

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**ÍTALO BRUNO BALEIRO GUIMARÃES**

**ANÁLISES DE INCERTEZAS E SENSIBILIDADE DE ARQUIVOS  
CLIMÁTICOS E SEUS IMPACTOS EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS  
TERMO ENERGÉTICAS**

VIÇOSA,  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2016

**ÍTALO BRUNO BALEIRO GUIMARÃES**

**ANÁLISES DE INCERTEZAS E SENSIBILIDADE DE ARQUIVOS  
CLIMÁTICOS E SEUS IMPACTOS EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS  
TERMO ENERGÉTICAS**

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

VIÇOSA,  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2016

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

T

G963a  
2016

Guimarães, Ítalo Bruno Baleeiro, 1987-

Análises de incertezas e sensibilidade de arquivos climáticos e seus impactos em simulações computacionais termo energéticas. / Ítalo Bruno Baleeiro Guimarães. – Viçosa, MG, 2016.

xi, 95f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Joyce Correna Carlo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.67-69.

1. Arquivos Climáticos. 2. Simulação Computacional de Edificações. 3. Eficiência Energética. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

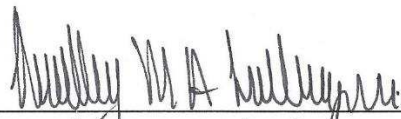
CDD 22 ed. 727

ÍTALO BRUNO BALEEIRO GUIMARÃES

**ANÁLISES DE INCERTEZAS E SENSIBILIDADE DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS E SEUS IMPACTOS EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS TERMO ENERGÉTICAS**

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

APROVADA: 30 de novembro de 2016.

  
Hemlley Maria Acioli Imbuzeiro

  
Túlio Márcio de Salles Tibúrcio

  
Joyce Correna Carlo  
(Orientadora)

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço primeiramente à minha família, ao meu pai Antônio, à minha mãe Celdir e à minha irmã e grande amiga Anne. Pelo apoio, incentivo, paciência e sabedoria nos momentos difíceis, pelo amor incondicional, por estarem sempre lutando junto comigo pelos meus sonhos e por estarem sempre ao meu lado mesmo à distância.

À minha noiva Caroline, que além do amor, da amizade e do companheirismo de vida, sempre me ajudou muito durante o mestrado, em especial nos últimos meses durante o processo de escrita da dissertação.

À minha orientadora, prof.(a) Joyce Carlo, pelos incontáveis ensinamentos, pela incansável dedicação, pelos constantes incentivos e apoios, pela enorme compreensão e pela infinita paciência.

E a todos os amigos e colegas, de Conquista e de Viçosa, pelos momentos de descontração, pelas resenhas e lembranças, fundamentais para recarregar as baterias. Enfim, a todos aqueles de forma direta ou indireta estiveram comigo nesta jornada e contribuíram para a execução desse trabalho.

## SUMÁRIO

_LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	5
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	5
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	6
1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	7
2 TRATAMENTO DE DADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS.....	9
2.1 INTRODUÇÃO .....	9
2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	11
2.3 COLETA DE DADOS CLIMÁTICOS .....	11
2.4 TRATAMENTO DOS DADOS CLIMÁTICOS COLETADOS .....	14
2.4.1 TRATAMENTO DE LACUNAS ENCONTRADAS NOS DADOS CLIMÁTICOS COLETADOS.....	14
2.4.2 MÉTODOS PARA TESTAR A CONSISTÊNCIA DOS DADOS CLIMÁTICOS COLETADOS.....	16
2.5 MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE DADOS CLIMÁTICOS .....	18
2.5.1 ELEMENTOS DO CLIMA: DADOS PSICOMÉTRICOS .....	18
2.5.2 ELEMENTOS DO CLIMA: DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR.....	24
2.5.3 ELEMENTOS DO CLIMA: DADOS DE ILUMINÂNCIA.....	27
2.6 RESULTADOS .....	31
2.6.1 TEMPERATURA DE BULBO SECO .....	31
2.6.2 UMIDADE RELATIVA E PRECIPITAÇÃO .....	33
2.6.3 RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL .....	36
2.6.4 VELOCIDADE E DIREÇÃO DOS VENTOS .....	38
2.7 CONCLUSÃO .....	40
2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	41

3	COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS TRADICIONAIS DE SELEÇÃO DE DADOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA .....	43
3.1	INTRODUÇÃO .....	43
3.1	MÉTODO .....	45
3.1.1	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	45
3.1.2	DESENVOLVIMENTO DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS .....	46
3.1.3	DESCRIÇÃO DAS EDIFICAÇÕES MODELADAS E SIMULADAS .....	51
3.1.4	DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES REALIZADAS .....	53
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	54
3.2.1	ANÁLISES DO ARQUIVO CLIMÁTICO MULTIANUAL .....	54
3.2.2	ANÁLISES DOS 5 ARQUIVOS CLIMÁTICOS TRADICIONAIS.....	60
3.3	CONCLUSÕES GERAIS.....	67
3.4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	67
4	COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS INOVADORES DE SELEÇÃO DE DADOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA .....	70
4.1	INTRODUÇÃO .....	70
4.2	MÉTODO .....	73
4.2.1	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	73
4.2.2	DESENVOLVIMENTO DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS .....	74
4.2.3	DESCRIÇÃO DAS EDIFICAÇÕES MODELADAS E SIMULADAS .....	78
4.2.4	DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES REALIZADAS .....	79
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	80
4.3.1	ANÁLISES DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS INOVADORES .....	80
4.3.2	ARQUIVO CLIMÁTICO COM PREVISÕES FUTURAS.....	87
4.4	CONCLUSÃO .....	89
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	90
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	92
5.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	93
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94

## LISTA DE FIGURAS

---

**FIGURA 1.2** - Síntese dos métodos utilizado na dissertação (Pág. 6).

-----

**FIGURA 2.1** - Síntese dos métodos usados no capítulo 2 (Pág. 4).

**FIGURA 2.2** - Sequência de 7 dias de dados de Temperatura de Bulbo Seco, com uma lacuna de 8h no quarto dia (Pág. 18).

**FIGURA 2.3** - Lacuna no quarto dia, preenchida com dados do dia com maiores semelhanças, o quinto dia (Pág. 18).

**FIGURA 2.4** - Sequência de 7 dias de dados de Temperatura de Bulbo Seco, com uma lacuna de 8h no quarto dia (Pág. 18).

**FIGURA 2.5** - Médias mensais, medias mensais das máximas diárias e medias mensais das mínimas diárias de TBS (Pág. 34).

**FIGURA 2.6** - Frequência de Ocorrência dos dados horários de TBS (Pág. 35).

**FIGURA 2.7** - Frequência de ocorrência de horas em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor, ao longo dos meses do ano (Pág. 36).

**FIGURA 2.8** - Frequência de ocorrência de horas em conforto, em desconforto por frio e em desconforto por calor, ao longo das horas do dia (Pág. 36).

**FIGURA 2.9** - Box-Plot de cada um dos 10 anos de dados climáticos coletados para Viçosa-MG (Pág. 37).

**FIGURA 2.10** - Médias mensais dos 10 anos de dados climáticos disponíveis para Viçosa-MG (Pág. 37).

**FIGURA 2.11** - Médias mensais, medias mensais das máximas diárias e medias mensais das mínimas diárias de UR (Pág. 38).

**FIGURA 2.12** - Frequência de ocorrência dos dados horários de UR. (Pág. 38).

**FIGURA 2.13** - Totais mensais de precipitação (Pág. 39).

**FIGURA 2.14** - Frequência de ocorrência de horas em conforto, em desconforto baixas UR e em desconforto altas UR ano (Pág. 39).

**FIGURA 2.15** - Frequência de ocorrência de horas em conforto, em desconforto baixas UR e em desconforto altas UR ano (Pág. 40).

**FIGURA 2.16** - Box-Plot dos 10 anos de dados climáticos coletados para Viçosa-MG (Pág. 41).

**FIGURA 2.17** - Médias mensais dos 10 anos de dados climáticos disponíveis para Viçosa-MG (Pág. 41).

**FIGURA 2.18** - Médias mensais dos totais diários de radiação global (Pág. 42).

**FIGURA 2.19** - Frequência de ocorrência dos totais diários de radiação global (Pág. 42).

**FIGURA 2.20** - Box-Plot dos 10 anos de dados climáticos coletados para Viçosa-MG (Pág. 43).

**FIGURA 2.21** - Médias mensais dos 10 anos de dados climáticos disponíveis para Viçosa-MG (Pág. 43).

**FIGURA 2.22** - Frequência de ocorrência dos registros horários da direção dos ventos (Pág. 44).

**FIGURA 2.23** - Frequência de ocorrência dos registros horários da velocidade dos ventos (Pág. 44).

**FIGURA 2.24** - Frequência de ocorrência dos registros horários da velocidade dos ventos (Pág. 45).

**FIGURA 2.25** - Frequência de ocorrência dos registros horários da velocidade dos ventos (Pág. 45).

-----

**FIGURA 3.1** - Síntese dos métodos usados no capítulo 3 (Pág. 4).

**FIGURA 3.2** - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 20%. E apresentação do zoneamento térmico dos modelos simulados (Pág. 4).

**FIGURA 3.3** - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 70%. E apresentação do dimensionamento dos modelos simulados (Pág. 4).

**FIGURA 3.6** - Totais anuais das cargas térmicas de aquecimento ao longo dos 10 anos do arquivo climático multianual e a média dos resultados. Relativos aos 8 modelos de edificações com baixas transmitâncias (Pág. 60).

**FIGURA 3.7** - Totais anuais das cargas térmicas de aquecimento ao longo dos 10 anos do arquivo climático multianual e a média dos resultados. Dos 8 modelos de edificações com altas transmitâncias (Pág. 60).

**FIGURA 3.8** - Amplitudes máximas entre os 10 anos para o total anual carga térmica de aquecimento. Além do percentual de variação em relação ao ano com menor total anual (Pág. 61).

**FIGURA 3.9** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 5 (Pág. 62).

**FIGURA 3.10** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 12 (Pág. 62).

**FIGURA 3.11** - Totais anuais das cargas térmicas de aquecimento ao longo dos 10 anos do arquivo climático multianual e a média dos resultados. Dos 8 modelos de edificações com baixas transmitâncias (Pág. 63).

**FIGURA 3.12** - Totais anuais das cargas térmicas de aquecimento ao longo dos 10 anos do arquivo climático multianual e a média dos resultados. Dos 8 modelos de edificações com altas transmitâncias (Pág. 63).

**FIGURA 3.13** - Amplitudes máximas entre os 10 anos para o total anual carga térmica de resfriamento. Além do percentual de variação em relação ao ano com menor total anual (Pág. 64).

**FIGURA 3.14** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 12 (Pág. 65).

**FIGURA 3.15** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 12 (Pág. 66).

**FIGURA 3.16** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de aquecimento de cada um dos 5 arquivos climáticos em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas (Pág. 68).

**FIGURA 3.17** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de aquecimento de cada um dos 5 arquivos climáticos em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas (**Pág. 68**).

**FIGURA 3.18** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 5 (**Pág. 69**).

**FIGURA 3.19** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 12 (**Pág. 69**).

**FIGURA 3.20** - Erro Quadrático Médio (EQM) entres cada um dos 5 arquivos climático tradicionais e o arquivo multianual, em relação aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas. (**Pág. 70**).

**FIGURA 3.21** - Erro Quadrático Médio (EQM) entres cada um dos 5 arquivos climático tradicionais e o arquivo multianual, em relação aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas. (**Pág. 70**).

**FIGURA 3.22** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de resfriamento de cada um dos 5 arquivos climáticos em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas (**Pág. 71**).

**FIGURA 3.23** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de resfriamento de cada um dos 5 arquivos climáticos em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas (**Pág. 72**).

**FIGURA 3.24** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 5 (**Pág. 73**).

**FIGURA 3.25** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 12 (**Pág. 73**).

**FIGURA 3.26** - Erro Quadrático Médio (EQM) entres cada um dos 5 arquivos climático tradicionais e o arquivo multianual, em relação aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas (**Pág. 74**).

**FIGURA 3.27** - Erro Quadrático Médio (EQM) entres cada um dos 5 arquivos climático tradicionais e o arquivo multianual, em relação aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas (**Pág. 74**).

-----

**FIGURA 3.1** - Síntese dos métodos usados no capítulo 4 (**Pág. 4**).

**FIGURA 3.2** - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 20%. E apresentação do zoneamento térmico dos modelos simulados (**Pág. 87**).

**FIGURA 3.3** - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 70%. E apresentação do dimensionamento dos modelos simulados (**Pág. 87**).

**FIGURA 3.4** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de aquecimento de cada um dos 3 arquivos climáticos inovadores e do TMY3, em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas (**Pág. 90**).

**FIGURA 3.5** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de aquecimento de cada um dos 3 arquivos climáticos inovadores e do TMY3, em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas (Pág. 90).

**FIGURA 3.6** - Erro Quadrático Médio (EQM) de cada um dos 3 arquivos climático inovadores e do TMY3, em relação ao arquivo multianual, tendo como foco aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas (Pág. 91).

**FIGURA 3.7** - Erro Quadrático Médio (EQM) de cada um dos 3 arquivos climático inovadores e do TMY3, em relação ao arquivo multianual, tendo como foco aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas (Pág. 91).

**FIGURA 3.8** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 5 (Pág. 92).

**FIGURA 3.9** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 12 (Pág. 93).

**FIGURA 3.10** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de resfriamento de cada um dos 3 arquivos climáticos inovadores e do TMY3, em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas (Pág. 94).

**FIGURA 3.11** - Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de resfriamento de cada um dos 3 arquivos climáticos inovadores e do TMY3, em relação aos resultados do arquivo climático multianual. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas (Pág. 94).

**FIGURA 3.12** - Erro Quadrático Médio (EQM) de cada um dos 3 arquivos climático inovadores e do TMY3, em relação ao arquivo multianual, tendo como foco aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com baixas transmitâncias térmicas (Pág. 95).

**FIGURA 3.13** - Erro Quadrático Médio (EQM) de cada um dos 3 arquivos climático inovadores e do TMY3, em relação ao arquivo multianual, tendo como foco aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento. Modelos de edificações com altas transmitâncias térmicas (Pág. 95).

**FIGURA 3.14** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 5 (Pág. 96).

**FIGURA 3.15** - Box-plot dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 12 (Pág. 97).

**FIGURA 3.16** - Previsão dos totais anuais das cargas térmicas de aquecimento para 2020, 2050 e 2080. Relativos aos 8 modelos de edificações com baixas transmitâncias (Pág. 99).

**FIGURA 3.17** - Previsão dos totais anuais das cargas térmicas de aquecimento para 2020, 2050 e 2080. Relativos aos 8 modelos de edificações com altas transmitâncias (Pág. 99).

**FIGURA 3.18** - Previsão dos totais anuais das cargas térmicas de resfriamento para 2020, 2050 e 2080. Relativos aos 8 modelos de edificações com baixas transmitâncias (Pág. 100).

**FIGURA 3.19** - Previsão dos totais anuais das cargas térmicas de resfriamento para 2020, 2050 e 2080. Relativos aos 8 modelos de edificações com altas transmitâncias (Pág. 101).

**FIGURA 3.20** - Síntese dos métodos usados no capítulo 4 (Pág. 4).

**FIGURA 3.21** - Síntese dos métodos usados no capítulo 4 (Pág. 4).

## LISTA DE TABELAS

---

**TABELA 2.1** - Elementos do clima que compõem um arquivo climático, e especificação daqueles que são usados no EnergyPlus (**Pág. 15**).

**TABELA 2.2** - Especificação dos dados de localização, ex. de Viçosa-MG (**Pág. 16**).

**TABELA 2.3** - Cálculo das diferenças entre o dia que apresentou a lacuna em relação aos 3 dias anteriores e posteriores (**Pág. 18**).

**TABELA 2.4** - Meses descartados por apresentar lacunas maiores que 24 horas em sequência (**Pág. 19**).

**TABELA 2.5** - Limites Climatológicos adotados no teste *range* (**Pág. 19**).

**TABELA 2.6** - Diferenças máximas entre dois dados consecutivos, usadas no teste *step* (**Pág. 20**).

**TABELA 2.7** - Variações e Desvio Padrão para um período de 24 horas de dados consecutivos (**Pág. 20**).

**TABELA 2.8** - Coeficientes a serem usados na equação 39. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40 (**Pág. 31**).

**TABELA 2.9** - Coeficientes a serem usados na equação 45. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40 (**Pág. 32**).

**TABELA 2.10** - Coeficientes a serem usados na equação 46. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40 (**Pág. 33**).

**TABELA 2.11** - Coeficientes a serem usados na equação 47. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40 (**Pág. 33**).

**TABELA 3.1** - Composição do arquivo climático TRY (**Pág. 53**).

**TABELA 3.2** - Composição do arquivo climático TMY\_br (**Pág. 53**).

**TABELA 3.3** - Composição do arquivo climático TMY3 (**Pág. 54**).

**TABELA 3.4** - Composição do arquivo climático WYEC2 (**Pág. 55**).

**TABELA 3.5** - Composição do arquivo climático TRY\_eu (**Pág. 55**).

**TABELA 3.6** - Composição do arquivo climático multianual (**Pág. 55**).

**TABELA 3.7** - Características construtivas dos modelos simulados (**Pág. 57**).

**TABELA 3.8** - Descrição das características das variáveis de cada um dos 16 modelos (**Pág. 57**).

**TABELA 4.1** - Composição do arquivo climático multi\_2anos (**Pág. 84**).

**TABELA 4.2** - Composição do arquivo climático multi\_3anos (**Pág. 85**).

**TABELA 4.3** - Composição do arquivo climático TMY3 (**Pág. 86**).

**TABELA 4.4** - Composição do arquivo climático multianual (**Pág. 86**).

**TABELA 4.5** - Características construtivas dos modelos simulados (**Pág. 87**).

**TABELA 4.6** - Descrição das características das variáveis de cada um dos 16 modelos (**Pág. 88**).

## RESUMO

---

GUIMARÃES, Ítalo Bruno Baleeiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2016. **Análises de Incertezas e Sensibilidade de Arquivos Climáticos e seus Impactos em Simulações Computacionais Termo Energéticas.** Orientadora: Joyce Correna Carlo.

Os programas computacionais de simulação são considerados, atualmente, as principais ferramentas para realizar previsões do desempenho de uma edificação. Para tal, estas ferramentas utilizam como dados de entrada descrições sobre a edificação e o entorno, entre estas, informações do climáticas da cidade, inseridas nos programas computacionais por meio de arquivos climáticos. Porém, apesar de serem programas com um alto nível de desenvolvimento tecnológico, apresentam também as suas limitações. A simulação é um processo de emulação da realidade que trabalha a partir de métodos matemáticos teóricos, por isso, possibilita realizar previsões, mas com certo grau de incerteza, já que a mesma lida com a simplificações da realidade. E a escolha dos métodos para desenvolver arquivos climáticos é uma destas incertezas, assim, os objetivos principais desta dissertação de mestrado foram: (1) desenvolver arquivos climáticos para a cidade de Viçosa-MG, apresentando todos os procedimentos, desde a coleta de dados em estações meteorológicas até a aplicação de métodos de seleção do ano climático representativo e; (2) avaliar as incertezas dos métodos de seleção do ano climático representativo, que compõe o arquivo climático, apontando o mais confiável. Foram coletados dados climáticos da cidade de Viçosa-MG, entre novembro de 2005 a dezembro de 2015 e, os dados com lacunas ou falhas passaram por procedimentos de tratamento, enquanto os elementos do clima que não foram encontrados na coleta de dados foram calculados. Em um segundo momento, foi realizada uma caracterização estatística do clima da cidade e, por fim foram analisadas diferenças nos resultados de simulações computacionais causadas pelo uso de diferentes tipos de arquivos climáticos. Em relação ao último passo, foram analisados um arquivo climático para cada um dos 10 anos de dados climáticos coletados para a cidade, além de outros desenvolvidos com métodos de seleção tradicionais usados nacional e internacionalmente e também, arquivos desenvolvidos com métodos de seleção inovadores. Os resultados das análises apontaram o método Multianual\_3anos como o mais confiável, com destaque também para o TMY3, que foi o melhor entre os métodos tradicionais.

## ABSTRACT

---

GUIMARÃES, Ítalo Bruno Baleeiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2016. **Uncertainties and Sensitivity Analysis of Weather Files and their Impacts on Computational Simulations Energy Term.** Adviser: Joyce Correna Carlo.

Computer simulation programs are currently considered the main tools for performing predictions of building performance. To do so, these tools use descriptions about the building and the environment as input data, for example the city's weather information, which is inserted in the programs through weather files. However, although the high level of technological development of these programs, they also have its limitations. The simulation is a reality emulation process made up of theoretical mathematical methods, therefore, it is possible to make predictions with these tools, but with a certain degree of uncertainty, since it deals with a reality simplifications. And the selection of the methods to weather files development is one of these uncertainties, so the research objectives were: (1) to develop weather file for the city of Viçosa-MG, presenting all the procedures, from the weather data collection in meteorological stations, to the application of the representative climatic year selection methods; (2) to evaluate the uncertainties of the representative climatic year selection methods, pointing the most reliable. Weather data, from November 2005 to December 2015, from the city of Viçosa-MG were collected. Those of this data with gaps and errors were treated, while the climatic elements not found in the data collection were calculated. In a second moment, a statistical characterization of the city 's weather was carried out and, finally, differences in the results of computational simulations caused by the use of different types of climate files were analyzed. About the last step mentioned, a weather file was developed for each of the 10 years of weather data collected from Viçosa-MG, besides others developed with traditional selection methods, used nationally and internationally, and also files developed with innovative selection methods. The results of the analyzes pointed to the Multianual\_3anos method as the most reliable, with special emphasis also to the TMY3, which was the traditional method with the best results.

# 1 INTRODUÇÃO GERAL

---

O principal desafio em avaliar a qualidade térmica, acústica e luminosa das edificações, além de aspectos de sustentabilidade, como a eficiência energética, é conseguir prever os desempenhos antes de construí-las, de maneira precisa e concomitantemente viável em relação a custo e tempo. Na avaliação de outros produtos, como eletrodomésticos ou automóveis, que são produzidos em série, esse processo de avaliação é mais simples, pois basta a análise de uma ou algumas unidades de produção. Essas terão o desempenho medido e, a partir da validação da qualidade do protótipo, a produção se dará pela replicação do mesmo. Neste caso, a qualidade dos resultados é muito alta, afinal o modelo avaliado é idêntico ao produto real. Além disso, o custo da produção dos protótipos testados é irrelevante em relação à quantidade de réplicas que serão produzidas e vendidas, com a garantia de que terão o mesmo desempenho do protótipo.

A avaliação de edificações é um caso peculiar, pois cada projeto arquitetônico é individual, não há produção em série e, na maioria das vezes, não há produção em série nem mesmo dos componentes construtivos de uma edificação. Esse fato torna complexa a tarefa de avaliar o desempenho de uma edificação, pois cada unidade de produção a ser construída precisa que ser avaliada individualmente, além de ser inviável elaborar protótipos em escala real para estudo de cada edificação a ser construída.

A solução está em prever os resultados a partir de uma abordagem matemática e probabilística, afinal, estimar desempenho termo energético de uma edificação é mais eficaz e econômico do que tentar corrigir problemas depois que ela já está em uso. Como a avaliação do desempenho de uma edificação com essa abordagem teórica é um trabalho extremamente complexo e, envolve diferentes fenômenos, em distintas escalas de análise, a simulação computacional é uma ferramenta fundamental em tais previsões (HENSEN e LAMBERTS, 2011).

Os programas computacionais de simulação são considerados, atualmente, a principal ferramenta para realização de previsões do desempenho de uma edificação, antes mesmo de construí-la, tendo como base o projeto da mesma. Estes programas permitem a integração da aplicação de diversas teorias de diferentes áreas de estudo como climatologia, física, química, biologia, psicologia comportamental, dentre outras. Permitem ainda integrar, ao mesmo tempo, cálculos sobre os diversos sistemas dinâmicos que ocorrem durante o funcionamento de uma edificação, permitindo associar e quantificar a influência que o desempenho de um sistema tem sobre o desempenho de outro. Tudo isso, com um nível de processamento de dados que possibilita que os dados obtidos por simulação virtual se aproximem da realidade (HENSEN e LAMBERTS, 2011; HENSEN, 1999).

Para tal, estas ferramentas utilizam-se de descrições sobre as características dos sistemas construtivos e dos sistemas de condicionamento natural e artificial propostos para a edificação, relacionando-as com descrições sobre as características das atividades realizadas por pessoas e equipamentos nos espaços da edificação. Também integra o processo de cálculo, as influências das características urbanas da vizinhança e das informações climáticas do local. E a partir disto, obter dados sobre o conforto térmico, acústico e luminoso dos ambientes, além do desempenho energético, dentre outros.

Apesar de serem ferramentas que estão em um alto nível de desenvolvimento tecnológico, os programas computacionais de simulação apresentam também limitações. A simulação como um processo de emulação da realidade que trabalha a partir de métodos matemáticos teóricos, possibilita prever o que acontecerá na realidade, mas com certo grau de erro, já que a mesma lida com a simplificações dessa realidade. O desempenho real da edificação tende a apresentar diferenças com relação a dados obtidos por simulação, mesmo em programas reconhecidos em âmbito internacional, e o principal responsável por essas diferenças são as diversas incertezas da especificação das características da edificação, do entorno e do clima. A baixa qualidade e precisão dos dados inseridos no software de simulação pelo usuário pode gerar inúmeras incertezas nas previsões obtidas, sendo imprescindível assegurar a qualidade dos resultados a partir do controle qualitativo do processo de simulação (MACDONALD et al, 1999; SILVA E GHISI, 2014.a).

Assim, um dos aprimoramentos que tem sido extensivamente discutido pela comunidade científica está relacionado com a identificação, quantificação e redução das incertezas que podem estar contidos nos resultados de uma simulação, resultante da qualidade dos dados de entrada inseridos no programa pelo usuário. Diversos pesquisadores vêm trabalhando e desenvolvendo estudos para identificar e quantificar incertezas na condução de simulações, além de apresentarem propostas de controle dessas imprecisões.

Entre as várias pesquisas com esse foco que têm sido publicadas é interessante citar como exemplos recentes: análises de incerteza das configurações dos parâmetros relacionados aos padrões de uso e as configurações das cargas térmicas, além de incertezas de diversos parâmetros termo físicos relativos à aspectos construtivos da edificação (SILVA e GHISI, 2014.a); análises da incerteza gerada por simplificações na modelagem da geometria de um projeto arquitetônico no EnergyPlus, identificando algumas simplificações que geram pequena variação no desempenho, além de outras que não são recomendadas por gerar variações significativas nos resultados (SILVA e GHISI, 2014.b); investigação de incertezas na especificação das propriedades termo físicas de materiais, que provocam variações significativas nos resultados de transferência de calor pelas fachadas de edificações (PRADA et al, 2014; HOLM e KUENZEL, 2002); análise de incerteza das propriedades termo físicas dos materiais, além de, alguns elementos do clima

e as cargas térmicas internas (MACDONALD e STRACHAN, 2001); análise de incerteza de dados climáticos e de padrões de uso (WANG, MATHEW e PANG, 2012).

Sorgato e Lamberts (2012) aplicaram análise de sensibilidade para testar a forma mais apropriada de especificar os coeficientes de pressão, de descarga, de fluxo de ar por frestas e de rugosidade, relacionados a modelagem do modelo de rede de ventilação, usado em simulações de edificações com condicionamento natural; Cóstola et al (2010) também avaliaram incertezas em configurações de ventilação natural, mais especificamente os coeficientes de pressão; Westphal (2007) desenvolveu um método de calibração de modelos a serem avaliados, para o caso de simulações de edificações já construídas, com base em resultados de análises de incerteza e sensibilidade.

Já as incertezas presentes nos cálculos realizados pelo programa são analisadas e controladas pelos desenvolvedores, que regularmente disponibilizam versões atualizadas com resultados cada vez mais precisos que as versões anteriores. Por esta razão, o foco principal das publicações tem sido controle da qualidade dos dados de entrada. Identificar e quantificar estas incertezas é importante para auxiliar futuros simuladores a obterem resultados mais precisos, a fim de respaldar análises e previsões que serão feitas a partir das simulações.

Como já mencionado, os dados de entrada usados para a condução de uma simulação são divididos, basicamente em quatro grupos: que descrevem a edificação e seus possíveis sistemas de aquecimento e refrigeração (artificialmente ou naturalmente induzidos); descrevem o uso e ocupação da edificação, como as cargas térmicas advindas dos usuários, da iluminação e dos equipamentos; descrevem o entorno da edificação, como a densidade urbana da região da cidade e os prédios vizinhos em maiores detalhes; e por fim os climáticos (HENSEN, 1999; WANG, MATHEW e PANG, 2012). Este último é o grupo de dados que permite um controle de qualidade mais simples, já que tem menos interferência do simulador, ou seja, é possível desenvolver um arquivo climático para uma cidade em um centro de pesquisa, e ceder aos simuladores as incertezas controladas e quantificadas, inerentes a esses dados.

A inserção de dados climáticos em um software de simulação é realizada com o uso de um arquivo climático. Este é um arquivo que contém dados climáticos medidos e/ou calculados da cidade onde está ou estará locada a edificação analisada e, são compostos de diversos elementos do clima como: temperatura, umidade relativa, irradiação, iluminância, velocidade e direção dos ventos, dentre outros. Estes dados são dispostos em frequência horária nos arquivos, resultando em 8760 horas de dados, para cada um dos parâmetros (CRAWLEY, 1998; HENSEN, 1999; BARNABY E CRAWLEY, 2011).

A obtenção de previsões com um alto nível de precisão, por meio de simulação, sobre a performance energética e de conforto ambiental de uma edificação, exige como primeiro requisito dados sobre o clima da localização também com um alto nível de precisão (CHOW et al, 2006). Assim, quanto maior os cuidados tomados durante a elaboração de um arquivo climático, e quanto melhor for a qualidade final do mesmo, maior será a precisão de uma simulação. A elaboração de arquivos climáticos exige, além do processo de coleta dos dados climáticos locais, uma série de procedimentos posteriores: avaliação da consistência dos dados coletados; tratamento de lacunas e inconsistências encontradas; cálculo de determinados elementos do clima, que eventualmente podem não ter sido encontrados na etapa de coleta dos dados; e a seleção de um ano climático representativo entre série de anos de dados climáticos coletados (BARNABY E CRAWLEY, 2011).

Em relação aos estudos sobre arquivos climáticos no Brasil, é importante destacar que não há muitos estudos que se proponham a quantificar as incertezas inerentes do uso de diferentes métodos para o desenvolvimento desses arquivos. São poucos também, os estudos que visam comparar qualitativamente e quantitativamente os diversos métodos tradicionais e inovadores, usados em outras partes do mundo para o desenvolvimento deste tipo de arquivo. Porém, esse contexto nacional difere muito do mundial nas pesquisas dessa área.

Portanto, essa pesquisa atuou na identificação de incertezas que são provenientes dos arquivos climáticos, em relação aos resultados de análises de edificações obtidos por programas computacionais de simulação. Além de indicar e apresentar os melhores métodos para cada etapa do processo de desenvolvimento de um arquivo climático, propõe também uma adaptação de métodos consagrados para as características climáticas brasileiras. Por fim, este estudo visa contribuir no aumento da confiabilidade das previsões obtidas sobre conforto térmico, luminoso e acústico e o desempenho energético das edificações.

## 1.1 OBJETIVOS

Realizar análises de sensibilidade e incerteza de diferentes métodos de desenvolvimento de arquivos climáticos, em relação ao uso destes em simulações termo energéticas de edificações típicas do Brasil.

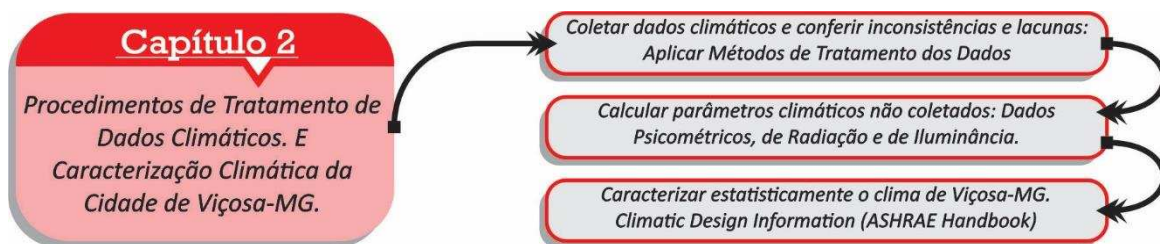
### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Descrever os procedimentos de coleta e tratamento de dados climáticos.
- ❖ Sintetizar as características climáticas da cidade de Viçosa-MG, com base nos dados tratados.
- ❖ Caracterizar as diferenças climáticas entre os dez anos da série de dados coletados e tratados de Viçosa-MG.
- ❖ Comparar 5 métodos tradicionais de seleção de dados climáticos de referência para o desenvolvimento de arquivos climáticos.
- ❖ Comparar 3 métodos multianuais de seleção de dados climáticos de referência para o desenvolvimento de arquivos climáticos.
- ❖ Comparar

## 1.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 1.1 resumi uma síntese das etapas da pesquisa apresentadas em cada capítulo desta dissertação. O capítulo 2, aborda os procedimentos de coleta, tratamento e cálculo, de dados climáticos necessários para o desenvolvimento de arquivos climáticos. O capítulo 3, discute a comparação entre 5 arquivos climáticos desenvolvidos com métodos tradicionais, estes foram comparados entre si e, também foram quantificadas as diferenças em relação à um arquivo climático multianual de 10 anos. O capítulo 4, discute a comparação entre 4 arquivos climáticos desenvolvidos com métodos inovadores, estes foram comparados entre si e, também foram quantificadas as diferenças em relação ao arquivo climático multianual de 10 anos e ao arquivo tradicional TMY3, discutido no capítulo anterior.

Figura 1.1 – Síntese dos métodos usados na dissertação.





### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação possui uma estrutura de organização onde os capítulos são etapas da pesquisa desenvolvida. O primeiro capítulo consiste na caracterização e introdução do trabalho, o que inclui os objetivos, a justificativa e a relevância do tema.

O Capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica sobre a preparação de dados climáticos para a criação de arquivos climáticos. Apresenta métodos indicados pela comunidade científica para a identificação de inconsistências e o tratamento dos dados climáticos coletados, além dos métodos para o cálculo de dados dos elementos do clima ausentes. E discute a caracterização do clima da cidade, com a quantificação de algumas das diferenças entre os anos da série de 10 anos de dados climáticos coletados para a cidade de Viçosa-MG.

O capítulo 3 dedica-se a uma análise de incerteza da escolha do método de desenvolvimento do arquivo climático, em relação aos resultados de simulações termo energéticas de edificações, com foco nos métodos tradicionais mais usados pela comunidade científica. Trata mais especificamente dos dois principais métodos utilizados no Brasil e dos três principais métodos internacionais.

Em seguida, o capítulo 4 apresenta uma análise de incerteza da escolha do método de desenvolvimento do arquivo climático, em relação aos resultados de simulações termo energéticas de edificações, com foco em diferentes métodos inovadores. Trata mais especificamente de um método sintético, dois métodos multianuais, além de um método para o desenvolvimento de arquivos climáticos com estimativas futuras do clima.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, ressaltando as limitações, além de discutir ideias de trabalhos futuros.

## 1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARNABY, C S; CRAWLEY, D B. Weather data for building performance simulation In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: SponPress, 2011, cap.3, p.37-55.
- BURHENNE, S.; TSVETKOVA, O.; JACOB, D.; HENZE, G.; ANDREAS, W. Uncertainty quantification for combined building performance and cost-benefit analyses. **Building and Environment**, v62: 2013. p 143-154.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 40, 2008, p. 2002-2008.
- CHOW, T.; CHAN, A.; FONG, K.; LIN, Z. Some perceptions on typical weather year from the observations of Hong Kong and Macau. **Solar Energy**, v80: 2006. p 459-467.
- CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; OHBA, M.; HENSEN, J. Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. **Energy and Buildings**, v 42: 2010. p 881-888.
- CRAWLEY, D. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? **ASHRAE Transactions**, v104: 1998. p 498-515.
- ENERGYPLUS. **Auxiliary Programs - Weather Converter Program**. 1ª edição. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkley National Laboratory, 2015.
- HENSEN, J. Simulation of building energy and indoor environmental quality - some weather data issues. In: International Workshop on Climate Data and their Applications in Engineering, Praga, 1999. **Anais...** Praga, Workshop, 1999.
- HENSEN, J.; LAMBERTS, R. Introduction to building performance simulation. In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: SponPress, 2011, cap.1, p.1-14.
- HOLMES, A.; KUENZEL, H. Practical application of an uncertainty approach for hygrothermal building simulations. **Building and Environment**, v 37: 2002. p 883-889.
- LABEEE. **Download: Softwares**. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares> >. Acesso em: 1 de Agosto de 2016.
- LOMARDO, L. **Eficiência Energética nos Edifícios e Sustentabilidade no Ambiente Construído**. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA, 2011.
- MACDONALD, I.; CLARK, J.; STRACHAN, P. Assessing uncertainty in building simulation. In: 6th International IBPSA Conference Building Simulation, Kyoto, 1999 **Proceedings...** Kyoto, Japan: IBPSA, 1999. p 683-690.
- MACDONALD, I.; STRACHAN, P. Practical application of an uncertainty analyses. **Energy and Buildings**, v 33: 2001. p 219-227.
- MENDES, N.; WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R.; NETO, J. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, v5 - n4: 2005. p 47-68.
- NCDC. **Test Reference Year (TRY): tape reference manual, TD-9706**. Asheville. North Carolina: National Climatic Data Centre, US Department of Commerce, 1976. Manual.
- PERNIGOTTO, G.; PRADA, A.; GASPARELLA, A.; HENSEN, J. Analysis and improvement of the representativeness of EM ISSO 15927-4 reference years for building energy simulation. **Journal of Building Performance Simulation**. V7: 2014. p 391-410.
- PRADA, A.; CAPPELLETTI, F.; BAGGIO, P.; GASPARELLA, A. On the effect of material uncertainties in envelope heat transfer simulations. **Energy and Buildings**, v.71: 2014. p 53-60.
- REINHART. Daylight performance predictions. In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: Spon Press, 2011, cap. 9, p. 235- 276.
- RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. 2012**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>; Acesso: 05/11/2013.

SILVA, A.; GHISI, E (a). Uncertainty analysis of computer model in building performance simulation. **Energy and Buildings**, v.76: 2014-a. p 258-269.

SILVA, A.; GHISI, E (b). Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v.76: 2014-b. p 381-391.

SORGATO, M.; LAMBERTS, R.; Análise De Sensibilidade dos Parâmetros Utilizados para a Simulação Computacional de Ventilação Natural, no Desempenho Térmico de uma Edificação Residencial Unifamiliar. In: XIV Encontro Nacional, Juiz de Fora, 2012, **Anais...** Juiz de Fora, ENCAC 2011.

SREBRIC, J. Ventilation performance prediction. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: Spon Press, 2011. cap. 6, p. 143-179.

VENÂNCIO, R.; PEDRINI, A. Modos Projetuais de Simulação Térmica: Conceitos, Definições e Aplicações In: XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, Búzios, 2011, **Anais...** Búzios, ENCAC-ELAC 2011. CDROM.

WANG, L.; MATHEW, P.; PANG, X. Uncertainties in energy consumption introduced by building operations and weather for a medium-size office building. **Energy and Building**, v53: 2012. p 152-158.

WESTPHAL, F. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

## 2 TRATAMENTO DE DADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS.

---

### 2.1 INTRODUÇÃO

Conhecer as características climáticas de uma cidade é essencial para o desenvolvimento de um bom projeto arquitetônico. A área de estudo que foca na relação entre o clima e as edificações conforme as necessidades humanas, conhecida como bioclimatologia, tem como premissa gerar informações a serem usadas na concepção de projetos arquitetônicos visando o equilíbrio com o clima local, ou seja, edificações que permitam aos usuários se beneficiar dos aspectos climáticos positivos, ao mesmo tempo que evitem problemas advindos dos rigores climáticos. Assim, a obtenção de bons níveis de conforto aos indivíduos e o bom desempenho térmico e energético do edifício exige um conhecimento detalhado das características do clima onde a edificação será inserida (LAMOTTA et al, 2008; CARLO e LAMBERTS, 2005).

O uso de informações advindas de dados climáticos, na concepção de projetos arquitetônicos, pode se dar em várias escalas. Desde análises climáticas mais generalizadas para uma determinada região, que usualmente são acompanhadas também de recomendações generalizadas de estratégias de projetos para a região. Estas, tem um caráter mais qualitativo e, levam em consideração sínteses anuais dos dados, além dos dias de projeto, que são dias específicos do ano que representam extremos climáticos. Com o avanço tecnológico dos estudos nesta área de pesquisa, especialmente nas duas últimas décadas, há inúmeras ferramentas computacionais disponíveis, que permitem a arquitetos e outros profissionais a realizarem análises mais detalhadas. Estas análises tem um caráter mais quantitativo pois permitem avaliações horárias do desempenho da edificação e levam em consideração as variações dos elementos do clima que ocorrem durante o dia, o mês, as estações, bem como as variações que ocorrem de um ano para o outro.

Atualmente, em 2016, há uma série programas computacionais disponíveis para suporte no desenvolvimento de projetos, com foco em auxiliar os arquitetos a garantir um bom desempenho de conforto e energético de edificações. Há programas mais simplificados voltados para análises bioclimáticas mais específicas e, outros mais abrangentes e complexos, que permitem avaliações completas da edificação, como o caso dos programas de simulação computacional.

A simulação computacional é uma das ferramentas mais poderosas de análise disponíveis no contexto atual (HENSEN e LAMBERTS, 2011) e, dentre os programas computacionais de simulação acessíveis, o *EnergyPlus* é um dos mais difundidos. Este simula o desempenho térmico e energético de edificações integrando os sistemas mais relevantes que participam das trocas térmicas da mesma (ENERGY PLUS, 2016).

Outro tipo de programa computacional de grande potencial para o estudo de projetos arquitetônicos são os de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como o programa *Phoenix*, que permite o estudo do desempenho da ventilação natural, tanto em escala urbana quanto arquitetônica (SREBRIC, 2011). Existem também os programas computacionais de simulação do aproveitamento da iluminação natural, como é o caso do programa *DaySim*, que possibilita a análise de múltiplos aspectos da iluminação, tanto em escala urbana quanto arquitetônica (REINHART, 2011).

Existem uma série de outros programas voltados à análise de conforto, para análises bioclimáticas mais específicas e simplificadas. Como os desenvolvidos pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina, Labeee/UFSC, com destaque para o *AnalysisBio*, que auxilia na plotagem dos dados climáticos horários na carta bioclimática, a fim de definir estratégias que podem proporcionar o conforto térmico no ambiente interno de uma edificação. Outro programa que auxilia na representação de dados climáticos é o *Solar*, que permite a visualização dos dados de temperatura e radiação solar sobre a carta solar, além da rosa dos ventos em imagem em separado (MACIEL et al, 2007).

Porém, para viabilizar a utilização de tais ferramentas, é imprescindível que dados climáticos da localidade sejam inseridos no programa computacional utilizado, e isso é realizado por meio da confecção de arquivos climáticos. Estes, tradicionalmente, se constituem de um ano que seja representativo do clima da localidade analisada, com dados medidos a uma frequência horária, resultando em 8760 horas de dados medidos para diversos elementos do clima como: temperatura, umidade relativa, irradiação, iluminância, velocidade e direção dos ventos, dentre outros (HENSEN, 1999; BARNABY E CRAWLEY, 2011).

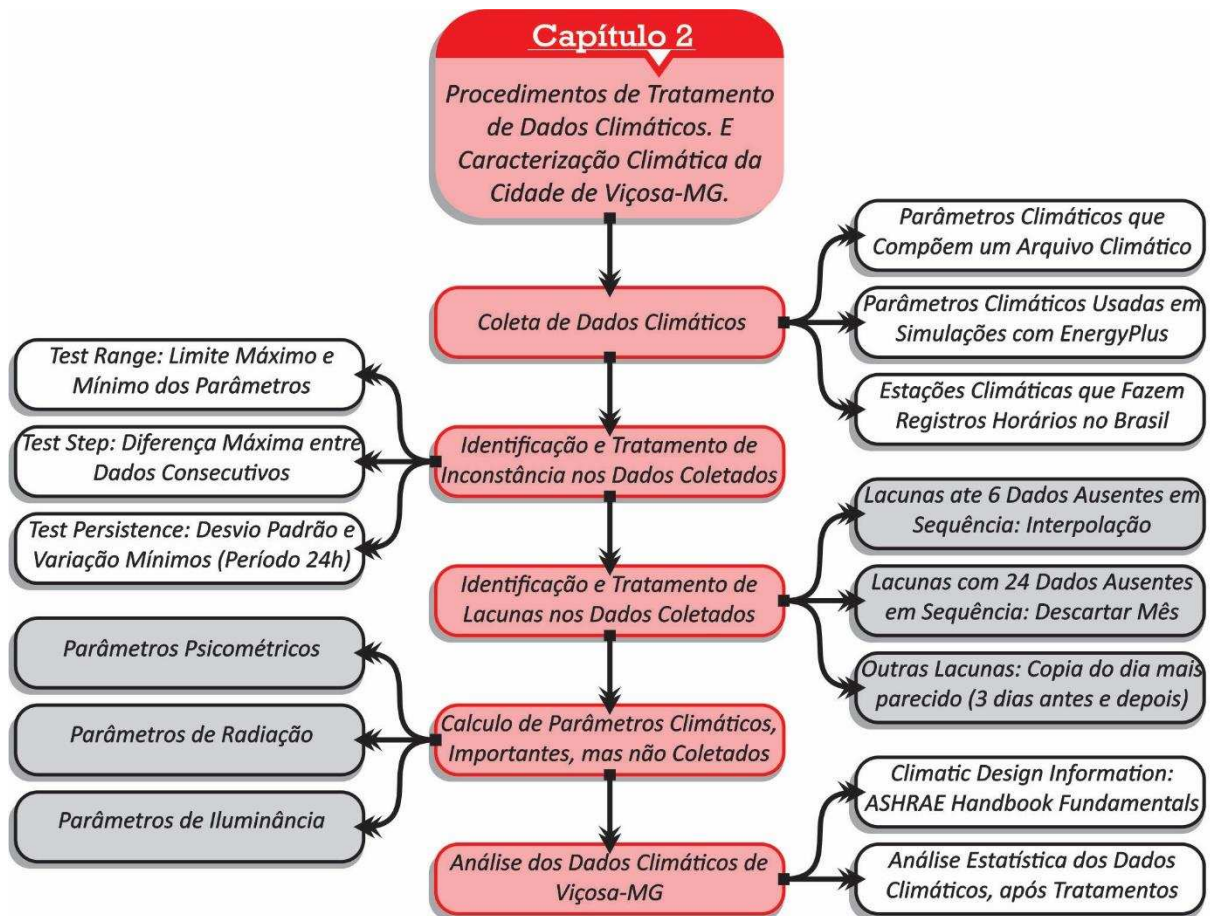
A elaboração de arquivos climáticos exige, além do processo de coleta dos dados climáticos, uma série de procedimentos posteriores: avaliação da consistência dos dados; tratamento de lacunas e inconsistências; e o cálculo dos elementos do clima, que são necessários para o arquivo, mas que não tenham sido encontrados na etapa de coleta dos dados (BARNABY E CRAWLEY, 2011).

Este capítulo tem por objetivo apresentar os procedimentos adotados no desenvolvimento de arquivos climáticos para a cidade de Viçosa-MG. Desde a apresentação das fontes da coleta dos dados climáticos, passando pelos procedimentos de análise, tratamento e cálculo dos elementos do clima não coletados. Por fim, será apresentada uma caracterização do clima de Viçosa-MG, realizada por meio de análises estatísticas dos dados climáticos coletados e tratados.

## 2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 2.1 apresenta uma síntese da etapa da pesquisa referente a esse capítulo. Inicialmente foram abordadas as questões relacionadas a coleta de dados climáticos da cidade de Viçosa-MG. Em um segundo momento foram discutidos os métodos de tratamento dos dados coletados e, cálculo dos dados referentes aos elementos do clima não obtidos durante a coleta. E por fim foram realizadas análises estatísticas dos dados climáticos de Viçosa-MG, após a aplicação de todos os procedimentos de tratamento de dados.

Figura 2.1 – Síntese dos métodos usados no capítulo 2.



## 2.3 COLETA DE DADOS CLIMÁTICOS

O primeiro critério a se observar na etapa da coleta de dados medidos em estações climáticas é a frequência no registro dos dados. A frequência horária de registro de dados é considerada a ideal para a confecção de arquivos climáticos, por ser curta o suficiente para observar o comportamento da maioria dos fenômenos analisados em uma simulação computacional, mas longa o suficiente para deixar o tempo de realização das simulações viável, especialmente as simulações que abrangem um ano completo (BARNABY E CRAWLEY, 2011).

Porém, é importante começar a pensar em aumentar a frequência dos registros de dados em arquivos climáticos, especialmente para análises de fenômenos que ocorrem escala micrometeorológica (turbulência, vértices, condensação nos poros dos materiais construtivos, etc) e que exigem um olhar mais sofisticado e detalhado (BARNABY E CRAWLEY, 2011). A coleta de dados com uma frequência horária de registros, que era inviável em estações manuais, já é viável desde o ano de 2001 no Brasil em estações climáticas automáticas. Vale destacar que o Brasil já conta com 688 cidades brasileiras com estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) (RORIZ, 2012) e um total de 1511 cidades brasileiras como estações climáticas de vários tipos (AMORIM, 2015).

Para o desenvolvimento dos arquivos climáticos da cidade de Viçosa-MG, foram usados dados climáticos oriundos da estação do Inmet, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Os dados foram obtidos de forma on-line no site da instituição (INMET, 2016) e, consistem de dados medidos no período entre o mês de setembro de 2005 a dezembro de 2015. Foram obtidos também dados da estação climática da CPTEC/INPE, localizada no Aeródromo de Viçosa-MG, porém, a frequência de medições dessa estação é de 3h, fazendo com que os dados não sejam aptos para arquivos climáticos.

Segundo Barnaby e Crawley (2011), o foco de análise de uma simulação computacional deve determinar os elementos do clima contidos em um arquivo climático, além de apontar os que devem ser tratados como prioridades.

A Tabela 2.1 apresenta os dados climáticos que compõem convencionalmente arquivos e dá destaque para aqueles que efetivamente foram utilizados pelo programa computacional *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2015). Porém, é importante ressaltar que a utilidade de um arquivo climático vai além do uso no *EnergyPlus*, e que os dados de radiação e iluminação são cada vez mais usados em outros programas de simulação, mesmo que ainda não estejam sendo usados efetivamente no *EnergyPlus*.

Tabela 2.1 - Elementos do clima que compõem um arquivo climático, e especificação daqueles que são usados no *EnergyPlus*.

<b>Elementos do Clima nos Arquivos Climáticos</b>	<b>Elementos do Clima usados pelo EnergyPlus</b>
<b>Temperatura de Bulbo Seco (TBS)</b>	<b>SIM</b>
<b>Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO)</b>	<b>SIM</b>
<b>Humidade Relativa (UR)</b>	<b>SIM</b>
<b>Pressão Atmosférica (PA)</b>	<b>SIM</b>
<i>Radiação Extraterrestre Horizontal</i>	<i>NÃO</i>
<i>Radiação Extraterrestre Direta Normal</i>	<i>NÃO</i>
<b>Radiação Infravermelha Horizontal</b>	<b>SIM</b>
<i>Radiação Global Horizontal</i>	<i>NÃO</i>
<b>Radiação Direta Normal</b>	<b>SIM</b>
<b>Radiação Difusa Horizontal</b>	<b>SIM</b>
<i>Iluminância Global Horizontal</i>	<i>NÃO</i>

<i>Iluminância Direta Normal</i>	NÃO
<i>Iluminância Difusa Horizontal</i>	NÃO
<i>Luminância Zenital</i>	NÃO
<b>Direção do Vento</b>	<b>SIM</b>
<b>Velocidade do Vento</b>	<b>SIM</b>
<i>Cobertura do Céu Total</i>	NÃO
<i>Cobertura do Céu Opaca</i>	NÃO
<i>Visibilidade do Céu</i>	NÃO
<i>Altura do Forro</i>	NÃO
<b>Observação Climática Momentânea</b>	<b>SIM</b>
<b>Códigos da Observação Climática Momentânea</b>	<b>SIM</b>
<i>Precipitação</i>	NÃO
<i>Profundidade Visível de Nevoa</i>	NÃO
<i>Profundidade de Neve</i>	NÃO
<i>Dias Desde a Última vez que Nevou</i>	NÃO

Ainda em relação à coleta de dados, é importante salientar que as estações climáticas podem registrar um mesmo elemento do clima de diferentes formas: como valor instantâneo na hora, valor máximo e valor mínimo de vários registros no intervalo de hora, ou ainda o valor médio de vários registros no intervalo de hora. Convencionalmente, utiliza-se o valor instantâneos para o desenvolvimento de arquivos climáticos, caso este esteja disponível (BARNABY E CRAWLEY, 2011).

Os dados referentes a cidade de Viçosa-MG foram os seguintes: temperatura de bulbo seco (instantânea, máxima e mínima); temperatura de ponto de orvalho (instantânea, máxima e mínima); umidade relativa (instantânea, máxima e mínima); pressão atmosférica (instantânea, máxima e mínima); velocidade e direção do vento; radiação global horizontal e precipitação.

Além dos dados climáticos acima mencionados, foi necessário especificar também algumas coordenadas da localização a que se refere o arquivo climático. Na Tabela 2.2 estão especificadas os dados solicitados e a descrição dos dados de Viçosa-MG, colocados como exemplo. Destaque para o código WMO (*World Meteorological Organization*) da estação, que no Brasil pode ser encontrado como código OMM (*Organização Mundial de Meteorologia*).

*Tabela 2.2 - Especificação dos dados de localização necessários para confecção de arquivos climáticos, e ex. de Viçosa-MG.*

<b>Cidade</b>	<b>Estado</b>	<b>País</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Time Zone</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>WMO / OMM</b>
Viçosa	MG	Brasil	- 20,76	- 42,86	- 3	698	86824

Após a coleta de dados foi aplicado um processo de tratamento dos dados brutos coletados. O primeiro problema a ser corrigido foram as lacunas encontradas nos registros que ocorrem principalmente devido a falhas nos equipamentos ou falhas humanas, mas também podem ocorrer por outros motivos, como problemas de manutenção ou interrupção no fornecimento de eletricidade. Foi preciso também testar a

consistência dos dados para eliminar imprecisões significativas das medições, como por exemplo, dados de radiação diferentes de zero após o pôr do sol, ou ainda dados de temperatura de bulbo úmido maiores que temperaturas de bulbo seco na mesma hora, entre outras. E por fim, calcular elementos do clima importantes para o arquivo climático, mas que não foram encontrados na coleta de dados.

## 2.4 TRATAMENTO DOS DADOS CLIMÁTICOS COLETADOS

### 2.4.1 TRATAMENTO DE LACUNAS ENCONTRADAS NOS DADOS CLIMÁTICOS COLETADOS

Programas computacionais de simulação não exigem que seja inserido um arquivo climático com um ano completo com dados climáticos horários. Programas como o EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2015) aceitam a inserção de arquivos climáticos que contenham um período menor do ano, isso apenas irá acarretar em uma limitação do período de simulação. Porém, definidos os limites de início e fim de um arquivo climático, este não pode conter lacunas entre os dados.

O método recomendado para tratar dados faltantes varia conforme o tamanho da lacuna identificada. Para lacunas com até 6 dados ausentes em sequência, recomenda-se o uso de interpolação simples, usando os dados imediatamente anterior e posterior à lacuna (CARLO et al, 2005). Neste caso, o uso da interpolação simples se justifica por se tratar de casos com lacunas muito pequenas, no máximo 6 linhas de dados, que é praticamente irrelevante quando considerado o universo de 8760 linhas de dados de um arquivo climático, falhas como esta tem influência quase nula nos resultados das simulações e, por isso, recomenda-se o uso de métodos estatísticos mais simples.

Já em casos em que há lacunas com mais de 24 horas de dados ausentes em sequência, os tratamentos são considerados ineficientes devido a elevadas incertezas na previsão, assim, é aconselhável descartar os dados de todo o mês onde a lacuna aparece, excluindo-os da seleção para criação do arquivo climático. E em casos onde a lacuna é maior do que 6 dados ausentes em sequência e menor que 24, o método utilizado para tratamento tem como conceito base a análise das diferenças entre o dia que apresenta a lacuna e, os três dias anteriores e os três dias posteriores ao intervalo de dados ausentes (CARLO et al, 2005).

Neste último caso, o procedimento consiste inicialmente em identificar as 10 horas de dados mais próximas à lacuna, sendo cinco horas imediatamente anteriores e cinco horas posteriores à lacuna. Depois, são identificadas e analisadas as mesmas 10 horas de dados, porém dos três dias anteriores e dos três dias posteriores ao intervalo de dados ausentes. A análise das 10 horas consiste em calcular a diferença total e média dos dados de cada um dos 6 dias em relação ao dia em que ocorreu a lacuna, além do desvio padrão e

a variância destas diferenças. Por fim, a lacuna é preenchida copiando os dados do dia, entre os 6 dias analisados, que apresentar as menores diferenças quanto ao dia em que ocorreu a lacuna.

Como exemplo, a Figura 2.2 mostra uma sequência de sete dias, ou 168 horas, de dados de temperatura de bulbo seco, sendo que no quarto dia foi encontrada uma lacuna de oito horas, entre 11h e 18h. A Tabela 2.3 apresenta as diferenças entre as 10 horas de temperaturas do dia que ocorre a lacuna, em relação às 10 horas de temperatura de cada um dos 3 dias anteriores e 3 dias posteriores. A Tabela 2.3 exibe também a soma total das diferenças, a média da diferenças, a variância e o desvio padrão, e nesta, é possível perceber pelos resultados, que o dia com menores diferenças em relação ao dia que houve a lacuna, foi o primeiro dia posterior ou o quinto dia. Assim, a lacuna será completada usando os dados do quinto dia, nos mesmo horários da lacuna, como indicado na Figura 2.3.

Figura 2.2 - Sequência de 7 dias de dados de Temperatura de Bulbo Seco, com uma lacuna de 8h no quarto dia.

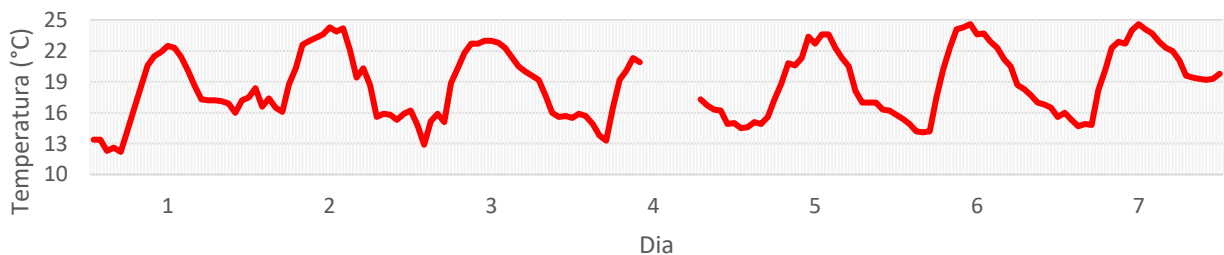
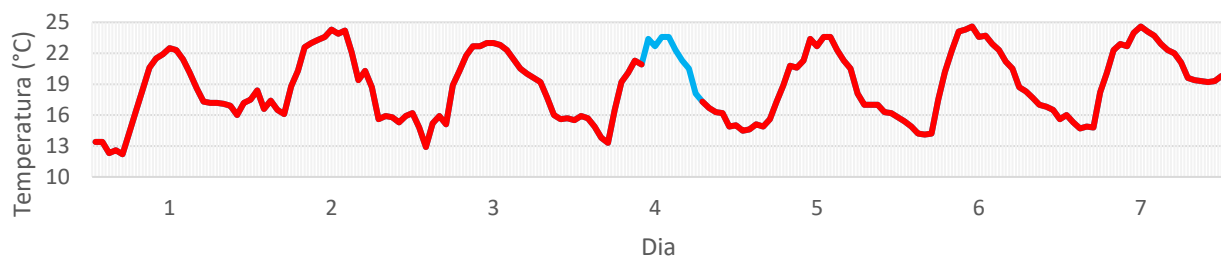


Tabela 2.3 - Diferenças entre as 10 horas de dados do dia que apresentou a lacuna e os 3 dias anteriores e posteriores.

	<b>Dia 1</b>	<b>Dia 2</b>	<b>Dia 3</b>	<b>Dia 5</b>	<b>Dia 6</b>	<b>Dia 7</b>
às 6h	2,2 °C	-2,3 °C	-2,4 °C	-0,8 °C	-1,0 °C	-1,7 °C
às 7h	2,8 °C	-1,1 °C	-1,1 °C	0,3 °C	-1,0 °C	-0,9 °C
às 8h	1,6 °C	-2,5 °C	-1,7 °C	-0,7 °C	-2,2 °C	-2,2 °C
às 9h	0,7 °C	-1,7 °C	-1,4 °C	0,7 °C	-2,8 °C	-1,6 °C
às 10h	-0,6 °C	-2,4 °C	-1,8 °C	-0,4 °C	-3,4 °C	-1,8 °C
às 19h	0,1 °C	1,7 °C	-1,9 °C	0,3 °C	-1,0 °C	-2,3 °C
às 20h	-0,4 °C	0,8 °C	-1,0 °C	-0,3 °C	-1,0 °C	-2,7 °C
às 21h	-0,6 °C	0,5 °C	0,3 °C	-0,7 °C	-0,7 °C	-3,0 °C
às 22h	0,2 °C	0,9 °C	0,6 °C	-0,1 °C	-0,6 °C	-3,0 °C
às 23h	-2,3 °C	-1,0 °C	-0,8 °C	-1,3 °C	-1,6 °C	-4,4 °C
<b>Diferença Total</b>	11,50 °C	14,90 °C	13,00 °C	5,60 °C	15,30 °C	23,60 °C
<b>Média das</b>	1,15 °C	1,49 °C	1,30 °C	0,56 °C	1,53 °C	2,36 °C
<b>Variância</b>	0,97 °C	0,53 °C	0,43 °C	0,12 °C	0,92 °C	0,95 °C
<b>Desvio Padrão</b>	0,99 °C	0,73 °C	0,66 °C	0,35 °C	0,96 °C	0,98 °C

Figura 2.3 - Lacuna no quarto dia, preenchida com dados do dia com maiores semelhanças, o quinto dia.



No caso dos dados coletados para a cidade de Viçosa-MG, praticamente todos os meses dos 10 anos de dados coletados tiveram que passar por ao menos um dos tratamentos mencionados, sendo que cerca de 93% das lacunas encontradas foram tratadas por meio de interpolação, enquanto 9 meses foram descartados por apresentar lacunas maiores que 24 horas seguidas (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Meses descartados por apresentar lacunas maiores que 24 horas em sequência.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>2005</b>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Desc	Apto
<b>2006</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Desc	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2007</b>	Desc	Desc	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2008</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2009</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Desc
<b>2010</b>	Apto	Apto	Desc	Apto	Apto	Desc	Desc	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2011</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2012</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2013</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2014</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2015</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Desc	Apto	Apto	Apto

#### 2.4.2 MÉTODOS PARA TESTAR A CONSISTÊNCIA DOS DADOS CLIMÁTICOS COLETADOS

Além das lacunas encontradas nos dados brutos, é necessário também conferir a consistência dos dados coletados, para eliminar aqueles que apresentam indícios de imprecisões significativas de medição. Pittigliani (2000) apresenta a descrição de uma série de testes usados para avaliação da consistência de dados meteorológicos, estes podem ser divididos em três tipos: *Range* (Teste dos limites máximo e mínimo de cada parâmetro climático); *Step* (Teste da diferença máxima entre dados consecutivos); *Persistence* (Teste do desvio padrão e da variação no período de 24 horas de dados medidos).

Os valores utilizados para conferir a consistência dos dados foram apresentados nas tabelas abaixo: na Tabela 2.5 encontram-se os limites climatológicos de cada parâmetro climático coletado, usados no teste *Range*; na Tabela 2.6 estão apresentadas as diferenças máximas aceitáveis entre dois dados consecutivos de cada parâmetro coletado, usados no teste *Step*; e a Tabela 2.7 mostra a variação mínima e o desvio-padrão

mínimo para uma série de 24 dados consecutivos de cada parâmetro climático coletado, usado no teste *Persistence*.

Tabela 2.5 - Limites Climatológicos adotados no teste Range (Fonte: Pittigliani, 2000).

PARAMETRO CLIMÁTICO	UNIDADE	LIMITE MÍNIMO	LIMITE MÁXIMO
Temperatura de Bulbo Seco	°C	-15	45
Umidade Relativa	%	0	100
Pressão Atmosférica	hPa	760	1050
Velocidade do Vento	m/s	0	35
Direção do Vento	°	1	360
Precipitação	mm/h	0	60
Radiação Global Horizontal	W/m <sup>2</sup>	0	1355

Tabela 2.6 - Diferenças máximas entre dois dados consecutivos, usadas no teste Step (Fonte: Pittigliani (2000))

PARAMETRO CLIMÁTICO	UNIDADE	DIFERENÇA MÁXIMA
Temperatura de Bulbo Seco	°C	7
Umidade Relativa	%	30
Pressão Atmosférica	hPa	5
Velocidade do Vento	m/s	35
Direção do Vento	°	360
Precipitação	mm	60
Radiação Global Horizontal	W/m <sup>2</sup>	600

Tabela 2.7 - Variações e Desvio Padrão mínimos para um período de 24 horas de dados consecutivos (Fonte: Pittigliani (2000)).

PARAMETRO CLIMÁTICO	UNIDADE	VARIAÇÃO MÍNIMA	DESVIO PADRÃO
Temperatura de Bulbo Seco	°C	0,2	0,1
Umidade Relativa	%	0,1	0,1
Pressão Atmosférica	hPa	5,0	0,1
Velocidade do Vento	m/s	0,1	0,1
Direção do Vento	°	0,1	0,1
Precipitação	mm	0,0	0,0
Radiação Global Horizontal	W/m <sup>2</sup>	50	0,1

Recomenda-se ainda investigar a consistência dos dados após tratados em relação a algum referencial histórico, pois podem ser encontrados dados que, mesmo respeitando os limites aceitáveis do parâmetro climático em questão, sejam muito discrepantes do que é comum para a localidade, região ou país. Como exemplo, mesmo o parâmetro temperatura de bulbo seco ter como limites aceitáveis valores entre -15°C e 45°C, encontrar valores com temperaturas negativas para a localidade de Viçosa-MG é muito discrepante do padrão local. Esses dados não devem ser tomados como errados de imediato, mas devem ser analisados com mais profundidade para saber se foi um problema no momento na medição, no registro do dado ou se é uma situação atípica.

A fonte de dados usada nesta análise histórica foram as normais climatológicas. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define Normais Climatológicas como valores médios calculados para um

período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas, e no Brasil é possível obter normais climatológicas para o período entre 1931 a 1960 ou 1961 a 1990 (INMET, 2016).

## 2.5 MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE DADOS CLIMÁTICOS

Após a coleta de dados e o posterior tratamento, o passo seguinte foi o cálculo de elementos do clima exigidos para a criação do arquivo climático, mas cujos dados não tenham sido coletados. Existem três grupos de elementos do clima que podem ser calculados, caso não seja possível a coleta de dados medidos dos mesmos: psicométricos, radiação solar e iluminância.

### 2.5.1 ELEMENTOS DO CLIMA: DADOS PSICOMÉTRICOS

Quanto aos dados psicométricos, é possível calcular os elementos do clima: umidade relativa (UR); temperatura de ponto de orvalho (TPO) e temperatura de bulbo seco (TBU). Porém, é necessário que haja dados medidos disponível de ao menos um desses elementos do clima, para que os dois restantes sejam estimados em função do primeiro. São necessários também dados coletados de temperatura de bulbo seco (TBS) e pressão atmosférica (P). E além disso, o cálculo destes elementos requer também o cálculo de outros que não necessariamente serão usados no arquivo climático, são eles: pressão de saturação ( $P_{ws}$ ); pressão de vapor ( $P_w$ ); razão de umidade (W); entalpia (h); volume específico (v); e densidade do ar (da).

A descrição das equações para o cálculo dos 9 elementos acima citados é apresentada a seguir (ASHRAE, 2013; MUNEER, 2004).

A Umidade Relativa (UR) é definida pela equação 1.

$$UR = P_w / P_{ws} \quad (1)$$

UR = Umidade Relativa (%)

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

$P_{ws}$  = Pressão de Saturação (Pa)

A Pressão de Saturação ( $P_{ws}$ ) é definida pela equação 2, e também pela equação 3 ou 4.

$$P_{ws} = e^{\ln P_{ws}} \quad (2)$$

$P_{ws}$  = Pressão de Saturação (Pa)

❖ Para TBS  $\geq 0^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned}
\ln P_{ws} = & ((-5.8002206 \times 10^3)/(TBS + 273,15)) + (1,3914993 \times 10^0) \\
& + (-4,8640239 \times 10^{-2} \times (TBS + 273,15)) \\
& + (4,1764768 \times 10^{-5} \times (TBS + 273,15)^2) \\
& + (-1,4452093 \times 10^{-8} \times (TBS + 273,15)^3) \\
& + (6,5459673 \times 10^0 \times \ln(TBS + 273,15))
\end{aligned} \tag{3}$$

$P_{ws}$  = Pressão de Saturação (Pa)

$TBS$  = Temperatura de Bulbo Seco (°C)

$TBS + 273,15$  = Temperatura Absoluta (K)

❖ Para  $TBS < 0^\circ C$ :

$$\begin{aligned}
\ln P_{ws} = & ((-5,67453559 \times 10^3)/(TBS + 273,15)) + (6,3925247 \times 10^0) \\
& + (-9,677843 \times 10^{-3} \times (TBS + 273,15)) \\
& + (6,2215701 \times 10^{-7} \times (TBS + 273,15)^2) \\
& + (2,0747825 \times 10^{-9} \times (TBS + 273,15)^3) \\
& + (-9,484024 \times 10^{-13} \times (TBS + 273,15)^4) \\
& + (4,1635019 \times 10^0 \times \ln(TBS + 273,15))
\end{aligned} \tag{4}$$

$P_{ws}$  = Pressão de Saturação (Pa)

$TBS$  = Temperatura de Bulbo Seco (°C)

$TBS + 273,15$  = Temperatura Absoluta (K)

O cálculo do elemento Pressão de Vapor ( $P_w$ ) dependerá dos dados disponíveis previamente coletados. Se dados de  $UR$  estiverem disponíveis,  $P_w$  será definida pela equação 5. Se os dados de  $TPO$  estiverem disponíveis,  $P_w$  é definida pela equação 6, com suporte das equações 7 ou 8, a depender da  $TBS$ . Porém, se os dados disponíveis forem os de  $TBU$ ,  $P_{ws}$  é definida pela equação 9.

$$P_w = UR \times P_{ws} \tag{5}$$

$UR$  = Umidade Relativa (%)

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

$P_{ws}$  = Pressão de Saturação (Pa)

$$P_w = e^{\ln P_w} \tag{6}$$

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

❖ Para  $TBS > 0^\circ C$ :

$$\begin{aligned} \ln P_w = & ((-5.8002206 \times 10^3)/(TPO + 273,15)) + (1,3914993 \times 10^0) \\ & + (-4,8640239 \times 10^{-2} \times (TPO + 273,15)) \\ & + (4,1764768 \times 10^{-5} \times (TPO + 273,15)^2) \\ & + (-1,4452093 \times 10^{-8} \times (TPO + 273,15)^3) \\ & + (6,5459673 \times 10^0 \times \ln(TPO + 273,15)) \end{aligned} \quad (7)$$

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

$TPO$  = Temperatura de Ponto de Orvalho (°C)

$TPO + 273,15$  = Temperatura Absoluta (K)

❖ Para  $TBS \leq 0^\circ C$ :

$$\begin{aligned} \ln P_w = & ((-5,67453559 \times 10^3)/(TPO + 273,15)) + (6,3925247 \times 10^0) \\ & + (-9,677843 \times 10^{-3} \times (TPO + 273,15)) \\ & + (6,2215701 \times 10^{-7} \times (TPO + 273,15)^2) \\ & + (2,0747825 \times 10^{-9} \times (TPO + 273,15)^3) \\ & + (-9,484024 \times 10^{-13} \times (TPO + 273,15)^4) \\ & + (4,1635019 \times 10^0 \times \ln(TPO + 273,15)) \end{aligned} \quad (8)$$

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

$TPO$  = Temperatura de Ponto de Orvalho (°C)

$TPO + 273,15$  = Temperatura Absoluta (K)

$$P_w = \frac{(P \times W)}{(0,621945 + W)} \quad (9)$$

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

$W$  = Razão de Umidade (kg/kg de ar seco)

$P$  = Pressão Atmosférica (kPa)

Assim como a pressão de vapor, o cálculo do elemento Razão de Umidade ( $W$ ) dependerá dos dados que estiverem disponíveis. Se forem  $UR$  ou  $TPO$ ,  $W$  será definida pela equação 10. Caso esteja disponível a  $TBU$ ,  $W$  será definida pela equação 11 ou 12, conforme  $TBS$  e com suporte da equação 13 que, por sua vez utilizará as equações 14 e 15, conforme  $TBS$ .

$$W = \frac{0,621945 \times P_w}{P - P_w} \quad (10)$$

$W$  = Razão de Umidade (kg/kg de ar seco)

$P$  = Pressão Atmosférica (kPa)

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa) (Calculada com a equação 5 ou 6)

❖ Para  $TBS \geq 0^\circ C$ :

$$W = \frac{(2501 - (2,326 \times TBU)) \times \left( \frac{0,621945 \times P_{ws}^*}{P - P_{ws}^*} \right) - (1,006 \times (TBS - TBU))}{2501 + (1,86 \times TBS) - (4,186 \times TBU)} \quad (11)$$

$W$  = Razão de Umidade (Kg/Kg de ar seco)

$TBS$  = Temperatura de Bulbo Seco ( $^\circ C$ )

$TBU$  = Temperatura de Bulbo Umido ( $^\circ C$ )

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a  $TBU$  no lugar da  $TBS$ )

❖ Para  $TBS < 0^\circ C$ :

$$W = \frac{(2830 - (0,24 \times TBU)) \times \left( \frac{0,621945 \times P_{ws}^*}{P - P_{ws}^*} \right) - (1,006 \times (TBS - TBU))}{2830 + (1,86 \times TBS) - (2,1 \times TBU)} \quad (12)$$

$W$  = Razão de Umidade (kg/kg de ar seco)

$TBS$  = Temperatura de Bulbo Seco ( $^\circ C$ )

$TBU$  = Temperatura de Bulbo Umido ( $^\circ C$ )

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a  $TBU$  no lugar da  $TBS$ )

$$P_{ws}^* = e^{\ln P_{ws}^*} \quad (13)$$

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a  $TBU$  no lugar da  $TBS$ )

❖ Para  $TBS > 0^\circ C$ :

$$\begin{aligned} \ln P_{ws}^* = & ((-5.8002206 \times 10^3)/(TBU + 273,15)) + (1,3914993 \times 10^0) \\ & + (-4,8640239 \times 10^{-2} \times (TBU + 273,15)) \\ & + (4,1764768 \times 10^{-5} \times (TBU + 273,15)^2) \\ & + (-1,4452093 \times 10^{-8} \times (TBU + 273,15)^3) \\ & + (6,5459673 \times 10^0 \times \ln(TBU + 273,15)) \end{aligned} \quad (14)$$

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a  $TBU$  no lugar da  $TBS$ )

$TBU$  = Temperatura de Bulbo Umido ( $^\circ C$ )

$TBU + 273,15$  = Temperatura Absoluta (K)

❖ Para  $TBS \leq 0^\circ C$ :

$$\begin{aligned}
\ln P_{ws}^* = & ((-5,67453559 \times 10^3)/(TBU + 273,15)) + (6,3925247 \times 10^0) \\
& + (-9,677843 \times 10^{-3} \times (TBU + 273,15)) \\
& + (6,2215701 \times 10^{-7} \times (TBU + 273,15)^2) \\
& + (2,0747825 \times 10^{-9} \times (TBU + 273,15)^3) \\
& + (-9,484024 \times 10^{-13} \times (TBU + 273,15)^4) \\
& + (4,1635019 \times 10^0 \times \ln(TBU + 273,15))
\end{aligned} \tag{15}$$

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a TBU no lugar da TBS)

TBU = Temperatura de Bulbo Umido (°C)

TBU + 273,15 = Temperatura Absoluta (K)

A Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO) é definida pela equação 16 ou 17, a depender da TBS.

❖ Para TBS > 0°C:

$$\begin{aligned}
TPO = & 6,54 + (14,526 \times \ln P_w) + (0,7389 \times (\ln P_w^2)) + (0,09486 \times (\ln P_w^3)) \\
& + (0,4569 \times P_w^{0,1984})
\end{aligned} \tag{16}$$

TPO = Temperatura de Ponto de Orvalho (°C)

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

❖ Para TBS < 0°C:

$$TPO = 6,09 + (12,608 \times \ln P_w) + (0,4959 \times (\ln P_w^2)) \tag{17}$$

TPO = Temperatura de Ponto de Orvalho (°C)

$P_w$  = Pressão de Vapor (Pa)

A Entalpia (h) é definida pela equação 18.

$$h = (1,006 \times TBS) + [W \times (2501 + (1,86 \times TBS))] \tag{18}$$

$k$  = Entalpia (kJ/kg de ar seco)

TBU = Temperatura de Bulbo Umido (°C)

$W$  = Razão de Umidade (kg/kg de ar seco)

O Volume Específico (v) é definido pela equação 19.

$$v = \frac{0,287042 \times (TBS + 273,15) \times [1 + (1,607858 \times W)]}{P} \tag{19}$$

$v$  = Volume Específico (m<sup>3</sup>/Kg de ar seco)

TBS = Temperatura de Bulbo Seco (°C)

TBS + 273,15 = Temperatura Absoluta (K)

$W$  = Razão de Umidade (kg/kg de ar seco)

$P$  = Pressão Atmosférica (kPa)

A Densidade do Ar ( $da$ ) é definida pela equação 20.

$$da = \frac{1}{v} \quad (20)$$

$da$  = Densidade do Ar (kg de ar seco/m<sup>3</sup>)

$v$  = Volume Específico (m<sup>3</sup>/kg de ar seco)

A temperatura de bulbo úmido ( $TBU$ ) é calculada utilizando as equações 21 ou 22, com o suporte da equação 23 que, por sua vez, necessita das equações 24 ou 25.

Assim, o cálculo da TBU é mais complexo, e, segundo ASHRAE (2013), a resolução exige ou a utilização do método de solução numérica ou o método de tentativa e erro. Nesta pesquisa, foi utilizado o método de tentativa e erro por meio da programação de uma rotina com testes sequenciais de todos os valores de um universo determinado para  $TBU$ .

❖ Para  $TBS > 0^{\circ}C$ :

$$W = \frac{(2501 - (2,326 \times TBU)) \times \left( \frac{0,621945 \times P_{ws}^*}{P - P_{ws}^*} \right) - (1,006 \times (TBS - TBU))}{2501 + (1,86 \times TBS) - (4,186 \times TBU)} \quad (21)$$

$W$  = Razão de Umidade (kg/kg de ar seco)

$TBS$  = Temperatura de Bulbo Seco ( $^{\circ}C$ )

$TBU$  = Temperatura de Bulbo Umido ( $^{\circ}C$ )

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a TBU no lugar da TBS)

❖ Para  $TBS \leq 0^{\circ}C$ :

$$W = \frac{(2830 - (0,24 \times TBU)) \times \left( \frac{0,621945 \times P_{ws}^*}{P - P_{ws}^*} \right) - (1,006 \times (TBS - TBU))}{2830 + (1,86 \times TBS) - (2,1 \times TBU)} \quad (22)$$

$W$  = Razão de Umidade (kg/kg de ar seco)

$TBS$  = Temperatura de Bulbo Seco ( $^{\circ}C$ )

$TBU$  = Temperatura de Bulbo Umido ( $^{\circ}C$ )

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a TBU no lugar da TBS)

$$P_{ws}^* = e^{\ln P_{ws}^*} \quad (23)$$

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a TBU no lugar da TBS)

❖ Para  $TBS > 0^{\circ}C$ :

$$\begin{aligned}
\ln P_{ws}^* = & ((-5.8002206 \times 10^3)/(TBU + 273,15)) + (1,3914993 \times 10^0) \\
& + (-4,8640239 \times 10^{-2} \times (TBU + 273,15)) \\
& + (4,1764768 \times 10^{-5} \times (TBU + 273,15)^2) \\
& + (-1,4452093 \times 10^{-8} \times (TBU + 273,15)^3) \\
& + (6,5459673 \times 10^0 \times \ln(TBU + 273,15))
\end{aligned} \tag{24}$$

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a TBU no lugar da TBS)

TBU = Temperatura de Bulbo Umido (°C)

TBU + 273,15 = Temperatura Absoluta (K)

❖ Para  $TBS \leq 0^\circ C$ :

$$\begin{aligned}
\ln P_{ws}^* = & ((-5,67453559 \times 10^3)/(TBU + 273,15)) + (6,3925247 \times 10^0) \\
& + (-9,677843 \times 10^{-3} \times (TBU + 273,15)) \\
& + (6,2215701 \times 10^{-7} \times (TBU + 273,15)^2) \\
& + (2,0747825 \times 10^{-9} \times (TBU + 273,15)^3) \\
& + (-9,484024 \times 10^{-13} \times (TBU + 273,15)^4) \\
& + (4,1635019 \times 10^0 \times \ln(TBU + 273,15))
\end{aligned} \tag{25}$$

$P_{ws}^*$  = Pressão de Saturação (Pa) (Calculado com a TBU no lugar da TBS)

TBU = Temperatura de Bulbo Umido (°C)

TBU + 273,15 = Temperatura Absoluta (K)

## 2.5.2 ELEMENTOS DO CLIMA: DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR

Deve-se calcular os elementos do clima: Radiação Extraterrestre Horizontal (IE); Radiação Extraterrestre Normal (IEn); Radiação Infravermelha Horizontal (IR); Radiação Difusa Horizontal (ID); e Radiação Direta Normal (IBn). Para tanto, é necessário que haja dados medidos ou calculados de Radiação Global Horizontal (IG), de Pressão Atmosférica (P), da latitude (LAT), da longitude (LONG) e do meridiano padrão da zona do fuso horário local (LST), além de dados psicométricos de Temperatura de Bulbo Seco (TBS) e Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO).

Ainda, é necessário calcular outros elementos que não serão diretamente usados no arquivo climático: Número do Dia (DN); Equação do Horário (EOT); Horário Solar Aparente (AST); Ângulo de Altitude Solar (SOLALT); Declinação Solar (DEC); Altura Solar ( $\omega$ ); Índice de Claridade (Kt); e Emissividade do Céu (SkyE).

As equações para o cálculo dos 13 parâmetros acima citados são apresentadas a seguir (MUNEER, 2004; DUFFIE e BECKMAN, 2013).

A Radiação Extraterrestre Horizontal ( $I_E$ ) é definida pela equação 26.

$$I_E = 1367 \times [1 + (0,033 \times \cos(0,0172024 \times DN))] \times \sin(SOLALT) \quad (26)$$

$I_E$  = Radiação Extraterrestre Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$SOLALT$  = Ângulo da Altitude Solar

$DN$  = Número do Dia

O Ângulo de Altitude Solar ( $SOLALT$ ), que é o ângulo complementar ao Ângulo de Azimute Solar, é definida pela equação 27.

$$SOLALT = \sin^{-1}[(\cos LAT \times \cos DEC \times \cos \omega) + (\sin LAT + \sin DEC)] \quad (27)$$

$SOLALT$  = Ângulo da Altitude Solar

$LAT$  = Latitude (radianos)

$\omega$  = Altura Solar (radianos)

$DEC$  = Solar Declination (radianos)

A Radiação Extraterrestre Normal ( $I_{EN}$ ) é definida pela equação 28.

$$I_{EN} = I_E \times \sin(SOLALT) \quad (28)$$

$I_{EN}$  = Radiação Extraterrestre Normal ( $Wh/M^2$ )

$I_E$  = Radiação Extraterrestre Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$SOLALT$  = Ângulo da Altitude Solar (radianos)

O parâmetro Número do Dia ( $DN$ ) indica qual é o dia do ano ao qual o cálculo se refere. Para exemplificar, considerando o ano com 365 dias, o dia 20 de janeiro é o  $DN$  20, já o dia 20 de fevereiro é o  $DN$  51 e assim sucessivamente.

A Altura Solar ( $\omega$ ) é um elemento do clima que determina a posição real do sol em uma localidade em função do dia e do horário. Porém, é importante destacar que existe uma convenção internacional para o uso de zonas de fuso horário, no Brasil por exemplo existem 4 fusos horários. Assim, o horário adotado em muitas localidades não é o horário solar real da longitude local, e sim o horário solar referente a longitude da zona de fuso horário adotada no local. Portanto, para calcular  $\omega$  é preciso calcular primeiro o horário real da localidade, em seguida calcular a diferença do horário real em relação às 12h, e o resultado é multiplicado por  $15^\circ$ . Esse conceito apresentado é descrito na equação 29, com suporte das equações 30 e 31.

$$\omega = [(AST - 12) \times 15] \times \left(\frac{\pi}{180}\right) \quad (29)$$

$\omega$  = Altura Solar (radianos)

$AST$  = Horário Solar Aparente (h)

$\frac{\pi}{180}$  = Elemento inserido na equação para converter o resultado de Graus para Radianos

$$AST = LCT + EOT \pm \left( \frac{LSM - LONG}{15} \right) \quad (30)$$

*AST = Horário Solar Aparente (h)*

*LCT = Horário padrão da Zona de Fuso Horário (h)*

*LONG = Longitude Local (Radianos)(Modulo)*

*LSM = Longitude do Meridiano Padrão do Fuso Horário Local (Radiano)(Modulo)*

*± = Será + quando LONG estiver a leste de LSM, e Será - caso contrario.*

*EOT = Equação do Horarios*

$$EOT = \left[ 0,1236 \times \sin \left( \frac{360 \times (DN - 1)}{365,242} \right) \right] - \left[ 0,0043 \times \cos \left( \frac{360 \times (DN - 1)}{365,242} \right) \right] \\ + \left[ 0,1538 \times \sin \left( 2 \times \left( \frac{360 \times (DN - 1)}{365,242} \right) \right) \right] \\ + \left[ 0,0608 \times \cos \left( 2 \times \left( \frac{360 \times (DN - 1)}{365,242} \right) \right) \right] \quad (31)$$

*EOT = Equação do Horário*

*DN = Número do Dia*

O parâmetro Declinação Solar (DEC) é definida pela equação 32.

$$DEC = \sin^{-1} \{ 0,39795 \times \cos [ 0,98563 \times (DN - 173) ] \} \quad (32)$$

*DEC = Declinação Solar (radianos)*

*DN = Número do Dia*

A Radiação Difusa Horizontal ( $I_D$ ) é definida pela equação 33.

$$I_D = I_G \times [ 1,006 - (0,317 \times K_t) + (3,1241 \times K_t^2) - (12,7616 \times K_t^3) \\ + (9,7166 \times K_t^{34}) ] \quad (33)$$

*$I_D$  = Radiação Difusa Horizontal ( $Wh/M^2$ )*

*$I_G$  = Radiação Global Horizontal ( $Wh/M^2$ )*

*$K_t$  = Índice de Claridade*

O Índice de Claridade ( $K_t$ ) é definida pela equação 34.

$$K_t = I_G / I_E \quad (34)$$

*$K_t$  = Índice de Claridade*

*$I_G$  = Radiação Global Horizontal ( $Wh/M^2$ )*

*$I_E$  = Radiação Extraterrestre Horizontal ( $Wh/M^2$ )*

A Radiação Direta Horizontal ( $I_B$ ) é definida pela equação 35.

$$I_B = I_G - I_D \quad (35)$$

$I_B$  = Radiação Direta Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$I_D$  = Radiação Difusa Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$I_G$  = Radiação Global Horizontal ( $Wh/M^2$ )

A Radiação Direta Normal ( $I_{BN}$ ) é definida pela equação 36.

$$I_{BN} = I_B \times \sin(SOLALT) \quad (36)$$

$I_{BN}$  = Radiação Direta Normal ( $Wh/M^2$ )

$I_B$  = Radiação Direta Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$SOLALT$  = Angulo da Altitude Solar (radianos)

A Radiação Infravermelha Horizontal ( $IR$ ) é definida pela equação 37, com suporte da equação 38.

$$IR = Sky_E \times Sigma \times TBS^4 \quad (37)$$

$IR$  = Radiação Infravermelho Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$SKY_E$  = Emissividade do Céu

$Sigma$  = Stefan Boltzmann Constant =  $5.6697 \times 10^{-8}$

$TBS$  = Temperatura de Bulbo Seco (K)

$$Sky_E = \left( 0.787 + \left( 0.764 \times \ln \left( \frac{TPO}{273} \right) \right) \right) \times (1 + (0.0224 \times N) - (0.0035 \times N^2) + (0.00028 \times N^3)) \quad (38)$$

$SKY_E$  = Emissividade do Céu

$TPO$  = Temperatura de Ponto de Orvalho (K)

$N$  = Cobertura Opaca do Céu

É importante mencionar que a equação 38 requer o parâmetro Cobertura Opaca do Céu, mas na etapa de coleta dos dados para a cidade de Viçosa, não foi possível conseguir dados deste elemento do clima. Por essa razão, foi utilizado o valor padrão recomendado pelo manual do Energy Plus (ENERGYPLUS, 2015), para casos onde não há dados disponíveis: 3/10, ou 0,3.

### 2.5.3 ELEMENTOS DO CLIMA: DADOS DE ILUMINÂNCIA

Deve-se calcular os elementos do clima: Iluminância Global Horizontal (ILG); Iluminância Difusa Horizontal (ILD); Iluminância Direta Normal (ILBn); Luminância Zenital (LZ). É necessário que haja dados medidos ou calculados de Radiação Global Horizontal (IG), Radiação Difusa Horizontal (ID), Radiação Direta

Normal ( $I_{Bn}$ ), Radiação Extraterrestre Horizontal (IE), Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO), Declinação Solar (DEC), Altura Solar ( $\omega$ ).

Além disso, é necessário calcular outros elementos que não serão usados diretamente no arquivo climático: Ângulo da Altitude Solar (SOLALT), Ângulo do Zênite Solar (SOLZEN), Claridade do Céu ( $\epsilon$ ), Teor de Água Precipitável da Atmosfera ( $L_w$ ), Massa do Ar Ótica Relativa ( $m$ ) e Coeficiente de Claridade do Céu ( $\Delta$ ).

A descrição das equações para o cálculo dos 10 parâmetros acima citados é apresentada a seguir MUNEER, 2004; PEREZ et al, 1990).

A Iluminância Global Horizontal ( $IL_G$ ) é definida pela equação 39, com auxílio da Tabela 2.8.

$$IL_G = I_G \times (a_i + (b_i \times L_w) + (c_i \times \cos SOLZEN) + (d_i \times \ln(\Delta))) \quad (39)$$

$IL_G$  = Iluminância Global Horizontal (Lux)

$I_G$  = Radiação Global Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$L_w$  = Teor de Água Precipitável da Atmosfera

$SOLZEN$  = Angulo do Zenite Solar (Rad)

$\Delta$  = Coeficiente de Claridade do Céu

$a_i$ ;  $b_i$ ;  $c_i$ ;  $d_i$  = Coeficientes dados na tabela 8, variam a depender do parametro Claridade do Céu ( $\epsilon$ )

Tabela 2.8 - Coeficientes a serem usados na equação 39. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40.

$\epsilon$ (bin): i	1	2	3	4	5	6	7	8
Limite Inferior	1,00	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20
Limite	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20	—
$a_i$	96.63	107.54	98.73	92.72	86.73	88.34	78.63	99.65
$b_i$	-0.47	0.79	0.70	0.56	0.98	1.39	1.47	1.86
$c_i$	11.50	1.79	4.40	8.36	7.10	6.06	4.93	-4.46
$d_i$	-9.16	-1.19	-6.95	-8.31	-10.94	-7.60	-11.37	-3.15

A Claridade do Céu ( $\epsilon$ ) é definida pela equação 40.

$$\epsilon = \frac{[(1.041 \times SOLZEN^3) + \left(\frac{I_D + I_{Bn}}{I_D}\right)]}{1 + (1.041 \times SOLZEN^3)} \quad (40)$$

$\epsilon$  = Claridade do Céu

$SOLZEN$  = Angulo do Zenite Solar (Rad)

$I_D$  = Radiação Difusa Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$I_{Bn}$  = Radiação Direta Normal ( $Wh/M^2$ )

O Ângulo do Zenite Solar ( $SOLZEN$ ) é definida pela equação 41.

$$\mathbf{SOLZEN} = \cos^{-1}[(\cos LAT \times \cos DEC \times \cos \omega) + (\sin LAT + \sin DEC)] \quad (41)$$

*SOLZEN = Angulo do Zenite Solar*

*LAT = Latitude (radianos)*

*$\omega$  = Solar Hour Angle (radianos)*

*DEC = Solar Declination (radianos)*

O Coeficiente de Claridade do Céu ( $\Delta$ ) é definida pela equação 42.

$$\mathbf{\Delta} = \frac{I_D \times m}{I_E} \quad (42)$$

*$\Delta$  = Sky Brightness Coefficient*

*$I_D$  = Radiação Difusa Horizontal ( $Wh/M^2$ )*

*$I_E$  = Radiação Extraterrestre Horizontal ( $Wh/M^2$ )*

*$m$  = Relative Optical Air Mass*

A Massa do Ar Ótica Relativa ( $m$ ) é definida pela equação 43.

$$\mathbf{m} = [\sin SOLALT + (0.50572 \times (SOLALT + 6.07995)^{-1.6364})]^{-1} \quad (43)$$

*$m$  = Massa do Ar Ótica Relativa*

*SOLALT = Angulo da Altitude Solar*

O Teor de Água Precipitável da Atmosfera ( $L_W$ ) é definida pela equação 44.

$$\mathbf{L_W} = \exp[(0.07 \times TPO) - 0.075] \quad (44)$$

*$L_W$  = Teor de Água Precipitável da Atmosfera*

*TPO = Temperatura de Ponto de Orvalho ( $^{\circ}C$ )*

A Iluminância Difusa Horizontal ( $IL_D$ ) é definida pela equação 45, com auxílio da Tabela 2.9.

$$\mathbf{IL_D} = I_D \times (a_i + (b_i \times L_W) + (c_i \times \cos SOLZEN) + (d_i \times \ln(\Delta))) \quad (45)$$

*$IL_D$  = Iluminância Difusa Horizontal ( $Lux$ )*

*$I_D$  = Radiação Difusa Horizontal ( $Wh/M^2$ )*

*$L_W$  = Teor de Água Precipitável da Atmosfera*

*SOLZEN = Angulo do Zenite Solar (Rad)*

*$\Delta$  = Coeficiente de Claridade do Céu*

*$a_i$ ;  $b_i$ ;  $c_i$ ;  $d_i$  = Coeficientes dados na tabela 9 variam a depender do parametro Claridade do Céu ( $\epsilon$ )*

Tabela 2.9 - Coeficientes a serem usados na equação 45. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40.

$\epsilon$ (bin): i	1	2	3	4	5	6	7	8
Limite Inferior	1,00	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20

Limite	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20	–
$a_i$	97,24	107,22	104,97	102,39	100,71	106,42	141,88	152,23
$b_i$	-0,46	1,15	2,96	5,59	5,94	3,83	1,90	0,35
$c_i$	12,00	0,59	-5,53	-13,95	-22,75	-36,15	-53,24	-45,27
$d_i$	-8,91	-3,95	-8,77	-13,90	-23,74	-28,83	-14,03	-7,98

A Iluminância Direta Normal ( $IL_{Bn}$ ) é definida pela equação 46, com auxílio da Tabela 2.10.

$$IL_{Bn} = I_{Bn} \times (a_i + (b_i \times L_w) + (c_i \times \exp((5.73 \times SOLZEN) - 5)) + (d_i \times \Delta)) \quad (46)$$

$IL_{Bn}$  = Iluminância Direta Normal (Lux)

$I_{Bn}$  = Radiação Direta Normal ( $Wh/M^2$ )

$L_w$  = Teor de Água Precipitável da Atmosfera

$SOLZEN$  = Angulo do Zenite Solar (Rad)

$\Delta$  = Coeficiente de Claridade do Céu

$a_i$ ;  $b_i$ ;  $c_i$ ;  $d_i$  = Coeficientes dados na tabela 10, variam a depender do parametro Claridade do Céu ( $\epsilon$ )

Tabela 2.10 - Coeficientes a serem usados na equação 46. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40.

$\epsilon$ (bin): i	1	2	3	4	5	6	7	8
Limite Inferior	1,00	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20
Limite	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20	–
$a_i$	57,20	98,99	109,83	110,34	106,36	107,19	105,75	101,18
$b_i$	-4,55	-3,46	-4,90	-5,84	-3,97	-1,25	0,77	1,58
$c_i$	-2,98	-1,21	-1,71	-1,99	-1,75	-1,51	-1,26	-1,10
$d_i$	117,12	12,38	-8,81	-4,56	-6,16	-26,73	-34,44	-8,29

A Luminância Zenital ( $L_z$ ) é definida pela equação 47, com auxílio da Tabela 2.11.

$$L_z = I_D \times (a_i + (b_i \times \cos SOLZEN) + (c_i \times \exp(-3 \times SOLZEN)) + (d_i \times \Delta)) \quad (47)$$

$L_z$  = Luminância Zenital (Lux)

$I_D$  = Radiação Difusa Horizontal ( $Wh/M^2$ )

$SOLZEN$  = Angulo do Zenite Solar (Rad)

$\Delta$  = Coeficiente de Claridade do Céu

$a_i$ ;  $b_i$ ;  $c_i$ ;  $d_i$  = Coeficientes dados na tabela 11, variam a depender do parametro Claridade do Céu ( $\epsilon$ )

Tabela 2.11 - Coeficientes a serem usados na equação 47. Os valores variam conforme o parâmetro Claridade do Céu, que é calculado conforme equação 40.

$\epsilon$ (bin): i	1	2	3	4	5	6	7	8
Limite Inferior	1,00	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20
Limite	1,07	1,23	1,50	1,95	2,80	4,50	6,20	–
$a_i$	40,86	26,58	19,34	13,25	14,47	19,76	28,39	42,91
$b_i$	26,77	14,73	2,28	-1,39	-5,09	-3,88	-9,67	-19,62
$c_i$	-29,59	58,46	100,00	124,79	160,09	154,61	151,58	130,80
$d_i$	-45,75	-21,25	0,25	15,66	9,13	-19,21	-69,39	-164,08

## 2.6 RESULTADOS

As análises estatísticas dos dados climáticos realizadas neste estudo são apresentadas a seguir, para os elementos do clima: Temperatura de Bulbo Seco; Umidade Relativa; Precipitação; Radiação Global Horizontal e as Velocidades e Direções dos Ventos. Os demais elementos do clima estão disponíveis eletronicamente ([www.latecae.ufv.br](http://www.latecae.ufv.br)).

Ressalta-se que, no desenvolvimento de arquivos climáticos, usualmente, a etapa seguinte aos tratamentos dos dados, que será discutida nos próximos capítulos, é a seleção de um ano climático referência. Sendo assim, foram criados um arquivo climático para cada um dos 10 anos de dados climáticos coletados, para quantificar e avaliar as variações nos dados dos elementos climáticos, ocorridas entre os 10 anos.

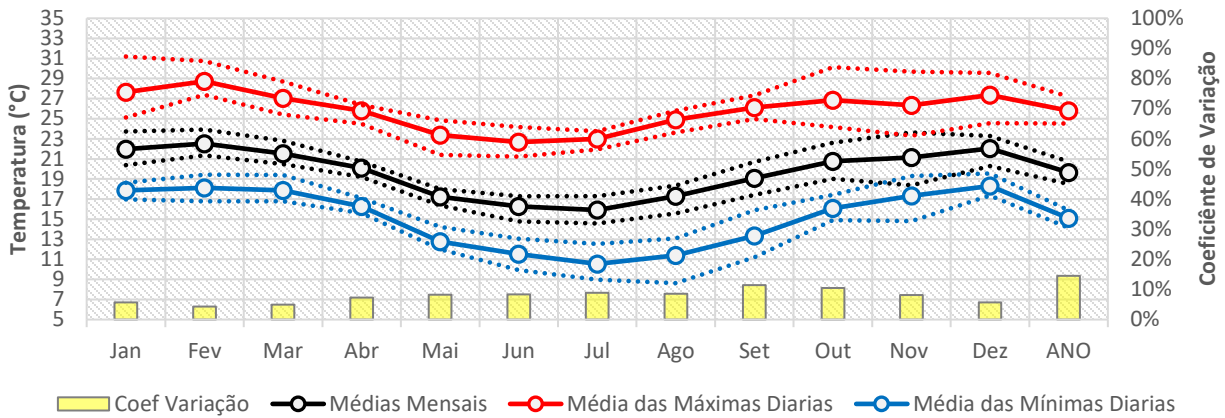
### 2.6.1 TEMPERATURA DE BULBO SECO

A Figura 2.4 apresenta as médias mensais, as médias mensais das máximas diárias e as médias mensais das mínimas diárias da temperatura de bulbo seco (TBS). Estes três dados referem-se as médias dos 10 anos de dados climáticos analisadas nesta pesquisa, além do ano mais quente e mais frio.

A partir das análises apresentadas, nota-se que é uma cidade com temperaturas amenas, em que as médias mensais de temperatura dos 10 anos não ultrapassam 23°C, chegando à 22,5°C em fevereiro. As médias mensais das máximas diárias dos 10 anos mantiveram-se na faixa entre 22,7°C e 28,7°C, valores referentes a junho e fevereiro, respectivamente. Vale destacar ainda que as médias mensais das mínimas diárias dos 10 anos são baixas no período do inverno, chegando a 10,5°C em julho.

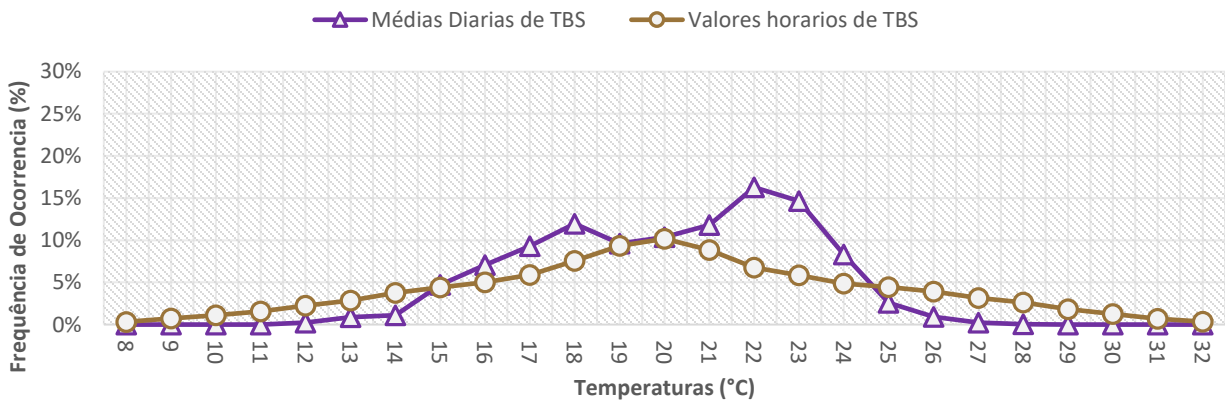
Observando a relação entre a média dos 10 anos e os anos mais frio e mais quente, observa-se que as diferenças anuais foram pequenas, abaixo de 1°C. Porém, em alguns meses do ano as diferenças foram maiores, com destaque para o mês de novembro que apresentou diferenças acima de 2°C tanto para as médias mensais, quanto para a médias mensais das máximas diárias e a médias mensais da mínimas diárias. No caso da análise das médias das máximas, também há diferenças acentuadas que ocorrem nos meses entre outubro e janeiro, sempre acima de 2,5°C. Já no caso das médias das mínimas, nota-se variações relevantes entre os meses de julho e setembro, próximas de 2°C.

Figura 2.4 – Médias mensais, médias mensais das máximas diárias e médias mensais das mínimas diárias de TBS, dos 10 anos de dados coletados (linhas contínuas), do ano mais quente e do ano mais frio (linhas pontilhadas). Além do coeficiente de variação das médias (barras).



Já a Figura 2.5, exibe o percentual de ocorrência dos dados de TBS na faixa entre 8°C e 32°C para os 10 anos de dados climáticos analisadas nesta pesquisa. Mostra os resultados tanto dos valores horários, quanto das médias diárias. Esta análise corroborou as conclusões anteriores, já que em 45% das horas do ano a temperatura esteve entre 18°C e 22°C e em apenas 2% das horas houveram registro de TBS acima de 30°C. Além disso, em 94% dos dias do ano, as médias diárias ficaram entre 15°C e 24°C.

Figura 2.5 – Frequência de Ocorrência das TBS horárias e das médias diárias de TBS.



### 2.6.1.1 Análise comparativa entre cada um dos 10 anos

Para melhor caracterizar as TBS registradas na cidade de Viçosa-MG, fez-se necessário também avaliar as variações nos dados dos elementos do clima, que ocorrem de um ano para o outro, mostradas nas Figuras 2.6 e 2.7.

A Figura 2.6 expõe as médias anuais, as medidas de posição e variação, além da distribuição de ocorrência simplificada da TBS, nota-se que há diferenças entre os anos, como por exemplo a diferença de 2°C entre as médias anuais dos anos de 2015, o mais quente, e o ano de 2011, o mais frio. Em relação à

distribuição de ocorrência das médias diárias de TBS, em 2015 houve uma maior ocorrência entre 18°C e 23°C, enquanto que em 2011 foi entre 16°C a 21°C.

Na figura 2.7 observa-se, novamente, que as médias mensais de TBS para cada um dos 10 anos apontam para diferenças relevantes entre os anos. As amplitudes entre as médias mensais do ano mais frio e o mais quente de cada mês são expressivas, ficando em entre 2°C e 5°C, para abril e novembro respectivamente. Assim, considera-se que as variações nos dados dos elementos do clima que ocorrem de um ano para o outro são significativas.

Figura 2.6 – Cada um dos 10 anos de dados de TBS de Viçosa-MG.

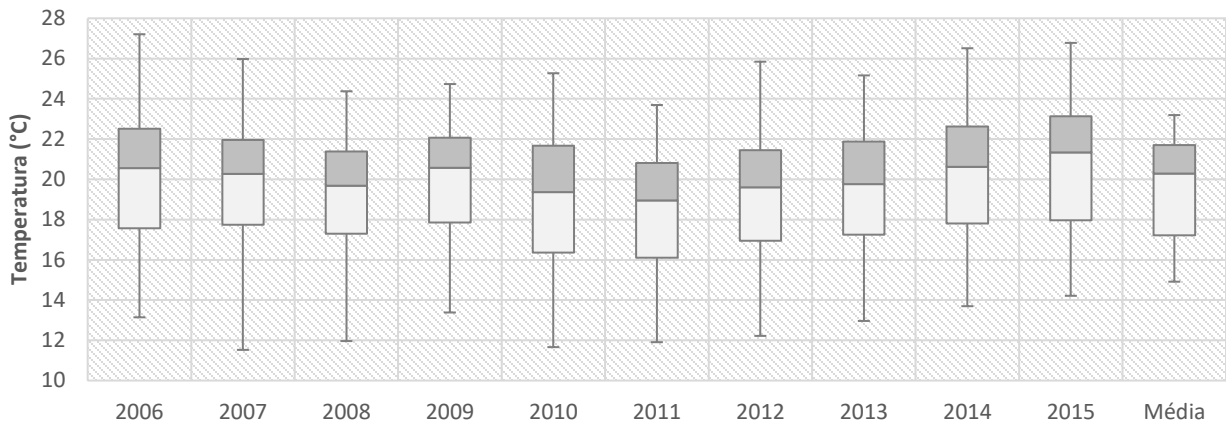
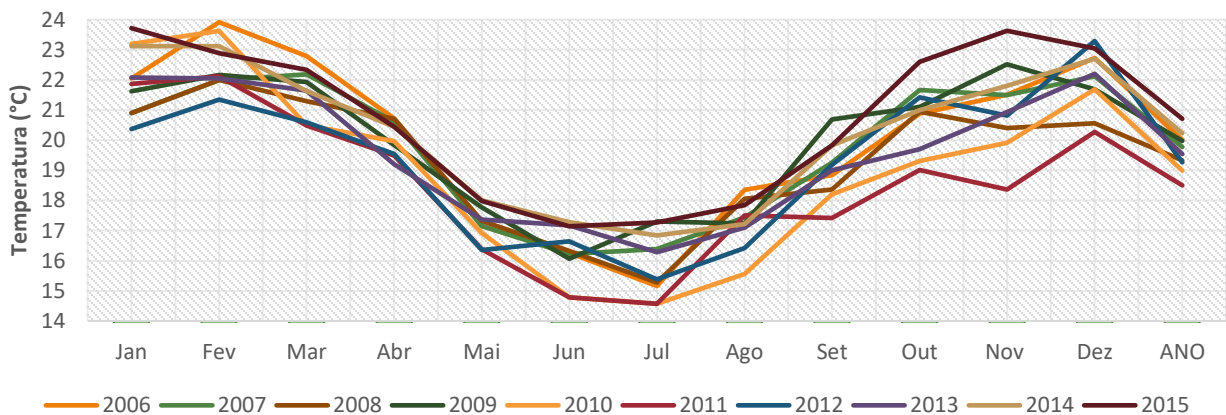


Figura 2.7 – Médias mensais dos 10 anos de dados climáticos disponíveis para Viçosa-MG.

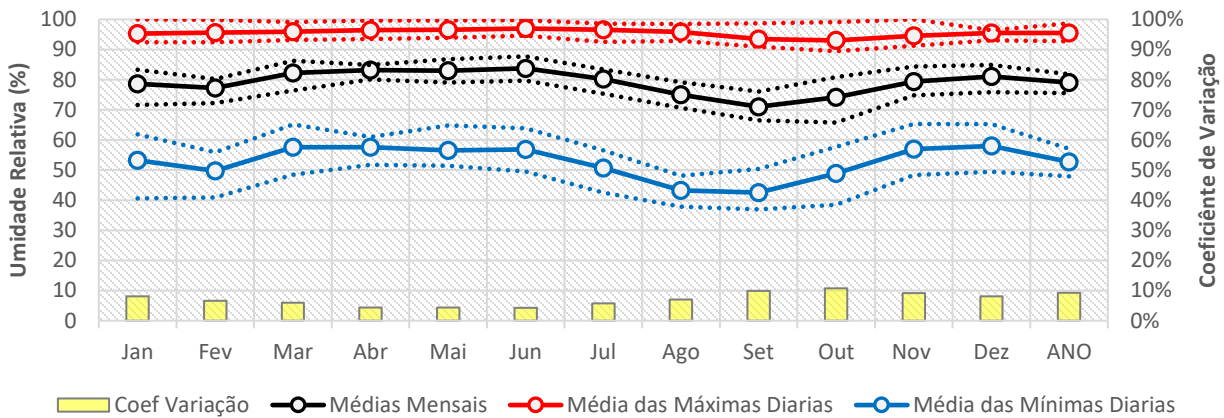


## 2.6.2 UMIDADE RELATIVA E PRECIPITAÇÃO

A figura 2.8 exibe as médias mensais, as médias mensais das máximas diárias e as médias mensais das mínimas diárias da umidade relativa (UR). Estes três dados referem-se as médias dos 10 anos de dados climáticos analisadas nesta pesquisa, além do ano mais quente e mais frio para demonstrar também os anos mais diferentes em relação as médias dos 10 anos. Confirmou-se, por meio das análises, a elevada umidade

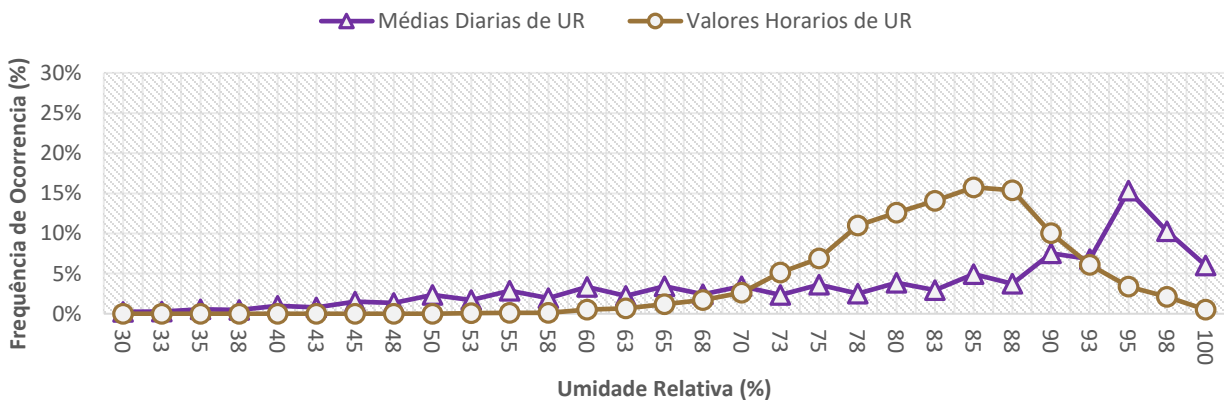
típica da cidade, pois, as médias mensais de umidade relativa do ar mantiveram-se acima de 70% de UR por todo o ano. Já as médias mensais das máximas diárias estiveram acima dos 90% de UR ao longo de todo o ano.

Figura 2.8 – Médias mensais, médias mensais das máximas diárias e médias mensais das mínimas diárias de UR, dos 10 anos de dados coletados (linhas contínuas), do ano mais quente e do ano mais frio (linhas pontilhadas). Além do coeficiente de variação das médias (barras).



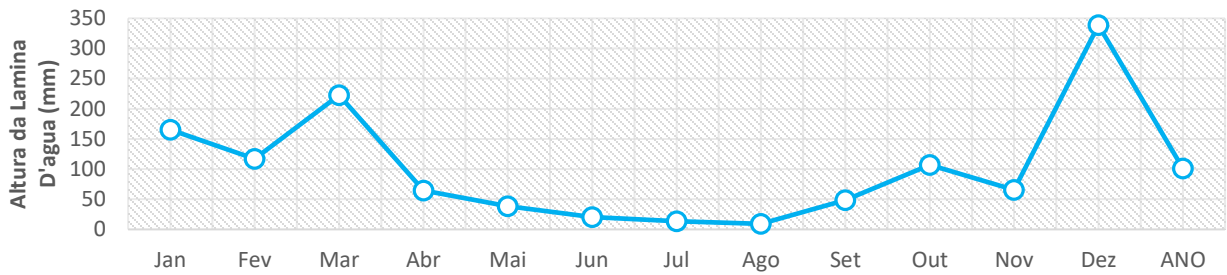
A figura 2.9 retrata o percentual de ocorrência das medias diárias e das UR horárias. Em relação aos dados horários, se vê que cerca 70% das horas do ano a UR esteve acima de 80%. Quanto as médias diárias, em cerca de 62% dos dias do ano a UR esteve acima de 80%.

Figura 2.9 – Frequência de ocorrência dos dados horários e das médias diárias de UR.



Os totais mensais de precipitação ao longo do ano, estão ilustrados na Figura 2.10. Foi possível constatar que as chuvas se concentraram entre os meses de outubro e março, com destaque para os meses de dezembro e março, com o total de chuvas mensal de 340 mm e 220 mm, respectivamente.

Figura 2.10 – Totais mensais de precipitação.



### 2.6.2.1 Análise comparativa entre cada um dos 10 anos

Para melhor caracterizar as UR registradas na cidade de Viçosa-MG, fez-se necessário as análises das variações nos dados dos elementos do clima, que ocorreram de um ano para o outro. As Figuras 2.11 e 2.12, ilustram características dos dados de UR para cada um dos 10 anos de estudo.

As médias anuais, as medidas de posição e variação, além da distribuição de ocorrência simplificada dos dados de UR, estão exibidas na Figura 2.11. Nota-se diferenças relevantes entre os anos como, por exemplo, as diferenças entre 2011, ano com registros de UR mais altas, e 2007, ano com registros mais baixos. A diferença entre as médias anuais de UR desses dois anos foi de 7%, 75% em 2007 e 82% em 2011. Em relação à distribuição de ocorrência das médias diárias de UR, em 2007 houve uma maior ocorrência entre 72°C e 80°C, enquanto que em 2011 a maior ocorrência manteve-se entre 75°C a 85°C.

Diferenças relevantes entre os anos também estão indicadas na Figura 2.12, a qual possui as médias mensais de UR para cada um dos 10 anos. As amplitudes entre as médias mensais do ano mais úmido e o mais seco de cada mês são expressivas, ficando em entre 5% e 14%, para abril e novembro, respectivamente. Tendo em vista que há diferenças de UR entre os anos, recomenda-se que estas sejam consideradas.

Figura 2.11 – Cada um dos 10 anos de dados de UR horária de Viçosa-MG.

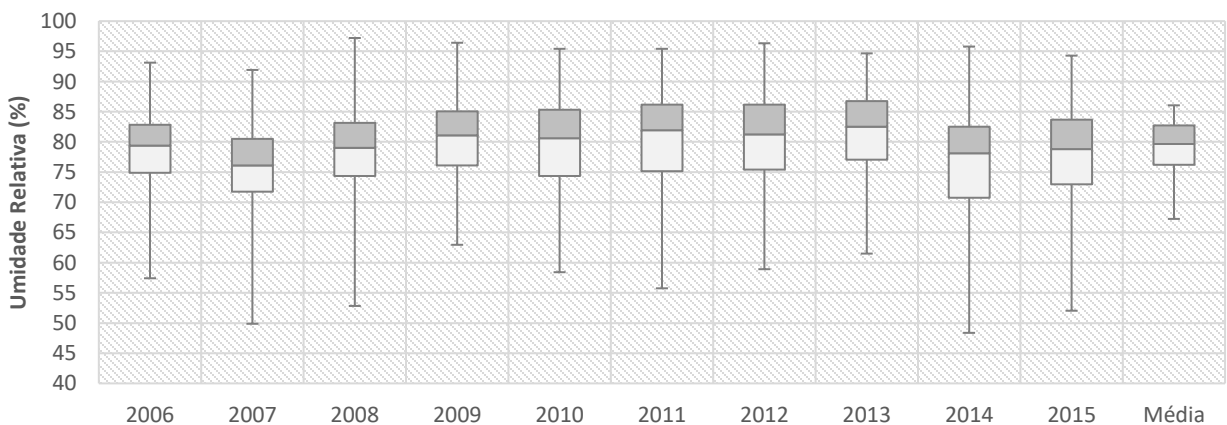
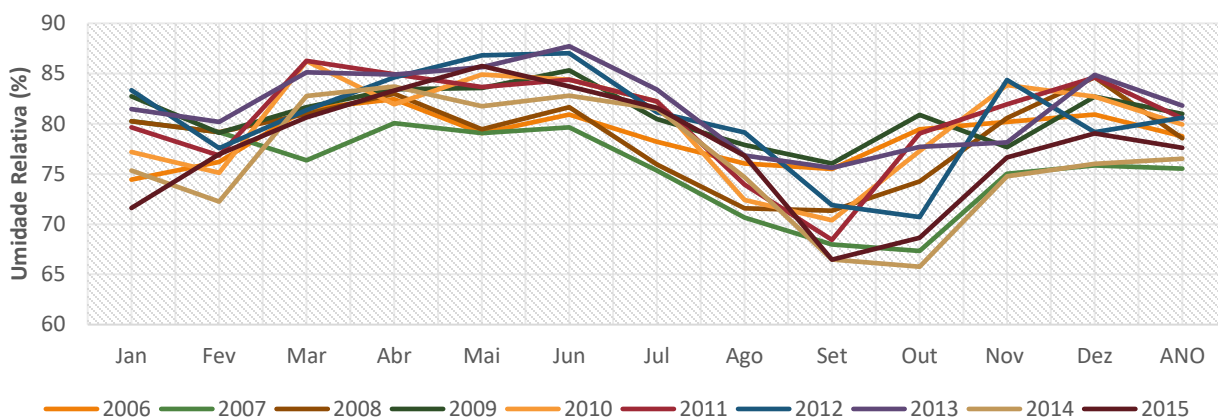


Figura 2.12 – Médias mensais dos 10 anos de dados climáticos disponíveis para Viçosa-MG.

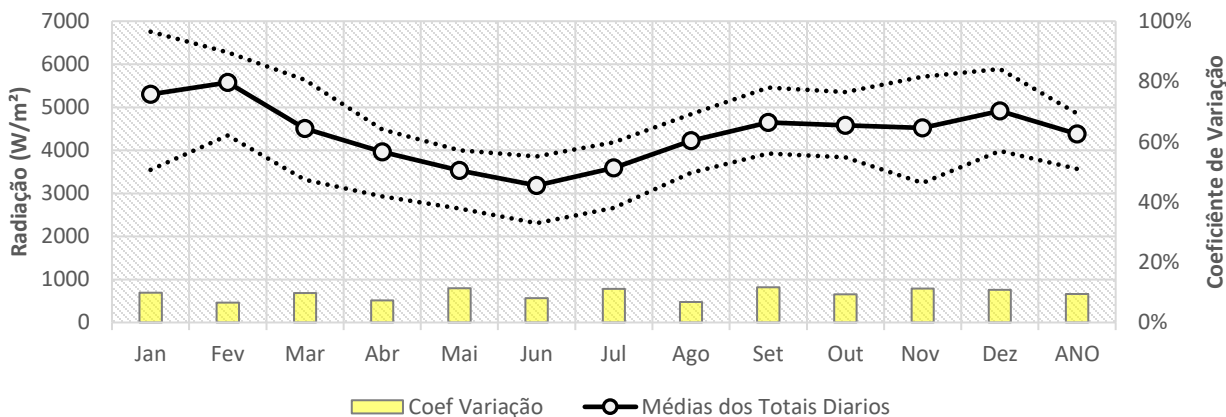


### 2.6.3 RADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

Na Figura 2.13 observa-se as médias mensais dos totais diários de radiação global horizontal. Foi utilizado o Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al, 2000) como base das análises a seguir, este estabelece um índice avaliação das radiações diárias que varia entre 6 MJ e 24 MJ, pouca e muita incidência de radiação ao longo do dia.

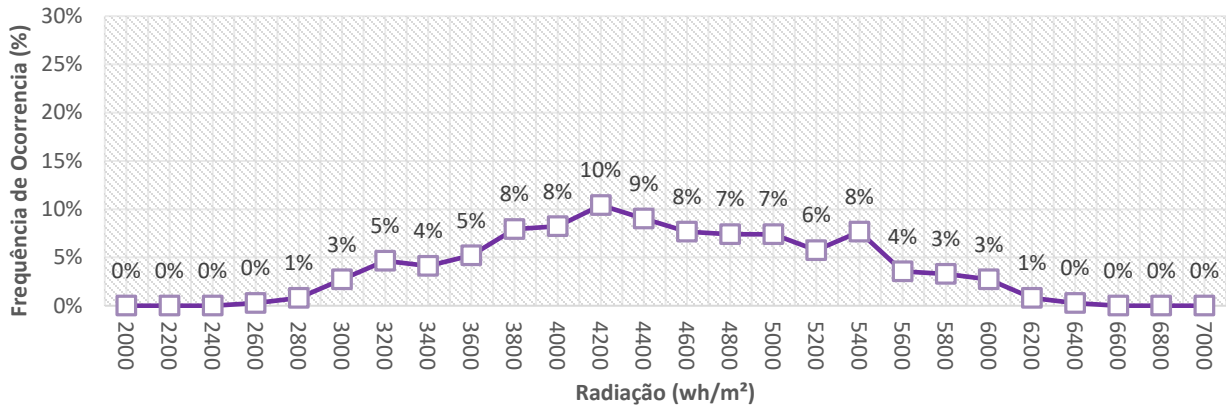
Pode-se inferir que no caso da Viçosa-MG que, em geral, as incidências de radiação solar são intermediárias quanto ao índice de avaliação mencionado, como mostrado a seguir. Os índices de radiação foram baixos entre os meses de inverno, o mês de junho apresentou médias de 3200 W/m<sup>2</sup> (10,8 MJ), e os meses de maio e julho apresentaram médias de 3500 W/m<sup>2</sup> (12,6 MJ). Já em relação aos meses de verão, os índices de radiação foram altos, como em fevereiro e dezembro, com médias de 5500 W/m<sup>2</sup> (18,9 MJ) e 5000 W/m<sup>2</sup> (18 MJ) respectivamente.

Figura 2.13 – Médias mensais dos totais diários de radiação global horizontal. Referentes aos 10 anos de dados coletados (linhas contínuas) e, ao ano mais quente e ano mais frio (linhas pontilhadas). Além do coeficiente de variação das médias (barras).



Observa-se na Figura 2.14 que o percentual de ocorrência de valores diários de radiação se manteve entre 2000 W/m<sup>2</sup> e 7000 W/m<sup>2</sup>. Em 45% dos dias do ano, a radiação total diária permaneceu entre 3400 W/m<sup>2</sup> e 4400 W/m<sup>2</sup> (12,2 MJ e 15,8 MJ). Estes dados reforçam a indicação de que Viçosa é uma cidade com incidências intermediárias de radiação.

Figura 2.14 – Frequência de ocorrência dos totais diários de radiação global.



### 2.6.3.1 Análise comparativa entre cada um dos 10 anos

As variações nos dados de radiação global horizontal, que ocorrem de um ano para outro nos 10 anos de dados coletados para a cidade de Viçosa-MG, foram ainda mais expressivas do que as identificadas para TBS e UR. Esta afirmativa pode ser verificada nas Figuras 2.15 e 2.16, as quais apresentam as características de cada um dos 10 anos de dados climáticos.

A Figura 2.15 observa-se que 2013 foi um ano com baixa incidência de radiação, cuja mediana dos totais diários de radiação foi 3500 W/m<sup>2</sup> (12,6 MJ). Já em 2014, a intensidade da radiação solar foi alta, cuja mediana foi 4800 W/m<sup>2</sup> (17,3 MJ). Em relação à distribuição de ocorrência, em 2013 houve uma maior ocorrência de totais diários de radiação entre 2500 W/m<sup>2</sup> e 4500 W/m<sup>2</sup>, enquanto em 2014 a faixa de maior ocorrência de radiação permaneceu entre 3800 W/m<sup>2</sup> e 6200 W/m<sup>2</sup>.

Na figura 2.16 nota-se as médias mensais dos totais diários de radiação para cada ano, e esta análise ratifica as conclusões anteriores. Verificou-se mudanças climáticas pequenas entre os meses de abril e julho, mas nos demais meses as diferenças foram expressivas. As amplitudes registradas nos meses de novembro e dezembro foram de 1500Wh/m<sup>2</sup> e, em janeiro a diferença entre os anos de 2008 e 2010 foi de 2000Wh/m<sup>2</sup>.

Figura 2.15 – Cada um dos 10 anos de dados dos totais diários de radiação solar global horizontal de Viçosa-MG.

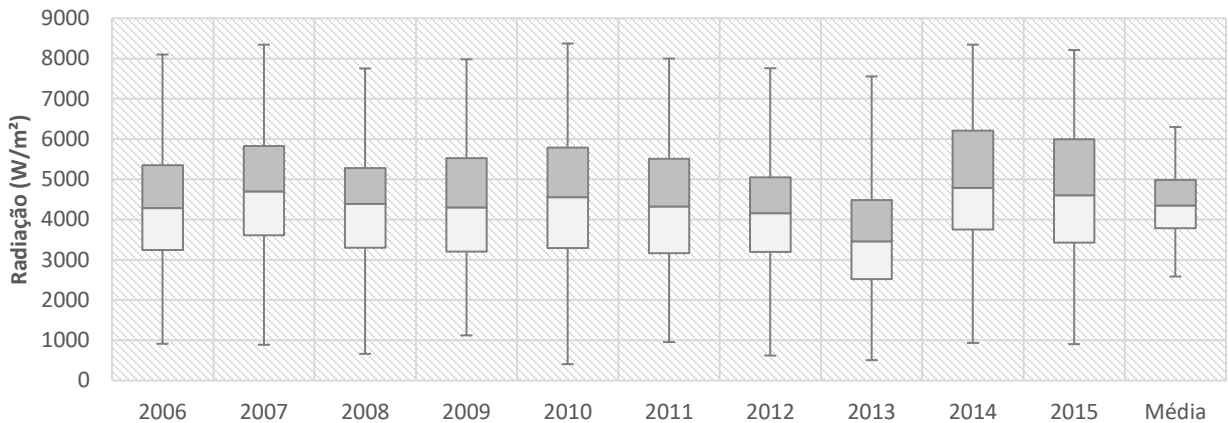
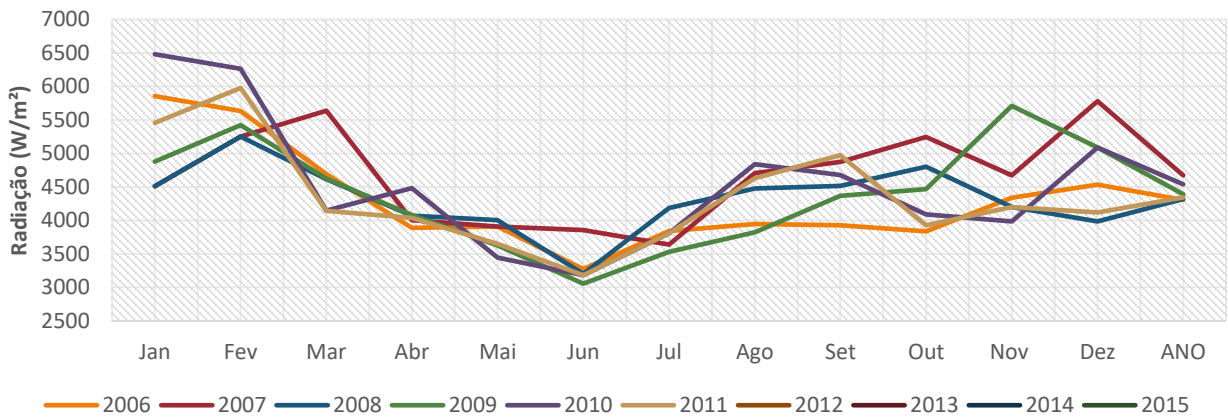


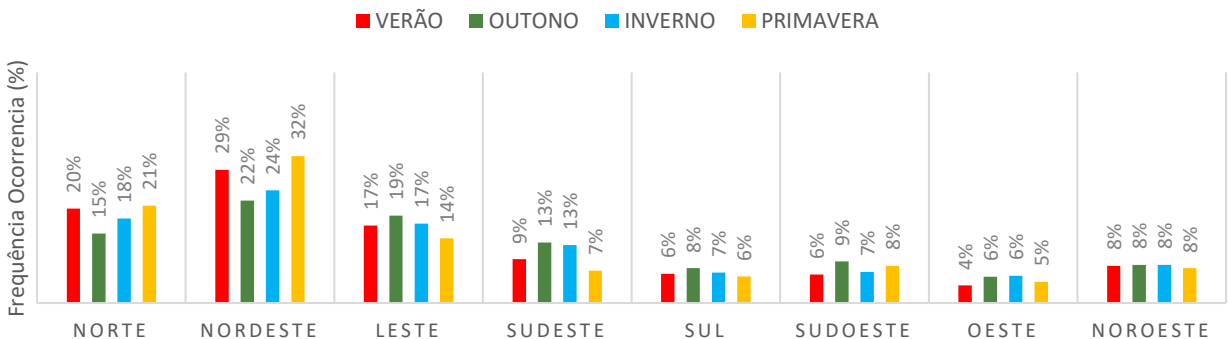
Figura 2.16 – Médias mensais dos 10 anos da radiação global horizontal disponíveis para Viçosa-MG.



#### 2.6.4 VELOCIDADE E DIREÇÃO DOS VENTOS

As figuras 2.17 e 2.18, apresentam a direção e velocidade dos ventos, registradas na cidade de Viçosa-MG. A figura 2.17, que apresenta a frequência de ocorrência das direções do vento nas 8760 horas do ano, mostra que a direção de vento com maior ocorrência é a nordeste, seguida das direções norte e leste, em todas as estações do ano.

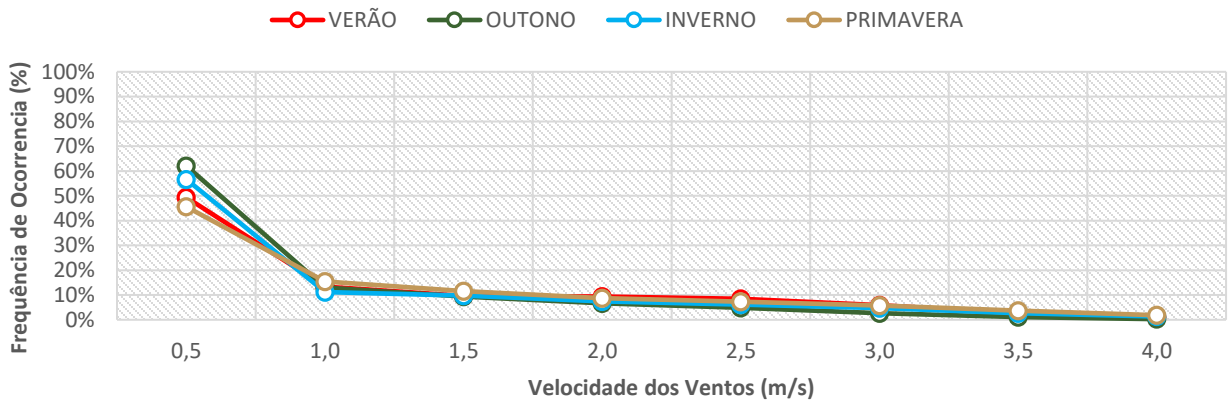
Figura 2.17 – Frequência de ocorrência dos registros horários da direção dos ventos.



A figura 2.18, em contrapartida, exibe a frequência de ocorrência das velocidades do vento nas 8760 horas do ano e, observa-se que a maior parte dos registros se manteve no intervalo entre 0m/s e 0,5m/s.

Esses resultados indicam uma condição estável do entorno da estação climática ao longo do período analisado. Vale destacar, que será necessária cautela ao aplicar esses dados como base para outros estudos pois, como visto, a topografia local interfere tanto na direção, quanto na velocidade dos ventos.

Figura 2.18 – Frequência de ocorrência dos registros horários da velocidade dos ventos.



#### 2.6.4.1 Análise comparativa entre cada um dos 10 anos

Observou-se que em relação as variações nos dados sobre os ventos, de um ano para outro. As figuras 2.19 e 2.20 tratam, respectivamente das frequências de ocorrência das direções e das velocidades do vento, nas 8760 horas do ano, para cada um dos 10 anos. Nota-se que em ambas as análises, não há grandes variações a serem apontadas. Quanto as direções dos ventos, nota-se que os anos de 2013, 2014 e 2015 tem variações de aproximadamente 10% de ocorrência, quanto a direção norte, e de aproximadamente -10% de ocorrência, quanto as direções leste e sudeste.

Ressalta-se que esses resultados possuem influência direta da estabilidade do entorno da estação climática ao longo do período analisado.

Figura 2.19 – Frequência de ocorrência dos registros horários da velocidade dos ventos.

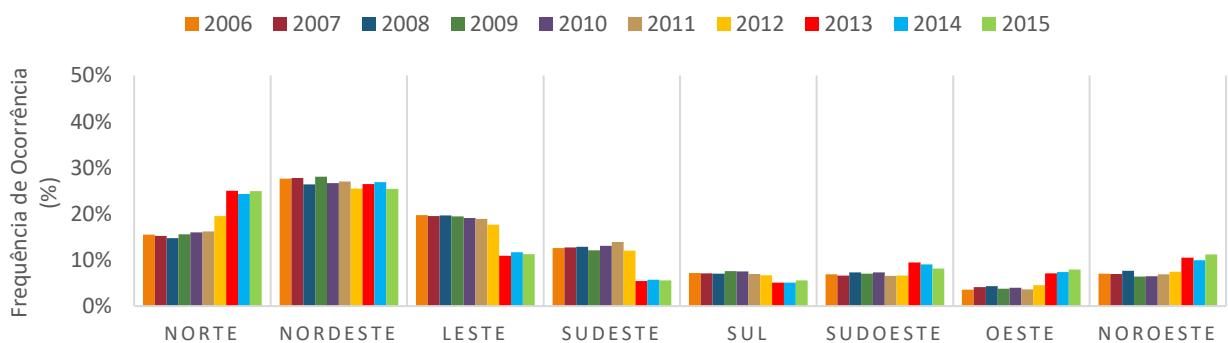
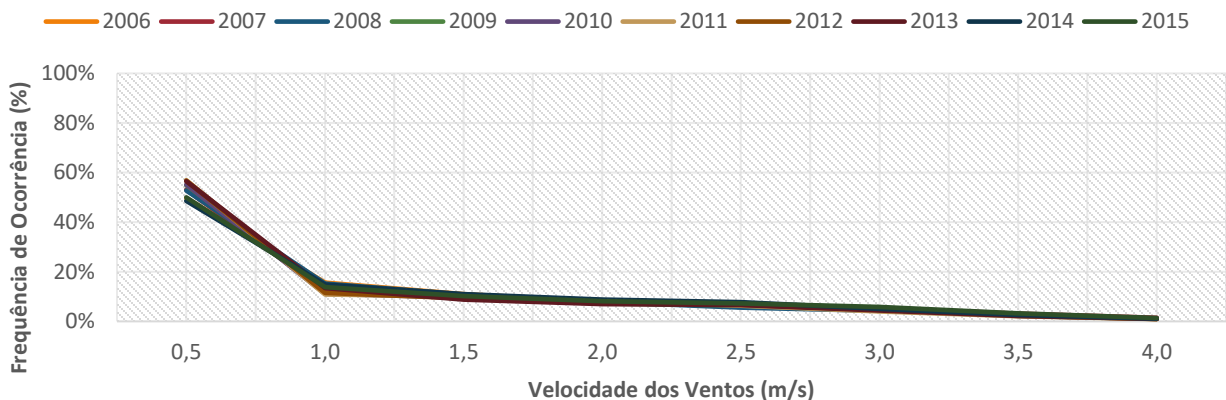


Figura 2.25 – Frequência de ocorrência dos registros horários da velocidade dos ventos.



## 2.7 CONCLUSÃO

O processo de desenvolvimento de arquivos climáticos possui como requisito básico a disponibilidade de dados climáticos adequados sobre a cidade. As principais exigências para a adequação destes dados são: (1) utilização de dados climáticos mensurados durante 10 a 30 anos (com o mínimo de 5 anos, mas com a exigência de atualização ao completarem 10 anos de dados disponíveis); (2) registros dos dados com uma frequência horaria; (3) é imprescindível a integridade dos dados, ou seja, que não haja lacunas e nem inconsistência; e (4) disponibilidade de diversos elementos do clima que usualmente não são medidos em estações climáticas brasileiras, o que exige o cálculo dos mesmos.

As etapas de coleta, tratamento e cálculo dos dados climáticos foram as etapas mais laboriosas, em termos de tempo, quando comparadas com as demais fases necessárias para o desenvolvimento de um arquivo climático. É fundamental que estas etapas sejam muito bem conduzidas pois, qualquer problema ou erro presente nos dados climáticos serão transferidos para o arquivo e, conseqüentemente, irão gerar imprecisões nos resultados de qualquer análise que utiliza deste.

Neste estudo foram coletados 10 anos e 2 meses de dados climáticos referentes a cidade de Viçosa-MG, porém, devido ao número excessivo de lacunas, imprecisões e inconstâncias encontradas, vários meses foram descartados: em 2005 apenas o mês de dezembro foi usado; em 2006, o mês de maio foi descartado; em 2007, janeiro e fevereiro foram descartados; em 2009, dezembro foi descartado; em 2010, março, junho e julho foram descartados; em 2015, novembro foi descartado. Além de todos os dados dos outros meses deste período de estudo precisaram passar por ajustes.

No Brasil, é difícil a coleta de dados de todos os elementos do clima exigidos para um arquivo climático, por esta razão é necessário a estimativa de elementos do clima complementares aos coletados. Neste estudo, foram obtidos dados referentes aos seguintes elementos do clima: (1) temperatura de bulbo seco

(instantânea, máxima e mínima); (2) temperatura de ponto de orvalho (instantânea, máxima e mínima); (3) umidade relativa (instantânea, máxima e mínima); (4) pressão atmosférica (instantânea, máxima e mínima); (5) velocidade e direção do vento; (6) radiação global horizontal; e (7) precipitação. A partir desse conjunto de dados, todos os outros parâmetros exigidos para a criação de um arquivo climático foram calculados.

Após o procedimento de tratamento de todos os dados, os mesmos foram analisados estatisticamente. As análises indicaram que Viçosa-MG é uma cidade com temperaturas de bulbo seco amenas ao longo do ano, apresenta índices de umidade relativa elevadas por todo o ano e, incidências de radiação intermediárias, com níveis altos em fevereiro e nos meses vizinhos, ao mesmo tempo possuem níveis relativamente baixos em junho e nos meses vizinhos. Já em relação às condições de conforto, a cidade apresenta principalmente, taxas de desconforto por frio nos meses de inverno e taxas de desconforto por excesso de umidade durante todo o ano, em ambos os casos o desconforto ocorre no período noturno e no início da manhã.

Outra análise estatística conduzida foi a avaliação de variações interanuais nos dados dos elementos do clima, que ocorram de um ano para outro, comparando os 10 anos de dados coletados. As diferenças identificadas na análise comparativa entre os anos foram expressivas, verificou-se diferenças de 2°C em relação à média anual de temperatura, de 7% em relação às médias anuais de umidade relativa e de 1300W/m<sup>2</sup> quanto às médias anuais dos totais diários de radiação global horizontal. Destaca-se que, estes aspectos necessitam ser levados em consideração ao utilizá-los para atividades profissionais e pesquisas acadêmicas, bem como, ao usar arquivos climáticos que consistem tradicionalmente de apenas um ano referência. O que leva à seleção do ano de representativo do clima ser muito importante.

Este trabalho tem como limitação não ter abordados os novos métodos de ajuste de microclimas (HENSEN, 1999), que é um tema bastante discutido pela comunidade científica, já que as estações climatológicas, geralmente, estão localizadas fora do perímetro urbano, em áreas abertas e com bastante vegetação. Recomenda-se um ajuste nos dados climáticos conforme as características urbanas da região estudada, bem como, do local que a edificação será construída, principalmente nos grandes centros urbanos. Assim, serão necessários trabalhos futuros, sobre os ajustes a serem realizados nos dados climáticos relacionados aos diferentes microclimas de uma mesma cidade.

## 2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ASHRAE. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. USA, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2013, Chapter F6.

BARNABY, C S; CRAWLEY, D B. Weather data for building performance simulation In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: SponPress, 2011, cap.3, p.37-55.

CARLO, J; LAMBERTS, R. **Processamento de Arquivos Climáticos para Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. Florianópolis. SC: Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2005. Relatório.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 7-26, 2010.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª edição. New York: John Wiley & Sons, 2013.

ENERGYPLUS. **Auxiliary Programs - Weather Converter Program**. 1ª edição. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2015.

HENSEN, J.; LAMBERTS, R. Introduction to building performance simulation. In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. New York: Spon Press, 2011, p. 1- 14.

INMET. **Dados Meteorológicos: Estações Automáticas**. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br> >. Acesso em: 1 de Agosto de 2016.

LAMOTTA, M. G.; LABAKI, L. C. Dez Anos Depois: Estudo do Clima de Campinas. Caracterização e Proposição de Recomendações de Projeto para Climas Compostos em 1998 e em 2008 – O Que Mudou? In: X Encontro Nacional e VI Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído, Natal, 2009, **Anais...** Natal, ENCAC-ELAC 2009. CD-ROM.

MARIA, A.; FARIA, T. Um Retrato da Evolução Urbana de Viçosa-MG: Impactos da Federalização da UFV sobre a Cidade (1969-2014). In: II Seminário Nacional de Planejamento e Desenvolvimento. Joinville, 2014. **Anais...** Joinville, XI SNPD, 2014.

MUNEER, T; Gueymard, C; Kambezidis, H. **Solar Radiation and Daylight Models**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

PEREIRA, I; ALVES, T; PINHEIRO, R; ASSIS, E. Metodologia de Tratamento de Dados Climáticos para Inserção em Softwares de Simulação Energética de Edifícios. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, São Paulo, 2004, **Anais...** São Paulo, clACS-ENTAC 2004. CD-ROM.

PEREZ R; INEICHEN P; SEALS R; MICALSKY J; STEWART R. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44: p. 271-289, 1990.

PITTIGLIANI, M. Controle de Qualidade de Dados Hidrometeorológicos do Simepar. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2001. **Anais...** Rio de Janeiro, XI CBMET, 2001.

REINHART. Daylight performance predictions. In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: Spon Press, 2011, cap. 9, p. 235- 276.

ROCHA, V.; FIALHO, E. Uso da terra e suas implicações na variação termo-higrométrica ao longo de um transeito campo-cidade no município de Viçosa-MG. **Revista de Ciências Humanas**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 64-77, 2010.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. 2012**. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>; Acesso: 05/11/2013.

SREBRIC, J. Ventilation performance prediction. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: Spon Press, 2011. cap. 6, p. 143-179.

## 3 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS TRADICIONAIS DE SELEÇÃO DE DADOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

A elaboração de arquivos climáticos exige, além do processo de coleta dos dados locais, uma série de procedimentos posteriores: avaliação da consistência dos dados coletados; tratamento de lacunas e inconsistências encontradas; cálculo de outros elementos do clima - necessários, mas que eventualmente podem não ter sido encontrados na etapa de coleta dos dados; e a seleção de um ano climático representativo da série de anos de dados climáticos coletados (BARNABY E CRAWLEY, 2011). Mas, é este último o procedimento que gera as maiores incertezas a respeito dos arquivos climáticos, afinal, nesta etapa será selecionado um ano de dados climáticos que terá a função de representar toda a complexidade climática de uma cidade. Segundo Chow et al (2006), é imprescindível a realização de estudos com a finalidade de garantir que o arquivo climático desenvolvido para uma cidade seja de fato a melhor representação possível das ocorrências climáticas mais usuais, identificadas em longos períodos de medição.

Em relação aos métodos de seleção do ano climático representativo, há diversos métodos propostos por vários países do mundo, cada um com o objetivo de resolver uma determinada incerteza e de atender as características climáticas de um determinado país. Vários autores (CRAWLEY, 1998; HENSEN, 1999; ARGIRIOU et al, 1999; ZANG et al, 2012; FOREJT, HENSEN e DRKAL, 2006; CHOW et al, 2006; PERNIGOTTO, PRADA E HENSEN, 2014) destacam como um dos principais métodos para desenvolvimento de arquivos climáticos, o TMY 3 (WILCOX e MARION, 2008). Este é o método de desenvolvimento de arquivos climáticos utilizado oficialmente nos EUA, além de ser o método mais difundido internacionalmente, e também é o método recomendado pelo programa computacional de simulação *EnergyPlus* (ENERGY PLUS, 2015). Outro método importante, utilizado nos EUA, também muito recomendado, é o WYEC2 (ASHRAE, 1997). Além destes, há vários outros métodos, de outras partes do mundo, que são igualmente aceitos e são bem difundidos pela comunidade acadêmica internacional, com destaque para o TRY Europeu (*European Test Reference Year*, ou Ano de Referência Teste Europeu), que é atualmente o método oficial da comunidade europeia e está descrito pela norma EN ISO 15927-4 (CEN, 2005). Outros constantemente citados nesta área são: o DRY (Design Reference Year, ou Ano de Referência para Projeto) (LUND, 1991), desenvolvido por pesquisadores na Dinamarca; e o TRY europeu proposto por Festa e Ratto (1993). Neste último, segundo os autores, o objetivo era propor modificações nos procedimentos do método DRY, mas acabou resultando em um método novo, muito similar aos métodos DRY e TMY em conceito, mas diferente quanto aos procedimentos estatísticos.

Já no Brasil, há centros de pesquisa que desenvolvem e disponibilizam arquivos climáticos de diversas cidades brasileiras, como o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (Labeee) e a Roriz Engenharia Bioclimática. A preocupação inicial desses centros tem sido gerar os arquivos climáticos para o máximo de cidades possível, afim de possibilitar que a prática de simulação se torne abrangente a várias regiões do Brasil, e não apenas aos grandes centros (RORIZ, 2012). Além disso, foi utilizado como método para seleção dos dados climáticos de referência que compõem os arquivos climáticos, o método TRY (Test Reference Year, ou Ano de Referência Teste) (NCDC, 1976), desenvolvido no início da década de 70, e substituído ao final da mesma década, e que já é considerado inadequado pela comunidade científica (CRAWLEY, 1998; CHOW et al, 2006; PERNIGOTTO, PRADA E HENSEN, 2014).

Houve também uma proposta de adaptação do método TMY para o Brasil (CARLO e LAMBERTS, 2005 e RORIZ, 2012), mas esta tinha foco apenas em simplificar a aplicação do método ao invés de adaptá-la para o caso brasileiro. Essa proposta não considerou a aplicação da função estatística *Finkelstein-Scharfer*, que é a principal característica do TMY americano. Portanto, o método TMY brasileiro diferenciou-se do método TRY apenas por utilizar meses de referência, ao invés de um ano de referência.

Ainda não há estudos no Brasil comparando os diversos métodos de seleção do ano climático representativo que vem sendo utilizados pelo mundo, para encontrar aquele que seja o mais adequado. Nem há pesquisas que apresentem proposta para o desenvolvimento de um método brasileiro de desenvolvimento de arquivos climáticos. Ao contrário, no contexto internacional, há vários desses estudos com esse foco, e é possível destacar o trabalho de Crawley (1998), que comparou vários métodos de desenvolvimento de arquivos climáticos com simulações multi-anuais. Neste trabalho, o autor apresentou os arquivos climáticos mais adequados para simulação, e desencorajou o uso do método TRY americano. Outra publicação relevante é a de Argiriou et al (1999), em que foram comparados 17 arquivos climáticos desenvolvidos para uma mesma cidade, utilizando diferentes métodos, e ao final, o arquivo com os melhores resultados foi desenvolvido com uma adaptação do método TRY de Festa e Ratto (1993).

O trabalho de Zang et al (2012) discute qual o método a ser utilizado no desenvolvimento de arquivos climáticos para 35 localidades na China. Yang et al (2007) e Yang et al (2011) também seguiram esta mesma linha de estudo, e discutiram métodos para geração de arquivos climáticos, baseados no TMY3, mas adaptados aos diferentes climas do vasto território da China. Said e Kadry (1994) também propuseram um método de geração de arquivos climáticos, baseados no TMY, mas adaptado para a Arábia Saudita. Kalogirou (2003) seguiu esta mesma tendência de pesquisa para o Chipre.

O atraso nessa área de pesquisa no Brasil é devido ao início tardio da popularização de pesquisas relacionadas com simulação computacional. Apenas em 2001 o Brasil promulgou a primeira lei de eficiência energética de edificações (Lei nº 10295), que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, lei esta que estabeleceu que deveriam ser criados parâmetros referenciais para a eficiência energética em edificações. Além disso, havia uma grande limitação quanto à disponibilidade de dados climáticos adequados para confecção de arquivos climáticos. A maioria das estações climáticas eram focadas apenas em prestar serviços para aeroportos, ou para uso agrário, e eram poucas as estações que contavam com infraestrutura para realizar medições automatizadas. Somente no ano de 2001, o Brasil passou a investir na implementação de estações climáticas com registros em frequência horária (INMET, 2016; RORIZ, 2012).

Assim, este estudo tem por objetivo fazer uma análise comparativa de cinco métodos de seleção do ano climático representativo para identificar aquele que resulta no arquivo climático que melhor representa as ocorrências climáticas mais usuais identificadas em longos períodos de medição para a cidade de Viçosa-MG. Serão comparados arquivos climáticos desenvolvidos a partir da mesma base de dados, usando os seguintes métodos: os 2 principais métodos utilizados no Brasil, o TRY e o TMY\_br; 2 métodos utilizados nos EUA, o TMY3 e o WYEC2; e método mais utilizado na Europa, o TRY europeu da EN ISO 15927-4.

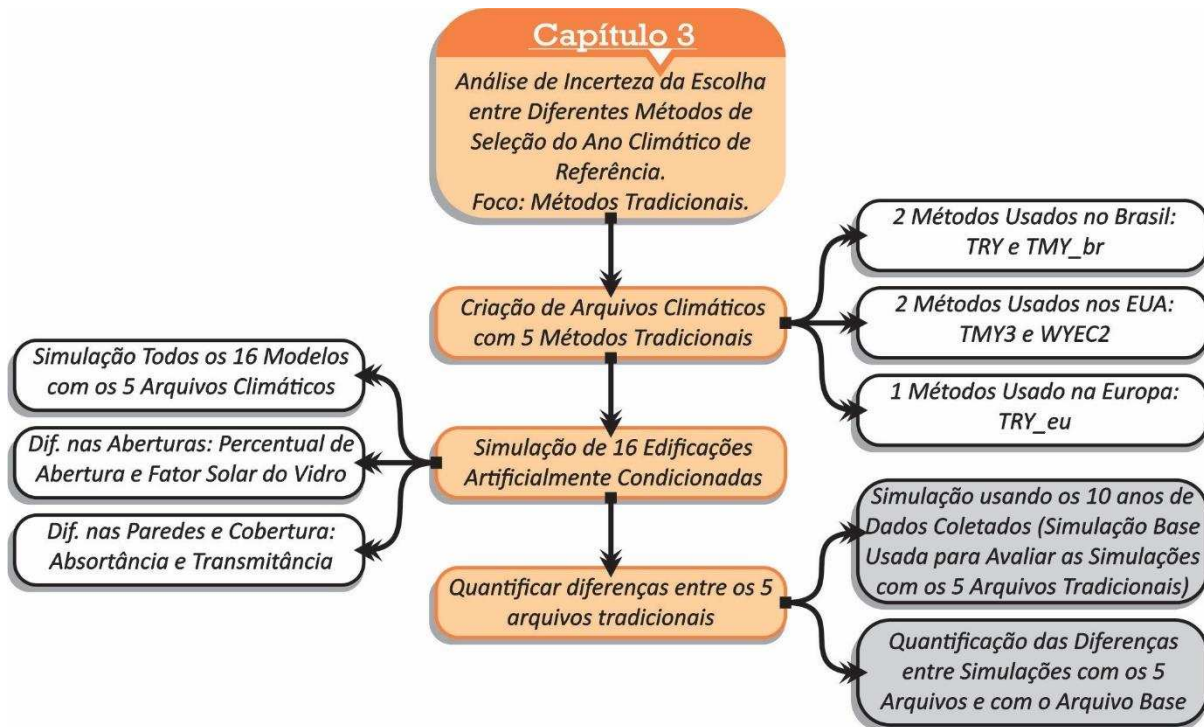
## 3.1 MÉTODO

### 3.1.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 3.1 apresenta uma síntese da etapa da pesquisa apresentada nesse capítulo. Inicialmente foram desenvolvidos 5 arquivos climáticos para a cidade de Viçosa-MG, usando 5 métodos tradicionais usados no Brasil e no mundo. Para avaliar comparativamente os 5 arquivos climáticos e as incertezas da escolha entre os métodos, foram realizadas simulações com 16 modelos de edificações, com características diferentes. Foi importante simular mais de um tipo de edificação, pois edificações com características diferentes têm sensibilidades diferentes às mudanças nos dados climáticos.

Os 5 arquivos climáticos foram comparados entre si e, também foram quantificadas as diferenças em relação ao arquivo climático multianual de 10 anos, discutido no capítulo anterior.

Figura 3.1 – Síntese dos métodos usados no capítulo 3.



### 3.1.2 DESENVOLVIMENTO DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS

Os dados utilizados na confecção dos arquivos climáticos são oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016), referentes à série histórica de dados entre novembro de 2005 a dezembro de 2015. Os elementos do clima coletados na estação em questão foram: temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, radiação global horizontal, precipitação, velocidade e direção do vento. A medição e registro dos dados é realizada com uma frequência horária que, segundo Barnaby e Crawley (2011) é um padrão de coleta adequado para confecção de arquivos climáticos para uso em software de simulação termo energética.

Segundo Barnaby e Crawley (2011) e Roriz (2012), dados medidos costumam apresentar lacunas e valores inconsistentes, assim é necessário um tratamento preliminar dos dados coletados para completar a série de dados e garantir a confiabilidade do arquivo. Nesse caso, foram aplicados procedimentos descritos por Carlo e Lamberts (2005) para completar dados ausentes, exceto para a temperatura do ponto de orvalho, cujas lacunas foram calculadas a partir dos dados horários de temperatura de bulbo seco e umidade relativa, com os modelos matemáticos de cálculo especificados por e Muneer (2004) e ASHRAE Handbooks Fundamentals (2013). Por fim, para complementar o tratamento, a consistência dos dados foi testada, segundo recomendações de Pittigliani (2000) e ENERGYPLUS (2015), para controle da qualidade.

Além disso, alguns parâmetros, fundamentais para a confecção de arquivos climáticos, mas que não são medidos na estação climática onde os dados foram coletados, tiveram que ser calculados. Os parâmetros em questão foram: Radiação Extraterrestre Global Horizontal, calculado segundo Muneer (2004); os demais dados de irradiação, calculados segundo Duffie e Beckman (1991) e Muneer (2004); além de dados de iluminância, calculados segundo Perez et al (1990) e Muneer (2004).

Após o tratamento completo dos dados, o passo seguinte consistiu na determinação do ano climático de referência. Foram desenvolvidos cinco arquivos climáticos, usando os mesmos dados climáticos da cidade de Viçosa-MG, mas cada um com métodos diferentes: o TMY 3 (WILCOX e MARION, 2008), o WYEC 2 (ASHRAE, 1997), o TRY Europeu (CEN, 2005), o TRY original (NCDC, 1976), o TMY brasileiro (CARLO et al, 2005 e RORIZ, 2012). Além do arquivo climático multianual com todos os 10 anos de dados climáticos coletados para Viçosa-MG, usado como base comparativa das análises. Estes métodos serão apresentados nos itens a seguir.

Os arquivos obtidos foram compilados para os formatos compatíveis com os programas de simulação computacional *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2015). E também foi criado um arquivo de extensão “.csv”, usado para consulta e manipulação dos dados, pelos usuários, por meio de uma planilha eletrônica.

### 3.1.2.1 TRY

O método TRY consiste na análise das médias mensais de temperatura de bulbo seco da série de anos de dados climáticos coletados e a seleção de um desses como o ano de referência do clima. De acordo com, este método tem como procedimentos: (1) o cálculo das médias mensais de temperatura de bulbo seco de toda a série de dados climáticos; (2) eliminação gradativa de anos de dados que contêm temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas), até permanecer apenas um ano, que será o ano climático de referência (NCDC, 1976).

A eliminação é feita seguindo a classificação dos meses do ano, quanto a ordem de importância para análises termo energéticas. Este método propõe a seleção de um ano completo, por isso, quando um mês é considerado extremo e é eliminado, elimina-se todo o ano ao qual aquele mês pertence. Por fim, o ano que sobrar sem nenhum mês eliminado, é considerado o ano de referência (NCDC, 1976). A Tabela 3.1 mostra a composição do arquivo climático TRY.

Tabela 3.1 - Composição do arquivo climático TRY.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>TRY</b>	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008	2008

### 3.1.2.2 TMY br

O método TMY, adaptado para o Brasil, se assemelha ao que foi apresentado sobre o método TRY, porém a diferença entre os métodos é que agora as análises são feitas para cada mês independentemente, assim, os meses selecionados podem ser de anos distintos, e posteriormente é feita a montagem de um ano climático artificial, com a junção dos meses climáticos de referência selecionados. Em geral os procedimentos consistem em calcular as médias mensais de temperatura de toda a série de dados coletados, e mês a mês independentemente, eliminar gradativamente aqueles com médias mensais de temperaturas mais altas e mais baixas, até permanecer apenas um, com o valor mediano e que será o mês climático de referência. Por fim, com a junção dos meses climáticos de referência, é montado o ano climático de referência (CARLO et al, 2005). A Tabela 3.2 mostra a composição do arquivo climático TMY\_br.

Tabela 3.2 - Composição do arquivo climático TMY\_br.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<i>TRY</i>	2006	2009	2013	2010	2008	2008	2013	2009	2013	2008	2013	2007

### 3.1.2.3 TMY3

O conceito do método internacional TMY3 se difere dos outros métodos já descritos. Os métodos anteriores buscam a seleção de um ano de referência que seja o ano com menos extremos de temperatura de bulbo seco, enquanto o conceito do TMY3 consiste em identificar a distribuição de probabilidade acumulada (DPA) de todos os elementos do clima, para assim, selecionar um ano de referência que tenha a DPA mais semelhante com a DPA de toda a série de dados coletados (WILCOX, MARION, 2008).

Assim como a adaptação nacional do método TMY, também no TMY3 as análises são feitas para cada mês independentemente, até que se tenha 12 meses de referência, podendo ser de anos distintos, que irão compor o arquivo climático foram serão aplicadas separadamente para cada mês do ano (WILCOX, MARION, 2008):

\* **Primeira etapa:** Calcular as médias diárias de 9 parâmetros que serão utilizados nas análises, são eles: máximas, mínimas e médias diárias de Temperatura de Bulbo Seco; máximas, mínimas e médias diárias de Temperatura de Ponto de Orvalho; máximas e médias diárias de Velocidade dos Ventos; totais diários de Radiação Global Horizontal; totais diários de Radiação Direta Normal.

\* **Segunda etapa:** Calcular a distribuição de probabilidade acumulada (DPA) para cada um dos parâmetros da primeira etapa. É necessário calcular a DPA de cada ano individualmente e de toda série de dados coletados.

\* **Terceira etapa:** Estabelecer um coeficiente de relação entre DPA geral e as DPA de cada ano individualmente, para cada um dos parâmetros. Este coeficiente será definido pela aplica da função estatística Finkelstein-Schafer (FS).

\* **Quarta etapa:** Fazer o balanço dos coeficientes FS calculados na etapa anterior, com o peso para os parâmetros. Os elementos do clima têm pesos distintos entre si, definidos pela relevância que os mesmos têm em análises termo energéticas, tendo em vista os padrões climáticos dos EUA. Nesta etapa é feita a multiplicação dos coeficientes FS pelos pesos de cada parâmetro.

\* **Quinta etapa:** Somar os FS balanceados de cada parâmetro, para cada ano, que resultará na diferença estatística entre a DPA geral e as DPA de cada ano. O ano que apresentar a diferença mais baixas, será o ano selecionado para o mês analisado.

Depois da aplicação do método para cada mês do ano, foi montado o ano climático de referência pela junção dos meses selecionados (WILCOX, MARION, 2008). A Tabela 3.3 mostra a composição do arquivo climático TMY3.

*Tabela 3.3 - Composição do arquivo climático TMY3.*

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>TRY</b>	2011	2015	2008	2015	2010	2006	2007	2014	2010	2008	2013	2010

#### 3.1.2.4 WYEC2

O método WYEC2 tem como conceito uma proposta intermediária em relação aos métodos com procedimentos simplificado, como é o caso do TRY, e os métodos com procedimentos complexos, como o TMY3. Assim, como o TMY3, este método busca selecionar um mês de referência que tenha a maior semelhança possível com todos os dados coletados deste mesmo mês. Mas em contrapartida, é composto de métodos estatisticamente mais simplificados.

Os procedimentos, que são aplicados separadamente para cada mês do ano, em linhas gerais consistem em: (1) calcular as médias mensais de temperaturas de bulbo seco e as médias mensais dos totais diários de radiação global horizontal, para cada ano separadamente; (2) calcular a média geral das médias calculadas para cada ano, tanto para temperatura quanto para radiação; (3) selecionar o ano que apresentou a média individual mais próxima da média geral (ASHRAE, 1997).

A Tabela 3.4 mostra a composição do arquivo climático WYEC2.

*Tabela 3.4 - Composição do arquivo climático WYEC2.*

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>TRY</b>	2011	2015	2014	2008	2010	2008	2007	2007	2014	2015	2015	2010

### 3.1.2.5 TRY\_eu

O conceito do método internacional TRY\_eu é semelhante ao método TMY3. Consiste em identificar a distribuição de probabilidade acumulada (DPA) de todos os parâmetros, para assim, selecionar um ano de referência que tenha a DPA mais semelhante com a DPA de toda a série de dados coletados (CEN, 2005).

Assim como a adaptação nacional do método TMY3, no TRY\_eu as análises são feitas para cada mês independentemente, até que se tenha 12 meses de referência, podendo ser de anos distintos, que irão compor o arquivo climático.

O método pode ser explicado de forma sintetizada por meio das 5 etapas principais. Estas serão aplicadas separadamente para cada mês do ano (CEN, 2005):

\* **Primeira etapa:** Calcular a média diária dos principais elementos do clima definidos para o país. A escolha é livre, os parâmetros devem ser definidos pelo desenvolvedor do arquivo. A norma recomenda os parâmetros TBS, UR e Radiação Global, caso não haja informações sobre os principais parâmetros climáticos do país.

\* **Segunda etapa:** Calcular a distribuição de probabilidade acumulada (DPA) para cada um dos parâmetros da primeira etapa. É necessário calcular a DPA de cada ano individualmente e de toda série de dados coletados.

\* **Terceira etapa:** Estabelecer um coeficiente de relação entre DPA geral e as DPA de cada ano individualmente, para cada um dos parâmetros. Este coeficiente será definido pela aplicação da função estatística Finkelstein-Schafer (FS).

\* **Quarta etapa:** O método não indica pesos diferenciados para cada parâmetro climático, mas diz que o desenvolvedor pode aplicar pesos caso existam tais informações para o país ou região. Caso se opte pelo uso de pesos, esta etapa consiste em fazer o balanço dos coeficientes FS calculados na etapa anterior, com o peso definido para os parâmetros. Como não existem estudos que indiquem estes pesos para o Brasil, esta etapa não foi realizada.

\* **Quinta etapa:** Somar os FS de cada parâmetro, para cada ano, que resultará na diferença estatística entre a DPA geral e as DPA de cada ano. Os 3 anos que apresentarem as diferenças mais baixas, são selecionados como os 3 candidatos mais aptos.

\* **Sexta etapa:** Para cada um dos 3 candidatos selecionados, são calculados os desvios padrão entre as médias dos dados de velocidade e direção de ventos para o ano candidatos e as médias de toda a série de dados coletados.

Depois da aplicação do método para cada mês do ano, foi montado o ano climático de referência pela junção dos meses selecionados (CEN, 2005). A Tabela 3.5 mostra a composição do arquivo climático TRY\_eu.

Tabela 3.5 - Composição do arquivo climático TRY\_eu.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>TRY</b>	2011	2015	2008	2015	2010	2006	2007	2014	2010	2008	2013	2010

### 3.1.2.6 MÉTODO MULTIANUAL COM TODOS OS DADOS COLETADOS

Este método multianual consiste em realizar uma simulação com um arquivo climático composto de todos os dados climáticos coletados que estejam aptos a serem processados. Neste estudo, foram coletados dados entre novembro de 2005 a dezembro de 2015, da cidade de Viçosa-MG. Porém, nem todos esses dados estavam aptos para uso, sendo que alguns meses foram corrigidos e utilizados e outros foram descartados por excesso de erros ou lacunas. A Tabela 3.6 mostra a relação dos dados aptos e dos descartados entre os 10 anos de dados climáticos coletados.

Tabela 3.6 - Composição do arquivo climático multianual.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>2005</b>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Desc	Apto
<b>2006</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Desc	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2007</b>	Desc	Desc	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2008</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2009</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Desc
<b>2010</b>	Apto	Apto	Desc	Apto	Apto	Desc	Desc	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2011</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2012</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2013</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2014</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2015</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Desc	Apto	Apto	Apto

Como havia meses de dados que foram descartados, se tornou inviável simplesmente montar os anos no arquivo climático multianual na sua ordem convencional, pois assim haveriam lacunas, o que não é aceitável na montagem de um arquivo climático. Para solucionar esse problema, cada mês descartado foi substituído por dados do mesmo mês do ano seguinte, exceto para o mês de setembro de 2015, no qual utilizou-se os dados de setembro de 2014. O ano de 2005 foi descartado por conter apenas o mês de dezembro. Assim, foi criado um arquivo climático composto de 10 anos de dados climáticos.

### 3.1.3 DESCRIÇÃO DAS EDIFICAÇÕES MODELADAS E SIMULADAS

Para analisar as diferenças nos resultados de simulação causadas pela escolha entre os 5 diferentes arquivos climáticos, os mesmos foram usados em simulações termo energéticas idênticas. Foram simulados com cada arquivo climático, 16 modelos de edificações artificialmente condicionadas com características diferentes, para avaliar paralelamente se tipos de edificações diferentes tem sensibilidades diferentes à mudança do arquivo climático.

Os 16 modelos possuem 2025 m<sup>2</sup> de área total de piso, com geometrias, número de pavimentos e zoneamentos térmicos idênticos. Foi usado um zoneamento térmico contendo cinco zonas, sendo uma central e quatro periféricas (Figuras 3.2 e 3.3). A variação entre eles se deu em relação aos seguintes fatores: percentual de aberturas envidraçadas, o fator solar do vidro, além da transmitância e absortância dos materiais de fechamento opacos das paredes, pisos e coberturas. As Tabelas 3.7 e 3.8 descrevem as características usadas em cada um dos 16 modelos. Vale destacar que, para configurar o condicionamento artificial, foi utilizado o recurso do *EnergyPlus* chamado *Ideal Loads* (cargas térmicas ideal), este permite a inclusão de um sistema de condicionamento artificial ideal, ou seja, com eficiência de 100%.

Figura 3.2 - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 20%. E apresentação do zoneamento térmico dos modelos simulados.

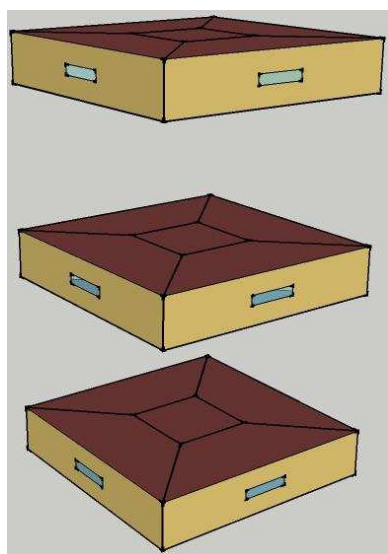


Figura 3.3 - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 70%. E apresentação do dimensionamento dos modelos simulados.

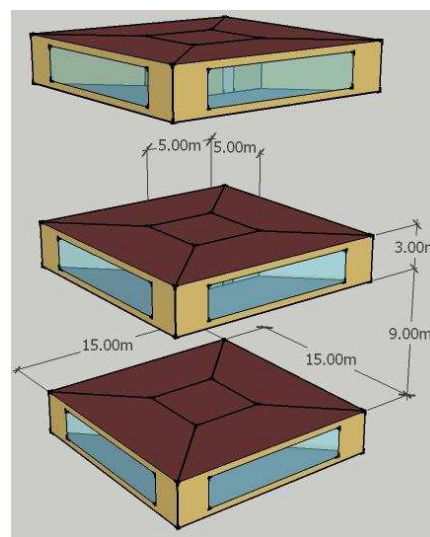


Tabela 3.7 - Características construtivas dos modelos simulados.

<b>Características Formais</b>		
Razão Entre as Fachadas	1:1	
Dimensão das Fachadas Laterais	15m	
Número de Pavimentos	9	
<b>Características das Aberturas</b>		
Percentual de Abertura	20%	70%
Fatos Solar do Vidro	0,25	0,67
<b>Características das Paredes, Pisos e Coberturas</b>		
Transmitância	0,5	4,0
Absortância	0,3	0,7
Capacidade Térmica	200	

Tabela 3.8 – Descrição das características das variáveis de cada um dos 16 modelos.

Nome	% Aberturas na Fachada	Fator Solar do Vidro	Transmitância (W/m <sup>2</sup> °C)	Absortância
Mod1	20%	0,67	0,5	0,3

<b>Mod2</b>	20%	0,67	0,5	0,7
<b>Mod3</b>	20%	0,67	4,0	0,3
<b>Mod4</b>	20%	0,67	4,0	0,7
<b>Mod5</b>	20%	0,25	0,5	0,3
<b>Mod6</b>	20%	0,25	0,5	0,7
<b>Mod7</b>	20%	0,25	4,0	0,3
<b>Mod8</b>	20%	0,25	4,0	0,7
<b>Mod9</b>	70%	0,67	0,5	0,3
<b>Mod10</b>	70%	0,67	0,5	0,7
<b>Mod11</b>	70%	0,67	4,0	0,3
<b>Mod12</b>	70%	0,67	4,0	0,7
<b>Mod13</b>	70%	0,25	0,5	0,3
<b>Mod14</b>	70%	0,25	0,5	0,7
<b>Mod15</b>	70%	0,25	4,0	0,3
<b>Mod16</b>	70%	0,25	4,0	0,7

### 3.1.4 DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES REALIZADAS

O primeiro foco das análises foi apresentar com detalhes os resultados de simulações realizadas com o arquivo climático multianual composto por 10 anos. Foram exibidos resultados individuais de cada um dos 10 anos que compõe o arquivo, bem como, o resultado das médias. Vale ressaltar que o resultado das médias foi utilizado na avaliação dos resultados dos cinco arquivos tradicionais no segundo foco de análises.

Os dados de saída das simulações para os 16 modelos de edificações artificialmente condicionadas foram analisados quanto aos totais anuais das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento. Além disso, os modelos 5 e 12 foram escolhidos para que se pudesse fazer uma análise mais detalhada das cargas térmicas referentes aos totais diários de aquecimento e resfriamento.

O segundo foco das análises consistiu na comparação dos resultados de simulações realizadas com os 5 arquivos climáticos desenvolvidos. Foram apresentados os resultados individuais de cada ano e suas diferenças em relação à média anual da simulação com o arquivo climático multianual. Além de repetir os mesmos tipos de análises aplicadas no primeiro foco, foi analisado também o erro quadrático médio (EQM) dos totais diários dos resultados das simulações, entre cada arquivo e o arquivo multianual.

O Erro Quadrático Médio (EQM) é definido pela Equação 48.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{Estimando} - X_{Base} / X_{Base})^2}{N}} \quad (48)$$

$X_{Estimado}$  = Dado Estimado, referente ao arquivo climático analisado.

$X_{Base}$  = Dado Base, referente ao arquivo climático de 10 anos.

$N$  = Número de dados analisados, neste caso o número de dias do ano, 365.

## 3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.2.1 ANÁLISES DO ARQUIVO CLIMÁTICO MULTIANUAL

Um dos principais questionamentos que existe em relação aos arquivos climáticos é se os seus dados conseguem representar efetivamente a complexidade climática de uma cidade. Cada localidade apresenta padrões meteorológicos que se repetem de um ano para outro, como o exemplo de Viçosa-MG, que nos últimos 10 anos revelou altos índices de umidade relativa, temperaturas amenas e taxa de radiação intermediárias, como apresentado no Capítulo 2. Porém, mesmo dentro destes padrões há margens para variações nos dados dos elementos do clima de um ano para outro, as quais interferem de forma relevante nos resultados de análises de edificações, principalmente aquelas em que se busca um nível de precisão mais elevado, como simulações computacionais termo energéticas de edificações.

#### 3.2.1.1 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE AQUECIMENTO

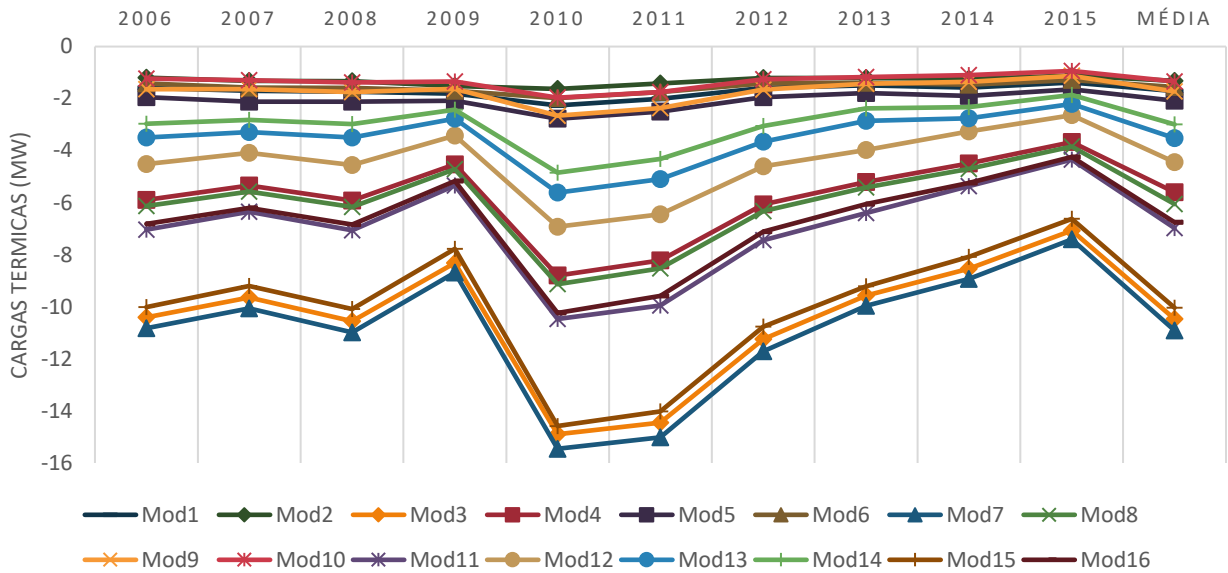
A Figura 3.6 apresenta os totais anuais das cargas térmicas de resfriamento para os 16 modelos de edificações artificialmente condicionadas. E complementando estas análises, a Figura 3.7 mostra as amplitudes máximas entre dois anos para cada modelo, bem como, o percentual de variação que a amplitude representa.

A partir destas análises, ressalta-se que os resultados de todos os 16 modelos simulados sofreram alterações significativas apenas pela alteração do ano que compõe o arquivo climático, enquanto as edificações com componentes com altas transmitância ( $4,0 \text{ W/m}^2\text{C}$ ) revelaram-se mais suscetíveis às variações nos dados dos elementos do clima.

Em relação aos modelos com alta transmitância ( $4,0 \text{ W/m}^2\text{C}$ ), destacam-se os modelos 3, 7 e 15, como aqueles que apresentaram os maiores valores de cargas térmicas de aquecimento e as maiores amplitudes,  $7,8 \text{ MW}$ ,  $8,1 \text{ MW}$ ,  $8,0 \text{ MW}$ , respectivamente, entre os anos de 2010 e 2015. Esses modelos se distinguem dos demais por terem, além de alta transmitância, uma baixa absorvância térmica ( $0,3$ ), ou seja, cores claras nas superfícies opacas, absorvendo menos a radiação solar.

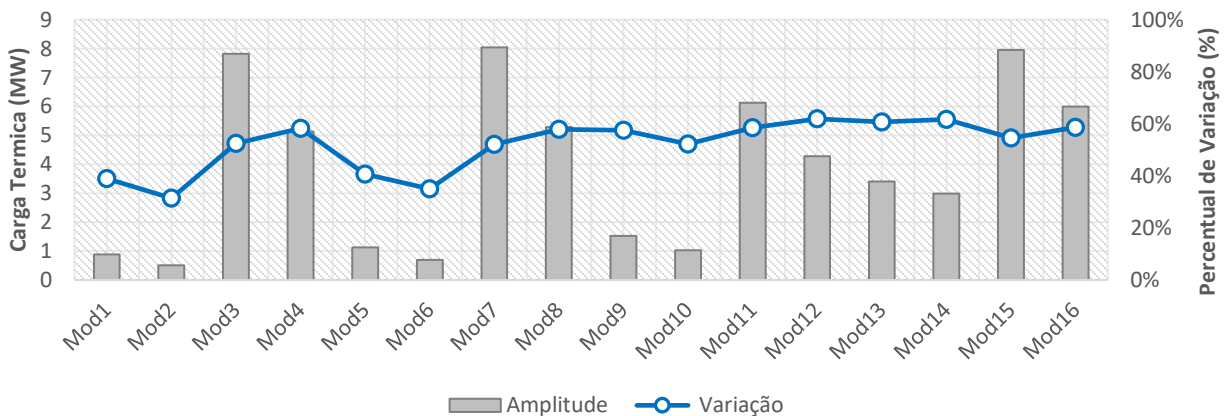
Já entre os modelos com baixa transmitância ( $0,5 \text{ W/m}^2\text{C}$ ), os modelos 1, 2, 5, 6, 9 e 10, apresentaram baixos valores de carga térmicas de aquecimento e baixas amplitudes, abaixo de  $1,0 \text{ MW}$  em todos os casos. Os modelos 13 e 14 foram os únicos entre aqueles com baixa transmitância, que tiveram amplitudes relevantes,  $3,4 \text{ MW}$  e  $4,0 \text{ MW}$  respectivamente, entre os anos de 2010 e 2015. Esses dois modelos se diferenciam por apresentar as fachadas compostas por 70% de aberturas, com fator solar de  $0,25$ , ou seja, com baixa transferência de radiação solar do meio externo para o interior do ambiente.

Figura 3.6 – Totais anuais das cargas térmicas de aquecimento ao longo dos 10 anos do arquivo climático multianual e a média dos resultados.



De acordo com a Figura 3.7, todos os modelos analisados apresentaram percentuais de variação acima de 30% e todos os modelos com baixa transmitância apresentaram percentuais de variação acima de 50%. Porém, é importante ressaltar que, qualquer conclusão a ser tomada em relação às incertezas inerentes aos dados climáticos usados em uma simulação, é preciso considerar também as análises das cargas térmicas de resfriamento, as quais serão discutidas posteriormente.

Figura 3.7 – Amplitudes máximas entre os 9 anos para o total anual carga térmica de aquecimento, ocorrida entre os anos de 2006 e 2015 e, do percentual de variação em relação ao ano com menor total anual.



Para melhor investigar as diferenças nos resultados das simulações, as Figuras 3.8 e 3.9 revelaram informações sobre medidas de posição, variações e distribuições dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, ao longo dos 10 anos. A Figura 3.8 corresponde aos resultados das simulações do modelo 5,

enquanto a Figura 3.9, ao modelo 12. Estes modelos foram selecionados por serem as edificações mais discrepantes: enquanto o modelo 5 tem baixa transmitância, baixa absorvância, baixo percentual de abertura, e baixo fator solar dos vidros, o modelo 12 tem características opostas.

As duas análises apresentaram padrões semelhantes, porém as simulações do modelo 12 resultaram em, aproximadamente o dobro das cargas térmicas diárias resultantes do modelo 5. Essa tendência ocorreu nos 16 modelos e, por esta razão, apenas os resultados dos modelos 5 e 12 foram apresentados a seguir. Os gráficos dos outros modelos encontram-se no item anexo.

Nos dois primeiros quartis, as variações na carga térmica de um ano para o outro são muito baixas. Dos 50% dos dias do ano restantes, no terceiro quartil a carga térmica está abaixo de 10 kW/dia para o modelo 5, e abaixo de 20 kW/dia para o modelo 12, em todos os anos. E é no último quartil que a variação anual se manifesta, percebe-se que as simulações com os anos de 2007, 2008, 2010 e 2011 apresentaram resultados com maior carga térmica de aquecimento que os demais, ultrapassando 140 kW/dia na análise do modelo 12, e 50 kW/dia no modelo 5.

Vale destacar que quanto mais frio for o ano, maiores serão as cargas térmicas de aquecimento resultantes, assim, o ano mais quente foi o de 2015 e o mais frio o de 2008.

Figura 3.8 – Totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 5.

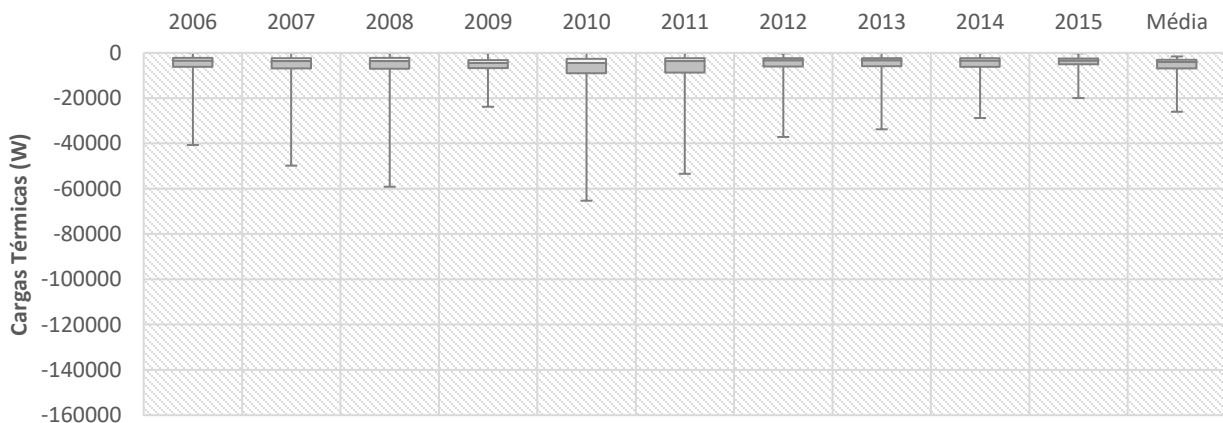
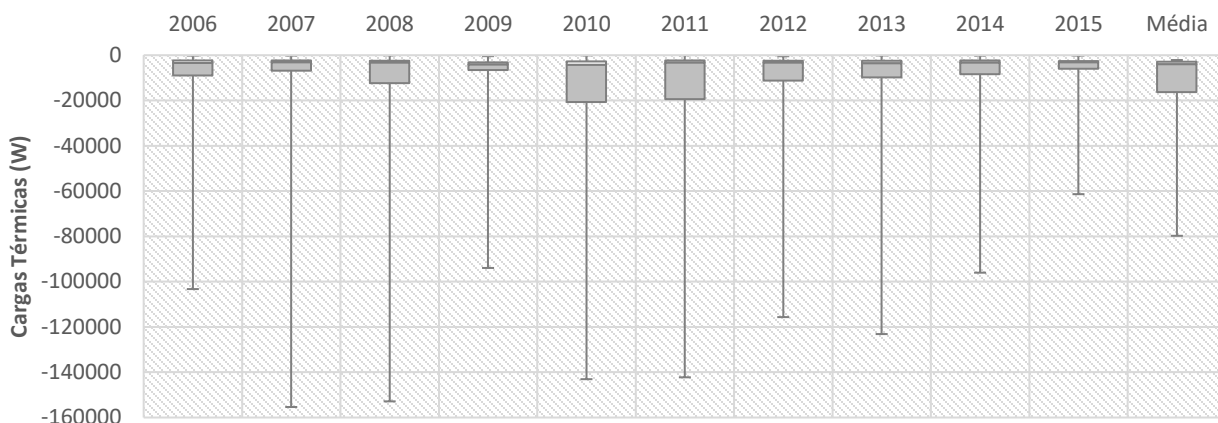


Figura 3.9 – Totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 12.



### 3.2.1.2 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE RESFRIAMENTO

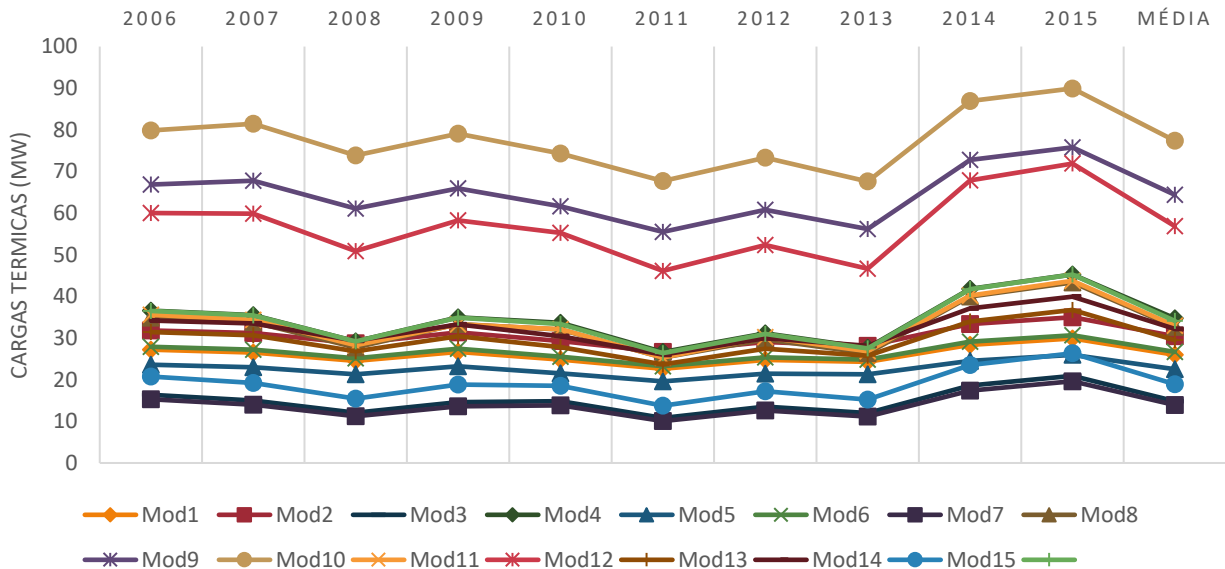
A Figura 3.10 descreve os totais anuais das cargas térmicas de resfriamento para os 16 modelos de edificações artificialmente condicionadas. Com a finalidade de detalhar melhor esta análise, a Figura 3.11 expõe as amplitudes máximas entre dois anos para cada um dos modelos e o percentual de variação que essa amplitude representa.

Semelhante ao que ocorreu nas análises das cargas térmicas de aquecimento, percebe-se que há variações relevantes em todos os 16 modelos analisados. Porém, a variável percentual de aberturas e fator solar do vidro foram as mais relevantes quanto as diferenças entre os modelos, como esperado.

Os modelos 9, 10 e 12, destacam-se por possuírem as maiores cargas térmicas de resfriamento e também as maiores amplitudes, apresentando variações de 20,3 MW, 22,3 MW e 25,7 MW, respectivamente, entre os anos de 2011 e 2015. Esses modelos se caracterizam por ter as fachadas compostas por 70% de aberturas, com vidros de fator solar 0,67, ou seja, com alta transferência de radiação solar do meio externo para o interior do ambiente. Conseqüentemente, os ambientes destas edificações tendem a ser mais quentes ao longo do ano, exigindo uma carga térmica de resfriamento maior. Vale destacar ainda, que o modelo 12 apresentou a maior amplitude entre os 3 modelos mencionados e, tem como diferencial, além das características mencionadas, uma alta transmitância ( $4,0 \text{ W/m}^2\text{C}$ ).

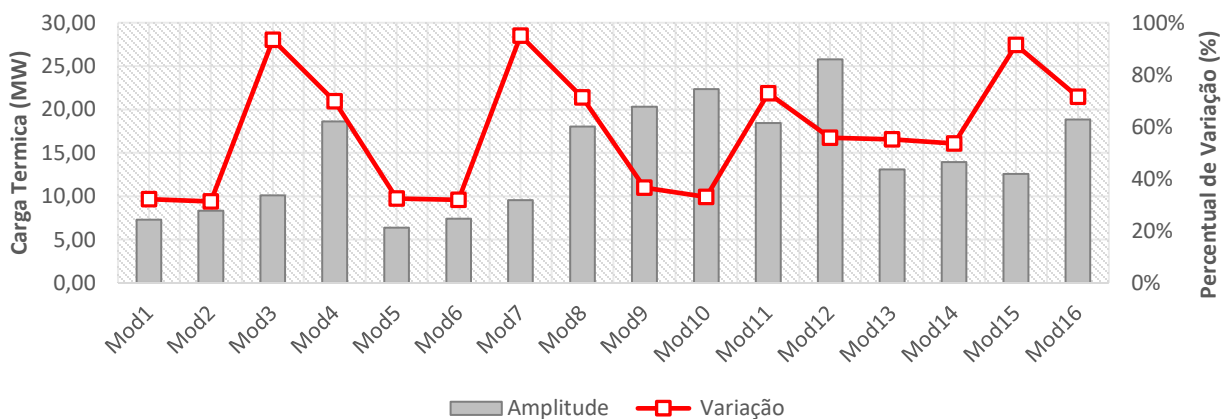
Os modelos 3 e 7 também chamam a atenção, mas neste caso por apresentar as menores cargas térmicas de resfriamento e também as menores amplitudes, apresentando variações de 10,1 MW e 9,5 MW, respectivamente, entre os anos de 2011 e 2015. Esses modelos se caracterizam por ter as fachadas compostas por 20% de aberturas e, os 80% de paredes restante tem alta transmitância ( $4,0 \text{ W/m}^2\text{C}$ ).

Figura 3.10 – Totais anuais das cargas térmicas de resfriamento ao longo dos 10 anos do arquivo climático multianual e a média dos resultados.



A partir da Figura 3.11, pode-se inferir que, assim como ocorreu com as cargas térmicas de aquecimento, todos os modelos analisados apresentaram percentuais de variação acima de 30% e, todos dispendo de alta transmitância apresentaram percentuais de variação acima de 50%. Destacam-se os modelos 3, 7 e 15, que apresentaram percentuais de variação acima de 90%, praticamente dobrando o total anual das cargas térmicas de resfriamento, apenas pela alteração do arquivo climático.

Figura 3.11 – Amplitudes máximas entre os 10 anos para o total anual carga térmica de resfriamento, ocorridas entre os anos de 2011 e 2015 e, o percentual de variação em relação ao ano com menor total anual.



Afim de aprofundar as diferenças dos resultados das simulações, as Figuras 3.12 e 3.13 exibem informações sobre medidas de posição, variações e distribuições dos totais diários das cargas térmicas de

resfriamento. A Figura 3.12 corresponde aos resultados das simulações do modelo 5, enquanto a Figura 3.13 ao modelo 12.

Constatou-se que os dois modelos apresentaram variações semelhantes de um ano para o outro, porém as simulações do modelo 12 resultaram em, aproximadamente, o triplo das cargas térmicas diárias comparando ao modelo 5. Essa tendência ocorreu nos 16 modelos, e por esta razão, apenas os resultados dos modelos 5 e 12 foram apresentados a seguir. Estes modelos foram escolhidos por serem as edificações mais discrepantes, enquanto o modelo 5 tem baixa transmitância, baixa absorvância, baixo percentual de abertura, e baixo fator solar dos vidros, o modelo 12 tem características opostas.

Observando as Figuras 3.12 e 3.13 é notável que, em todos os anos, nos 3 primeiros quartis, a térmica é superior a 25 kW/dia para o modelo 5 e 35 kW/dia para o modelo 12. Já no quarto quartil, a carga térmica média do modelo 5 está entre 75 kW e 100 kW em todos os anos, exceto 2011 e 2015, anos mais frio e mais quente respectivamente. No entanto, é no modelo 12 que a carga térmica de resfriamento é bastante significativa. Em mais de 25% do tempo, ela é superior a 225 kW, exceto nos anos de 2008, 2011 e 2013. E no ano de 2015, em mais de 25% do tempo, ela é superior a 300 kW, o que se torna muito significativo, pois é uma carga térmica em que já se recomenda o uso de sistemas de condicionamento central.

Nota-se que os resultados das cargas térmicas de resfriamento foram opostos aos das cargas térmicas de aquecimento, ou seja, os anos com menores aquecimento exibiram maiores resfriamentos, sendo o mais quente 2015 e o mais frio 2011.

Figura 3.12 – Totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 5.

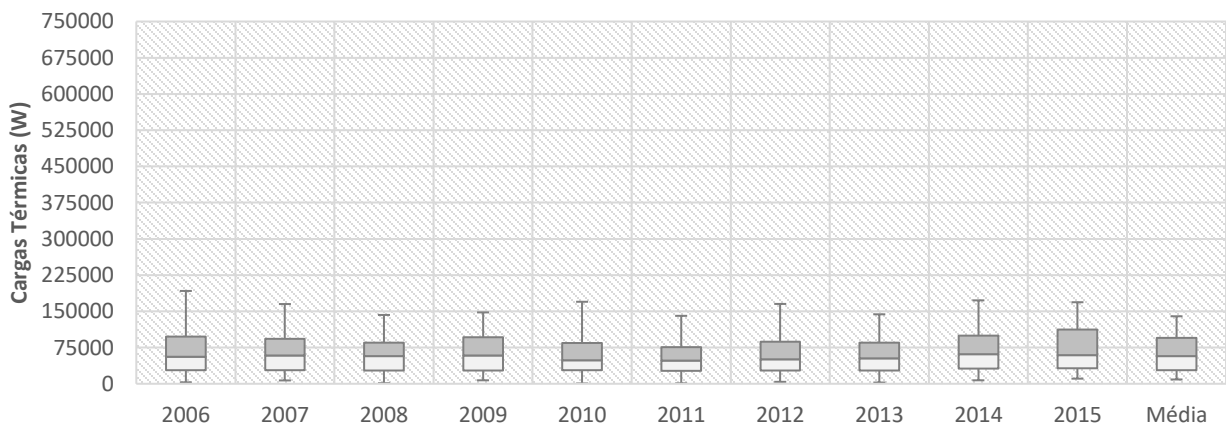
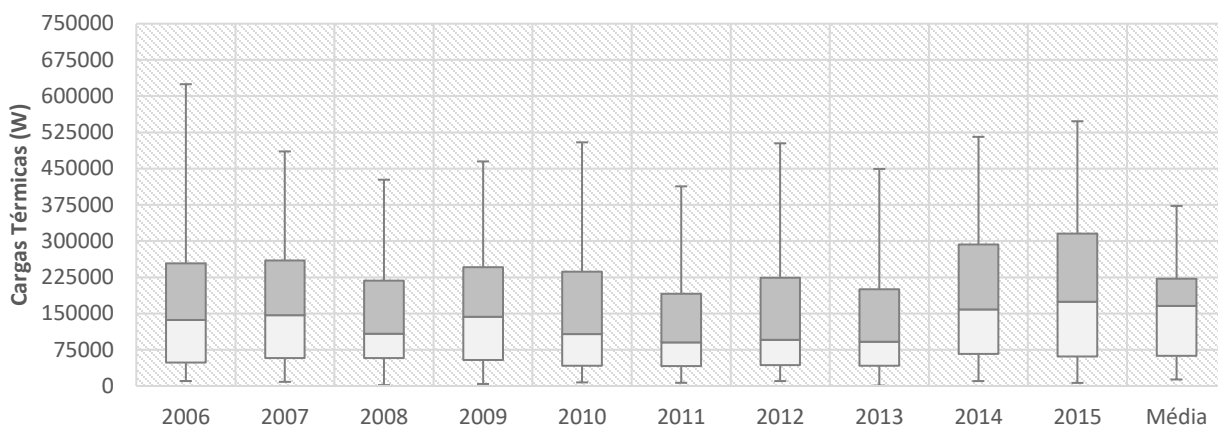


Figura 3.13 – Totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 12.



### 3.2.1.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SÉRIE DE 10 ANOS

Os percentuais de variação das amplitudes máximas de cargas térmicas entre os anos estudados, ficaram acima de 30% para todos os casos. Diversos casos analisados apresentaram percentuais de variação das amplitudes máximas de cargas térmicas acima de 50%, ressaltando que entre as análises das cargas de resfriamento, foram identificadas variações acima de 90%.

A partir das análises dos dois cenários de cargas térmicas apresentados, percebe-se que, conforme a escolha do ano climático que será usado para as análises termo energéticas, os resultados obtidos serão diferentes. Estas incertezas relativas às variações nos dados dos elementos do clima de um ano para outro, devem ser consideradas ao utilizar dados climáticos para realizar alguma atividade profissional ou pesquisas acadêmicas, principalmente, para elaboração de arquivos climáticos.

### 3.2.2 ANÁLISES DOS 5 ARQUIVOS CLIMÁTICOS TRADICIONAIS

Conduzir uma simulação utilizando arquivos climáticos composto por apenas um ano de dados, ao invés de um composto por 10 anos resulta em simulações 10 vezes mais rápidas e economia de tempo no processamento e análise. Porém, a simulação com o arquivo composto de 10 anos tende a fornecer resultados muito mais precisos pois leva em consideração as variações nos dados dos elementos do clima, que ocorreram ao longo dos anos. Assim, é importante identificar um método para o desenvolvimento de arquivos climáticos que permitam a seleção de um ano representativo, tornando as simulações viáveis em relação ao tempo de execução com confiabilidade.

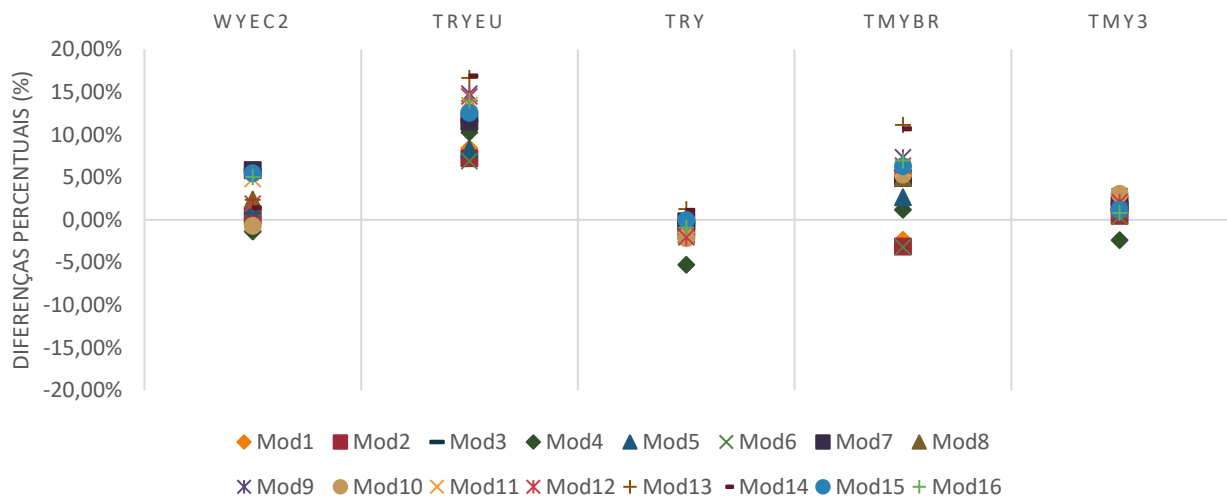
#### 3.2.2.1 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE AQUECIMENTO

A Figura 3.14 apresenta as diferenças percentuais dos resultados dos totais anuais das cargas térmicas de aquecimento entre as simulações com os 5 arquivos climáticos tradicionais e as simulações com o arquivo climático multianual. O primeiro aspecto a se destacar é que todos os métodos analisados apresentaram

resultados aproximados aos resultados do arquivo multianual, as diferenças percentuais são em geral baixas. Mas, alguns métodos obtiveram resultados melhores que outros. Destacam-se dois grupos distintos entre os métodos: o TMY3, o TRY e o WYEC2, os quais apresentaram resultados mais confiáveis e o TRY-Eu e TMY\_Br, os quais apresentaram resultados com diferenças maiores em relação as simulações de alguns modelos.

Nota-se que os métodos TMY3, WYEC2 e TRY apresentaram diferenças percentuais baixas em relação ao multianual, com menos de 6% de variação em todos os casos, sendo que o TMY3 apresentou menos de 3% de variação em todos os casos. Já os métodos TRY\_Eu e TMY\_Br exibiram diferenças maiores. Em relação ao TRY\_Eu, as diferenças foram sempre superiores a 6%, chegando a 17% nos modelos 13 e 14, enquanto o TMY\_Br apresentou diferenças inferiores a 5% apenas nos modelos 1, 2, 4, 5, 6, chegando a 11% nos modelo 13 e 14. Vale destacar que, os modelos 1, 2, 4, 5 e 6 correspondem às edificações com percentual de abertura na fachada de 20%.

Figura 3.14 – Diferenças percentuais entre os totais anuais de cargas térmicas de aquecimento de cada um dos 5 arquivos climáticos em relação aos resultados do arquivo climático multianual.



Em relação às análises dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, as Figuras 3.15 e 3.16 apresentam algumas medidas de posição e de variação, além da frequência de ocorrência simplificada. A Figura 3.15 exhibe os resultados das simulações realizadas com o modelo 5, enquanto a Figura 3.16 traz os resultados do modelo 12, o primeiro representante dos modelos com baixas transmitâncias (mod5) e o segundo representante dos modelos com alta transmitância (mod12).

Observa-se na Figura 3.15 em relação aos 3 primeiros quartis, o qual representa a fração de 75% dos dias do ano com os menores valores registrados, que os arquivos climáticos apresentaram valores semelhantes entre si, variando entre, aproximadamente, 0 a 5 kW. Por outro lado, em relação ao quarto quartil, o qual consiste na fração de 25% dos dias do ano com os maiores valores registrados e, coincide com

o período do inverno, nota-se variações significativas. Os arquivos TMY3, o TRY e o WYEC2, que obtiveram os resultados anuais com as menores diferenças em relação à média do arquivo multianual (Figura 3.12 e 4.13), apresentaram as maiores variações quanto aos picos de aquecimento no inverno, mas que não passaram de 502 kW, uma carga térmica pequena para estas edificações.

A Figura 3.16 indica que o TMY3 e o TRY foram os arquivos mais semelhantes ao multianual em relação aos 3 primeiros quartis, porém apresentaram diferenças significativas quanto ao quarto quartil, com picos de aquecimento muito superiores. Enquanto, o multianual exibiu pico de 80 kW, os outros dois arquivos exibiram resultados até 160 kW.

Estas análises indicam que, mesmo apresentando resultados anuais com diferenças percentuais baixas, no que se refere aos padrões de ocorrência ao longo do ano, os arquivos climáticos mostraram diferenças consideráveis para determinados períodos do ano, em relação à média do arquivo multianual.

Figura 3.15 – Totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 5.

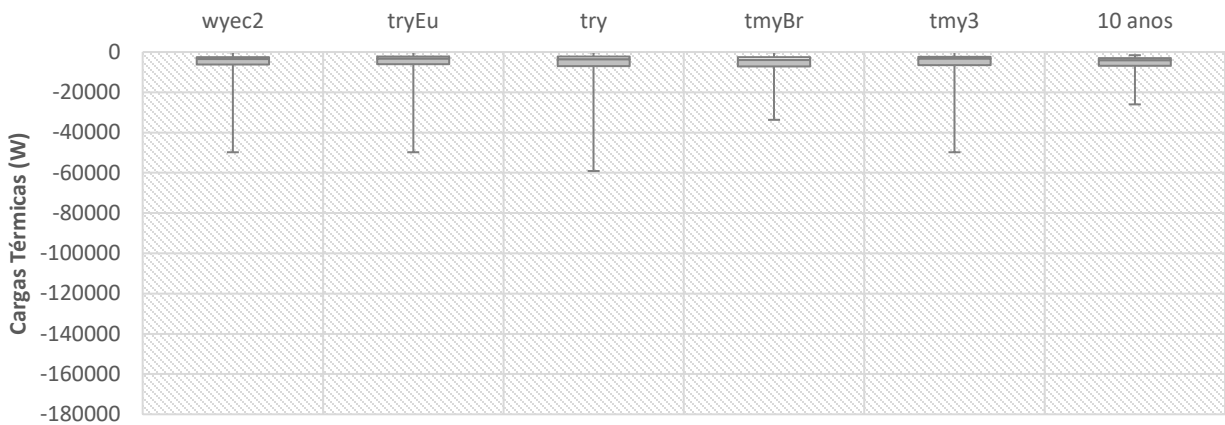
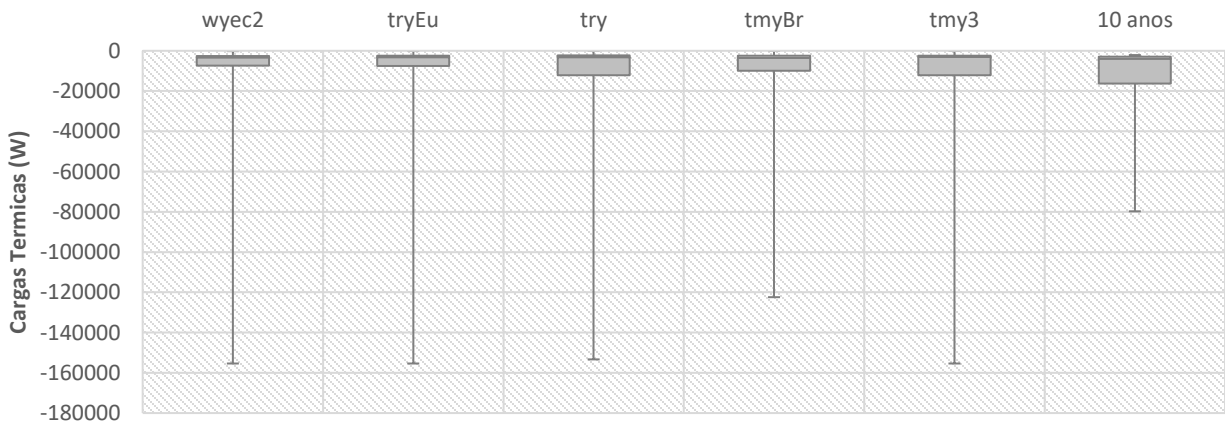


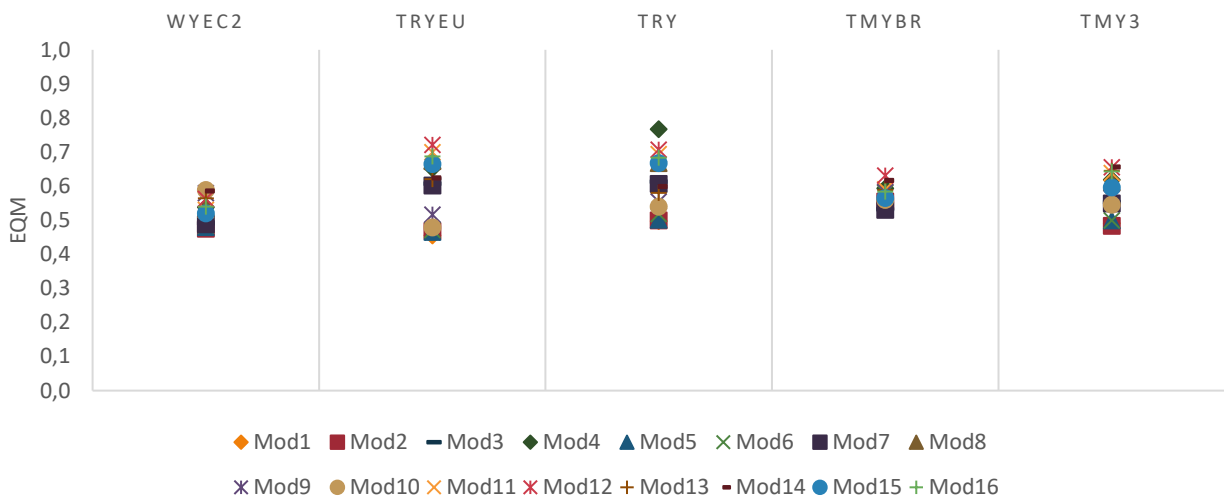
Figura 3.16 – Totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 12.



Corroborando as análises anteriores, a Figura 3.17 expõe os erros quadráticos médios (EQM) entre cada um dos cinco arquivos climáticos analisados e o arquivo multianual, no que se refere aos totais diários de cargas térmicas de aquecimento. Os resultados mostram que, apesar de os arquivos climáticos terem apresentado diferenças percentuais baixas, em relação ao arquivo multianual de 10 anos, quanto aos resultados anuais de simulação (Figuras 4.14), as diferenças quanto aos padrões de ocorrência dos totais diários ao longo do ano, expressas pelo EQM, são expressivas, maiores que 0,45 em todos os casos. Assim, os bons níveis de confiabilidade, encontrados nos resultados de análises anuais de simulação, não se estendem para análises relativas a períodos menores do ano.

A Figura 3.17 revela ainda uma maior coesão dos arquivos WYEC 2, TMY br e TMY3, com EQM que variam entre 0,47 a 0,57, entre 0,52 a 0,63 e entre 0,49 e 0,65, respectivamente. Destaque para o WYEC 2, que tem os menores valores de EQM e o conjunto mais coesos de resultados e, portanto, é o melhor. Já o TRY eu e o TRY, por outro lado, apresentaram os piores resultados, com EQM que variam entre 0,45 a 0,72 e entre 0,50 a 0,76, respectivamente.

Figura 3.17 – Erro Quadrático Médio (EQM) entres cada um dos 5 arquivos climáticos tradicionais e o arquivo multianual, em relação aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento.



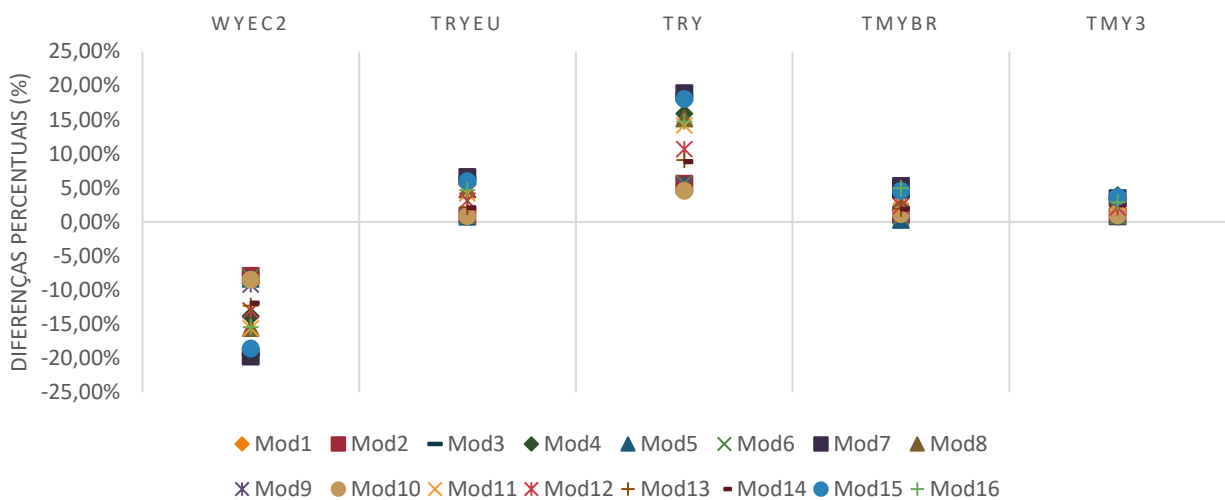
### 3.2.2.2 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE RESFRIAMENTO

A Figura 3.18 apresenta as diferenças percentuais dos resultados dos totais anuais das cargas térmicas de resfriamento, entre as simulações com os 5 arquivos climáticos tradicionais e as simulações com o arquivo climático multianual. Nota-se que o TMY3, TMY\_Br e TRY\_Eu apresentaram diferenças percentuais menores que o TRY e WYEC2. Vale destacar que o quadro de análise se inverteu em relação aos resultados das cargas térmicas de aquecimento, com exceção do TMY3 que manteve diferenças percentuais baixas nas duas

situações. Na análise anterior o TRY e WYEC2 expressaram os melhores resultados e na análise atual, o TMY\_Br e o TRY\_Eu foram os métodos que apresentaram maior aproximação com o multianual.

Nota-se que os métodos TMY3, TMY\_Br e TRY\_Eu apresentaram diferenças percentuais baixas em relação ao multianual, com menos de 6,5% de variação em todos os casos, sendo que o TMY3 apresentou menos de 4% de variação em todos os casos. Já os métodos TRY e WYEC2r exibiram diferenças maiores. Em relação ao TRY, as diferenças foram sempre superiores a 4,5%, chegando a 18% nos modelos 3 e 7, enquanto o TMY\_Br apresentou resultados ainda piores, com diferenças entre 7,9% a 19,7%.

Figura 3.18 – Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de resfriamento de cada um dos 5 arquivos climáticos em relação aos resultados do arquivo climático multianual.



Em relação aos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, as figuras 3.19 e 3.20 apresentam medidas de posição e de variação, além da frequência de ocorrência simplificada. A Figura 3.19 exhibe os resultados das simulações realizadas com os modelos 5, enquanto a Figura 3.20 traz os resultados do modelo 12. O primeiro, representante dos modelos com baixas transmitâncias e o segundo, representante dos modelos com alta transmitância.

Com exceção do WYEC 2, nos 3 primeiros quartis, as cargas térmicas se aproximam dos dados das médias do arquivo climático multianual dos 10 anos, abaixo de 95 kW para o modelo 5 e de 220 kW para o modelo 12. No quarto quartil, o TRY eu, TRY e TMY3 se aproximam mais da média do arquivo multianual dos 10 anos, em ambos os modelos.

Figura 3.19 – Totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 5.

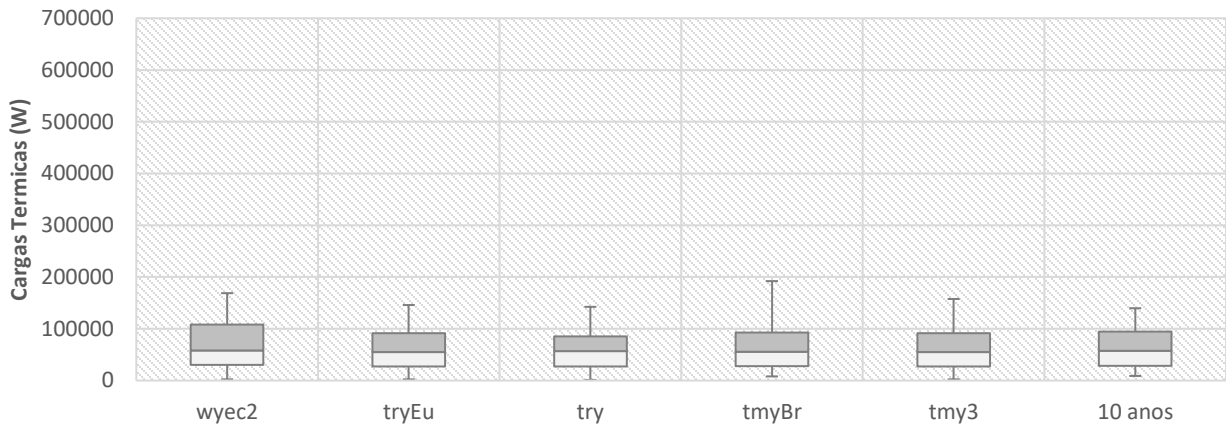
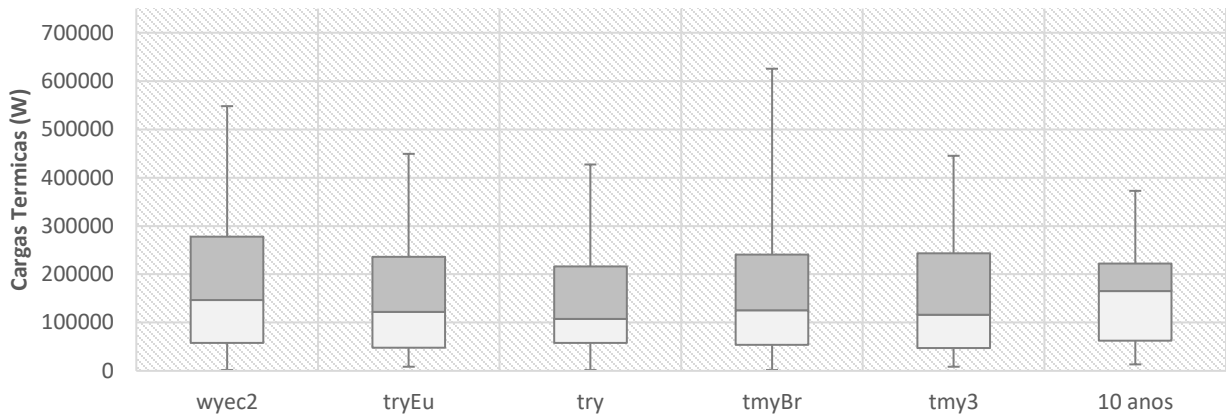


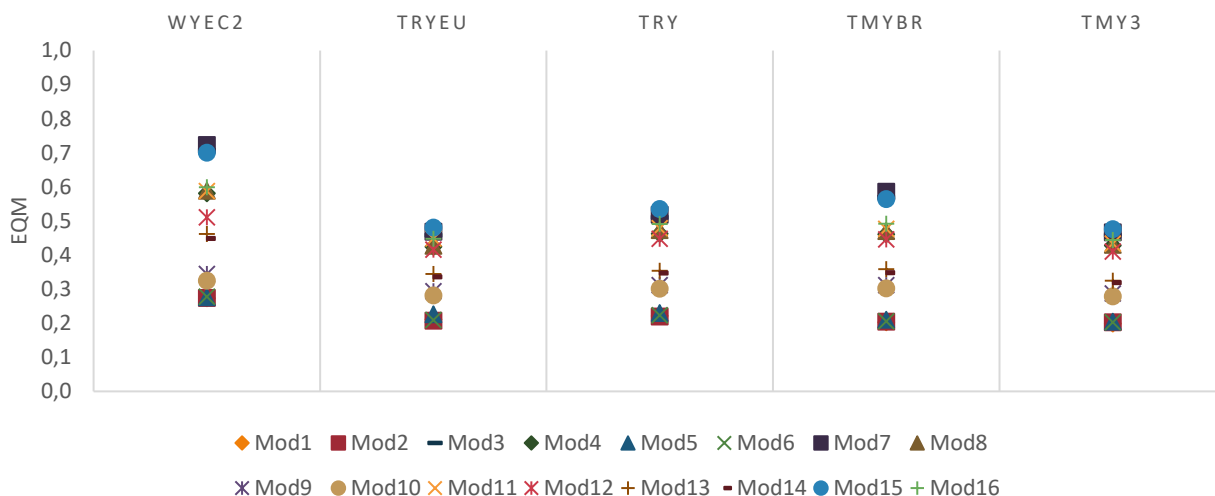
Figura 3.20 – Totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 12.



A Figuras 3.21 expõe os erros quadráticos médios (EQM) entre cada um dos cinco arquivos climáticos analisados e o arquivo multianual, dos totais diários de cargas térmicas de resfriamento. Nota-se dois cenários distintos, os modelos com alta transmitância mantiveram erros quadráticos altos, semelhante ao que haviam sido identificados nas análises das cargas térmicas de aquecimento. Já os modelos com baixa transmitância apresentaram erros consideravelmente mais baixos, entre 0,2 a 0,4, em praticamente todos os casos.

A Figura 3.21 revela ainda uma maior coesão dos arquivos TRY eu e TMY3, com EQM que variam entre 0,20 a 0,53 e entre 0,19 a 0,47, respectivamente. Destaque para o TMY3, que tem os menores valores de EQM e o conjunto mais coesos de resultados e, portanto, é o melhor. Já o TRY, o TMY br e o WYEC 2, por outro lado, apresentaram uma menor coesão, com EQM que variam entre 0,22 a 0,53, entre 0,22 a 0,56 e entre 0,27 a 0,72, respectivamente.

Figura 3.21 – Erro Quadrático Médio (EQM) entre cada um dos 5 arquivos climáticos tradicionais e o arquivo multianual, em relação aos totais diários das cargas térmicas de resfriamento.



### 3.2.2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS TRADICIONAIS

Entre os arquivos climáticos tradicionais analisados, aquele que apresentou menor diferença em relação ao arquivo climático multianual de 10 anos, quanto a simulações de cargas térmicas de aquecimento e de resfriamento, foi o TMY3. Em relação aos demais arquivos, o TMY3 manteve diferenças percentuais baixas para análises dos totais anuais de as ambas cargas térmicas, nas simulações de todos os modelos de edificações. Apresentou diferenças sempre abaixo de 5% em todos os casos, com destaque para os resultados dos modelos de edificações com baixas transmitâncias, os quais se mantiveram sempre abaixo de 3%.

Por outro lado, os demais arquivos tradicionais analisados exibiram bons resultados em algumas análises, mas falharam em outras. Como por exemplo, o TMY\_Br e o TRY\_Eu apresentaram diferenças percentuais baixas em relação as cargas térmicas de resfriamento, resultados semelhantes aos do TMY3, porém na análise das cargas térmicas de aquecimento, revelaram as maiores diferenças em relação ao multianual. Em relação aos métodos TRY e WYEC2 ocorreu situação oposta, ambos obtiveram ótimos resultados quanto as cargas térmicas de aquecimento, com diferenças abaixo de 3% para todos os modelos, porém, as diferenças nas análises das cargas térmicas de aquecimento foram expressivas, chegando a valores acima de 15% em alguns casos.

Porém, quando o foco de análise mudou para a comparação entre padrões de ocorrência dos totais diários das cargas térmica ao longo do ano, revelados pelo EQM, observou-se que nenhum dos arquivos climáticos pôde ser apontado como confiável em relação a análises relativas a períodos menores do que as anuais, ou seja, análises sazonais ou mensais tenderam a apresentar diferenças percentuais maiores. Mesmo assim, o TMY3, também nesta análise se mostrou o melhor método. Este arquivo apresentou um erro

quadrático médio que variou entre 0,45 a 0,65 na avaliação das cargas térmicas de aquecimento, e entre 0,19 a 0,45 em relação aos modelos com alta transmitância na avaliação das cargas térmicas de resfriamento. Vale destacar por fim, que no caso dos climas no Brasil, as análises das cargas térmicas de resfriamento são em geral mais relevantes.

### 3.3 CONCLUSÕES GERAIS

Neste trabalho foram realizados dois estudos: (1) avaliação de simulações em que se utilizou um arquivo climático multianual, composto por 10 anos de dados climáticos disponíveis para a cidade de Viçosa-MG e; (2) comparação entre os resultados das simulações com o arquivo multianual e os de simulações com arquivos climáticos desenvolvidos com 5 métodos tradicionais (TMY3, TMY\_Br, TRY, TRY\_Eu, WYEC2). Estas análises revelaram que a escolha dos dados climáticos usados nas simulações, podem gerar grandes incertezas nos resultados, com EQM de até 0,8 entre os arquivos analisados em relação a série referencial multianual de 10 anos, dependendo das características do modelo de edificação.

O primeiro estudo apresentou uma comparação entre simulações realizadas com cada um dos 10 anos das séries de dados coletados para a cidade de Viçosa-MG, entre 2006 e 2015. Observou-se que as variações nos resultados em razão de uma simples alteração no ano climático utilizado, podem ser expressivas. Vale destacar que foram avaliados anos climáticos de uma mesma cidade, medidos em uma mesma estação climática, além de terem sido testadas diferentes tipos de edificações. Observou-se que diferenças percentuais das amplitudes máximas de cargas térmicas entre os anos estudados, ficaram acima de 30% para todas as edificações. Os modelos com altas transmitâncias se mostram mais suscetíveis a mudanças climáticas, já que em todos os casos analisados apresentaram diferenças percentuais acima de 50%, ressaltando que, entre as análises das cargas de resfriamento, foram identificadas variações acima de 90%.

Entre os métodos analisados o TMY3 foi o que apresentou resultados mais aproximados aos do arquivo multianual. Para análises dos totais anuais das cargas térmicas, em todos os casos avaliados, o TMY3 obteve diferenças percentuais abaixo de 5%, já em relação as edificações com baixa transmitância, as diferenças não ultrapassaram 3%.

### 3.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGIRIOU, A.; LYKOURIS, S.; KONTOYIANNIDIS, C.; BALARAS, C.; ASIMAKOPOULOS, D.; PETRAKIS, M.; KASSOMENOS, P. Comparison of methodologies for TMY generation using 20years data for Athens, Greece. **Solar Energy**, v66: 1999. p 33-45.

ASHRAE (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS). **Weather Year for Energy Calculations 2 – Toolkit and Data**. Atlanta, EUA: 1997

ASHRAE (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS). **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. USA, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2013, Chapter F6.

BARNABY, C S; CRAWLEY, D B. Weather data for building performance simulation In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: SponPress, 2011, cap.3, p.37-55.

CARLO, J; LAMBERTS, R. **Processamento de Arquivos Climáticos para Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. Florianópolis. SC: Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2005. Relatório.

CEN (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION). **EN ISO 15927-4**: Hygrothermal Performance of Buildings - Calculation and Presentation of Climatic Data - Part 4: Hourly Data for Assessing the Annual Energy Use for Heating and Cooling. Brussels, Belgium: 2005.

CHOW, T.; CHAN, A.; FONG, K.; LIN, Z. Some perceptions on typical weather year from the observations of Hong Kong and Macau. **Solar Energy**, v80: 2006. p 459-467.

CRAWLEY, D. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? **ASHRAE Transactions**, v104: 1998. p 498-515.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª edição. New York: John Wiley & Sons, 2013.

ENERGYPLUS. **Auxiliary Programs - Weather Converter Program**. 1ª edição. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkley National Laboratory, 2015.

FESTA R.; RATTO C. Proposal of a numerical procedure to select reference years. **Solar Energy**, v50: 1993. p 9-17.

FOREJT, L; HENSEN, J.; DRKAL, F; BARANKOVA, P. Weather data around the world for design of field hospital HVAC. In: 17<sup>th</sup> Air-conditioning and Ventilation Conference, Prague, 2006 **Proceedings...** Prague, Czech Republic: IBPSA, 2006. 6 págs.

HENSEN, J. Simulation of building energy and indoor environmental quality - some weather data issues. In: International Workshop on Climate Data and their Applications in Engineering, Praga, 1999. Anais... Praga, Workshop, 1999.

INMET. **Dados Meteorológicos: Estações Automáticas**. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br> >. Acesso em: 1 de agosto de 2016.

KALOGIROU, S. Generation of Typical Meteorological Year (TMY-2) for Nicosia, Cyprus. **Renewable Energy**, v28: 2003. p 2317-2334.

LUND, H. The Design reference year. In: 3<sup>rd</sup> International IBPSA Conference Building Simulation, Nice, 1991 **Proceedings...** Nice, France: IBPSA, 1991. p 600-606.

MUNEER, T; Gueymard, C; Kambezidis, H. **Solar Radiation and Daylight Models**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

NCDC. **Test Reference Year (TRY): tape reference manual, TD-9706**. Asheville. North Carolina: National Climatic Data Centre, US Department of Commerce, 1976. Manual.

PEREZ R; INEICHEN P; SEALS R; MICALSKY J; STEWART R. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44: p. 271-289, 1990.

PERNIGOTTO, G.; PRADA, A.; GASPARELLA, A.; HENSEN, J. Analysis and improvement of the representativeness of EM ISO 15927-4 reference years for building energy simulation. **Journal of Building Performance Simulation**. V7: 2014. p 391-410.

PITTIGLIANI, M. Controle de Qualidade de Dados Hidrometeorológicos do Simepar. In: XI Congresso Brasileiros de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2001. **Anais...** Rio de Janeiro, XI CBMET, 2001.

SAID, S.; KADRY, H. Generation of representative weather-year data for Saudi Arabia. **Applied Energy**, v43: 1994. p 131-136.

WILCOX, S; MARION, W. **User's Manual for TMY3 Data Sets**. National Renewable Energy Laboratory, 2008.

YANG, L.; LAM, J.; LIU, J. Analysis of Typical Meteorological Years in Different Climates of China. **Energy Conversion and Management**, v48: 2007. p 654-668.

YANG, L.; WAN, K.; LI, D.; LAM, J. A new method to develop typical weather years in different climates for building energy use studies. **Energy**, v36: 2011. p 6121-6129

ZANG, H.; XU, Q.; DU, P.; ICHIYANAGI, K. A modified method to generate Typical Meteorological Year from the Long-Term Weather Database. **International Journal of Photoenergy**, 2012. 9 pág.

## 4 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS INOVADORES DE SELEÇÃO DE DADOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

A obtenção um alto nível de precisão do desempenho energético e de conforto ambiental de uma edificação por meio de simulação, exige como primeiro requisito um arquivo climático elaborado também com um alto nível de precisão (CHOW et al, 2006).

O procedimento que gera as maiores incertezas nos arquivos climáticos é decorrente do método de seleção do ano estatístico, visto que esta etapa consiste na seleção de dados que terão a função de representar toda a complexidade climática de uma cidade. Tradicionalmente, são dois os tipos de representações climáticas mais usadas em análises de conforto e eficiência energética de edificações: os dias de projeto, composto de dias ou semanas representativas dos extremos do clima, ou ainda um dia artificial com dados calculados que caracterizam o clima; e arquivos compostos por um ano climático típico de referência, que são os mais utilizados em simulações computacionais do desempenho de edificações (ASHRAE HANDBOOKS, 2013; PERNIGOTTO, PRADA E HENSEN, 2014).

Os dias de projeto tem como conceito a caracterização resumida do clima, ou a identificação dos extremos climáticos a serem usados no dimensionamento de sistemas de climatização artificial. Tendo em vista esses objetivos, o uso de poucos dados atende perfeitamente esse tipo específico de análise. Já o desenvolvimento de arquivos compostos por um ano climático típico de referência é requisito mínimo para análises mais complexas sobre a edificação pois, menos de um ano de dados não é recomendado para a maioria das análises relacionadas à quantificação do conforto ambiental e eficiência energética de edificações, devido à sazonalidade por estações climáticas ou pelo ciclo de chuvas.

Mesmo com a popularização desses dois tipos de formatos estatísticos, é possível levantar uma série de questionamentos sobre as incertezas inerentes a tais arquivos afinal, resumir a complexidade do clima de uma cidade a um arquivo climático composto por apenas um ano de dados representativos é também uma simplificação impactante, que resulta em incertezas relevantes nos resultados finais. Como um edifício tem, em média, uma vida útil de décadas, as mudanças nos elementos do clima que ocorrem de um ano para o outro são também uma questão a ser considerada nas análises.

Mesmo com este questionamento latente, a opção pelo uso de apenas um ano climático de referência para compor arquivos climáticos se consolidou e se popularizou. Este contexto tem origem já nos primeiros estudos na área. Os programas computacionais para análise energética e de conforto ambiental de edificações têm sido desenvolvidos há, pelo menos, 40 anos (CRAWLEY et al, 2008), e como a caracterização

do clima do local onde está a edificação é essencial para as análises realizadas por estes programas, também na década de 70 iniciou-se o desenvolvimento de arquivos climáticos (CHOW et al, 2006). Nesta época, a escolha pelo desenvolvimento de arquivos climáticos com um ano climático de referência ocorreu, principalmente, em função da limitação da capacidade de processamento dos computadores. Mesmo que em muitos lugares já houvesse a disponibilidade de uma série considerável de dados climáticos medidos, como nos EUA e na Europa, era inviável realizar uma simulação com arquivos climáticos composto com períodos maiores do que um ano de dados climáticos.

Desta época à segunda década do séc. XXI, as pesquisas acerca das incertezas nos dados climáticos, o questionamento de métodos tradicionais e o surgimento de novos métodos para o desenvolvimento de arquivos climáticos se mantiveram em evidência, e tem se tornado cada vez mais frequentes (CHOW et al, 2006). Mas, os principais métodos de desenvolvimento de arquivos climáticos usados no mundo continuam se baseando na seleção de apenas um ano climático de referência. Houve uma evolução significativa nos procedimentos de seleção e montagem do ano climático, que se tornaram cada vez mais sofisticados estatisticamente, mas com a evolução constante da capacidade de processamentos dos computadores nas últimas décadas, surge o questionamento sobre as vantagens e a viabilidade de desenvolver arquivos climáticos usando mais do que um ano de dados.

Os arquivos climáticos multianuais, como são conhecidos, continuam sendo simplificações do clima local, mas, com um nível de precisão consideravelmente maior. Este permitem levar em consideração as variações que ocorrem de um ano para o outro, e não apenas as variações climáticas que ocorrem ao longo do ano. Mesmo que os resultados de simulação desejados sejam referentes a uma análise anual, uma simulação multianual permitirá uma abordagem probabilística mais detalhada, acrescentando à média anual obtida as margens de incertezas. Por esta razão, diversos trabalhos têm buscado comparar a qualidade dos resultados obtidos em simulações com apenas um ano de dados climáticos em relação a simulações realizadas com arquivos climáticos multianuais, buscando avaliar também a viabilidade de se utilizar mais de um ano em simulações computacionais. Destaque para os trabalhos de Crawley (1998), Hensen (1999), Struck et al (2009) e Kershaw, Eames e Coley (2011).

Em relação às incertezas, outro questionamento inerente aos métodos tradicionais usados para criar arquivos climáticos são as tendências de mudanças climáticas. Como já destacado, uma edificação construída poderá ser utilizada por décadas ao longo da sua vida útil, assim avaliar o desempenho da mesma com base apenas em dados históricos medidos limita as análises ao desempenho da edificação no tempo presente, gerando uma incerteza sobre seu desempenho ao passar dos anos e décadas. Retomando a lógica dos arquivos climáticos multianuais, se existem variações significativas de um ano para outro, em uma série curta

de dados climáticos medidos, que precisam ser levadas em consideração nos resultados de simulações, também haverá variações significativas que ocorrerão no clima daqui em diante e que, conseqüentemente, irão impactar o desempenho da edificação com o passar dos anos.

Nas últimas duas décadas, a preocupação da comunidade científica internacional tem aumentado cada vez mais no que se refere ao desenvolvimento de pesquisas que preveem os impactos causados pela degradação excessiva e descontrolada da natureza causada pela ação do homem, como por exemplo, as emissões de gases do efeito estufa. Entre as principais e mais urgentes conseqüências da ação antropogênica sobre a natureza estão as mudanças climáticas (CRAWLEY et al, 2007; CASAGRANDE e ALVARES, 2013).

Tomando como ponto de partida este contexto, muitos pesquisadores têm concentrado esforços no desenvolvimento de arquivos climáticos futuros, para que as simulações computacionais permitam realizar análises multianuais que, ao mesmo tempo, inclua dados históricos e futuros sobre o clima. Belcher et al (2005) apresentam em seu trabalho a proposta de um método para o desenvolvimento de arquivos climáticos futuros conhecida como *morphing* e diversas outras pesquisas têm sido publicadas com o mesmo foco como, Crawley (2007), Guan (2009), De Wilde e Tian (2009), Kershaw, Eames e Coley (2011), Casagrande e Alvares (2013). Porém, os impactos da degradação da natureza por ações antropogênicas não resultam apenas em alterações no clima futuro, mas também geram fenômenos climáticos que já afetam muitos centros urbanos, no presente, como as ilhas de calor (CRAWLEY et al, 2007). Fenômenos como estes podem gerar variações significativas nas características climáticas de uma região para outra em uma mesma cidade, o que gera as incertezas de usar um mesmo arquivo climático para todas as áreas de uma cidade, especialmente nos casos de metrópoles e megalópoles.

Reforçando o questionamento sobre as variações nas características climáticas em diferentes zonas de uma mesma cidade, é importante chamar a atenção para as incertezas referentes às diferenças entre características urbanas dos locais de coleta de dados em relação às características urbanas dos locais onde as edificações serão de fato construídas. Segundo Barnaby e Crawley (2011), em uma perspectiva ideal, dados climáticos usados para análises de edificações deveriam ser coletados exatamente no terreno da edificação, afinal as diferentes conformações urbanas e de relevo, criam variações no clima. Segundo o mesmo, historicamente, a medição de dados climáticos em larga escala apoiam variadas atividades ligadas à aviação e agricultura, mas, a aplicação dos dados climáticos em análises do desempenho de edificações quase nunca foi considerada ao se definir local e procedimento de medição. Nesse sentido, várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o foco em estudar o impacto das diferentes conformações urbanas em variações nos dados climáticos e o efeito dessa incerteza em simulações. Destaque para os trabalhos de Reinhart et al (2013), Crawley (2007), Chan (2011), Hensen (1999) e Williamson et al (2009).

Assim, este trabalho tem o objetivo de avaliar a relevância e a viabilidade de métodos inovadores de desenvolvimento de arquivos climáticos. Serão comparados arquivos climáticos desenvolvidos para a cidade de Viçosa-MG, a partir da mesma base de dados, usando os seguintes métodos: TMY3, que é o método tradicional mais difundido internacionalmente; multianual composto de todos os dados coletados; multianual que consiste em 3 anos de dados climáticos; multianual com 2 anos de dados climáticos; e o método das médias, proposto pelo autor.

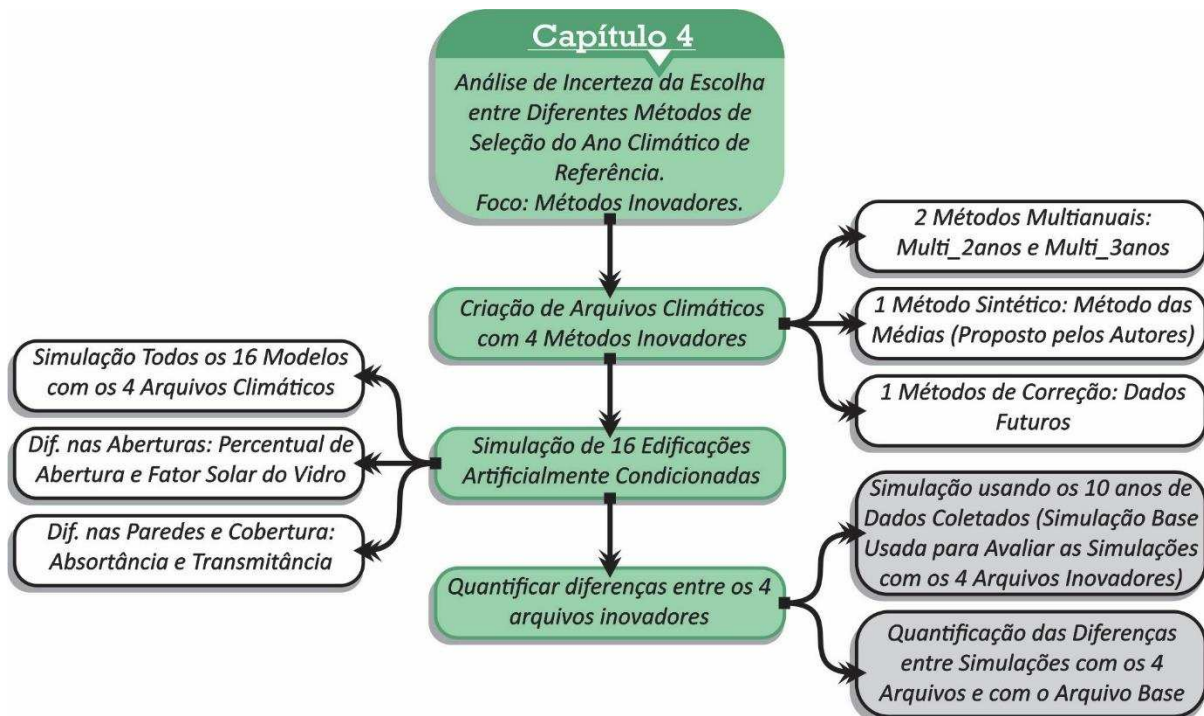
## 4.2 MÉTODO

### 4.2.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A Figura 4.1 apresenta uma síntese da etapa da pesquisa apresentada nesse capítulo. Inicialmente foram desenvolvidos 4 arquivos climáticos para a cidade de Viçosa-MG, usando 4 métodos inovadores usados internacionalmente. Para avaliar comparativamente os 4 arquivos climáticos e as incertezas da escolha entre os métodos, foram realizadas simulações com 16 modelos de edificações com características diferentes, para analisar a sensibilidade às mudanças nos dados climáticos.

Os 4 arquivos climáticos foram comparados entre si e, também foram quantificadas as diferenças em relação ao arquivo climático multianual de 10 anos e ao arquivo tradicional TMY3, discutido no capítulo anterior.

Figura 4.1 – Síntese dos métodos usados no capítulo 4.



#### 4.2.2 DESENVOLVIMENTO DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS

Os dados utilizados na confecção dos arquivos climáticos deste estudo são oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016), referentes à série histórica de novembro de 2005 a dezembro de 2015. Os elementos do clima coletados foram temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, radiação global horizontal, precipitação, velocidade e direção do vento. A medição e registro dos dados foi realizada com uma frequência horária que, segundo Barnaby e Crawley (2011), é o padrão de coleta adequado para confecção de arquivos climáticos para uso em software de simulação termo energética.

Segundo Barnaby e Crawley (2011) e Roriz (2012), dados medidos costumam apresentar lacunas e valores inconsistentes, assim é necessário um tratamento preliminar dos dados coletados para completar a série de dados e garantir a confiabilidade do arquivo. Nesse caso, foram aplicados procedimentos descritos por Carlo e Lamberts (2005), para completar dados ausentes, exceto para a temperatura do ponto de orvalho, cujas lacunas foram calculadas a partir dos dados horários de temperatura de bulbo seco e umidade relativa, com os modelos matemáticos de cálculo especificados por e Muneer (2004) e ASHRAE Handbooks Fundamentals (2013). Por fim, para complementar o tratamento, a consistência dos dados foi testada, segundo recomendações de Pittigliani (2000) e ENERGYPLUS (2015), para controle da qualidade.

Alguns parâmetros fundamentais para a confecção de arquivos climáticos que não foram medidos na estação climática foram calculados. Os parâmetros em questão foram Radiação Extraterrestre Global Horizontal, calculado segundo Muneer (2004); os demais dados de irradiação, calculados segundo Duffie e Beckman (1991) e Muneer (2004); além de dados de iluminância, calculados segundo Perez et al (1990) e Muneer (2004).

Após o tratamento completo dos dados, o passo seguinte consistiu na determinação do ano climático de referência. Foram desenvolvidos 4 arquivos climáticos, usando os mesmos dados climáticos da cidade de Viçosa-MG mas, cada um com métodos diferentes: o método das médias; o multianual de 2 anos (CRAWLEY, 1998); o multianual de 3 anos (HENSEN, 1999); o método de dados climáticos futuros (BELCHER et al, 2005), além do arquivo climático multianual com todos os 10 anos de dados climáticos coletados para Viçosa-MG, usado como base comparativa das análises. Estes métodos serão apresentados nos itens a seguir.

Os arquivos obtidos foram compilados para os formatos compatíveis com os programas de simulação computacional EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2015). Também foi criado um arquivo de extensão “.csv”, o qual foi usado para consulta e manipulação dos dados por meio de uma planilha eletrônica.

#### 4.2.2.1 MULTIANUAL DE 2 ANOS (Multi 2anos)

O método multi\_2anos tem como conceito uma proposta semelhante ao método tradicional TMY3, descrito no capítulo 3. O método TMY3 consiste em identificar a distribuição de probabilidade acumulada (DPA) de diversos parâmetros, para assim, selecionar um ano de referência que tenha a DPA mais semelhante com a DPA de toda a série de dados coletados. A diferença em relação ao multi\_2anos é que, além de selecionar o ano de referência mais semelhante, será selecionado também o ano de referência com as maiores diferenças. Dessa forma o resultado final das simulações será a média entre os resultados de arquivos climáticos com DPA mais semelhante e mais diferente em relação a toda a série de dados coletados.

Os procedimentos são os mesmos utilizados no desenvolvimento do arquivo climático TMY3, descrito no capítulo 3. A Tabela 4.1 mostra a composição do arquivo climático multi\_2anos. Nesta, o ano 1 é aquele com a DPA mais semelhante (corresponde ao arquivo TMY3), enquanto o ano 2 corresponde ao arquivo com a DPA mais diferente.

Tabela 4.1 - Composição do arquivo climático multi\_2anos.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>Ano1</b>	2011	2015	2008	2015	2010	2006	2007	2014	2010	2008	2013	2010
<b>Ano2</b>	2015	2010	2011	2013	2012	2013	2015	2013	2014	2011	2011	2008

#### 4.2.2.2 MULTIANUAL DE 3 ANOS (Multi 3anos)

O método multi\_3anos tem como conceito a identificação de um ano de referência com os valores mais baixos de temperatura e radiação, um outro ano com os valores mais altos de temperaturas e radiação, e por fim um ano com valores médios para os mesmos parâmetros. As análises são feitas para cada mês independentemente, assim, os meses selecionados para compor o ano de referência podem ser de anos distintos, e posteriormente é feita a montagem de um ano climático artificial com a junção dos meses climáticos de referência selecionados.

Os procedimentos, que são aplicados separadamente para cada mês do ano, consistem em: (1) calcular as médias mensais de temperaturas de bulbo seco e as médias mensais dos totais diários de radiação global horizontal, para cada ano separadamente; (2) selecionar o ano que apresentou as médias mais baixas de temperatura e radiação; (3) selecionar o ano que apresentou as médias mais altas de temperatura e radiação; (4) selecionar o ano que apresentou as médias de temperatura e radiação.

A Tabela 4.2 mostra a composição do arquivo climático multi\_3anos. Nesta, o ano 1 é composto dos meses com as médias mais baixas, o ano 2 é o com as médias, enquanto o ano 3 tem as médias mais altas.

Tabela 4.2 - Composição do arquivo multi\_3anos.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>Ano1</b>	2012	2013	2011	2013	2012	2009	2013	2013	2006	2011	2010	2011
<b>Ano2</b>	2011	2009	2009	2009	2009	2008	2007	2014	2013	2008	2013	2007
<b>Ano3</b>	2015	2014	2006	2008	2014	2014	2009	2008	2014	2015	2009	2014

#### 4.2.2.3 MÉTODO DAS MÉDIAS (Sintético)

O método das médias é um método simples que tem como proposta criar um ano climático de referência sintético, a partir do cálculo das medidas horárias de todos os elementos do clima, em relação à série de anos de dados coletados. Ou seja, para cada uma das 8760 horas que compõem o ano é calculada a média usando os valores daquela mesma hora do ano, de todos os anos de dados coletados. Esse processo é aplicado a todos os parâmetros coletados e também aos calculados. Desta forma, o resultado obtido será um arquivo climático com dados artificiais, que podem ou não ter ocorrido, mas que representa as características usuais do clima local.

#### 4.2.2.4 MÉTODO DE DADOS CLIMÁTICOS FUTUROS (Morphing)

O método *Morphing* consiste em ajustar os dados do arquivo climático de uma cidade, a partir de estimativas de mudanças climáticas a médio e longo prazo. Existem diversos estudos que visam estimar os impactos ambientais futuros em função das tendências identificadas nas últimas décadas e, dentre esses estudos, um dos principais focos está em estimar a mudanças climáticas. Este método propõe a aplicação das alterações climáticas estimadas de algum estudo, escolhido pelo desenvolvedor, no arquivo climático da cidade, para desta forma avaliar o impacto das mudanças climáticas no desempenho termo energético de edificações (BELCHER et al, 2005).

As estimativas de mudanças climáticas ocorrem de três formas: (1) por desvio, que corresponde a aumentar ou diminuir um parâmetro por soma ou subtração; (2) por extensão, em que o aumento ou diminuição é feita de forma proporcional (multiplicação ou divisão); (3) por desvio e extensão, o qual corresponde às duas primeiras alternativas aplicadas concomitantemente (BELCHER et al, 2005).

Os arquivos climáticos futuros para este estudo da cidade de Viçosa-MG foram desenvolvidos com o apoio da ferramenta denominada *Climate Change World Weather File Generator* (JENTSCH, BAHAJ E JAMES, 2008). Esta ferramenta utiliza o método *Morphing*, com base no terceiro relatório do IPCC (IPCC, 2001), mais especificamente o modelo global HadCM3. O cenário de emissões considerado foi o A2, que corresponde a um cenário pessimista.

Foram desenvolvidos três arquivos climáticos futuros: estimativa de 30 anos no futuro; estimativa de 60 anos no futuro; e estimativa de 90 anos no futuro. E o arquivo usado como base e, que corresponde ao presente nas análises realizadas, é o TMY3. Vale destacar que o relatório do IPCC toma como base dados entre 1961 e 1990, e por essa razão seria recomendável utilizar um arquivo climático desenvolvido com dados desse mesmo período. Porém, não há um arquivo climático de Viçosa relativo a esse período, e também não há dados horários medidos nesse período que sejam adequados para o desenvolvimento de um arquivo climático, por essa razão, optou-se por utilizar o arquivo climático referente ao período de 2006 a 2015.

A tabela 4.3 mostra a composição do arquivo climático TMY3, usado como base para os arquivos climáticos futuros.

Tabela 4.3- Composição do arquivo climático TMY3.

	<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>TMY3</b>	2011	2015	2008	2015	2010	2006	2007	2014	2010	2008	2013	2010

#### 4.2.2.5 MÉTODO MULTIANUAL COM TODOS OS DADOS COLETADOS

Este método multianual consiste em realizar uma simulação com um arquivo climático composto de todos os dados climáticos coletados que estejam aptos a serem processados. Neste estudo, foram coletados dados entre novembro de 2005 a dezembro de 2015, da cidade de Viçosa-MG. Porém, nem todos esses dados estavam aptos para uso, sendo que alguns meses foram corrigidos e utilizados e outros foram descartados por excesso de erros ou lacunas. A Tabela 4.4 mostra a relação dos dados aptos e dos descartados entre os 10 anos de dados climáticos coletados.

Tabela 4.4 - Composição do arquivo climático multianual.

	<b>JAN</b>	<b>FEV</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SET</b>	<b>OUT</b>	<b>NOV</b>	<b>DEZ</b>
<b>2005</b>	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	<b>Desc</b>	Apto
<b>2006</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	<b>Desc</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2007</b>	<b>Desc</b>	<b>Desc</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2008</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2009</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	<b>Desc</b>
<b>2010</b>	Apto	Apto	<b>Desc</b>	Apto	Apto	<b>Desc</b>	<b>Desc</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2011</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2012</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2013</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2014</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
<b>2015</b>	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	<b>Desc</b>	Apto	Apto	Apto

Como haviam meses de dados que foram descartados, se tornou inviável simplesmente montar os anos no arquivo climático multianual na sua ordem convencional, pois assim haveriam lacunas, o que não é aceitável na montagem de um arquivo climático. Para solucionar esse problema, cada mês descartado foi

substituído por dados do mesmo mês do ano seguinte, exceto para o mês de setembro de 2015, no qual utilizou-se os dados de setembro de 2014. O ano de 2005 foi descartado por conter apenas o mês de dezembro. Assim, foi criado um arquivo climático composto de 10 anos de dados climáticos.

#### 4.2.3 DESCRIÇÃO DAS EDIFICAÇÕES MODELADAS E SIMULADAS

Para analisar as diferenças nos resultados de simulação causadas pela escolha entre os diferentes arquivos climáticos analisados, os mesmos foram usados em simulações termo energéticas idênticas. Foram simulados com cada arquivo climático, 16 modelos de edificações artificialmente condicionados com características diferentes, para avaliar paralelamente se tipos de edificações diferentes tem sensibilidades diferentes à mudança do arquivo climático.

Os 16 modelos possuem 2025 m<sup>2</sup> de área total de piso, com geometrias, número de pavimentos e zoneamentos térmicos idênticos. Foi usado um zoneamento térmico contendo cinco zonas, sendo uma central e quatro periféricas (Figuras 4.2 e 4.3). A variação entre eles se deu em relação aos seguintes fatores: percentual de aberturas envidraçadas, o fator solar do vidro, além da transmitância e absorvância dos materiais de fechamento opacos das paredes, pisos e coberturas. As Tabelas 4.5 e 4.6 descrevem as características usadas em cada um dos 16 modelos. Vale destacar que, para configurar o condicionamento artificial, foi utilizado o recurso do *EnergyPlus* chamado *Ideal Loads* (cargas térmicas ideais), este permite a inclusão de um sistema de condicionamento artificial ideal, ou seja, com eficiência de 100%.

Figura 4.2 - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 20%. E apresentação do zoneamento térmico dos modelos simulados.

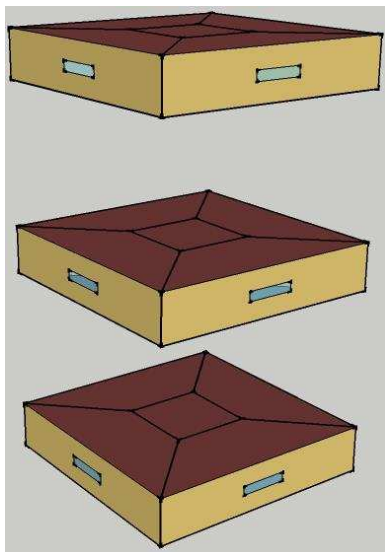


Figura 4.3 - Representação dos modelos com percentual com abertura nas fachadas de 70%. E apresentação do dimensionamento dos modelos simulados.

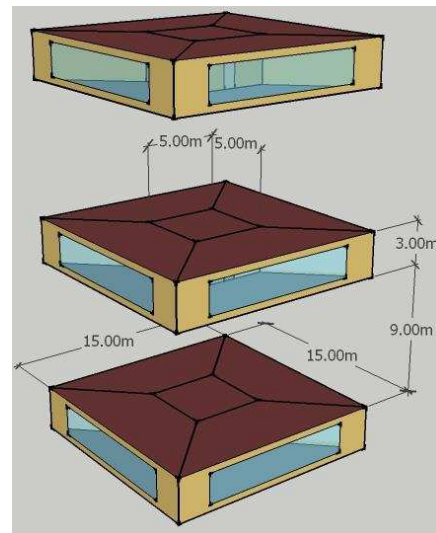


Tabela 4.5 - Características construtivas dos modelos simulados.

<b>Características Formais</b>
--------------------------------

<i>Razão Entre as Fachadas</i>	1:1	
<i>Dimensão das Fachadas Laterais</i>	15m	
<i>Número de Pavimentos</i>	9	
<b>Características das Aberturas</b>		
<i>Percentual de Abertura</i>	20%	70%
<i>Fatos Solar do Vidro</i>	0,25	0,67
<b>Características das Paredes, Pisos e Coberturas</b>		
<i>Transmitância</i>	0,5	4,0
<i>Absortância</i>	0,3	0,7
<i>Capacidade Térmica</i>	200	

Tabela 4.6 – Descrição das características das variáveis de cada um dos 16 modelos.

<b>Nome</b>	<b>% Aberturas na Fachada</b>	<b>Fator Solar do Vidro</b>	<b>Transmitância (W/m<sup>2</sup>°C)</b>	<b>Absortância</b>
<b>Mod1</b>	20%	0,67	0,5	0,3
<b>Mod2</b>	20%	0,67	0,5	0,7
<b>Mod3</b>	20%	0,67	4,0	0,3
<b>Mod4</b>	20%	0,67	4,0	0,7
<b>Mod5</b>	20%	0,25	0,5	0,3
<b>Mod6</b>	20%	0,25	0,5	0,7
<b>Mod7</b>	20%	0,25	4,0	0,3
<b>Mod8</b>	20%	0,25	4,0	0,7
<b>Mod9</b>	70%	0,67	0,5	0,3
<b>Mod10</b>	70%	0,67	0,5	0,7
<b>Mod11</b>	70%	0,67	4,0	0,3
<b>Mod12</b>	70%	0,67	4,0	0,7
<b>Mod13</b>	70%	0,25	0,5	0,3
<b>Mod14</b>	70%	0,25	0,5	0,7
<b>Mod15</b>	70%	0,25	4,0	0,3
<b>Mod16</b>	70%	0,25	4,0	0,7

#### 4.2.4 DESCRIÇÃO DAS ANÁLISES REALIZADAS

O primeiro foco das análises consistiu na comparação dos resultados de simulações realizadas com 3 dos arquivos climáticos inovadores: sintético, multianual de 2 anos e multianual de 3 anos. Foram apresentados os resultados individuais para cada arquivo e suas diferenças em relação à média anual da simulação com o arquivo climático multianual. Afim de enriquecer as análises, foi acrescentado aos gráficos os dados relativos ao TMY3, analisado no capítulo anterior e apontado como o método tradicional mais confiável.

Os dados de saída das simulações para os 16 modelos de edificações artificialmente condicionadas foram os totais anuais das cargas térmicas de aquecimento e resfriamento. Além disso, os modelos 5 e 12 foram escolhidos para a realização de uma análise mais detalhada dos totais diários de aquecimento e resfriamento. E por fim, foi analisado também o erro quadrático médio (EQM) dos totais diários dos resultados das simulações, entre cada arquivo e o arquivo multianual.

O Erro Quadrático Médio (*EQM*) é definido pela Equação 49.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{Estimando} - X_{Base} / X_{Base})^2}{N}} \quad (49)$$

$X_{Estimado}$  = Dado Estimado, referente ao arquivo climático analisado.

$X_{Base}$  = Dado Base, referente ao arquivo climático de 10 anos.

$N$  = Número de dados analisados, neste caso o número de dias do ano, 365.

O segundo foco das análises consistiu na comparação dos resultados de simulações realizadas com os 3 arquivos climáticos futuros: estimativa de 30 anos no futuro; estimativa de 60 anos no futuro; e estimativa de 90 anos no futuro. Estes dados foram comparados com o arquivo TMY3, que foi usado como base para desenvolvimento dos arquivos futuros. O TMY3 representa nesta análise as estimativas do presente sobre o desempenho das edificações, enquanto os outros três arquivos representam estimativas futuras. Foram comparados os totais anuais de cargas térmicas de aquecimento e de resfriamento, além das diferenças percentuais entre resultados das simulações com os quatro arquivos.

## 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.3.1 ANÁLISES DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS INOVADORES

Os métodos inovadores de desenvolvimento de arquivo climático têm como objetivo a busca pelo aprimoramento da qualidade encontrada nos arquivos desenvolvidos com métodos tradicionais, compostos por um ano representativo. Conduzir uma simulação utilizando todos os dados climáticos disponíveis de uma cidade não é viável para a maioria das aplicações, porém, já é viável pensar em simulações maiores que um ano em função do desenvolvimento da capacidade de processamento dos computadores. A ideia principal é reduzir ainda mais as diferenças entre os métodos tradicionais e as simulações conduzidas com o arquivo climático composto por todos os dados da cidade, para conseguir resultados com as menores incertezas possíveis, porém com simulações viáveis em relação ao tempo.

#### 4.3.1.1 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE AQUECIMENTO

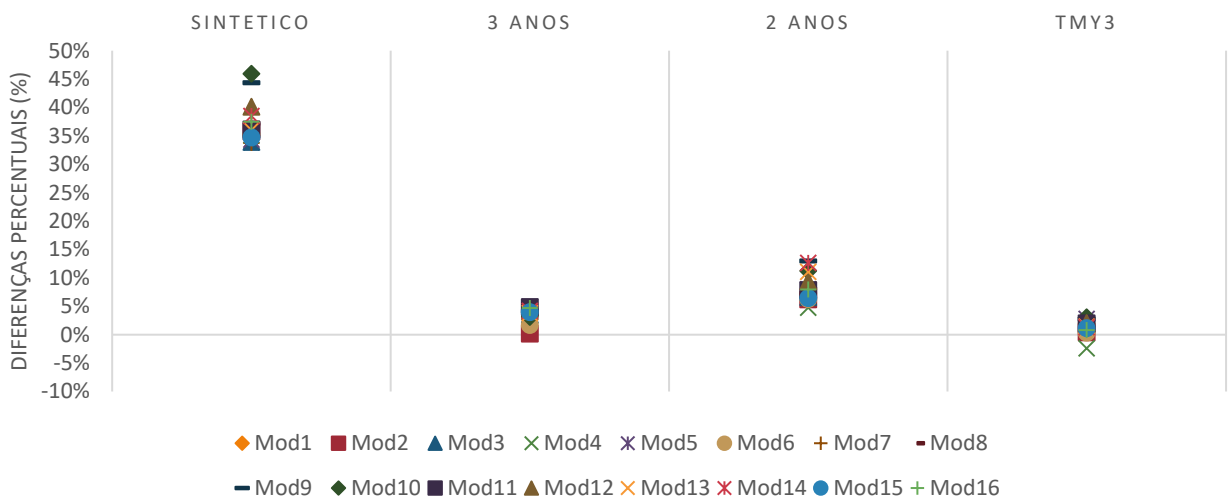
A Figura 4.4 apresenta as diferenças percentuais dos resultados dos totais anuais das cargas térmicas de aquecimento, entre as simulações com 3 arquivos climáticos inovadores (multi\_2anos, multi\_3 anos e sintético), com 1 dos arquivos tradicionais (TMY3), além das simulações com o arquivo climático multi\_10anos.

O primeiro aspecto a se destacar em relação as análises é que o arquivo climático sintético tem uma confiabilidade consideravelmente baixa para todos os modelos de edificações simuladas. Com diferenças percentuais acima de 30% em todos os casos e chegando a 47% em relação ao modelo 10. Sendo assim, os resultados deste arquivo climático apenas reforçam a importância das simulações multianuais. Simular os 10

anos de dados climáticos e calcular a média anual dos resultados, não equivale a montar um arquivo com a médias anual dos elementos do clima e simular apenas este ano sintético. Outro aspecto a se destacar nas análises é que em relação aos outros métodos analisados (multi\_2anos, multi\_3anos e TMY3) os resultados apresentaram-se aproximados aos resultados do arquivo multianual, as diferenças percentuais são em geral baixas. Mas, alguns métodos obtiveram resultados melhores que outros.

Nota-se que o multi\_3anos apresentou diferenças percentuais baixas em relação ao multi\_10anos, com menos de 5% de variação em todos os casos. Porém, o TMY3 apresentou resultados ainda mais precisos, com menos de 3% de variação em relação ao multi\_10anos, em todos os casos. Já o arquivo multi\_2anos apresentou diferenças consideravelmente maiores, acima de 5% para todos os casos, chegando a 14% para os modelos 10 e 14.

Figura 4.4 – Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de aquecimento de cada um dos 3 arquivos climáticos inovadores e do TMY3, em relação aos resultados do arquivo climático multianual.



Seguindo para análises dos totais diários das cargas térmicas de aquecimento, com intuito de avaliar a semelhança dos padrões de ocorrência ao longo do ano dos 3 arquivos inovadores e do TMY3 em relação ao arquivo multi\_10anos, as Figuras 4.5 e 4.6 apresentam algumas medidas de posição e de variação, do modelo 5 e do modelo 12, respectivamente. Estes modelos foram selecionados por serem as edificações mais discrepantes, enquanto o modelo 5 tem baixa transmitância, baixa absorvância, baixo percentual de abertura, e baixo fator solar dos vidros, o modelo 12 tem características opostas.

Observa-se na Figura 4.5, que nos 3 primeiros quartis os arquivos climáticos são semelhantes entre si, a exceção do arquivo sintético, com cargas de aquecimento máximas para o modelo 5, de aproximadamente 7,0 kW e, de aproximadamente 18 kW para o modelo 12. Por outro lado, no 4º quartil, coincidente com o período de inverno, há uma discrepância apenas quanto ao TMY3. Já os arquivos

multi\_3anos e multi\_2anos exibiram valores muito próximo ao do arquivo multi\_10anos. As mesmas observações são válidas para a Figura 4.6.

Os resultados das Figuras 4.5, 4.6 e da Figura 4.4, quando relacionados demonstram que, apesar de o TMY3 ter apresentado as menores diferenças quanto às análises anuais, obteve diferenças consideráveis em relação as análises diárias. Já o arquivo multi\_3anos apresentou diferenças baixas nas análises anuais, bem como, nas análises dos padrões de ocorrência diárias.

Figura 4.5 – Totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 5.

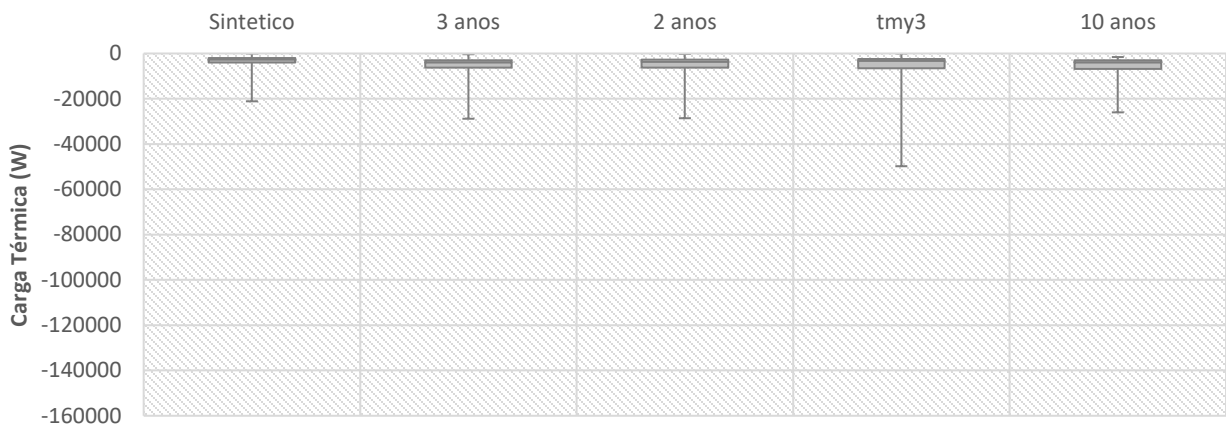
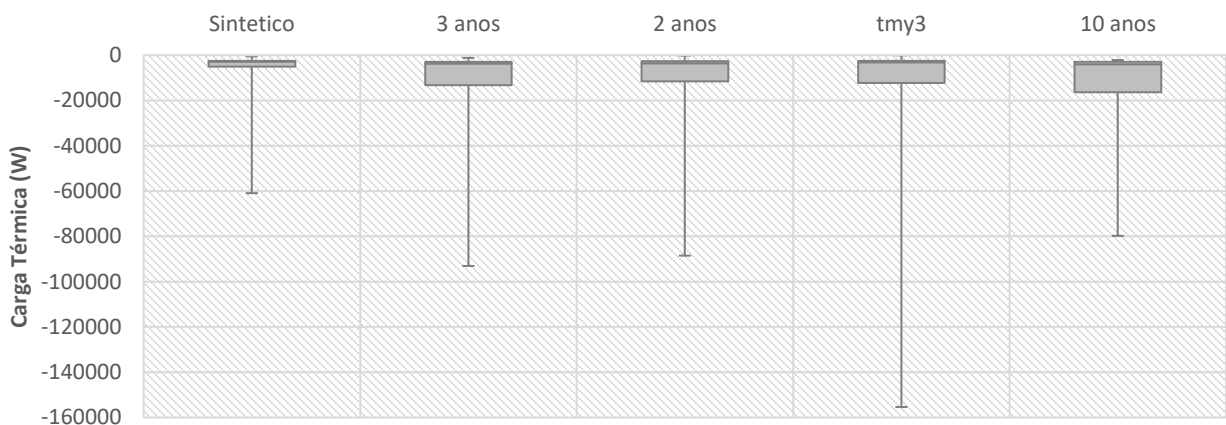


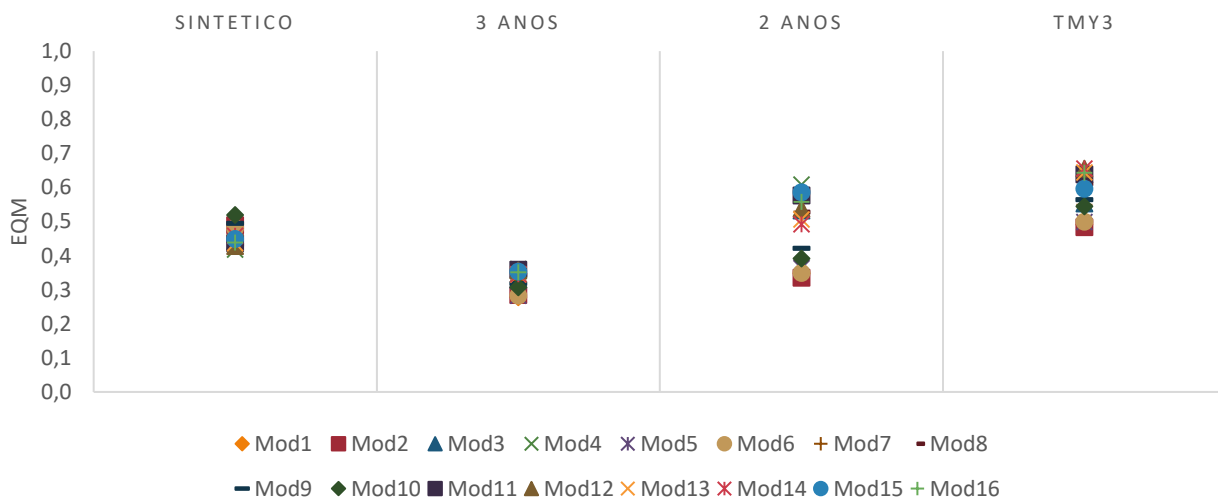
Figura 4.6 – Totais diários das cargas térmicas de aquecimento, para as simulações com o modelo 12.



Corroborando as análises anteriores, a Figura 4.7 expõem os erros quadráticos médios (EQM) entre cada um dos quatro arquivos inovadores, o arquivo tradicional e o arquivo multianual, no que se refere aos totais diários de cargas térmicas de aquecimento. Nota-se que o arquivo climático multi\_3anos foi o que apresentou os melhores resultados, com EQM abaixo de 0,4 para todos os casos, enquanto o TMY3, que havia sido o mais preciso dos métodos tradicionais, se destacou obtendo resultados sempre acima de 0,5, chegando a 0,6 para os modelos 1, 2 e 12. Já o arquivo multi\_2anos apresentou resultados intermediários entre os dois.

Estes resultados indicam que apesar do arquivo TMY3 apresentar uma maior confiabilidade quando às análises anuais, essa confiabilidade não necessariamente se estende para análises relativas a períodos menores do ano, ou seja, análises sazonais ou mensais tendem a apresentar diferenças percentuais maiores. Já o arquivo multi\_3anos apresentou diferenças baixas quanto a análises anuais, bem como, em relação aos padrões de ocorrência ao longo do ano.

Figura 4.7 – Erro Quadrático Médio (EQM) de cada um dos 3 arquivos climático inovadores e do TMY3, em relação ao arquivo multianual, tendo como foco aos totais diários das cargas térmicas de aquecimento.

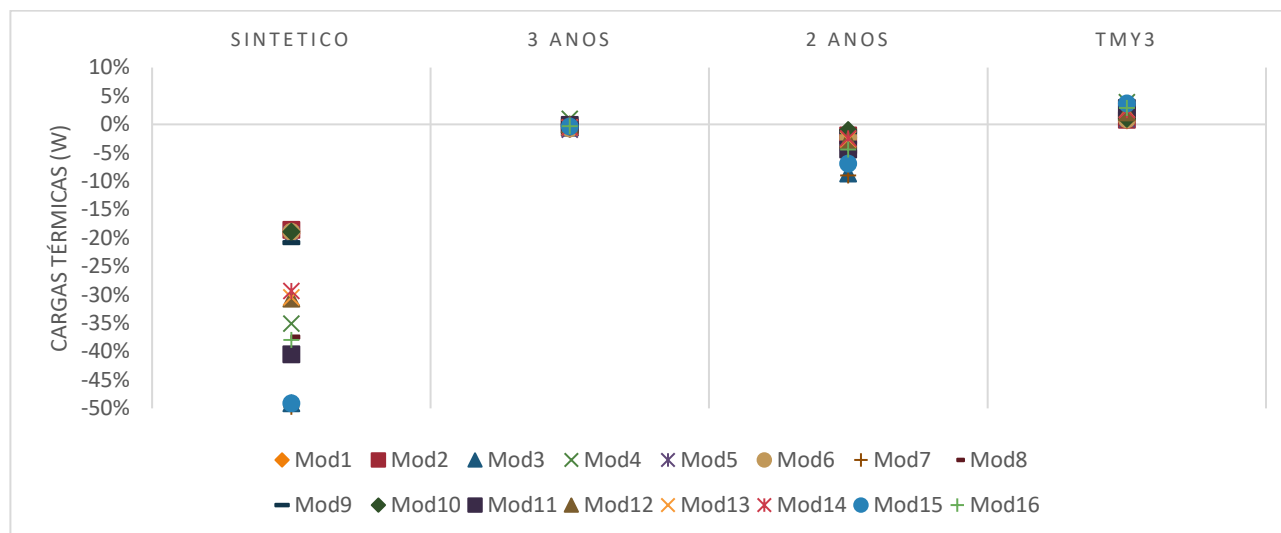


#### 4.3.1.2 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE RESFRIAMENTO

A Figura 4.8 apresenta as diferenças percentuais dos totais anuais das cargas térmicas de resfriamento entre as simulações dos 4 arquivos climáticos analisados e as simulações com o arquivo climático multi\_10anos. Nota-se inicialmente que o arquivo climático sintético tem uma confiabilidade consideravelmente baixa para todos os modelos de edificações simuladas. Com diferenças percentuais entre 15% e 30% para os modelos com baixas transmitâncias e, entre 30% e 50% para os modelos com altas transmitâncias. Enquanto, os outros 3 arquivos apresentaram resultados aproximados aos do arquivo multianual com diferenças percentuais, em geral, baixas.

Nota-se também que os TMY3 e multi\_3anos apresentaram bons resultados, abaixo de 5% para todos os casos, com destaque para o multi\_3anos que apresentou diferenças abaixo de 1% para todos os casos. Enquanto o multi\_2anos apresentou diferenças percentuais maiores, chegando a 9% para o modelo7.

Figura 4.8 – Diferenças percentuais entre os resultados do totais anuais de cargas térmicas de resfriamento de cada um dos 3 arquivos climáticos inovadores e do TMY3, em relação aos resultados do arquivo climático multianual.



Em relação as análises dos totais diários das cargas térmicas de resfriamento, as Figuras 4.9 e 4.10 apresentam algumas medidas de posição e de variação, além da frequência de ocorrência simplificada. A Figura 4.9 exibe os resultados das simulações realizadas com o modelo 5, enquanto a Figura 4.10 traz os resultados do modelo 12.

A Figura 4.9 indicou em relação aos 3 primeiros quartis que, com exceção do arquivo sintético, todos os outros arquivos apresentaram resultados similares ao multi\_10anos, inclusive quanto ao valor da mediana, que foi de, aproximadamente, 57 kW para todos. Já em relação ao quarto quartil, com exceção do arquivo sintético, os demais obtiveram resultados semelhantes, porém, o multi\_3anos foi o que mais se aproximou do multi\_10anos, com pico de, aproximadamente, 140 kW contra picos de 155 kW para o TMY3 e o multi\_2anos.

Em paralelo, a Figura 4.10 revelou que apesar da aproximação considerável dos arquivos TMY3 e multi\_3anos com relação ao multi\_10anos, o multi\_3anos foi, novamente, aquele que apresentou maior aproximação. Em relação aos 3 primeiros quartis, o multi\_3anos e o multi\_10anos apresentaram resultados praticamente idênticos, com uma pequena diferença quanto a mediana, de 155 kW para 165 kW, respectivamente. Já em relação ao quarto quartil, os resultados também foram semelhantes, com uma pequena variação em relação aos máximos anuais, de 370 kW no arquivo multi\_10anos para 400 kW no arquivo multi\_3anos.

Figura 4.9 – Totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 5.

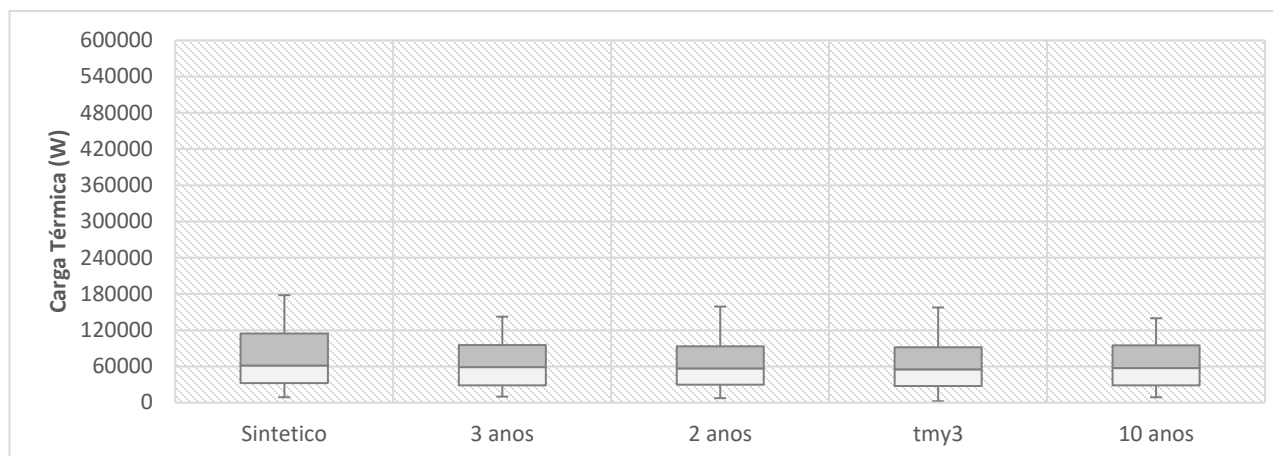
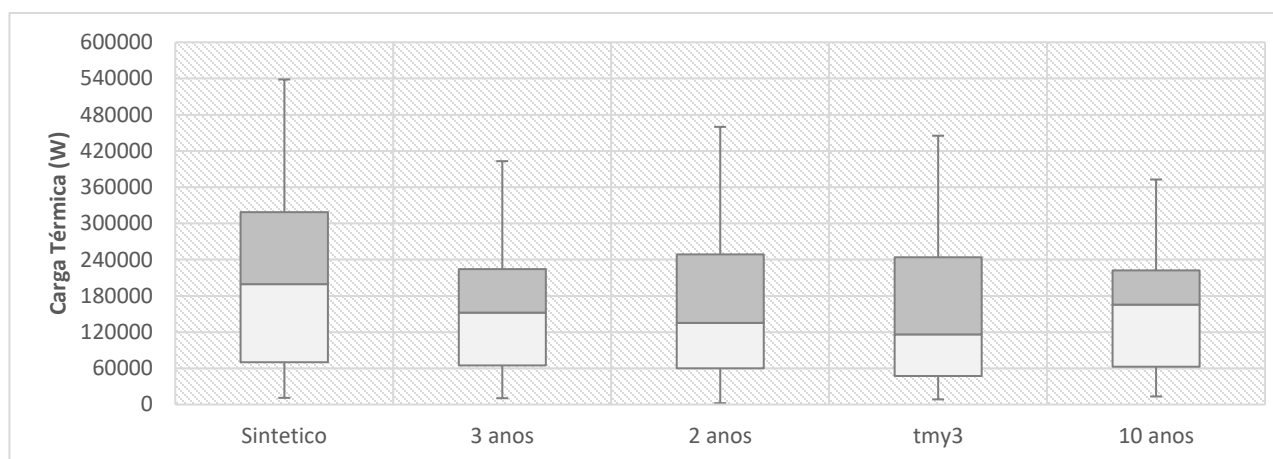


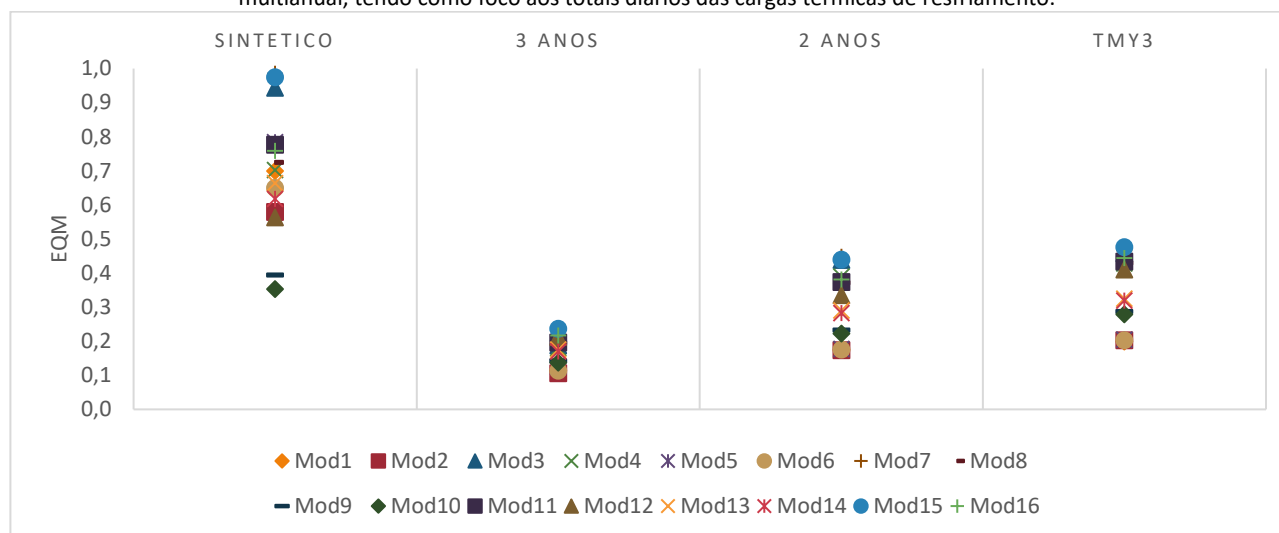
Figura 4.10 – Totais diários das cargas térmicas de resfriamento, para as simulações com o modelo 12.



Já a Figuras 4.11 revela os erros quadráticos médios (EQM) entre cada um dos quatro arquivos climáticos analisados e o arquivo multianual, no que se refere aos totais diários de cargas térmicas de resfriamento. Nota-se na análise, que o arquivo climático multi\_3anos foi o que apresentou os melhores resultados, com EQM abaixo de 0,25 para todos os casos. Por outro lado, os arquivos TMY3 e mult\_2anos, apresentaram dois cenários distintos: (1) para os modelos com baixa transmitância, as diferenças em relação ao multi\_10anos foram baixas, com EQM abaixo de 0,3; (2) para os modelos com altas transmitância, as diferenças foram expressivas, onde o multi\_2anos exibiu EQM entre 0,3 e 0,5 e o TMY3 mostrou resultados entre 0,4 e 0,5.

Estas análises indicam que o arquivo multi\_3anos tem uma maior aproximação com o multi\_10anos, tanto para análises anuais, quanto para as análises dos totais diários. Este apresentou diferenças percentuais abaixo de 1% quanto as análises anuais e, diferenças abaixo de 0,2 EQM nas análises diárias.

Figura 4.11 – Erro Quadrático Médio (EQM) de cada um dos 3 arquivos climático inovadores e do TMY3, em relação ao arquivo multianual, tendo como foco aos totais diários das cargas térmicas de resfriamento.



#### 4.3.1.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MÉTODOS INOVADORES

Entre os arquivos climáticos inovadores analisados, aquele que apresentou menor diferença em relação ao arquivo climático multianual, quanto a simulações de cargas térmicas de aquecimento e de resfriamento, foi o multi\_3anos. Este exibiu resultados melhores que o arquivo climático tradicional TMY3, que foi apontado como o melhor entre os arquivos tradicionais, no capítulo anterior. Em contraponto, o arquivo climático sintético se mostrou inadequado para uso em todos os aspectos. Vale ressaltar que, o arquivo multi-2anos também apresentou resultados que o qualificam como um bom método, porém não tão confiável como o método multi-3anos.

O método multi-3anos revelou-se um aprimoramento em relação aos métodos tradicionais, como o TMY3, por manter baixas as diferenças percentuais das análises anuais, ao mesmo tempo que reduz, consideravelmente, as diferenças percentuais referentes às análises de períodos menores. Nas análises dos totais anuais de cargas térmicas obteve os resultados sempre abaixo de 5% em relação ao multi\_10anos, sendo que nas análises das cargas térmicas de resfriamento, as diferenças não passaram de 1%. Já nas análises dos totais diárias de cargas térmicas, mostrou padrões de ocorrência também aproximados em relação ao arquivo multi\_10anos, apresentando EQM sempre abaixo de 0,4, e quanto às cargas térmicas de resfriamento, obteve EQM sempre abaixo de 0,25.

Por fim, em estudos onde as análises sazonais ou mensais são relevantes, o arquivo multi\_3anos tende a ser o mais confiável. Mas, por outro lado, uma simulação multianual requer um maior custo de tempo para ser realizada quando comparada aos métodos tradicionais. O multi\_3anos requer, aproximadamente, 3 vezes menos tempo que uma simulação com o arquivo multi\_10anos, porém demanda 3 vezes mais tempo

que uma simulação composta de um ano representativo, como as realizadas pelo TMY3. Por esta razão, para estudos em que o foco são análises anuais o TMY3 continua sendo o método mais recomendado.

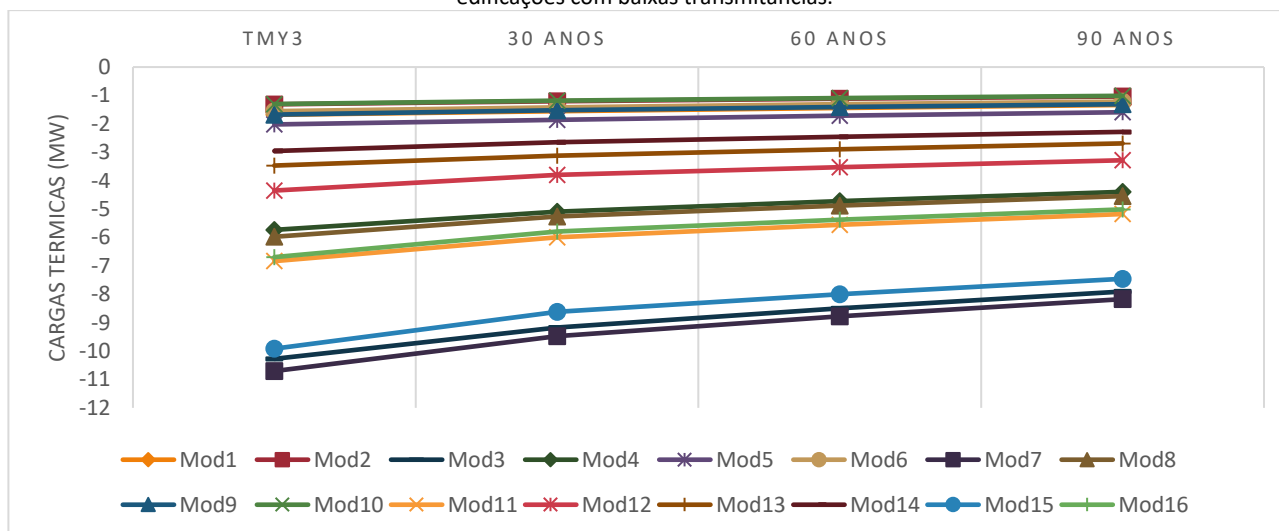
### 4.3.2 ARQUIVO CLIMÁTICO COM PREVISÕES FUTURAS

#### 4.3.2.1 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE AQUECIMENTO

A Figura 4.12 apresenta os totais anuais das cargas térmicas de aquecimento para 16 modelos de edificações artificialmente condicionadas. Esta, revela diferenças percentuais regulares entre cada período, nos casos dos modelos com baixa transmitância, observou-se um aumento médio de aproximadamente 9,8% entre o TMY3 e a estimativa de 30 anos no futuro, um aumento médio de 9,2% entre 30 anos e a estimativa de 60 anos no futuro e, entre 60 anos e a estimativa de 90 anos no futuro. Os modelos com altas transmitâncias também apresentaram uma tendência de diferenças percentuais regulares entre cada período, porém com intensidades maiores que os modelos de baixa transmitância, como esperado. Observou-se um aumento médio de aproximadamente 13,7% entre o TMY3 a estimativa de 30 anos no futuro, um aumento médio de 12,9% entre 30 anos e 60 anos no futuro e, de 13,5% entre 60 anos e 90 anos no futuro.

Outra observação importante, é que a análise mostrou o percentual de abertura como uma variável relevantes. Em relação ao período entre o TMY3 e o arquivo de 30 anos no futuro, por exemplo, os modelos 3, 4, 7 e 8, que têm um baixo percentual de abertura, obtiveram uma média de aumento de 12,5%, enquanto os modelos 11, 12, 15 e 16, que têm um alto percentual de aberturas, obtiveram uma média de 14,8%.

Figura 4.12 – Previsão dos totais anuais das cargas térmicas de aquecimento para 2020, 2050 e 2080. Relativos aos 8 modelos de edificações com baixas transmitâncias.



#### 4.3.2.2 ANÁLISE DAS CARGAS TÉRMICAS DE RESFRIAMENTO

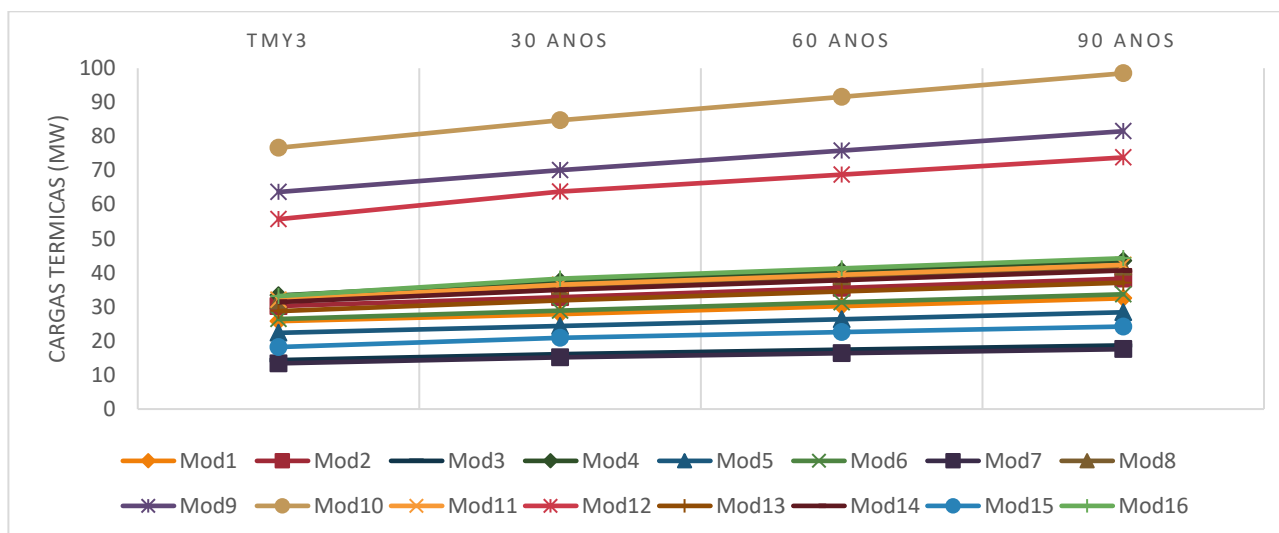
Os totais anuais das cargas térmicas de resfriamento para 16 modelos de edificações artificialmente condicionadas, são mostradas na Figura 4.13. As análises revelaram que os resultados das diferenças

percentuais entre cada arquivo climático quanto a carga térmica de resfriamento, foram semelhantes aos resultados identificados na análise das cargas térmicas de aquecimento.

Tanto para os modelos com baixa transmitância quanto para os modelos com altas transmitância, houve uma tendência de diferenças percentuais regulares entre cada período. A diferença média entre os arquivos TMY3 e a estimativa de 30 anos no futuro, foi de 10,1% para os modelos com baixa transmitância, e de 13,9% para os modelos com alta transmitância. Entre o arquivo de 30 anos e a estimativa de 60 anos no futuro, a média das diferenças dos modelos com baixa transmitância foi de 9,6%, enquanto a média dos modelos com alta transmitância foi de 13,4%. Já as médias das diferenças entre o arquivo de 60 anos e a estimativa de 90 anos no futuro, foram de 9,8% para os modelos com baixa transmitância e de 13,7% para os com altas transmitâncias.

Outra observação importante, é que esta análise também mostrou o percentual de abertura como uma variável relevantes. Em relação ao período entre o TMY3 e o arquivo de 30 anos no futuro, por exemplo, os modelos 3, 4, 7 e 8, que têm um baixo percentual de abertura, obtiveram uma média de aumento de 12,2%, enquanto os modelos 11, 12, 15 e 16, que têm um alto percentual de aberturas, obtiveram uma média de 14,5%.

Figura 4.13 – Previsão dos totais anuais das cargas térmicas de resfriamento para 2020, 2050 e 2080. Relativos aos 8 modelos de edificações com baixas transmitâncias.



#### 4.3.2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ARQUIVOS CLIMÁTICOS COM PREVISÕES FUTURAS

Os resultados apresentados sobre os arquivos climáticos futuros, apresentam algumas incertezas do seu processo de desenvolvimento. Primeiramente, como as estimativas futuras apontadas nos relatórios do IPCC, foram feitas com base em dados históricos entre 1961 e 1990, seria importante usar arquivos climáticos desenvolvidos com o uso de dados do mesmo período para a cidade de Viçosa. Além disso, os cenários

utilizados no desenvolvimento dos arquivos são referentes a mudanças climáticas globais, que promovem uma simplificação das variações do clima em uma escala que não permite de forma precisa entender os impactos regionais.

Em geral, observou-se incertezas relevantes nos dados climáticos usados em simulação, devido a um padrão homogêneo de aumento nas cargas térmicas de aquecimento e resfriamento entre cada um dos períodos analisados. Os modelos com baixas transmitâncias obtiveram variações de aproximadamente 9% em cada um dos períodos: entre presente (TMY3) e a estimativa de 30 anos no futuro; entre 30 anos no futuro e a estimativa de 60 anos no futuro; e entre 60 anos no futuro e a estimativa de 90 anos no futuro. Já os modelos com altas transmitâncias apresentaram diferenças percentuais de aproximadamente 13% para os mesmos três períodos.

#### 4.4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a qualidade dos arquivos climáticos desenvolvidos por meio dos métodos inovadores de desenvolvimento de arquivos climáticos, mais especificamente os métodos: Sintético, mult\_2anos e multi\_3anos. Foram comparados os totais anuais e os totais diários de cargas térmicas de aquecimento e resfriamento, entre os três arquivos climáticos citados, além do arquivo TMY3 e do arquivo multi\_10anos (composto de todos os dados climáticos coletados para Viçosa).

Os resultados mostraram que os métodos inovadores são um aprimoramento dos métodos tradicionais. Simulações conduzidas com o TMY3, apontado como o melhor dos arquivos tradicionais, apresentou diferenças anuais pequenas em relação a simulações realizadas com o arquivo multi\_10anos, sempre abaixo de 5% de diferenças, mas obteve diferenças relevantes na análise dos padrões de ocorrência dos totais diários das cargas térmicas, com EQM sempre acima de 0,4. Em contraponto, o multi\_3anos obteve resultados melhores, mantendo as baixas diferenças nas análises anuais, sempre abaixo de 5%, mas aumentando a confiabilidade em relação as análises diárias, com EQM sempre abaixo de 0,4.

Por esta razão, é possível afirmar que em estudos onde as análises sazonais ou mensais são relevantes, o arquivo multi\_3anos tende a ser o mais confiável. Mas, por outro lado, uma simulação multianual requer um maior custo de tempo para ser realizada quando comparada aos métodos tradicionais. O multi\_3anos requer, aproximadamente, 3 vezes menos tempo que uma simulação com o arquivo multi\_10anos, porém demanda 3 vezes mais tempo que uma simulação composta de um ano representativo, como as realizadas pelo TMY3. Por esta razão, para estudos em que o foco são análises anuais o TMY3 continua sendo o método mais recomendado.

Outro aspecto avaliado neste estudo foram as incertezas de análise do desempenho das edificações, por meio de simulações, em função das mudanças climáticas estimadas para o futuro. Os resultados desta análise mostraram um padrão praticamente constante de aumento nas cargas térmicas de aquecimento e resfriamento entre cada um dos períodos analisados.

Assim, apesar das incertezas, é importante continuar aperfeiçoando os estudos sobre como as mudanças climáticas futuras deverão impactar as edificações. A relevância desses estudos vai além de apenas qualificar a avaliação de uma edificação, incluindo estimativas de desempenho ao longo da sua vida útil, mas possibilitam começar a planejar os projetos para que eles possam estar preparados para os novos cenários climáticos. Além disso, tais pesquisas podem ser utilizadas para realizar planejamentos de cunho político estratégico, como, por exemplo, no caso da política energética de um país, que pode levar em consideração estimativas de aumento de consumo em função das previsões de mudanças climáticas.

#### 4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ASHRAE (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS). a. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. USA, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2013, Chapter F6.

ASHRAE (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS). b. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**. USA, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2013, Chapter F14.

BARNABY, C S; CRAWLEY, D B. Weather data for building performance simulation In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: SponPress, 2011, cap.3, p.37-55.

BELCHER, S E; HACKER, J N; POWELL, D S. Constructing Design Weather Data for Future Climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v.26, n.1, p. 49-61, 2005.

CARLO, J; LAMBERTS, R. **Processamento de Arquivos Climáticos para Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. Florianópolis. SC: Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2005. Relatório.

CASAGRANDE, B G; ALVAREZ, C E. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.13, n.4, p.173-187, 2013.

CHAN, A. Developing a modified typical meteorological year weather file for Hong Kong taking into account the urban heat island effect. **Building and Environment**, v 46: 2011. p 2434-2441.

CHOW, T.; CHAN, A.; FONG, K.; LIN, Z. Some perceptions on typical weather year from the observations of Hong Kong and Macau. **Solar Energy**, v80: 2006. p 459-467.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; OHBA, M.; HENSEN, J. Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. **Energy and Buildings**, v 42: 2010. p 881-888.

CRAWLEY, D. Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings? **ASHRAE Transactions**, v104: 1998. p 498-515.

CRAWLEY, D. Creating Weather Files for Climate Change and Urbanization Impacts Analysis. In: 9th International IBPSA Conference Building Simulation, Beijing, 2007 **Proceedings...** Beijing, China: IBPSA, 2007. p 1075-1082.

- CRAWLEY, D.; HAND, J.; KUMMERT, M.; GRIFFITH, B. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. In: **Building and Environment**. Oxford: Elsevier, 2008 V. 43. p. 661-673.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª edição. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- ENERGYPLUS. **Auxiliary Programs - Weather Converter Program**. 1ª edição. University of Illinois and Ernest Orlando Lawrence Berkley National Laboratory, 2015.
- GUAN, L. Preparation of Future Weather Data to Study the Impact of Climate Change on Buildings. **Building and Environment**, v.44, p. 793-800, 2009.
- HENSEN, J. Simulation of building energy and indoor environmental quality - some weather data issues. In: International Workshop on Climate Data and their Applications in Engineering, Praga, 1999. Anais... Praga, Workshop, 1999.
- HENSEN, J.; LAMBERTS, R. Introduction to building performance simulation. In: HENSEN, J.; LAMBERTS, R. (Org.). **Building Performance Simulation for Design and Operation**. Abingdon: SponPress, 2011, cap.1, p.1-14.
- INMET. **Dados Meteorológicos: Estações Automáticas**. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br> >. Acesso em: 1 de agosto de 2016.
- KERSHAW, T.; EAMES, M.; COLEY, D. Assessing the risk of climate change for buildings: A comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations. **Building and Environment**, v46: 2011. p 1303-1308.
- MUNEER, T; Gueymard, C; Kambezidis, H. **Solar Radiation and Daylight Models**. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- PEREZ R; INEICHEN P; SEALS R; MICALSKY J; STEWART R. Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44: p. 271-289, 1990.
- PERNIGOTTO, G.; PRADA, A.; GASPARELLA, A.; HENSEN, J. Analysis and improvement of the representativeness of EM ISO 15927-4 reference years for building energy simulation. **Journal of Building Performance Simulation**. V7: 2014. p 391-410.
- PITTIGLIANI, M. Controle de Qualidade de Dados Hidrometeorológicos do Simepar. In: XI Congresso Brasileiros de Meteorologia. Rio de Janeiro, 2001. **Anais...** Rio de Janeiro, XI CBMET, 2001.
- REINHART, C.; DOGAN, T.; JAKUBIEC, A.; RAKHA, T.; SANG, A. UMI - An urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. In: 13th International IBPSA Conference Building Simulation, Chambéry, 2013 **Proceedings...** Chambéry, France: IBPSA, 2011. p 476-483.
- RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. 2012**. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>; Acesso: 05/11/2013.
- WILCOX, S; MARION, W. **User's Manual for TMY3 Data Sets**. National Renewable Energy Laboratory, 2008.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

O desenvolvimento de arquivos climáticos são o primeiro passo para viabilizar o uso de programas computacionais de simulações, os quais, por sua vez, possibilitam estudos avançados e mais precisos sobre o desempenho de edificações. Este trabalho resultou no desenvolvimento de diversos tipos de arquivos climáticos para a cidade de Viçosa-MG, através da aplicação de vários métodos, desde os mais tradicionais (TMY\_br, TRY, TMY3, WYEC2, TRY\_eu), passando por métodos inovadores (Multianual\_10anos, multianual\_2anos, multianual\_3anos, sintético) e até arquivos com previsões futuras do clima. Também contribuirá com estudos futuros sobre o tema no Brasil, como material didático pois, descreve o "passo a passo" para o desenvolvimento de arquivos climáticos, auxiliando estudos que se proponham a desenvolver arquivos climáticos para outras cidades.

Nesta pesquisa foram descritos os procedimentos de tratamento de dados como: conferir inconstâncias, preencher lacunas e calcular parâmetros climáticos ausentes. Estes procedimentos foram aplicados nos dados climáticos coletados de Viçosa-MG e, após a aplicação dos tratamentos, os dados foram analisados estatisticamente com a finalidade de caracterizar o clima local.

Em relação aos arquivos climáticos desenvolvidos, primeiramente foi discutido o método multianual\_10anos, que consiste em realizar as simulações com toda a série de dados climáticos coletados e tratados. Este método não é viável para a maioria das aplicações das simulações por requerer um custo computacional muito alto, porém serve como base qualitativa para avaliar outros métodos. Além disso, as simulações com o arquivo multianual\_10anos permitiram analisar as diferenças entre simulações realizadas com cada um dos anos coletados, e revelou mudanças significativas entre arquivos climáticos de anos distintos. A diferença percentual máxima entre os anos climáticos foi superior a 30% para todas as edificações com baixas transmitâncias e, superior a 50% para edificações com altas transmitâncias.

Por conta das incertezas da escolha do ano que irá compor o arquivo climático, como as mostradas nos resultados das simulações dos anos que compõem o arquivo multianual\_10anos, é imprescindível utilizar um método confiável para selecionados os dados que sejam representativos de toda a série de dados coletados. Assim, foram criados 5 arquivos climáticos, utilizando 2 métodos conceituados no Brasil e 3 internacionais. Entre estes, as análises apontaram que o método TMY3 foi o que apresentou as menores diferenças em relação ao arquivo multianual\_10anos. Para análises dos totais anuais das cargas térmicas, o TMY3 obteve diferenças percentuais abaixo de 5%, para todos os casos. Por isso, é o mais confiável entre os métodos tradicionais testados.

Porém, apesar das semelhanças entre o TMY3 e o multianual\_10anos quanto às análises dos totais anuais de cargas térmicas, ao analisar os totais diárias e os padrões de ocorrência ao longo do ano, as diferenças foram expressivas, com EQM acima de 0,4 em praticamente todos os casos analisados. Para aprimorar esta e outras incertezas, novos métodos com conceitos inovadores têm sido publicados pela comunidade científica. O principal conceito destes métodos é selecionar mais do que apenas um ano como dados representativos da cidade, como é de praxe nos métodos tradicionais, aprimorando a representatividade quanto as variações que ocorrem entre os anos.

As análises dos novos métodos, apontaram que o método multianual\_3anos foi o que apresentou as menores diferenças em relação ao arquivo base e por isso, é o mais confiável entre todos os métodos testados. Este arquivo também obteve diferenças baixas em relação ao arquivo multianual\_10anos, para as análises anuais, com diferenças percentuais abaixo de 5%, para todos os casos, assim como o TMY3, mas reduziu significativamente as diferenças em relação as análises diárias, com EQM abaixo de 0,3 em praticamente todos os casos.

Assim, em estudos onde as análises sazonais ou mensais são relevantes, o arquivo multi\_3anos tende a ser o mais confiável. Mas, por outro lado, uma simulação multianual requer um maior custo de tempo para ser realizada quando comparada aos métodos tradicionais. O multi\_3anos requer, aproximadamente, 3 vezes mais tempo que uma simulação com o TMY3. Por esta razão, para estudos em que o foco são análises anuais o TMY3 continua sendo o método mais recomendado.

Por fim, outro método inovador estudado foi o *morphing*, que propõe o ajuste de arquivos climáticos por meio de estudos sobre previsões de mudanças climáticas para as próximas décadas. Foram desenvolvidos 3 arquivos futuros, com previsões para 30, 60 e 90 anos no futuro. Tais previsões indicaram que haverá uma tendência de alterações significativas nos padrões climáticos da cidade, para as próximas décadas e, que estas provocarão variações expressivas nos resultados do desempenho das edificações. Os modelos testados com baixa transmitância, obtiveram variações de aproximadamente 9% a cada período de 30 anos, enquanto os modelos testados com alta transmitância, apresentaram variação de aproximadamente 13% a cada período de 30 anos. Tendo em vista a longa vida útil das edificações, estudos que usem arquivos climáticos constituídos não apenas de dados históricos medidos, mas também dados estimados para o futuro, são relevantes.

## 5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

As principais limitações do desenvolvimento dessa pesquisa foram:

- ❖ A condição ideal para o desenvolvimento de arquivos climáticos é o uso de 30 anos de dados medidos da cidade estudada, sendo que o mínimo recomendado são 10 anos. Este estudo foi realizado com base em uma série de 10 anos de dados medidos da cidade de Viçosa-MG.
- ❖ Os dados climáticos coletados de Viçosa-MG, usados nesse estudo, foram medidos na estação climática do Inmet, que fica localizado em uma área isolada dentro da Universidade Federal de Viçosa. Essa característica é comum nas estações climáticas brasileiras, que tem como principal objetivo atender as demandas agrícolas e de aviação. Porém, há variações climáticas significativas entre uma região aberta, isolada e cercada de vegetação, para uma região urbanizada, mesmo que dentro de uma mesma cidade. E quanto mais adensada é uma região urbana, maiores são as variações.
- ❖ Os arquivos climáticos futuros foram desenvolvidos utilizando como base os relatórios de mudanças climáticas do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) porém, estas previsões são baseadas em modelos climáticos globais, que representam uma simplificação do clima a uma escala que não permite o detalhamento das análises a nível regional. Assim, apesar do esforço de instituições brasileiras na busca pelo entendimento das mudanças climáticas e suas consequências para o território brasileiros, os relatórios encontrados não apresentam dados suficientes para a configuração de arquivos climáticos futuros.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais recomendações para trabalhos futuros são:

- ❖ Desenvolvimento de um método de desenvolvimento de arquivos climáticos, pensado para atender as especificidades do clima brasileiro.
- ❖ Estudar métodos para fazer o ajuste dos dados climáticos em relação as diferenças entre a área aberta, onde os dados são medidos e, a área urbana onde será construída a edificação.
- ❖ Estudo sobre a implementação de medições de dados climáticos em áreas urbanas, gerando base para a criação de uma rede de estações climáticas voltada para estudos urbanos.
- ❖ Estender as avaliações feitas em relação aos métodos seleção dos dados climáticos representativos, tanto os tradicionais quanto os inovadores, para outras cidades. Para confirmar quais os métodos são os mais confiáveis, é necessário testá-los em outros climas.

- ❖ Aprofundar os estudos sobre os dados climáticos futuros. Levantar informações suficientes para possibilitar desenvolver arquivos a partir de estudos em escala nacional e não apenas a escala global.
- ❖ Desenvolver proposta e ferramentas para atualizar todos os arquivos climáticos brasileiros, tanto em relação aos métodos de tratamento, quanto em relação a aplicação de diferentes métodos de seleção dos dados representativos. Os arquivos climáticos nacionais disponíveis atualmente, foram desenvolvidos com o método TRY, que é considerado ultrapassado pela comunidade científica internacional.