

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BRUNA GOMES CASAGRANDE

**CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS: DIAGNÓSTICO
PROSPECTIVO DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO
DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS NO BRASIL PARA O SÉCULO
XXI**

VITÓRIA

2013

BRUNA GOMES CASAGRANDE

**CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS: DIAGNÓSTICO PROSPECTIVO
DO DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS
COMERCIAIS NO BRASIL PARA O SÉCULO XXI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Cristina Engel de Alvarez.

VITÓRIA

2013

**CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS: DIAGNÓSTICO PROSPECTIVO DO
DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE EDIFÍCIOS COMERCIAIS NO BRASIL
PARA O SÉCULO XXI**

Bruna Gomes Casagrande

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil.

Aprovada no dia **19 de julho de 2013** por:

Prof^ª. Dra. Cristina Engel Alvarez
Doutora em Arquitetura e Urbanismo- UFES
Orientador

Prof. Dr. José Eduardo da Maceno Pezzopane
Doutor em Ciência Florestal- UFES
Membro Interno

Prof. Dr. Paulo Sergio de Paula Vargas
Doutor em Comunicação Semiótica- UFES
Membro Interno

Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões
Doutor em Geologia- UFRGS
Membro Externo

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a Cristina Engel de Alvarez, pelas valiosas revisões, orientações e, principalmente, pelo apoio na decisão por este tema. Não poderia deixar de agradecer também pela oportunidade de frequentar o LPP/UFES.

Aos membros da banca, pelo interesse em participar da avaliação deste trabalho e por compartilhar seus conhecimentos nesta ocasião.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, especialmente ao Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama, ao Dr. Fernando Avancini e à Dr^a Geilma Vieira.

Aos professores Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane e Dr. Paulo Sergio de Paula Vargas, pela importante contribuição na etapa de qualificação.

Aos professores e alunos do Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Colatina, pela enriquecedora troca de conhecimentos e experiências, em especial à equipe do eixo de infraestrutura.

Aos colegas do LPP/UFES, pelos inúmeros momentos de alegria proporcionados nesses quase três anos, minha “família capixaba”. Agradeço em especial aos grandes amigos que encontrei nesse período e me fizeram “crescer” e aprender tanto.

Às amigas Ana Carol e Ana Clara, pela motivação ao estudo do tema e por permitir o prosseguimento da sua pesquisa.

Às colegas e amigas, Sandra e Soraya, por estarem sempre presentes e, simplesmente por isso, tornar tudo mais fácil.

Aos Andrighetos, por terem sido sempre tão acolhedores.

À minha família, minha central de força, pelo suporte em cada decisão e por compreender minha ausência.

Ao Rafael, pelo apoio e carinho especial nessa fase da nossa vida e, sobretudo, por estimular minha curiosidade para a investigação.

À Capes, pela bolsa de estudos concedida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro.	30
Figura 2 – Carta Bioclimática apresentando as normais climatológicas de cidades desta zona, destacando a cidade de Santos, SP.	31
Figura 3 – Exemplo de ENCE apresentando níveis de eficiência A, tanto para os sistemas individuais quanto para o edifício completo.	34
Figura 4 – Ângulos verticais de sombreamento.	37
Figura 5 – Ângulos horizontais de sombreamento.	38
Figura 6 – Catorze horas de dados climáticos existentes em um arquivo com extensão try.	42
Figura 7 – Parte do resumo do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.	44
Figura 8 – Médias mensais de temperatura do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.	44
Figura 9 – Dia de temperatura máxima e dia de radiação global máxima do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.	45
Figura 10 – Frequência de ocorrência das temperaturas de bulbo seco e úmido, e médias mensais de radiação diária do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.	45
Figura 11 – Cabeçalho presente no arquivo climático de formato csv.	46
Figura 12 – Vista esquemática dos componentes do sistema climático, seus processos e interações.	47
Figura 13 – Variações anuais de temperatura global do ar (°C), de 1850 a 2005, em relação às médias de 1961-1990.	53
Figura 14 – Pirâmide esquemática da modelagem do clima.	55
Figura 15 – Resolução espacial cartesiana nos modelos climáticos de circulação geral.	56
Figura 16 – Exemplo de mapa resultado do projeto “Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI”.	59
Figura 17 – Aparência da ferramenta CCWorldWeatherGen.	69
Figura 18 – Mapa do Brasil com as cidades selecionadas para investigação.	75

Figura 19 – Esquema dos mecanismos de impacto das mudanças climáticas sobre edificações, usuários e sistemas, considerando-se apenas as mudanças climáticas graduais.....	78
Figura 20 – Representação do edifício com as maiores fachadas orientadas a Norte e Sul.	82
Figura 21 – Representação do edifício com as maiores fachadas orientadas a Leste e Oeste.....	82
Figura 22 – Representação do edifício com 50% de abertura nas maiores fachadas.	83
Figura 23 – Representação do edifício com 90% de abertura nas maiores fachadas.	83
Figura 24 – Representação do edifício sem proteção solar nas aberturas.....	84
Figura 25 – Representação do edifício com proteção solar nas aberturas.....	84
Figura 26 – Configuração de situação atual com <i>template</i> padrão do <i>software</i>	85
Figura 27 – Configuração de situação futura com novo <i>template</i>	86
Figura 28 – <i>Template</i> de situação futura com as mesmas informações gerais do <i>template</i> atual.....	86
Figura 29 – Informações geográficas inseridas automaticamente a partir da seleção de um arquivo climático.....	87
Figura 30 – Dados climáticos estatísticos configurados automaticamente pelo <i>software</i> , a partir de arquivo .stat.	88
Figura 31 – Configurações de sítio com temperaturas de chão alteradas.....	89
Figura 32 – Pavimento tipo do edifício com treze zonas térmicas.....	89
Figura 33 – Sistemas combinados (“ <i>Combined</i> ” <i>Constructions</i>).....	94
Figura 34 – Sistemas separados (“ <i>Separate</i> ” <i>Constructions</i>).....	94
Figura 35 – Tipos de proteção solar do <i>DesignBuilder</i>	96
Figura 36 – Modelos de luminárias do <i>DesignBuilder</i>	99
Figura 37 – Representação gráfica do controle do sistema de iluminação.....	99
Figura 38 – Configuração do período de simulação e intervalo de tempo entre os resultados.....	101
Figura 39 – Percentual de aumento no consumo de energia anual para as seis cidades, em 2020, 2050 e 2080, respectivamente.	105

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da oferta e do consumo de energia elétrica a partir da década de 1970.	25
Gráfico 2 – Crescimento populacional em relação ao consumo energético.....	26
Gráfico 3 – Crescimento do PIB em relação ao consumo final de energia.....	26
Gráfico 4 – Consumo de eletricidade por setor.	27
Gráfico 5 – Evolução do consumo por setores em relação ao crescimento populacional.	28
Gráfico 6 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de todos os modelos simulados, organizados por cidades, nos quatro períodos – atual, 2020, 2050 e 2080. Em cinza está representado o somatório do consumo das cidades por período.	104
Gráfico 7 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, no período atual.	106
Gráfico 8 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, em 2020.	107
Gráfico 9 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, em 2050.	107
Gráfico 10 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, em 2080.	108
Gráfico 11 – Consumo total dos modelos orientados a Norte e Sul (NS) e a Leste e Oeste (LO), nas seis cidades, em cada período (atual, 2020, 2050 e 2080).	109
Gráfico 12 – Aumento percentual do consumo dos modelos orientados a Norte e Sul (NS) e a Leste e Oeste (LO), por cidades.	110
Gráfico 13 – Consumo total dos modelos com 50% de abertura (PAF50) e com 90% de abertura (PAF90), nas seis cidades, em cada período (atual, 2020, 2050 e 2080).	110
Gráfico 14 – Aumento percentual do consumo dos modelos com 50% de abertura (PAF50) e dos modelos com 90% de abertura (PAF90), por cidades.	111

- Gráfico 15** – Consumo total dos modelos sem proteção solar (SP) e com proteção solar (CP), nas seis cidades, em cada período (atual, 2020, 2050 e 2080). 111
- Gráfico 16** – Aumento percentual do consumo dos modelos sem proteção solar (SP) e com proteção solar (CP), por cidades. 112
- Gráfico 17** – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Belém, em relação ao período atual. 113
- Gráfico 18** – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Belém, em relação ao período atual. 113
- Gráfico 19** – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Belém, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar..... 114
- Gráfico 20** – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Brasília, em relação ao período atual. 115
- Gráfico 21** – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Brasília, em relação ao período atual. 115
- Gráfico 22** – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Brasília, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar..... 116
- Gráfico 23** – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Porto Alegre, em relação ao período atual. 116
- Gráfico 24** – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Porto Alegre, em relação ao período atual. 117
- Gráfico 25** – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Porto Alegre, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar..... 118
- Gráfico 26** – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Recife, em relação ao período atual. 118
- Gráfico 27** – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Recife, em relação ao período atual. 119

- Gráfico 28** – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Recife, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar..... 120
- Gráfico 29** – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de São Paulo, em relação ao período atual. 120
- Gráfico 30** – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de São Paulo, em relação ao período atual..... 121
- Gráfico 31** – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em São Paulo, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar..... 121
- Gráfico 32** – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Vitória, em relação ao período atual. 122
- Gráfico 33** – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Vitória, em relação ao período atual. 123
- Gráfico 34** – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Vitória, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar..... 123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Diretrizes construtivas recomendadas para a cidade de Santos (SP), localizada na Zona Bioclimática 5.	31
Quadro 2 – Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico.	32
Quadro 3 – Pesquisas relacionadas à preparação de arquivos climáticos futuros para simulação térmica de edifícios.	63
Quadro 4 – Projeções de anomalias de temperatura para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, em relação ao período base 1961-90, para a América do Sul no cenário A2, pelo modelo HadCM3. Projeções para 2020, 2050 e 2080.	72
Quadro 5 – Cidades do Brasil, zonas bioclimáticas conforme NBR 15220 e conforme proposta do novo zoneamento bioclimático brasileiro.	73
Quadro 6 – Características construtivas do edifício.	76
Quadro 7 – Limite de transmitância térmica para paredes e coberturas, pré-requisito para classificação no nível A do RTQ-C.	81
Quadro 8 – Variações adotadas para os elementos em análise.	82
Quadro 9 – Características de ocupação e equipamentos do edifício.	90
Quadro 10 – Características dos componentes do edifício	91
Quadro 11 – Propriedades dos materiais presentes nos componentes do edifício.	92
Quadro 12 – Características das janelas externas.	95
Quadro 13 – Detalhes geométricos do <i>brise</i> horizontal.	96
Quadro 14 – Detalhes geométricos do <i>brise</i> superior.	97
Quadro 15 – Dispositivos de proteção solar das fachadas com 50% de abertura, à esquerda, e com 90% de abertura, à direita.	97
Quadro 16 – Características do sistema de iluminação.	98
Quadro 17 – Controle do sistema de iluminação artificial em três passos.	99
Quadro 18 – Características do sistema de climatização.	100
Quadro 19 – 32 modelos a simular para cada cidade.	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
AOGCM	Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers</i>
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPW	<i>EnergyPlus/EPSt Weather</i>
FBDS	Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável
GCM	(ou MCG) Modelo de Circulação Geral
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
INFRAERO	Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar
LPP	Laboratório de Planejamento e Projetos
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PAF	Percentual de Abertura na Fachada
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PS	Proteção Solar
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
SWERA	<i>Solar and Wind Energy Resource Assessment</i>
TMY	<i>Test Meteorological Year</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USP	Universidade de São Paulo

RESUMO

Ao mesmo tempo em que foram desenvolvidos no Brasil programas com a meta de racionalização do sistema energético nacional, motivados principalmente pelas crises enfrentadas pelo país, como o racionamento de 2001, estudos a respeito do comportamento do clima em escala mundial apresentaram avanços expressivos, facilitados pela evolução tecnológica e computacional. Entre as estratégias para contenção do desperdício da energia produzida está o consumo pelas edificações, uma vez que a adoção de sistemas construtivos adequados pode reduzir o consumo final de eletricidade. Tal constatação constitui um dos preceitos da arquitetura bioclimática, que preconiza a necessidade de adaptação do edifício ao clima local, sendo, para isso, imprescindível a compreensão dos fenômenos climáticos.

Desta forma, o princípio que conduziu esta pesquisa foi o comportamento variável do clima, consenso para grande parte dos climatologistas, e suas consequências para as demandas energéticas futuras, particularmente durante o ciclo de vida planejado para cada edifício. Investigar o impacto das mudanças projetadas para o clima ao longo do século XXI no desempenho termoenergético de edificações comerciais artificialmente climatizadas localizadas em diferentes cidades do Brasil foi o principal objetivo deste estudo. Os procedimentos metodológicos foram divididos em quatro etapas, iniciando-se por uma ampla revisão bibliográfica sobre a temática central – mudanças climáticas – bem como os temas correlacionados, com especial ênfase para a associação entre conforto térmico e a questão energética. Na segunda etapa foram estabelecidos os mecanismos para preparação de arquivos climáticos futuros, incluindo-se a seleção de cidades para representação das diferentes condições geográficas do território brasileiro. Posteriormente foi efetuado o recorte do objeto, com a indicação dos parâmetros de controle e das variáveis em análise, designando-se as características do edifício que não serão afetadas por intervenções futuras: percentual de abertura nas fachadas, dispositivos de proteção solar e orientação das maiores fachadas. A etapa final foi dedicada às simulações, realizadas no programa *DesignBuilder* a partir da configuração dos 192 modelos paramétricos.

Os resultados da aplicação da metodologia, analisados quantitativa e qualitativamente, reproduziram, de forma generalizada, um aumento no consumo de 10,7% em 2020, 16,9% em 2050 e 25,6% em 2080, em relação ao consumo atual.

Apesar da significância desse aumento, inclusive para o planejamento energético nacional, aumentos mais expressivos foram registrados em estudos internacionais, reforçando a necessidade de consideração dos fenômenos regionais na preparação de dados climáticos futuros neste tipo de pesquisa. Em Recife, a variação de parâmetros construtivos não provocou diferenças tão significativas nas taxas de aumento do consumo quanto nas outras cinco localidades, sendo que Brasília apresentou as maiores taxas de aumento. Considerando-se os edifícios de todas as cidades, a presença de dispositivos de proteção solar foi a variável com maior impacto para diminuição do consumo, e o edifício orientado a Leste e Oeste, com grandes aberturas desprotegidas, apresentou consumo significativamente superior aos outros modelos, atual e futuramente. Por fim, ao contrário da maioria dos resultados mensais observados, em Porto Alegre ocorreu uma diminuição no consumo em alguns meses de 2020 e 2050, ocasionada possivelmente pela diminuição dos períodos de utilização da climatização artificial para aquecimento.

Palavras-chave

Mudanças climáticas, eficiência energética, arquivo climático futuro, simulação de edificações.

ABSTRACT

At the same time that programs were developed in Brazil with the goal of the national energy system rationalization, mainly motivated by the crisis faced by the country – as in the rationing of 2001 – studies of the climate's behavior on a global scale showed significant advances, facilitated by technological and computational development. One of the strategies for containment the waste energy produced is the energy consumption by buildings, since the adoption of appropriate constructive systems can reduce the final electricity consumption. This was a principle of bioclimatic architecture, which recommends an adaptation of the building to the local climate conditions, and for that, it is essential to understand the climate system.

Therefore, the principle that guided the development of this research was the variable behavior of the climate, which is consensus for most climatologists, and its consequences for the future energy demands of buildings, particularly along the planned life cycle for each building. The main objective of this study was to investigate the impact of projected changes to the climate over the twenty-first century in the thermo energetic performance of commercial buildings artificially acclimatized located in different cities of Brazil. The methodological procedures were divided into four stages, initiating with an extensive literature review on the central theme – climate change – as well as related topics, with special emphasis on the relationship between thermal comfort and energy issue. In the second step mechanisms for preparing future climate files were established, including the selection of cities for representation of different geo-climatic conditions of the Brazilian territory. After that the definition of the object was performed, indicating the control parameters and variables in the analysis, assigning the characteristics of the building that will not be affected by future interventions – window wall ratio, solar shading and orientation of the largest facades. The final step was dedicated to the simulations, performed in the program DesignBuilder from the configuration of the 192 parametric models.

The results of applying the methodology, analyzed quantitatively and qualitatively, reproduced in generalized way an increase in energy consumption in buildings by 10.7% in 2020, 16.9% in 2050 and 25.6% in 2080, compared to current consumption. Although the significance of this increase, including the national energy planning,

most significant increases were recorded in international studies, reinforcing the need for consideration of regional climate events in the preparation of future climate data in this type of research. In Recife, the variation of constructive parameters did not cause as significant differences in the rates of increase in consumption as the other five locations, and Brasilia had the highest rates of increase. Considering the buildings of all the cities, the presence of solar shading was the variable with the greatest impact on reducing energy consumption, and the building oriented east and west, with large unprotected openings, showed energy consumption significantly superior to other models, in all cities and periods. Finally, unlike most of monthly results observed, in Porto Alegre occurred a decrease in energy consumption in some months of 2020 and 2050, possibly caused by the reduction in time use of artificial air conditioning heating.

Keywords

Climate change, energy efficiency, climate change weather file, building simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Hipótese.....	19
1.2. Objetivos	20
1.3. Estrutura da dissertação.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. A questão energética e o desenvolvimento sustentável.....	22
2.1.1. Histórico da crise energética	22
2.1.2. Análise da evolução do consumo de energia.....	24
2.1.3. Análise do consumo de energia por setores	27
2.2. Eficiência energética em edificações	28
2.2.1. NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações	29
2.2.2. RTQ-C – Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.....	33
2.2.3. Elementos da Envoltória – Definições.....	35
2.2.3.1. Transmitância térmica	35
2.2.3.2. Absortância de superfícies	36
2.2.3.3. Percentual de abertura na fachada (PAF)	36
2.2.3.4. Fator Solar	37
2.2.3.5. Proteção solar.....	37
2.2.3.6. Orientação	38
2.2.4. Método de simulação	38
2.2.4.1. Arquivos climáticos	39
2.2.4.2. Arquivos climáticos de cidades brasileiras	40

2.3. Mudanças climáticas	46
2.3.1. O sistema climático	46
2.3.2. Evolução do estudo do clima	47
2.3.3. Equilíbrio do sistema climático	49
2.3.4. Indícios de uma nova mudança climática.....	52
2.3.5. Modelagem do sistema climático	54
2.3.6. Modelos climáticos do IPCC e modelos climáticos regionais.....	56
2.3.7. Impacto das mudanças climáticas no Brasil.....	59
3. METODOLOGIA	63
3.1. Preparação dos arquivos climáticos futuros	63
3.1.1. Método adotado para configuração do arquivo climático futuro	67
3.1.2. Ferramenta para conversão de dados	69
3.1.3. Modelo de projeções climáticas futuras	70
3.1.4. Seleção das cidades	71
3.2. Simulações termoenergéticas de edificações	75
3.2.1. Recorte do objeto.....	75
3.2.2. Variáveis de teste da edificação.....	77
3.2.3. <i>Software</i> para simulação termoenergética de edificações	84
3.2.4. Processo de modelagem.....	85
3.2.4.1. Configurações do sítio	85
3.2.4.2. Construção da geometria.....	89
3.2.4.3. Dados dos componentes do edifício	90
3.2.4.4. Simulações	100
3.3. Processamento das simulações	101
3.4. Análise e interpretação dos resultados	102

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1. Análise por períodos	104
4.1.1. Atual.....	106
4.1.2. 2020	106
4.1.3. 2050	107
4.1.4. 2080	108
4.2. Impacto das variáveis	108
4.2.1. Orientação.....	109
4.2.2. Percentual de Abertura nas Fachadas	110
4.2.3. Proteção Solar	111
4.3. Análise por cidades	112
4.3.1. Belém.....	112
4.3.2. Brasília	114
4.3.3. Porto Alegre	116
4.3.4. Recife.....	118
4.3.5. São Paulo.....	120
4.3.6. Vitória.....	122
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	124
5.1. Considerações específicas.....	125
5.2. Limitações da pesquisa	126
5.3. Sugestões para trabalhos futuros.....	127
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1. INTRODUÇÃO

A crise energética iniciada na década de 1970 com a constatação da finitude das reservas de petróleo provocou transformações econômicas em nível mundial, forçando os países a investirem em formas alternativas de oferta e consumo de energia (BRASIL, acesso em 19 maio 2012). Desde então são desenvolvidos, no Brasil, programas com a meta de racionalização do sistema energético nacional.

Embora a origem desses programas esteja diretamente relacionada às crises enfrentadas pelo país, como o racionamento de 2001, os instrumentos de avaliação da eficiência atuais procuram uma aproximação aos conceitos de desenvolvimento sustentável, nos quais a preservação dos recursos naturais esgotáveis é premissa básica para a qualidade de vida de gerações futuras.

O consumo energético pelas edificações é considerado, também, uma oportunidade para diminuição do desperdício da energia produzida, uma vez que a adoção de estratégias construtivas adequadas pode reduzir o consumo final de eletricidade. Inicialmente, como incentivo ao setor da construção civil – e futuramente como requisito obrigatório –, um instrumento para avaliação da eficiência energética de edificações foi produzido, o Procel Edifica – Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações –, com estímulos governamentais, nos moldes de ferramentas lançadas anteriormente visando à efficientização energética da denominada “linha branca” de eletrodomésticos (MME, acesso em 25 maio 2012, p. 5).

Nesse contexto foram fortalecidos os preceitos da arquitetura bioclimática, ressaltando-se a necessidade de adaptação do edifício às condições do clima local, sendo, para isso, imprescindível a compreensão dos fenômenos que regem o sistema climático.

Estudos a respeito do comportamento do clima em escala mundial apresentaram avanços expressivos nesse mesmo período, facilitados principalmente por avanços tecnológicos e computacionais. Um dos resultados do progresso da climatologia é a reprodução dos componentes e interações presentes no sistema climático através de modelagens matemáticas e, por conseguinte, as informações produzidas por esses modelos (DIAS, 2006; MARENGO, 2007).

É consenso para grande parte dos estudiosos do clima que o seu comportamento é variável e, de acordo com modelos climáticos globais e regionais, uma alteração na distribuição do calor entre as regiões do planeta vem acontecendo desde o século XX. A mitigação das consequências das mudanças climáticas futuras é pauta de políticas públicas de muitos países do mundo e pesquisas para adequação aos novos cenários têm sido desenvolvidas em diversas áreas do conhecimento (FREITAS; AMBRIZZI, 2012).

Sem demérito das iniciativas instituídas até então, acredita-se que as preocupações em torno das consequências do aumento gradual das temperaturas, entre outras mudanças projetadas para diferentes componentes climáticos ainda para o século XXI, devem ser tão pronunciadas quanto os possíveis eventos extremos.

Sabe-se que a edificação oferece uma interface entre o ambiente externo – sujeito às mudanças climáticas –, e o ambiente interno, que precisa ser mantido em condições tais que ofereçam conforto e segurança aos usuários. Desta forma, adquire fundamental importância a investigação do desempenho de edificações quanto às demandas energéticas futuras, particularmente durante o ciclo de vida planejado para cada edifício.

1.1.Hipótese

Considerando-se que:

- O desempenho, principalmente energético, das edificações está diretamente relacionado ao clima a que estiverem expostas;
- O sistema estrutural da grande maioria dos edifícios é projetado para uma vida útil de, no mínimo, 50 anos, com as vedações externas planejadas para uma durabilidade mínima de 40 anos; e
- As mudanças climáticas projetadas para esse período mostram alterações substanciais em relação às condições atuais;

Presume-se que a utilização de dados climáticos desatualizados comprometa a avaliação do desempenho energético de edifícios. Infere-se, ainda, que a demanda energética futura para o alcance do conforto térmico através de sistemas artificiais será maior que a estipulada atualmente.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem como principal objetivo investigar o impacto das mudanças projetadas para o clima ao longo do século XXI no desempenho termoenergético de edificações comerciais artificialmente climatizadas localizadas em diferentes cidades do Brasil.

Para o alcance desse objetivo, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Investigar, através de levantamento bibliográfico, métodos de avaliação do desempenho futuro de edifícios, considerando-se as mudanças projetadas para o clima ao longo do século XXI;
- Definir o método para inserção de informações climáticas futuras na avaliação do desempenho termoenergético de edifícios, tendo em vista o emprego posterior da simulação computacional;
- Estabelecer os locais (cidades) para realização do estudo, visando à representação das diferentes condições geográficas do território brasileiro;
- Caracterizar o objeto de estudo e determinar modelos paramétricos para investigação da influência de variáveis arquitetônicas no desempenho termoenergético de edifícios no futuro; e
- Quantificar o incremento no consumo de energia dos modelos, caracterizar seu comportamento futuro por cidades e por períodos, e identificar o impacto das variáveis arquitetônicas sobre essas variações.

1.3. Estrutura da dissertação

O conteúdo deste trabalho foi organizado em 5 capítulos:

- o **capítulo 1** – Introdução – apresenta o contexto da pesquisa através da exposição da problemática e das justificativas para o desenvolvimento do estudo, bem como os Objetivos, a Hipótese de trabalho e a Estrutura da dissertação;
- o **capítulo 2** – Revisão Bibliográfica – expõe o estudo da literatura relacionada às questões energéticas e de eficiência de edificações, bem como a investigação do tema mudanças climáticas;

- o **capítulo 3** – Metodologia – descreve as etapas da pesquisa com ênfase para os procedimentos para preparação de arquivos climáticos futuros e o processo de simulação termoenergética de edificações;
- o **capítulo 4** – Resultados e Discussão – apresenta e analisa os dados obtidos das simulações; e
- o **capítulo 5** – Considerações Finais – contempla as principais conclusões reproduzidas através da análise dos resultados, além de sugestões para a continuidade da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o propósito de proporcionar maior familiaridade com a problemática exposta anteriormente, foi realizada uma pesquisa exploratória através do levantamento bibliográfico de fontes relacionadas ao tema em estudo. Através da investigação preliminar foi possível a construção dos procedimentos metodológicos desta pesquisa, sendo assim, a revisão bibliográfica inicial foi dividida em três assuntos principais: a questão energética; a eficiência energética em edificações; e as mudanças climáticas futuras.

2.1.A questão energética e o desenvolvimento sustentável

Um das grandes críticas ao modelo de desenvolvimento atual é a associação direta de melhoria de condições de vida ao crescimento financeiro. Por este ponto de vista pressupõe-se que o progresso de uma nação pode ser medido somente pela sua produção material, desconsiderando fatores sociais e ambientais. O crescimento populacional desequilibrado, a apropriação desigual dos recursos naturais do planeta e o consumo elevado de energia e de recursos não renováveis são outras consequências desse modelo (LOMARDO, 2011).

Em contrapartida, se determinado modelo de desenvolvimento conseguir atender às necessidades da geração atual sem comprometer os recursos necessários para satisfação das necessidades das gerações futuras, então será considerado como sustentável, no conceito mais elementar do tema (BRUNDTLAND, 1987). Para o alcance dessa condição, e de acordo com Lomardo (2011), cinco vertentes da sustentabilidade devem ser planejadas em equilíbrio: a social, a econômica, a ecológica, a espacial e a cultural.

O consumo eficiente dos recursos energéticos pode ser genericamente classificado na vertente ecológica, que procura alternativas para o consumo de combustíveis fósseis e de recursos naturais facilmente esgotáveis, entre outros. Porém, pela ótica do desenvolvimento sustentável, toda ação tem implicações nas demais vertentes, e por isso os estudos acerca da eficiência energética abrangem ainda as questões sociais, econômicas, espaciais, culturais e ecológicas.

2.1.1.Histórico da crise energética

Desde sua descoberta no final do século XIX até a década de 1970, o petróleo foi consumido de forma abundante, caracterizando-se como a força motriz da sociedade e da economia do período. Quando se descobriu que o petróleo é uma fonte esgotável e que seu uso intensivo não aconteceria sem prejuízos para o meio ambiente, o preço do produto foi elevado, forçando o desenvolvimento de estratégias alternativas de geração e consumo de energia (BRASIL, acesso em 20 maio 2012).

No contexto nacional, medidas para redução de importações, para estímulo ao desenvolvimento de um combustível nacional e para intensificação dos esforços de exploração e produção de petróleo nacional, foram tomadas como resposta aos choques do petróleo (BRASIL, acesso em 20 maio 2012). Mesmo assim, no final da década de 1970, instaura-se uma forte crise na economia brasileira, fazendo com que durante a década de 1980 o país sofresse uma profunda deterioração em sua situação econômica e social (BRASIL, acesso em 19 maio 2012).

Nesse período foi criado o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), pelo então Ministério da Indústria e do Comércio – atual Ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior (MDIC) –, junto à Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) e ao Ministério de Minas e Energia (MME), com a coordenação do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), com o principal objetivo orientado para a questão da eficiência energética (BRASIL, acesso em 19 maio 2012).

O PBE promove a articulação entre governo e fabricantes de equipamentos no sentido de estabelecer metas e compromissos para o aumento da eficiência energética desses produtos. O objetivo é prover os consumidores de informações que lhes permitam avaliar e otimizar o consumo de energia dos equipamentos e selecionar os produtos de maior eficiência em relação ao consumo, possibilitando economia no uso da energia (BRASIL, acesso em 19 maio 2012, p. 127).

Dessa iniciativa surgiu o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), instituído em dezembro de 1985, com condução e execução a cargo da Eletrobrás. A partir de 1993 o PROCEL passou a conceder, anualmente, um selo de reconhecimento de excelência a equipamentos pelo uso eficiente de energia elétrica (BRASIL, acesso em 19 maio 2012).

Na década de 1990, o setor energético brasileiro passa por sucessivas reformas, nas quais foram criadas agências reguladoras e políticas para abertura do setor a

novas empresas. A atratividade de novos investimentos para a expansão, porém, fez reduzir significativamente os reservatórios do sistema, resultando no racionamento de energia elétrica, em 2001 (BRASIL, acesso em 19 maio 2012). Em publicação anterior ao racionamento, Tolmasquim (2000, p. 179) já alertava sobre suas consequências: “redução do crescimento econômico, aumento do desemprego, aumento do déficit da balança comercial, perda de arrecadação de impostos e efeito inflacionário”.

Em consequência do racionamento, em 20 de dezembro de 2001 foi publicado no Diário Oficial da União o Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, que regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001 (BRASIL, acesso em 16 maio 2012; BRASIL, acesso em 17 maio 2012).

Os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, bem como as edificações construídas, serão estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica a ser fixada nos termos deste Decreto, sob a coordenação do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, acesso em 16 maio 2012).

Nesse contexto foi criado o Procel Edifica: Plano de Ação para Eficiência Energética em Edificações, que “visa construir as bases necessárias para racionalizar o consumo de energia nas edificações no Brasil” (MME, acesso em 25 maio 2012, p. 5).

2.1.2. Análise da evolução do consumo de energia

Com o intuito de realizar o planejamento de longo prazo no setor energético do país foi instituído o Plano Nacional de Energia 2030. Para a formulação desse plano foram desenvolvidos estudos para subsidiar políticas energéticas segundo uma perspectiva integrada de recursos disponíveis (BRASIL, acesso em 19 maio 2012).

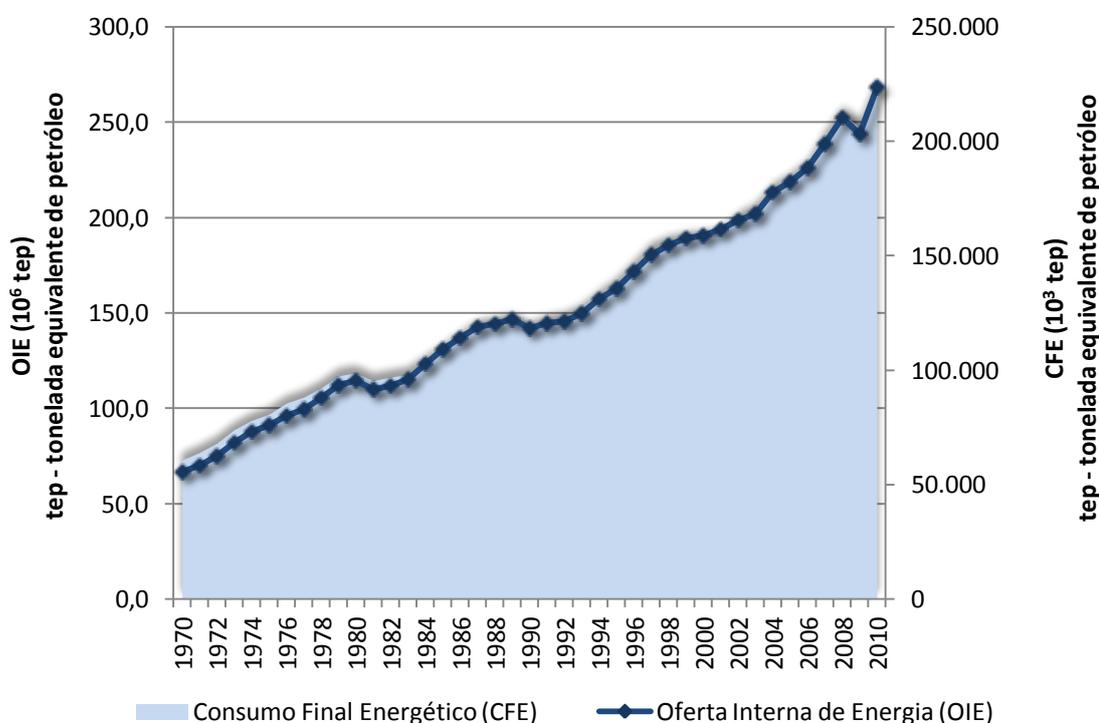
O quadro energético brasileiro atual apresenta oito diferentes fontes para produção de energia elétrica: hidráulica, carvão e derivados, nuclear, derivados do petróleo, gás natural, eólica, biomassa e importação. De toda a energia elétrica produzida por essas fontes, 74% corresponde à energia gerada por hidrelétricas (BRASIL, acesso em 15 maio 2012).

Mesmo que a maior parte da energia elétrica consumida seja gerada por fonte renovável, sabe-se que a implantação de usinas hidrelétricas causam impactos

severos ao local, com riscos ao sistema hidrológico, entre outras consequências. Além disso, o atendimento à crescente demanda por energia nos grandes centros urbanos do país implica na construção de usinas em bacias localizadas em áreas distantes, uma vez que o potencial hidrelétrico das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul já foi explorado (BRASIL, acesso em 15 jul. 2012).

A tendência crescente do consumo de energia força que a oferta interna¹ também seja incrementada (Gráfico 1), e esse comportamento é um dos fatores que estimula o desenvolvimento de políticas para o uso eficiente de energia.

Gráfico 1– Evolução da oferta e do consumo de energia elétrica a partir da década de 1970.

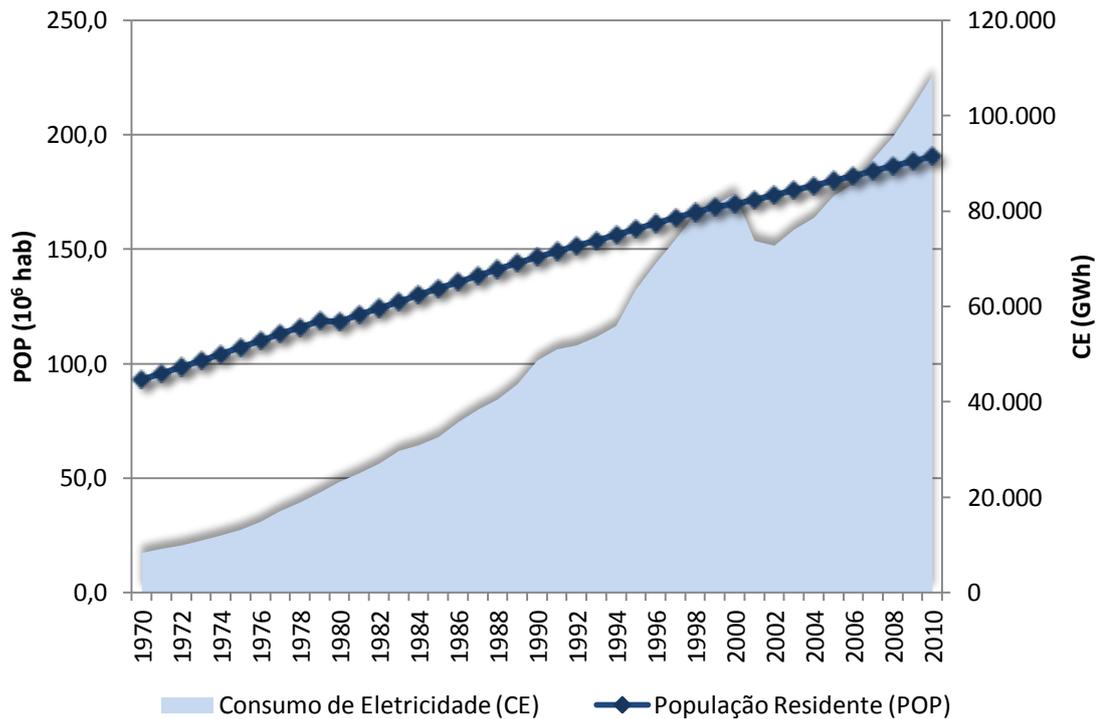


Fonte: Adaptado de Brasil (Acesso em 15 maio 2012).

O consumo de eletricidade em relação ao crescimento populacional e ao produto interno bruto pode ser observado no Gráfico 2, que evidencia o aumento no consumo por habitante, típico de países em desenvolvimento.

¹ Entende-se por oferta interna de energia a quantidade de energia disponibilizada para transformação e/ou consumo final. Representa a energia antes dos processos de transformação e distribuição (BRASIL, acesso em 15 maio 2012).

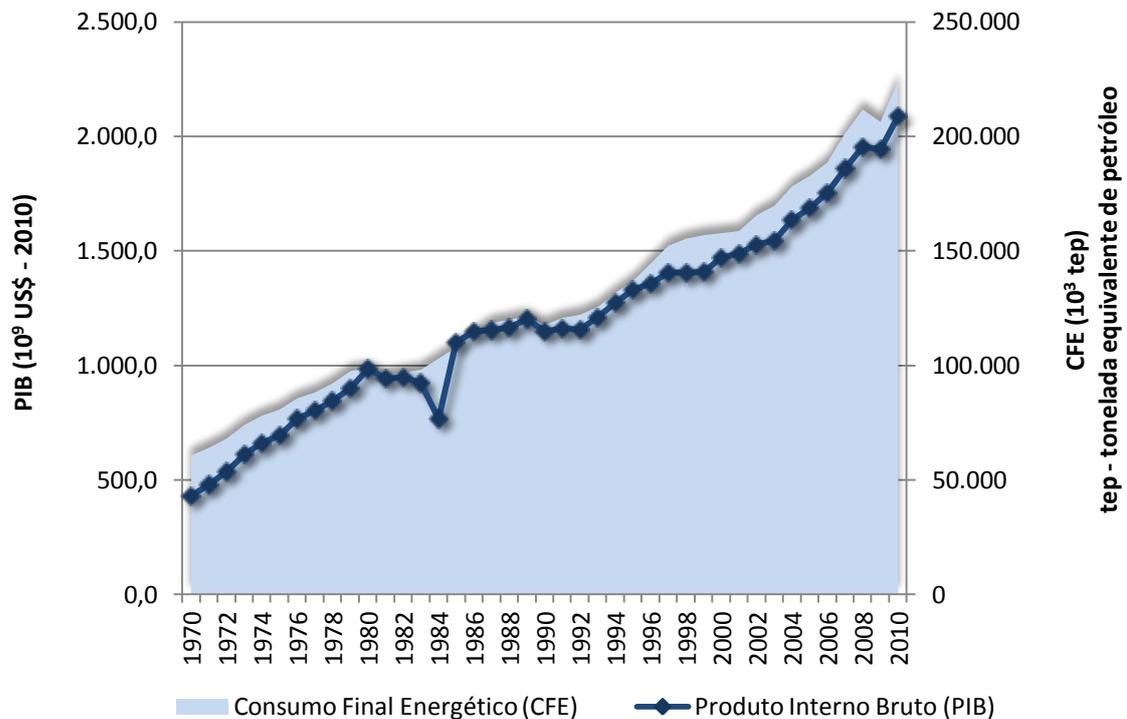
Gráfico 2 – Crescimento populacional em relação ao consumo energético.



Fonte: Adaptado de Brasil (Acesso em 15 maio 2012).

O consumo final energético em relação ao produto interno bruto possui tendência semelhante de crescimento, como pode ser observado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Crescimento do PIB em relação ao consumo final de energia.



Fonte: Adaptado de Brasil (Acesso em 15 maio 2012).

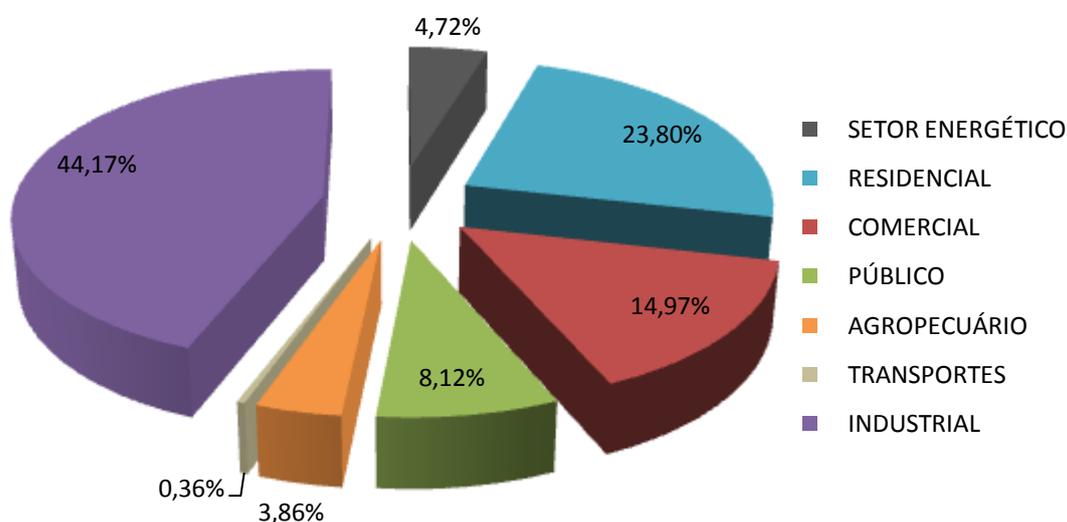
2.1.3. Análise do consumo de energia por setores

Segundo Lomardo (2011), o planejamento energético em países em desenvolvimento é baseado na oferta, ou seja, considera alternativas de oferta para satisfazer uma demanda, projetada para o futuro através de dados econômicos do passado, sem questionar métodos alternativos de consumo. O desenvolvimento sustentável traz como premissa justamente a dissociação dos padrões de consumo energético e as taxas de crescimento econômico, impondo o desafio de redução de consumo energético para atendimento aos mesmos modelos econômicos, sociais e ambientais (LOMARDO, 2011).

Nesse cenário entram os programas de racionalização do uso final de energia, como o Procel Edifica, atuando sobre a relação entre a quantidade de energia utilizada para produzir um bem ou realizar uma atividade e a energia consumida para realizá-lo, ou seja, inserido no conceito de eficiência energética. Um estudo sobre o consumo de eletricidade dos edifícios brasileiros, realizado em seis cidades, demonstrou uma grande variabilidade de níveis de eficiência entre as edificações, ocasionada possivelmente pela falta de preocupação com a questão energética durante o desenvolvimento dos projetos (LOMARDO, 2011).

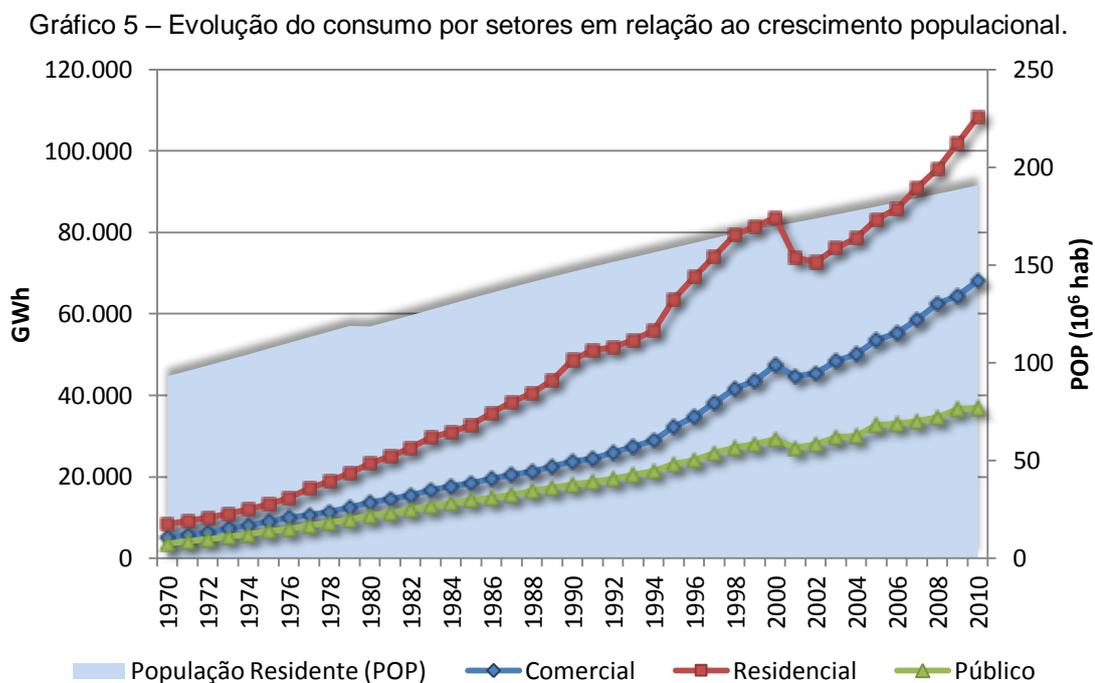
Em 2010, 23,8% do consumo final energético foi representado pelo setor residencial, 14,97% pelo setor comercial e 8,12% pelo setor público (Gráfico 4). Sabe-se que parte desse consumo pode ser reduzida através da utilização de estratégias aplicadas ao edifício, para adequação às condições ambientais onde se instala.

Gráfico 4 – Consumo de eletricidade por setor.



Fonte: Adaptado de Brasil (Acesso em 15 maio 2012).

Considerando-se os setores residencial, comercial e público, nos quais a arquitetura participa para o aumento ou diminuição do consumo, desde a década de 1970 as tendências têm acompanhado o crescimento da população (Gráfico 5).



2.2. Eficiência energética em edificações

A preocupação com o consumo de energia pelas edificações – assunto bastante debatido em diversos países, inclusive no Brasil –, fundamenta-se essencialmente na necessidade de conservação de recursos naturais, princípio básico de uma sociedade que almeja desenvolver-se de forma sustentável. Nesse contexto, o grande desafio imposto aos profissionais da construção civil seria o desenvolvimento de soluções, sejam projetuais ou construtivas, para que edifícios consigam diminuir o consumo de energia, sem prejuízo para suas condições ambientais internas (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004).

Segundo Frota (2004, p. 16)

a racionalização do uso da energia apresenta estreitos laços com a adequação da arquitetura ao clima, evitando ou reduzindo os sistemas de condicionamento artificial de ar, quer com a finalidade de refrigerar, quer com a de aquecer os ambientes. Os controles térmicos naturais propiciam a redução do excesso de calor resultante no interior dos edifícios, minimizando, por vezes, os efeitos de climas excessivamente quentes.

Adequar a arquitetura ao clima local visando o conforto ambiental e a eficiência energética foi um dos conceitos que deu início ao que hoje se caracteriza pela denominação de “arquitetura bioclimática” (CORBELLA; YANNAS, 2003). Assim, a preocupação com a adaptação ambiental dos edifícios, considerando-se as múltiplas dimensões da sustentabilidade, foi o estímulo para o desenvolvimento de instrumentos e métodos de avaliação da eficiência energética, além de diversos outros parâmetros relacionados às construções.

No Brasil, dois importantes regulamentos foram produzidos, fundamentados em normalizações internacionais, para avaliação de questões relacionadas ao desempenho térmico e à eficiência energética de edificações: a NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005a) e o RTQ-C – Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, uma das vertentes do Procel Edifica (MME, acesso em 25 maio 2012).

Em fevereiro de 2013 foi publicada também a NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho, com foco “nos requisitos dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos” (ABNT, 2013). Essa norma é dividida em seis partes, sendo que o desempenho térmico da habitação é considerado na primeira parte, de modo geral, e nas partes 4, sistemas de vedações verticais, e 5, sistemas de coberturas, com o enfoque direcionado. Para determinação dos níveis de eficiência de uma edificação habitacional quanto ao seu desempenho térmico são utilizados, principalmente, os conceitos apresentados na NBR 15220 (ABNT, 2005a).

2.2.1. NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações

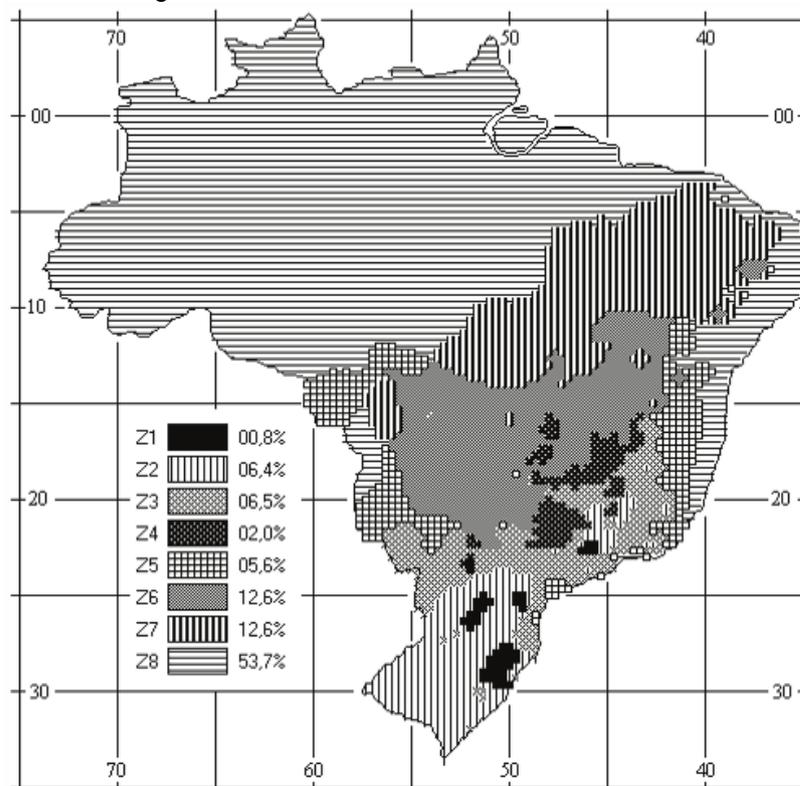
Com a primeira edição publicada em abril de 2005, a Norma Brasileira que trata do desempenho térmico de edificações é dividida em cinco partes:

- Parte 1: Definições, símbolos e unidades;
- Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;

- Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
- Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Uma importante contribuição para desenvolvimento de projetos adequados ao clima em que serão implantados é a terceira parte da norma, onde se estabelece um Zoneamento Climático para o território brasileiro (Figura 1), além de recomendações e diretrizes construtivas para adequação climática de habitações unifamiliares de interesse social com até três pavimentos. Para a determinação dessas diretrizes, para cada zona bioclimática foram adotados quatro parâmetros: 1. tamanho das aberturas para ventilação; 2. proteção das aberturas; 3. vedações externas (tipo de parede externa e tipo de cobertura); e 4. estratégias de condicionamento térmico passivo.

Figura 1 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro.

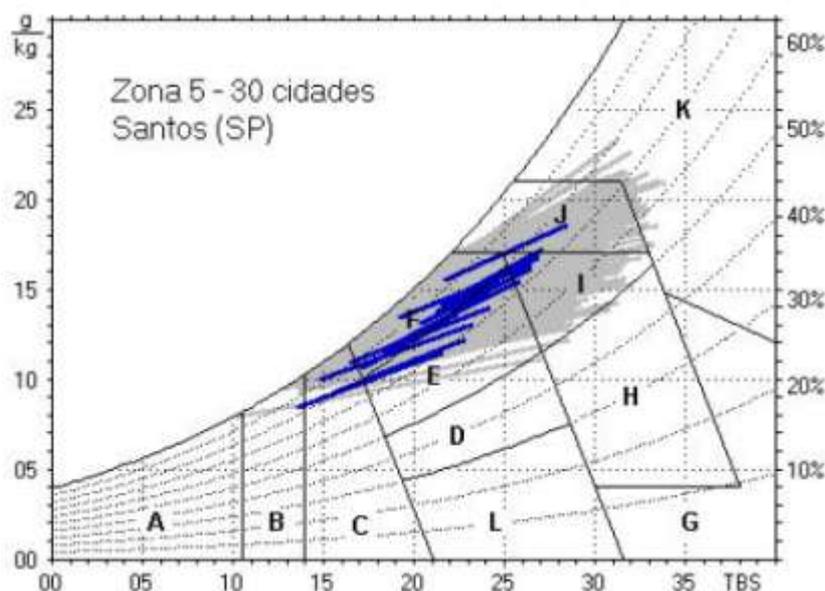


Fonte: ABNT (2005c).

Além da divisão territorial do país em 8 zonas bioclimáticas (Figura 1), 330 cidades tiveram seu clima classificado e, através da metodologia da Carta Bioclimática

proposta por Givoni (Figura 2), foram determinadas as diretrizes projetuais de acordo com as características climáticas de cada local.

Figura 2 – Carta Bioclimática apresentando as normais climatológicas de cidades desta zona, destacando a cidade de Santos, SP.



Fonte: ABNT (2005c).

No Quadro 1 estão exemplificadas as estratégias a serem atendidas por construções localizadas em Santos (SP), Zona Bioclimática 5, conforme os resultados obtidos na carta bioclimática da cidade.

Quadro 1 – Diretrizes construtivas recomendadas para a cidade de Santos (SP), localizada na Zona Bioclimática 5.

Santos (SP) – Zona Bioclimática 5	
Diretriz	Recomendação
Aberturas para ventilação	Médias ¹
Sombreamento das aberturas	Sombrear aberturas
Vedações externas	Parede leve refletora ²
	Cobertura leve isolada ³
Condicionamento térmico passivo	J – Ventilação cruzada
	C – Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Fonte: ABNT (2005c).

¹ A área da abertura deve corresponder a mais de 15% e menos de 25% da área do piso.

² Transmitância térmica menor ou igual a 3,60 W/m².K; atraso térmico menor ou igual a 4,3 horas e fator solar menor ou igual a 4,0%.

³ Transmitância térmica menor ou igual a 2,00 W/m².K; atraso térmico menor ou igual a 3,3 horas e fator solar menor ou igual a 6,5%.

Ao todo, são onze estratégias de condicionamento térmico passivo detalhadas na NBR 15220 (ABNT, 2005c) e indicadas de acordo com as normais registradas na carta bioclimática de cada cidade. Cada zona da carta bioclimática corresponde a uma estratégia (Figura 2), detalhadas no Quadro 2:

Quadro 2 – Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico.

Estratégias de Condicionamento Térmico Passivo		
A	Zona de aquecimento artificial (calefação)	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	Zona de aquecimento solar da edificação	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	Zona de massa térmica para aquecimento	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Zona de Conforto Térmico (baixa umidade)	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Zona de Conforto Térmico	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	Zona de desumidificação (renovação do ar)	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
G e H	Zona de resfriamento evaporativo	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada através da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.
Continua		

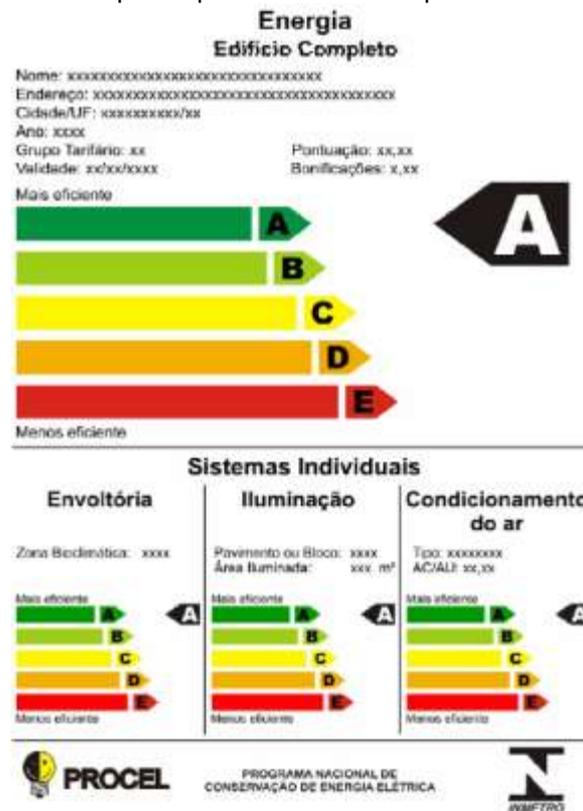
Conclusão		
H e I	Zona de massa térmica de refrigeração	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	Zona de ventilação	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.
K	Zona de refrigeração artificial	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.
L	Zona de umidificação do ar	Nas situações em que a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21°C e 30°C, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida através da utilização de recipientes com água e do controle da ventilação, pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.

Fonte: ABNT (2005c).

2.2.2. RTQ-C – Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

A classificação de um edifício avaliado pelos requisitos presentes nesse regulamento é simbolizada pela ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia – (Figura 3), ponderando-se as avaliações de cada sistema em separado: envoltória, iluminação e condicionamento de ar (MME, acesso em 25 maio 2012).

Figura 3 – Exemplo de ENCE apresentando níveis de eficiência A, tanto para os sistemas individuais quanto para o edifício completo.



Fonte: MME (Acesso em 25 maio 2012).

A aplicação dessa etiqueta é limitada a edifícios com área útil total mínima de 500 m² e/ou com tensão de abastecimento superior ou igual a 2,3 kV, incluindo edifícios condicionados, parcialmente condicionados e não condicionados. Para avaliação de edifícios de uso misto são consideradas apenas as parcelas da edificação com função comercial, de serviço ou pública, desde que compreendam uma área igual ou superior a 500 m².

Para obtenção da ENCE, o nível de eficiência do edifício, ou parte dele, pode ser definido através do método prescritivo ou do método de simulação. O método prescritivo consiste na aplicação de uma equação, detalhada no próprio regulamento, válida para edifícios condicionados. De maneira mais complexa e flexível, o método de simulação é processado em um programa computacional de simulação termoenergética, considerando-se, ainda, os parâmetros estabelecidos no método anterior. Pelo método de simulação é possível avaliar, além de edifícios condicionados, edifícios não condicionados.

Além da classificação geral do edifício, é possível a etiquetagem parcial dos sistemas, referentes à área total do edifício, ou a parcelas do mesmo. Para os

sistemas de iluminação e condicionamento de ar é permitida a consideração de um pavimento específico ou um conjunto de salas. Já para a envoltória é necessária a consideração de todo o edifício para a análise e classificação.

Para a classificação geral do edifício, são atribuídos pesos a cada sistema individual: 30% para a envoltória, 30% para o sistema de iluminação e 40% para o sistema de condicionamento de ar. Cada sistema, assim como o edifício completo, pode atingir cinco níveis, sendo A o mais eficiente; B, C, D e E os menos eficientes.

2.2.3. Elementos da Envoltória – Definições

A interação entre o edifício e o meio onde está inserido pode ser, até certo ponto, controlada pelo projetista através da manipulação dos sistemas construtivos de fechamento e condicionamento, ou seja, climatização e iluminação (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004). O planejamento dessas variáveis arquitetônicas objetiva a construção de ambientes o mais confortável possível ao usuário ou, pelo menos, tão confortáveis quanto os espaços ao ar livre em climas amenos (FROTA, 2004).

Entre os elementos construtivos que determinam a adaptação do usuário ao meio, o envelope do edifício pode ser considerado um dos mais importantes, visto que é nele que ocorrem as trocas térmicas entre interior e exterior. A capacidade da envoltória de transmitir a radiação solar e, conseqüentemente, aumentar os ganhos de calor internos, é um dos diferenciais a serem observados durante o projeto do edifício (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004).

Sendo assim, para determinação da eficiência do envelope de uma construção, algumas de suas características são mensuradas e classificadas de acordo com os limites impostos em cada instrumento de avaliação. Considerando-se, portanto, os dois principais regulamentos para avaliação do desempenho térmico de edifícios, publicados no Brasil, são apresentadas a seguir algumas definições relacionadas aos ganhos de calor pela envoltória de edifícios.

2.2.3.1. Transmitância térmica

Definição: “transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo” (MME, acesso em 16 maio 2012).

A transmitância térmica é um dos pré-requisitos específicos a serem atendidos para a classificação da envoltória no RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012), sendo que os limites impostos variam de acordo com zona bioclimática determinada na NBR 15220 (ABNT, 2005c). Esse parâmetro deve ser calculado para os elementos opacos tanto das paredes quanto da cobertura da edificação, ponderando-se os valores conforme a área que ocupam.

Para o cálculo da transmitância térmica de um elemento construtivo, devem ser consideradas algumas propriedades térmicas dos materiais que o compõe, como a condutividade térmica e o calor específico. A Parte 2 da NBR 15220 (ABNT, 2005b) apresenta o método de cálculo da transmitância térmica para o uso nas equações do RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012).

2.2.3.2. Absortância de superfícies

Definição: “quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície” (ABNT, 2005a).

Assim como a transmitância térmica, a absortância é um dos pré-requisitos específicos a serem atendidos para a classificação da envoltória no RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012), e os limites impostos também variam de acordo com zona bioclimática determinada na NBR 15220 (ABNT, 2005c).

Prioritariamente, o valor da absortância deve ser obtido com o fabricante do material (MME, acesso em 16 maio 2012), no entanto, em situações em que esses valores não forem disponibilizados, recomenda-se utilizar os valores presentes na Parte 2 da NBR 15220 (ABNT, 2005b).

2.2.3.3. Percentual de abertura na fachada (PAF)

Definição: “razão entre a soma das áreas de abertura envidraçada, ou com fechamento transparente ou translúcido, de cada fachada e a área total de fachada da edificação” (MME, acesso em 16 maio 2012).

O PAF é considerado diretamente na equação do índice de consumo da envoltória, e não somente nos pré-requisitos específicos do RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012).

2.2.3.4. Fator Solar

Definição:

Quociente da taxa de radiação solar diretamente transmitida através de um componente transparente ou translúcido, sob determinado ângulo de incidência, mais a parcela absorvida e posteriormente retransmitida para o interior, pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo (ABNT, 2005a).

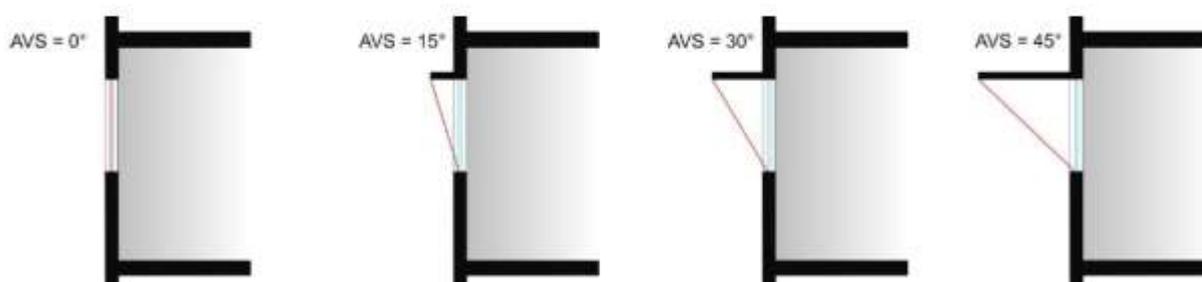
Assim como o PAF, o fator solar é considerado diretamente na equação do índice de consumo da envoltória no RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012). Para o cálculo desse parâmetro deve ser utilizada a fórmula presente na Parte 2 da NBR 15220 (ABNT, 2005b), com informações fornecidas pelo fabricante do material ou através de medições normalizadas.

2.2.3.5. Proteção solar

Definição: dispositivo que determina a obstrução à radiação solar nas aberturas.

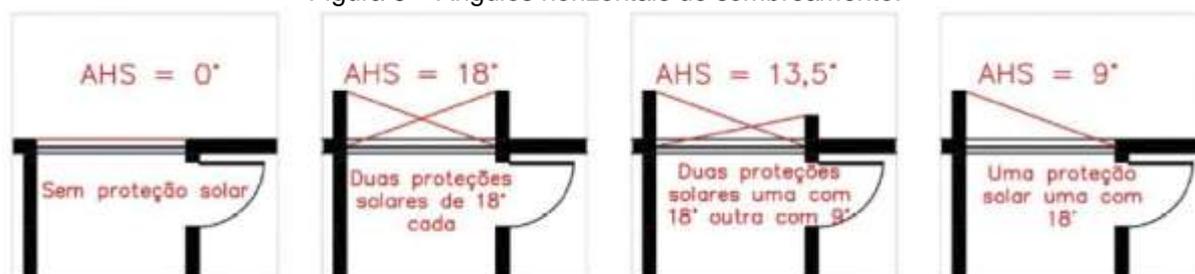
No RTQ-C, esses dispositivos são considerados diretamente na equação do índice de consumo da envoltória e representados pelos ângulos de sombreamento vertical, referente às proteções horizontais; e horizontal, referente às proteções verticais. O ângulo vertical de sombreamento é medido no desenho do elemento em corte, enquanto o ângulo horizontal de sombreamento é medido em planta e deve sempre ser considerado nos dois lados da abertura, conforme o exemplo das Figuras 4 e 5, respectivamente (MME, acesso em 16 maio 2012).

Figura 4 – Ângulos verticais de sombreamento.



Fonte: MME (Acesso em 16 maio 2012).

Figura 5 – Ângulos horizontais de sombreamento.



Fonte: MME (Acesso em 16 maio 2012).

2.2.3.6. Orientação

Definição: posicionamento do edifício em relação à trajetória solar.

A orientação das fachadas é considerada no RTQ-C para o cálculo do PAF, no método prescritivo. O PAF da fachada oeste é comparado ao PAF total do edifício e, caso o primeiro seja maior, será utilizado na equação do índice de consumo da envoltória. No método de simulação, o consumo final de um edifício só pode ser comparado a outro edifício, chamado referência, de mesma orientação. Caso o objetivo da análise seja o estudo de diferentes orientações, deve-se modelar um edifício referência para cada orientação (MME, acesso em 16 maio 2012). Ou seja, a orientação do edifício não é considerada diretamente na equação do índice de consumo da envoltória.

2.2.4. Método de simulação

Segundo Mendes *et al.* (2005), a utilização de *softwares* para simulação de edifícios teve início nas instituições de ensino e pesquisa, dependendo de instrumentos normativos para sua disseminação no meio privado. No Brasil, esse incentivo é enunciado pelo RTQ-C, ao indicar o método de simulação para permitir: 1. a liberdade de projeto, seja na forma do edifício, na natureza de suas aberturas ou proteções solares, ou nos sistemas utilizados; 2. a incorporação de inovações tecnológicas, comprovando níveis de eficiência elevados; 3. o uso de estratégias passivas de condicionamento, possibilitando edifícios não condicionados ou parcialmente condicionados; e 4 a incorporação de soluções não previstas no RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012).

Durante aproximadamente as três últimas décadas, a tecnologia das simulações computacionais de edifícios mostrou considerável evolução, fazendo com que a complexidade dos códigos embutidos nas ferramentas seja muito mais acentuada

(MENDES *et al.*, 2005). Tal evolução proporciona um aumento da confiabilidade dos resultados, uma vez que reproduz com maior acuidade os fenômenos reais. Em contrapartida, exige também maior detalhamento para a construção do modelo virtual, ou seja, a caracterização do edifício real considera uma grande quantidade de variáveis para os dados de entrada do processo de simulação. Entre essas variáveis estão os arquivos climáticos.

2.2.4.1. Arquivos climáticos

Sendo o clima uma variável que afeta diretamente o desempenho térmico das edificações, o máximo de exatidão na inserção de suas características para posterior simulação em *softwares* específicos é de essencial importância. A grande quantidade de dados, bem como a variabilidade dos elementos climáticos, fez surgir uma série de metodologias para a transformação dessas informações num produto passível de utilização em projetos de edifícios. O tratamento desses dados objetiva o estabelecimento de parâmetros, ou estratégias, que possibilitem um ambiente edificado adaptado às condições climáticas do local onde está/será implantado.

Goulart, Firmino e Lamberts (1998) apresentam em sua pesquisa diferentes metodologias para o tratamento de dados climáticos:

- Temperatura de projeto – metodologia ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers*): baseia-se na hipótese de que o nível de frequência de uma temperatura específica em um determinado período de tempo se repetirá no futuro. Após aplicação da metodologia para determinação das temperaturas de projeto, estas devem ser usadas para calcular cargas de refrigeração, de ventilação ou para uso em processos de resfriamento evaporativo;
- Graus-dia e graus-hora: é o somatório da diferença de temperatura, quando esta se encontra abaixo de uma temperatura base, para estimar a energia requerida para refrigeração. São métodos mais simplificados para análise de energia e são apropriados se o uso da edificação e a eficiência do equipamento de ar condicionado forem constantes;
- Temperatura BIN: números de horas em que a temperatura externa se encontra dentro de um intervalo, usualmente de 3°C, coletados em três ou mais períodos diários. Essa metodologia parte da premissa de que os

cálculos para o consumo anual de energia podem oferecer melhores resultados se forem avaliados, separadamente, diferentes intervalos de temperaturas e períodos do dia;

- Ano Climático de Referência: baseia-se na eliminação de anos de dados, os quais contêm temperaturas médias mensais extremas (altas ou baixas), até permanecer um ano somente. O Ano Climático de Referência ou *Test Reference Year* (TRY) foi preparado pelo *National Climatic Center* dos Estados Unidos para utilização em programas de simulação de desempenho térmico de edificações;
- Dia Típico de Projeto: importante ferramenta para determinação das exigências higrotérmicas de verão e inverno. Com base nas características desse dia o projeto pode ser elaborado para melhor responder ao conforto térmico do indivíduo; e
- Estatística: tem o objetivo de transformar os dados climáticos disponíveis para cada cidade em informações de mais fácil leitura e visualização.

Geralmente essas metodologias são aplicadas com dados climáticos coletados em estações automáticas localizadas fora do centro urbano das cidades. Esse distanciamento ocasiona certa imprecisão nas informações obtidas, já que os edifícios posteriormente analisados localizam-se, em sua grande maioria, justamente no meio urbanizado. Outro condicionante para o tratamento de dados climáticos coletados em estações automáticas são as possíveis falhas nos equipamentos e as interrupções nas medições, que acarretam lacunas nas séries coletadas.

Tanto a ausência de algum dos dados necessários às metodologias como a dificuldade de obtenção de dados de qualidade para alguns parâmetros climáticos exigem o desenvolvimento de modelos que representem os fenômenos cujos dados não estiverem disponíveis (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

2.2.4.2. Arquivos climáticos de cidades brasileiras

No Brasil, inicialmente 14 capitais tiveram seus dados tratados e transformados em arquivos climáticos para utilização em *softwares* de simulação térmica de edificações, seguindo a metodologia do Ano Climático de Referência. Após uma revisão para identificação e correção de possíveis erros, os dados foram compilados para diferentes extensões, o que possibilita o uso em diferentes *softwares*

computacionais e, inclusive, a visualização em planilhas eletrônicas (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Após esse primeiro trabalho de formatação de arquivos climáticos, o projeto do *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), desenvolvido, no Brasil, pelo INPE, LABEEE/UFSC (Laboratório de Eficiência Energética em Edificações/Universidade Federal de Santa Catarina) e LABSOLAR/UFSC (Laboratório de Energia Solar), disponibiliza arquivos climáticos TMY² para 20 cidades brasileiras. Em 2010, após liberação pelo INMET de dados climáticos atualizados de 411 estações climatológicas, referentes aos anos entre 2000 e 2010, foi formatada uma quantidade bastante representativa de arquivos, em formato TMY (RORIZ, acesso em 05 maio 2012). Além desses, alguns trabalhos são desenvolvidos pontualmente, sobretudo em instituições de ensino, para elaboração e/ou revisão de arquivos climáticos.

A quantidade de dados necessária à formatação de arquivos climáticos está diretamente relacionada ao nível de detalhamento do *software*, deste modo, quanto mais detalhado o programa de simulação, mais detalhadas devem ser as informações climáticas nele inseridas. Atualmente é comum o lançamento de dados horários para ser possível a entrada nesses *softwares*, ou seja, os dados das componentes climáticas registradas são de hora em hora (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Um ano de informações coletadas hora a hora corresponde a 8760 horas de dados climáticos para cada variável requerida pela metodologia. No caso da metodologia do Ano Climático de Referência, onde são necessários dados de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, velocidade de vento, direção do vento, etc., o total de informações lançadas é 8760 vezes a quantidade de variáveis (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Um das dificuldades em relação à qualidade dos dados coletados no Brasil é a radiação solar devido, principalmente, à dificuldade de obtenção de dados precisos, essencial para medições térmicas em países tropicais com alta incidência de

² *Test Meteorological Year*. “[...] é uma compilação de meses sem extremos de temperatura provenientes de diferentes anos, gerando um ano climático que nunca existiu, mas que apresenta temperaturas sem extremos para cada mês” (NREL, 1995, *apud* LABEEE, acesso em 05 maio 2012, p. 3).

radiação em todo território. Segundo LABEEE (acesso em 05 maio 2012, p. 1) em relação à medição da radiação solar,

[...] é um fator de difícil obtenção, com poucas estações distribuídas irregularmente em um território de grande variação de latitudes, de condições de céu e de turbidez do ar, relacionadas à localização geográfica, topografia, níveis de poluição, dentre outros.

Os primeiros arquivos climáticos de cidades brasileiras, para utilização em *softwares* de simulação térmica, foram compilados a partir de dados obtidos da INFRAERO (Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária) na década de 1990, referentes ao período de 1961-1990. Inicialmente, o acesso a esses dados permitiu a geração de dois tipos de arquivo, sendo um deles com extensão *try*, cuja configuração está exemplificada na Figura 6 (GOULART; FIRMINO; LAMBERTS, 1998; LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Figura 6 – Catorze horas de dados climáticos existentes em um arquivo com extensão *try*.

```

83780174159 15120 21 9250 13 16050 . . . . . 54 1 1 0
83780174159 15160 15 9250 0 . . . . . 54 1 1 1
83780172161 15170 10 9240 0 . . . . . 54 1 1 2
83780172162 15 0 0 9234 0 . . . . . 54 1 1 3
83780164159 15 70 10 9234 88 77021 . . . . . 54 1 1 4
83780160156 15 50 77 9234100 87020 . . . . . 54 1 1 5
83780164158 15 30 72 9244100 87020 . . . . . 54 1 1 6
83780168160 15 30 51 9244 75 67020 . . . . . 54 1 1 7
83780178167 16 30 41 9244 38 37020 . . . . . 54 1 1 8
83780195175 16 50 51 9242 13 16025 . . . . . 54 1 1 9
83780222188 17 20 10 9242 0 . . . . . 54 1 1 10
83780250196 17 30 15 9240 13 18080 . . . . . 54 1 1 11
83780259200 17330 36 9230 63 58080 . . . . . 54 1 1 12
83780277205 17340 15 9220 75 68080 . . . . . 54 1 1 13

```

Fonte: LABEEE (Acesso em 05 maio 2012).

Conforme pode ser constatado na Figura 6, arquivos de extensão *try* possuem um formato específico para leitura em programas computacionais, sendo difícil a compreensão visual dos dados nesta configuração, pois o lançamento é feito sem espaçamento ou vírgula para separar os diferentes fenômenos climáticos (LABEEE, acesso em 05 maio 2012). Cada linha da Figura 6 contém as seguintes informações (GOULART; FIRMINO; LAMBERTS, 1998):

- Número da Estação;
- Temperatura de Bulbo Seco;
- Temperatura de Bulbo Úmido;
- Temperatura de Ponto de Orvalho;
- Direção do Vento;

- Velocidade do Vento;
- Pressão nível da pista;
- Tempo presente;
- Total de Nuvens;
- Quantidade Nuvem (1° camada);
- Tipo nuvem (1° camada);
- Altura nuvem (1° camada);
- Quantidade nuvem (2° camada);
- Tipo nuvem (2° camada);
- Altura nuvem (2° camada);
- Soma da quantidade da 1° camada e da 2° camada;
- Quantidade nuvem (3° camada);
- Tipo nuvem (3°camada);
- Altura nuvem (3° camada);
- Soma da quant. da 3° camada;
- Quantidade nuvem (4°camada);
- Tipo nuvem (4° camada);
- Altura nuvem (4°camada);
- Radiação Solar;
- Ano;
- Mês;
- Dia; e
- Hora.

Anteriormente à formatação dos arquivos climáticos, os dados foram revisados para verificação de possíveis erros. Nessa etapa alguns requisitos para geração de arquivos climáticos que sirvam para simuladores de desempenho térmico foram conferidos, como a quantidade de linhas, que não deve ser inferior a 8760 (correspondente a um ano completo de dados horários). A ausência de variáveis climáticas também foi verificada, com exceção da radiação, que não existia nos dados disponibilizados (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Na Figura 7 são apresentadas algumas informações, como exemplo, sobre a revisão dos dados da cidade de Vitória. Os limites máximos e mínimos de algumas variáveis

climáticas devem ser compatíveis com a realidade da região. O valor zero na coluna nebulosidade significa uma situação de céu claro. Obrigatoriamente, a temperatura de bulbo úmido deve ser menor que a temperatura de bulbo seco, e a radiação solar no período noturno deve ser zero (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Figura 7 – Parte do resumo do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.

Média dos dados horários							
	tbs (oC)	tbu (oC)	pressão (kPa)	neb	rad global (Wh/m ²)	rad direta (Wh/m ²)	veloc.do ar (m/s)
Máxima	35.6	28.8	102.7	10	1237	1059	15
Média	23.2	21.1	101.5	6.0	211.4	148.9	4.3
Mínima	11.2	10.8	100.2	0	0	0	0

TBS>TBU	OK
l noturna*=0	OK
l diurna**>0	OK

*Das 21 h às 4 h

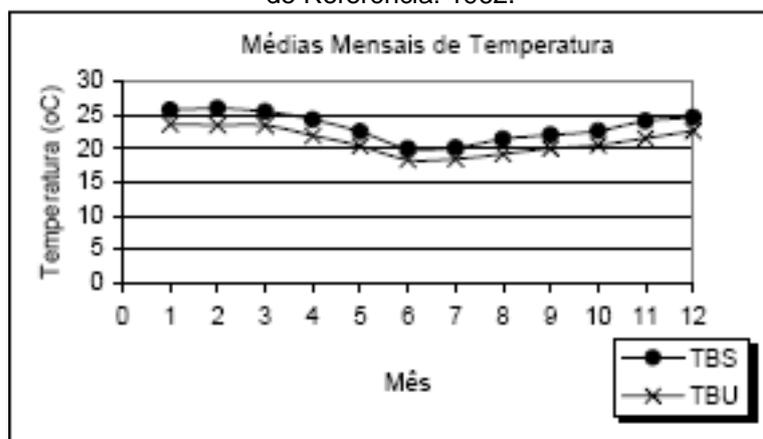
**Das 8 h às 17 h

Tmax	
Mês	Dia
1	3
lmax	
Mês	Dia
12	3

Fonte: LABEEE (Acesso em 05 maio 2012).

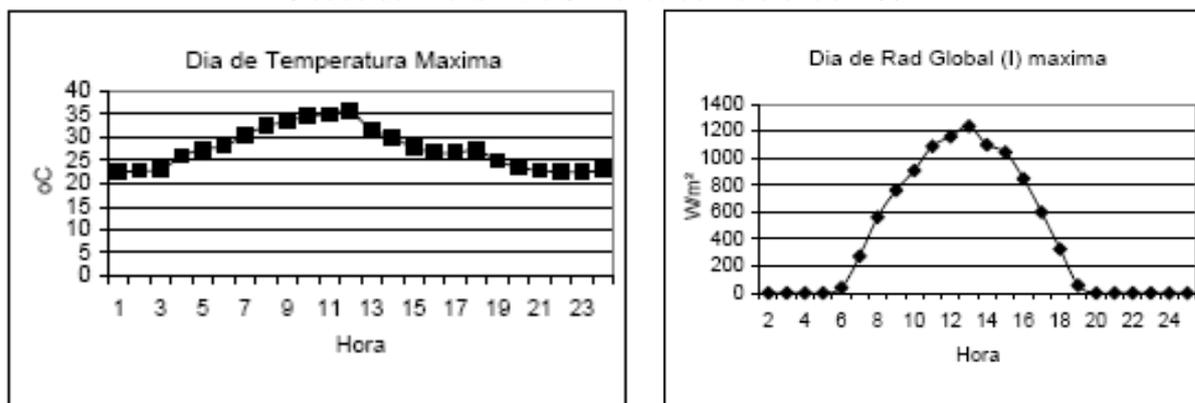
Nesse resumo também são informadas as médias mensais de temperaturas de bulbo seco e úmido (Figura 8). O dia de temperatura máxima e o dia de radiação global máxima são detalhados em gráficos horários (Figura 9). A frequência de ocorrência das temperaturas de bulbo seco e úmido, e as médias mensais de radiação diária também são apresentadas no resumo (Figura 10).

Figura 8 – Médias mensais de temperatura do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.



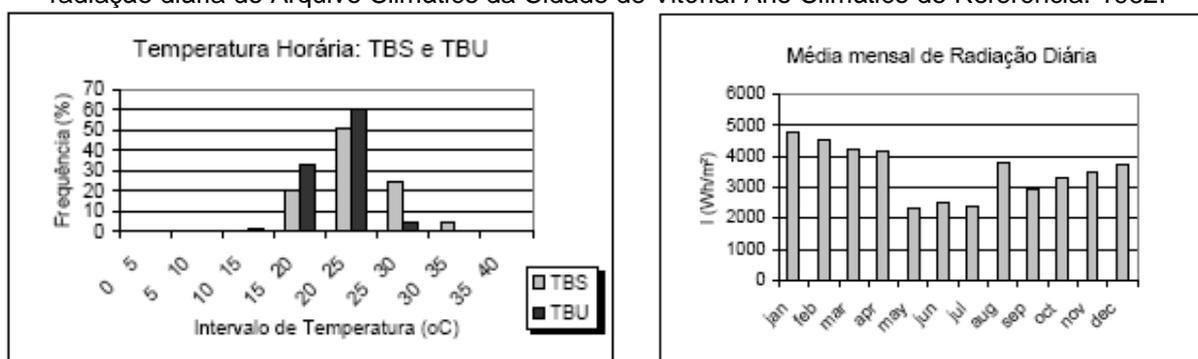
Fonte: LABEEE (Acesso em 05 maio 2012).

Figura 9 – Dia de temperatura máxima e dia de radiação global máxima do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.



Fonte: LABEEE (Acesso em 05 maio 2012).

Figura 10 – Frequência de ocorrência das temperaturas de bulbo seco e úmido, e médias mensais de radiação diária do Arquivo Climático da Cidade de Vitória. Ano Climático de Referência: 1962.



Fonte: LABEEE (Acesso em 05 maio 2012).

Para os dados ausentes que não ultrapassaram 6 horas consecutivas, utilizou-se o método de interpolação para completar os valores. Nos casos em que a ausência de dados foi maior que 6 horas consecutivas, foram investigadas as informações de três dias anteriores e três dias posteriores ao intervalo faltante e o preenchimento foi realizado através de análise de tendências (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Tanto a radiação horizontal global, quanto a radiação direta normal, e, eventualmente, a radiação difusa horizontal, foram estimadas hora a hora, após avaliação do melhor método a ser adotado. Conforme LABEEE (acesso em 05 maio 2012, p. 20), “os níveis de irradiação estão diretamente relacionados ao período do ano e à quantidade de nuvens na abóbada celeste”.

Após as devidas revisões e correções, os dados climáticos foram compilados para três formatos, sendo um arquivo texto (csv) e outros dois compatíveis com *softwares* simuladores (bin e epw). O arquivo texto com extensão csv, cujo cabeçalho está representado na Figura 11, reúne os dados climáticos das 8760 horas de forma

acessível à consulta ou manipulação para outros fins (LABEEE, acesso em 05 maio 2012).

Figura 11 – Cabeçalho presente no arquivo climático de formato csv.

Mês	Dia	Hora	TBS {C}	TBU {C}	T _d {C}	Pressão Atmosferica {kPa}
Umidade Relativa {%}	Densidade do ar	Entalpia	Velocidade do Vento {m/s}	Direção do Vento {graus}	Cobertura Total de Nuvens	Radiação Global Horizontal Extraterreste {Wh/m2}
Radiação Global Horizontal {Wh/m2}	Radiação Direta {Wh/m2}		Radiação Direta Normal {Wh/m2}	Radiação Difusa Horizontal {Wh/m2}		

Fonte: LABEEE (Acesso em 05 maio 2012).

2.3. Mudanças climáticas

Considera-se como um dos principais desafios a ser enfrentado pela sociedade do século XXI, as mudanças no clima em nível mundial, especialmente em função das consequências que devem causar ao meio ambiente, à saúde humana e à economia. Nos itens a seguir são apresentados os principais conceitos em relação à ciência climatológica e à evolução dos estudos que culminou na representação do sistema climático em modelos matemáticos complexos.

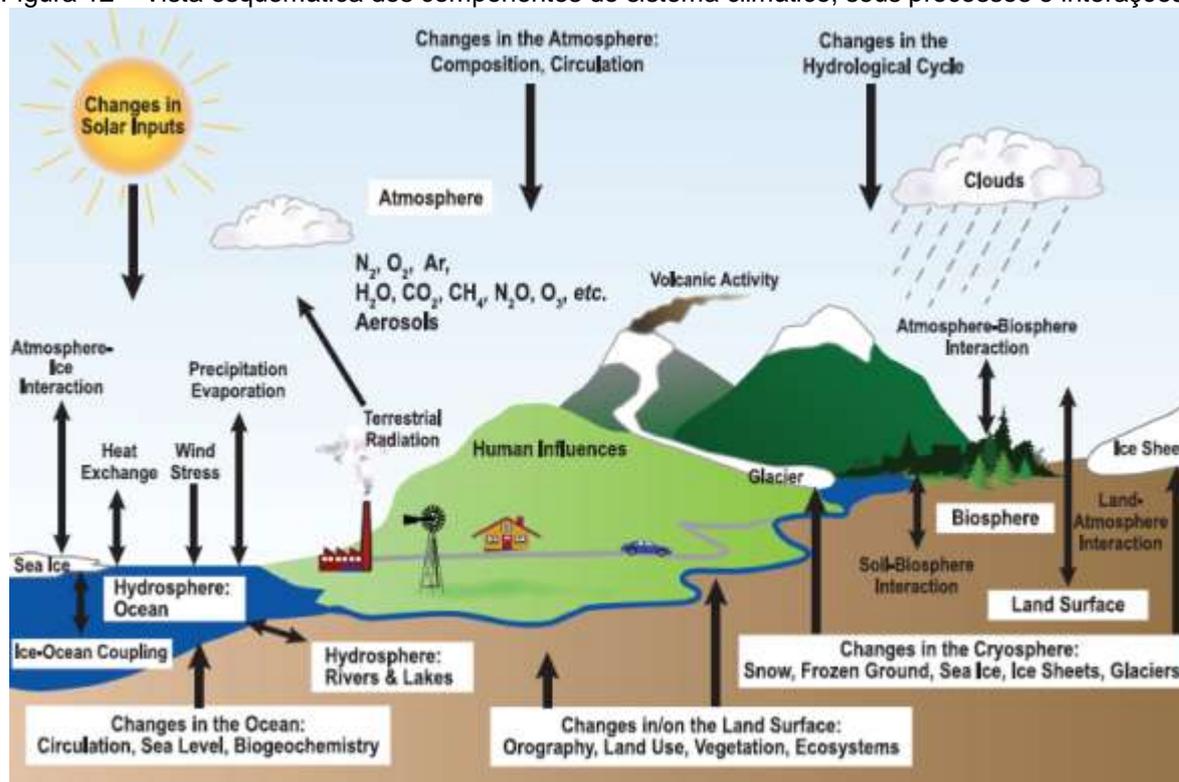
2.3.1. O sistema climático

O clima do globo terrestre pode ser entendido como um amplo sistema físico que se desenvolve num estado de equilíbrio dinâmico, extremamente complexo, cujos elementos mantêm fortes vínculos entre si numa larga escala de tempo e espaço (LE TREUT *et al.*, 2007).

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) apresenta, ainda, o clima como um sistema resultante de cinco subsistemas heterogêneos, dinâmicos e com propriedades físicas distintas: a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a litosfera e a biosfera (WMO, acesso em 15 maio 2012). Esses subsistemas não se superpõem uns aos outros, visto que as relações entre eles implicam apenas em troca de

matéria e energia (DIAS, 2006), como pode ser observado na Figura 12. Isso significa que, atualmente, considera-se como clima de uma região a generalização estatística do comportamento de sua atmosfera, funcionando em estado de equilíbrio dinâmico.

Figura 12 – Vista esquemática dos componentes do sistema climático, seus processos e interações.



Fonte: Le Treut *et al.* (2007).

2.3.2. Evolução do estudo do clima

Embora a preocupação com o clima remonte ao início da história da humanidade, somente no século XIX é que os fenômenos meteorológicos começaram a ser observados e organizados sistematicamente, principalmente após a invenção do telégrafo, em 1832. Inicialmente eram medidos, basicamente, temperatura e precipitação, e a partir das diferenças encontradas nos valores médios de cada região surgiam os primeiros esboços do quadro climatológico terrestre (PITA, 2006a). Köppen foi o primeiro cientista a enfrentar o desafio de trabalhar os dados climáticos coletados em 100 estações distribuídas em diferentes regiões do mundo. Apesar da simplicidade das concepções adotadas naquele período, os dados observados permitiram a criação das leis e princípios que explicassem os fenômenos climáticos, muitos utilizados ainda hoje (LE TREUT *et al.*, 2007).

Todavia os métodos adotados para explicar o comportamento das variáveis climáticas passaram a ser questionados por estudiosos da área, que consideram a caracterização do clima baseada somente em valores médios como abstrata, estática e separativa, pois um valor médio não corresponde às situações diferenciadas, dinâmicas e integradas ocorrentes no sistema atmosférico real. Além disso, essa forma de abordagem não se caracteriza como uma climatologia explicativa, já que não esclarece, mas apenas descreve os eventos que originam a distribuição dos climas. Assim surgiram novos conceitos dentro das ciências climatológicas, principalmente a partir da década de 1950, com a preocupação principal de analisar a sucessão habitual dos eventos determinados pelo clima, e não apenas o valor médio de variáveis isoladas (BARRY; CHORLEY, 2013).

Quando, nas décadas de 60 e 70 do século passado, anomalias climáticas passaram a ter repercussões não só no meio ambiente, mas também no meio socioeconômico, o modelo climatológico voltou a ser discutido, principalmente por ignorar o restante dos elementos geográficos na configuração dos climas regionais (LE TREUT *et al.*, 2007). Assim são formadas as tendências mais recentes da climatologia, em consequência, principalmente, da gravidade dos problemas de deterioração ambiental e da consolidação da Teoria Geral de Sistemas como modelo de conhecimento capaz de explicar os fenômenos naturais (PITA, 2006a).

A climatologia atual é dividida, portanto, em dois grandes eixos: o estudo do clima como sistema, que considera cada região climática nada mais senão o resultado de um sistema climático mundial, dinâmico e aberto, alimentado pela energia solar e composto por todas as camadas que envolvem o planeta; e o estudo do clima como recurso, uma visão na qual o clima é considerado um insumo fundamental para a humanidade e por isso deve ter toda sua potencialidade explorada (PITA, 2006a).

Ao considerar o clima um sistema, torna-se necessário recorrer a novas fontes de informação, diferentes das convencionais, herdeiras de um modelo cujo objetivo foi planejado principalmente para previsões meteorológicas. Por outro lado, o entendimento do clima como recurso pressupõe o conhecimento da relação existente entre clima e sociedade. Sendo o clima muito variável, tanto no tempo como no espaço, a utilização ótima de suas potencialidades depende da adaptação das atividades humanas a tais variabilidades, visto que algumas condições

climáticas são ideais para o desenvolvimento de determinadas atividades, enquanto outras podem trazer prejuízos (LE TREUT *et al.*, 2007).

Ambas abordagens de estudo do clima, como sistema e como recurso, apesar de conceberem formas diferentes de aproximação dos fenômenos climáticos, perseguem interesses comuns: a compreensão das manifestações climáticas e sua previsão futura, para servir uma sociedade estritamente conectada e dependente dessas informações.

2.3.3. Equilíbrio do sistema climático

O mosaico climático do globo terrestre, como exposto anteriormente, pode ser entendido como um conjunto de regiões climáticas distintas, representantes do comportamento atmosférico sobre uma área, em um período de tempo que, por convenção, deve ser superior a 30 anos. Essa generalização que origina os diferentes climas mundiais só é possível porque a atmosfera e todos os elementos que a definem (temperatura, precipitação, vento, etc.), apesar da grande variabilidade em determinados períodos, apresentam-se estáveis (LENZI; FAVERO, 2011). Ou seja, eliminando-se as variações periódicas, principalmente dos ciclos diurno e anual, os valores observados das variáveis que caracterizam o clima flutuam em torno de um valor central.

Portanto, os cinco subsistemas que definem o clima – a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a litosfera e a biosfera – alimentados pela energia solar, funcionam em equilíbrio, não estático, visto que existem variabilidades periódicas dentro dos processos, e sim dinâmico (CGEE, acesso em 20 ago. 2012; DIAS, 2006). Contudo, esse sistema não tem funcionado sempre nesse mesmo modelo. Inúmeras evidências provam que a distribuição climática atual não representa toda a história do clima da Terra, como por exemplo, as pinturas rupestres de paisagens de savanas no atual deserto do Saara (CGEE, acesso em 20 ago. 2012; LE TREUT *et al.*, 2007).

Sendo assim, é possível afirmar que têm acontecido, ao longo da história conhecida pelo homem, mudanças no clima da Terra, as quais presume-se, voltarão a acontecer no futuro. A dificuldade está em identificar, em meio à imensa variabilidade dos fenômenos atmosféricos, quando acontecerá a ruptura desse suposto equilíbrio pela manifestação de mudanças climáticas.

Detectar nas séries de dados, através de concepções estatísticas, rupturas, inconstâncias ou descontinuidades que representem mudanças climáticas efetivas pode ser um processo complicado, pois o comportamento habitual do clima apresenta flutuações, seja em escala temporal ou espacial. Sendo assim, é preciso que a variação dos valores em observação, dentro de determinado intervalo de tempo, seja superior às variações internas, aos ruídos da série.

Em síntese, a energia solar entra no sistema climático, circula pelos cinco subsistemas e é devolvida ao espaço exterior na mesma quantidade, de tal forma que o sistema permanece em equilíbrio com o exterior (LE TREUT *et al.*, 2007). No entanto o equilíbrio desse sistema não é imediato, nem automático, pois cada componente, além de possuir diferentes tempos de resposta às anomalias, não se relaciona a outros componentes através de ligações lineares, mas sim a partir de um complexo sistema de diversas entradas, saídas e mecanismos de realimentação (DIAS, 2006; LENZI; FAVERO, 2011; VAREJÃO-SILVA, 2006).

Mudanças climáticas acontecem, portanto, quando o equilíbrio do sistema é comprometido pela variação de um de seus componentes e, conseqüentemente, é substituído por um novo equilíbrio, após um período de transição entre ambos. Se a anomalia de um componente foi suficientemente importante para abalar o equilíbrio climático, impedindo que volte àquela configuração, uma nova dinâmica possivelmente fará com que seja alcançado um novo equilíbrio.

A despeito da simplicidade dessa constatação, a identificação de uma mudança climática somente pode ser levada a cabo se houver conhecimento suficiente e preciso sobre a estrutura do sistema climático, com todos os seus componentes e relações, os fluxos de matéria e energia que percorrem essas ligações, os tempos de respostas às anomalias, etc. (LE TREUT *et al.*, 2007).

Algumas dessas interações entre os elementos do sistema climático já foram identificadas como possíveis causas de uma próxima perturbação desse equilíbrio. O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera é considerado um dos principais agentes dessas transformações, embora alguns grupos específicos não concordem com essa teoria. A Terra encontra-se atualmente em equilíbrio radiativo, devido, justamente, à existência desses gases que provocam o efeito estufa, pois eles “absorvem parte da energia do Sol, refletida pela superfície do planeta, e a redistribuem em forma de calor através das circulações atmosféricas

e oceânicas” (MARENGO *et al.*, 2007b). Porém, há décadas tem se observado um aumento na concentração desses gases na atmosfera, provocando um aumento na eficiência do efeito estufa, fenômeno também conhecido como aquecimento global.

Diversos estudos exploram a semelhança na variabilidade da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e o aumento das temperaturas. Já em 1971 a Academia de Ciências da Suécia publicava um relatório sobre o impacto do aumento da concentração do dióxido de carbono na atmosfera, pela ação do homem, no aumento da temperatura na superfície do planeta (CGEE, acesso em 20 ago. 2012). A constatação desse aumento na concentração de gases de efeito estufa ser consequência de ações humanas levou ao estabelecimento do denominado Protocolo de Quioto³, em 1997, para a Convenção Quadro das Nações Unidas em Mudanças de Clima.

O Protocolo de Quioto trata, principalmente, da emissão de dióxido de carbono (CO₂), lançado sobretudo pela queima de combustíveis fósseis, desmatamento e produção de cimento; das emissões de metano (CH₄) em aterros sanitários e na pecuária devido à decomposição anaeróbica de matéria orgânica; das emissões de óxido nitroso (N₂O) devido ao uso de fertilizantes nitrogenados; e das emissões de perfluorocarbonos (PFCs), hidrofluorocarbonos (HFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) lançados por processos industriais (CGEE, acesso em 20 ago. 2012).

Além das alterações nas concentrações de gases de efeito estufa, outros fenômenos ocasionam instabilidades no sistema climático e podem contribuir para uma mudança definitiva nos seus padrões: as erupções vulcânicas, por injetar cinzas na estratosfera; a variabilidade da radiação solar; as emissões de material particulado (aerossóis) na atmosfera pela ação humana; mudanças no ozônio estratosférico e troposférico, devidas, também, à ação do homem; e variações naturais do clima, porém de periodicidade ainda não bem definida, como o fenômeno *El Niño* (CGEE, acesso em 20 ago. 2012).

³ O Protocolo de Quioto foi adotado na Terceira Sessão da Conferência das Partes. Os países incluídos no Anexo B do Protocolo concordaram em reduzir as emissões antropogênicas de gases do efeito estufa pelo menos em 5% abaixo dos níveis de 1990, no período de compromisso de 2008 à 2012 (MARENGO *et al.*, 2007b). Considerando-se sua importância como um dos países mais emissores, a não ratificação do Protocolo de Quioto pelos Estados Unidos é ainda uma questão em debate sobre o regime futuro (CGEE, acesso em 20 ago. 2012).

Finalmente, a investigação e simulação de mudanças climáticas no futuro são interpretadas por práticas ora indutivas, através da análise de climas do passado, ora dedutivas, baseadas em leis físicas consagradas em teorias climáticas, ambas essenciais ao aperfeiçoamento dos modelos de simulação, cada vez mais precisos, para projeção de mudanças climáticas futuras (LE TREUT *et al.*, 2007; PITA, 2006b).

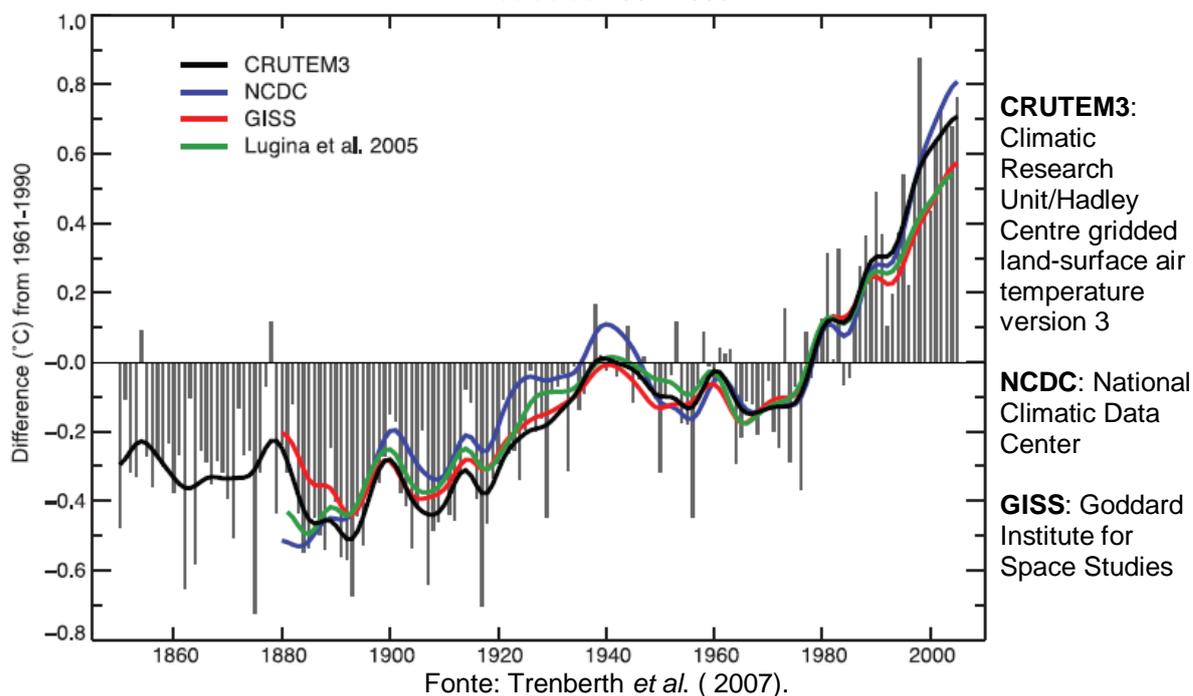
2.3.4. Indícios de uma nova mudança climática

Ao longo de sua trajetória a Terra apresentou situações climáticas distintas, que puderam ser comprovadas em testemunhos oceânicos e fontes terrestres, complementadas por testemunhos de gelo coletados em diferentes regiões do planeta (BARRY; CHORLEY, 2013).

A constatação de configurações climáticas anteriores diferentes da atual torna evidente que o clima, por seu funcionamento natural e suas respostas aos diversos agentes com quem interage, é variável, ou seja, está sujeito a mudanças, mesmo quando se encontra em aparente equilíbrio. Por esse motivo, a eminência de uma mudança climática não está, necessariamente, vinculada a uma fundamentação baseada em intervenções humanas sobre o meio ambiente; esse pode ser somente um fator sobreposto à trajetória natural do planeta.

Estatisticamente, de acordo com as tendências do atual período interglacial, as mudanças climáticas levariam a uma nova glaciação. Entretanto, os registros climáticos dos últimos anos evidenciam um considerável aquecimento, o qual fez surgir a suposição de um novo período de climas quentes (Figura 13).

Figura 13 – Variações anuais de temperatura global do ar (°C), de 1850 a 2005, em relação às médias de 1961-1990.



Como pode ser observado na (Figura 13), do final do século XIX ao início do século XX, as temperaturas aparentavam um comportamento estável, com médias anuais 0,3-0,4°C menores que as registradas no período de 1961 a 1990. A partir da década de 1920, esse comportamento adquire uma tendência crescente e, apesar da interrupção em meados das décadas de 1950 e 1970, a variação das temperaturas médias anuais chegou a 0,8°C a mais, no ano 2000, em relação às médias de 1961-1990.

Essa tendência evidente de aumento das temperaturas acompanha uma série de outras conclusões, como a diferença de intensidade de aquecimento entre os hemisférios, sendo que o Sul experimentou maiores alterações em seus padrões nas últimas décadas. Durante o outono e o inverno, a percepção de variações de temperatura por aquecimento é maior em relação às registradas no verão e na primavera. Quanto ao ciclo diário de variação de temperaturas, as mínimas apresentam maiores alterações em relação às máximas, o que ocasiona uma redução nas amplitudes diárias (JANSEN *et al.*, 2007).

Essas informações requerem uma análise extremamente cuidadosa para que não sejam feitas conclusões equivocadas, principalmente a respeito das causas associadas aos eventos analisados. O aumento das temperaturas ocasionado pela urbanização pode ser um exemplo disso, pois até um determinado momento do

estudo de climas passados, as mudanças nas séries de temperaturas ocorriam tanto nas superfícies continentais quanto oceânicas, onde é pouco provável a influência direta da urbanização (PITA, 2006b).

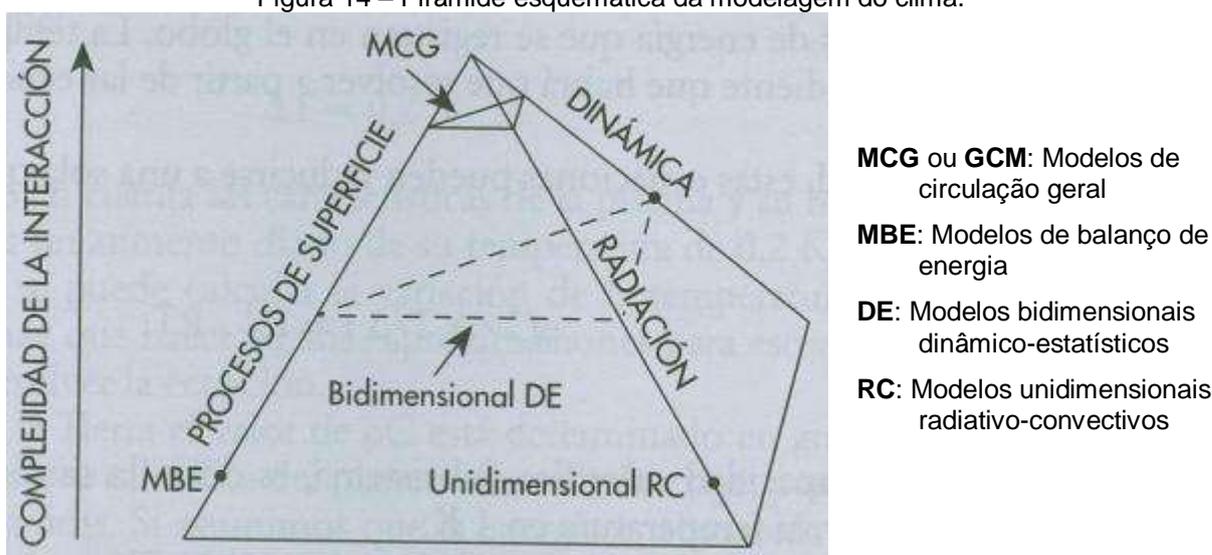
Diante de toda incerteza e fragilidade do sistema climático, é imprescindível a observação contínua do seu comportamento, assim como a busca por respostas em seus eventos. A fim de alcançar esse objetivo, adota-se como estratégia a modelagem desse complexo sistema, que considere todas as variáveis envolvidas em cada processo integrante do clima global.

2.3.5. Modelagem do sistema climático

O estudo do clima como sistema, como visto anteriormente, pressupõe cada clima distinto como o resultado do funcionamento de um sistema climático global. Para a compreensão do seu funcionamento, a climatologia atual busca desenvolver modelos matemáticos que representem todos os componentes e interações atuantes nesse complexo conjunto de variáveis. Foram esses modelos que, nas últimas quatro décadas, ocasionaram mudanças fundamentais no entendimento do complexo comportamento atmosférico (BARRY; CHORLEY, 2013).

Esse processo de conversão de dados, ou modelagem, pode ser feito de maneiras distintas, o que gera uma relativa variedade de modelos disponíveis para estudo. A Figura 14 apresenta os quatro principais tipos de modelos climáticos, numa pirâmide cujos eixos representam os processos de modelagem e a altura refere-se ao grau de complexidade com que se abordam estes processos, sendo o pico da pirâmide a situação mais complexa.

Figura 14 – Pirâmide esquemática da modelagem do clima.



Fonte: Pita (2006b).

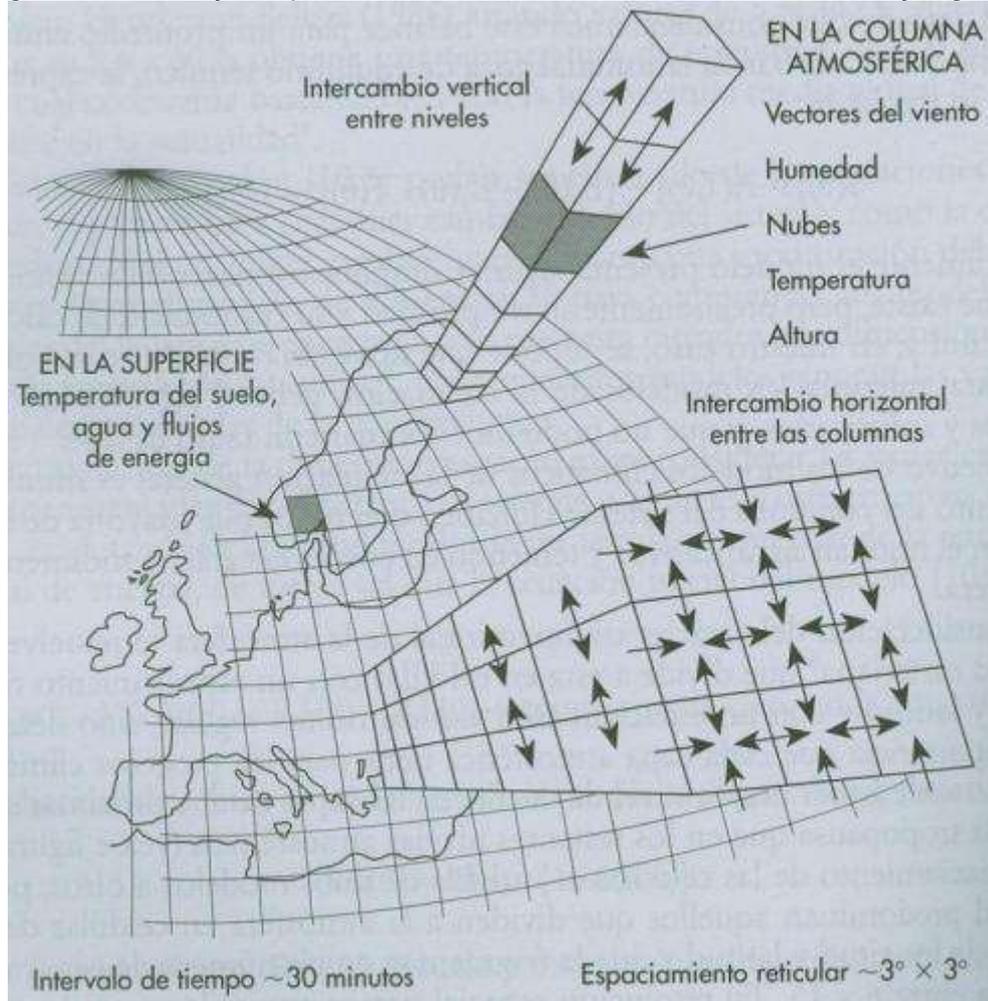
Ainda conforme Barry e Chorley (2013) e Pita (2006b), a respeito dos principais tipos de modelos climáticos:

- Os modelos de balanço de energia (MBE) são modelos unidimensionais que avaliam a variação da temperatura da superfície em função da latitude;
- Os modelos unidimensionais radiativo-convectivos (RC) calculam o perfil vertical da temperatura a partir de um valor médio global, tendo em conta os processos radiativos e convectivos que se desenvolvem na atmosfera;
- Os modelos bidimensionais dinâmico-estatísticos (DE) abordam dois tipos de processos fundamentais: os processos da superfície e os processos dinâmicos considerando duas dimensões espaciais, a latitude e a altura;
- Os modelos de circulação geral (MCGs ou GCMs) são os mais complexos, pois consideram a maioria dos processos físicos relevantes para o clima e abordam-nos em três dimensões: a latitude, a longitude e a altura. Além disso, esses modelos geralmente acoplam um modelo de circulação geral oceânica, dada a importância do comportamento do oceano sobre o clima.

Um modo para conseguir a abordagem das três dimensões no modelo climático é a divisão da atmosfera em uma rede cartesiana, com eixos latitudinais e longitudinais espaçados igualmente, e divisões em altura segundo a importância da camada atmosférica ao processo climático. Esse espaçamento é variável entre os modelos, sendo mais frequente a divisão a cada 5°, ou a cada 3°, para latitude e longitude, e 6

a 15 camadas verticais (altura). Essa resolução oferece o melhor custo benefício para os estudos climáticos, tendo em vista os recursos computacionais atuais. Já a escala temporal mais frequentemente utilizada é a que estabelece sequências com intervalos de mais ou menos trinta minutos (Figura 15).

Figura 15 – Resolução espacial cartesiana nos modelos climáticos de circulação geral.



Fonte: Pita (2006b).

2.3.6. Modelos climáticos do IPCC e modelos climáticos regionais

Com o intuito de fornecer informações amparadas por visões científicas a respeito do clima foi criado, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Em síntese, esse órgão tem como principal objetivo estudar as bases científicas, técnicas e socioeconômicas relevantes para a compreensão dos riscos das mudanças climáticas induzidas ao homem, seus potenciais impactos e opções para adaptação e mitigação (IPCC, acesso em 30 abr. 2012).

Desde então, o IPCC tem publicado relatórios científicos completos sobre as alterações climáticas produzidas no mundo: o primeiro foi lançado em 1990, o segundo em 1995 – importante instrumento para a adoção do Protocolo de Kyoto, em 1997 –, o terceiro em 2001, e o quarto em 2007 (IPCC, acesso em 30 abr. 2012).

Nesses relatórios são apresentados os dados obtidos através da construção dos GCMs pelas distintas instituições colaboradoras de diversas regiões do mundo. Cada instituição possui uma metodologia diferenciada para inserção e manipulação de dados, sendo inevitável, portanto, uma variação entre as projeções, ou dados de saída, fornecidos por diferentes modelos. Para que um modelo seja útil para pesquisadores do IPCC, os critérios devem ser atribuídos segundo alguns limites, como, por exemplo, o incremento na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e suas consequências no aumento das temperaturas (MARENGO *et al.*, 2007b).

No Brasil, com o intuito de entender a variabilidade do clima atual e suas possíveis mudanças futuras, foi instituído o projeto “Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI” (MARENGO *et al.*, 2007b), pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), em colaboração com o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP) e com a Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável (FBDS). As bases consultadas nesse projeto foram:

- Registros climáticos coletados desde o início do Século XX, fornecidos por instituições nacionais;
- Projeções futuras do clima apontadas por modelos globais, fornecidos pelo IPCC e pelo *Hadley Centre for Climate Research* do Reino Unido; e
- Simulações com modelos climáticos regionais, desenvolvidos e rodados no CPTEC/INPE e no IAG/USP, no Brasil.

Os dados de saída gerados pelos modelos do IPCC foram analisados e discutidos no Relatório I desse projeto e permitiram uma primeira aproximação ao clima futuro do país, com uma abordagem geral e poucos detalhes em níveis regionais. A partir desse primeiro relatório pôde-se conhecer o nível de incerteza devido à variabilidade dos dados de saída apresentados pelos diferentes modelos. Assim, o projeto

evoluiria no sentido de tentar diminuir essas incertezas, através da integração de dados de diferentes modelos (AMBRIZZI *et al.*, 2007).

Outro aspecto desenvolvido foi a regionalização das simulações, uma técnica aplicada com o objetivo de aumentar a resolução espacial dos modelos sobre a área em estudo. Em modelos cuja resolução é da ordem de centenas de quilômetros, eventos climáticos de mesoescala, ou ocorrências de escala espacial inferior à resolução do modelo, podem gerar erros quando da aplicação destas técnicas. Esses erros comprometem a precisão das simulações e acrescentam variações às observações em escala regional. Porém, o aumento da resolução de modelos globais demanda recursos computacionais de custo elevado, além de uma grande quantidade de espaço para armazenamento (AMBRIZZI *et al.*, 2007).

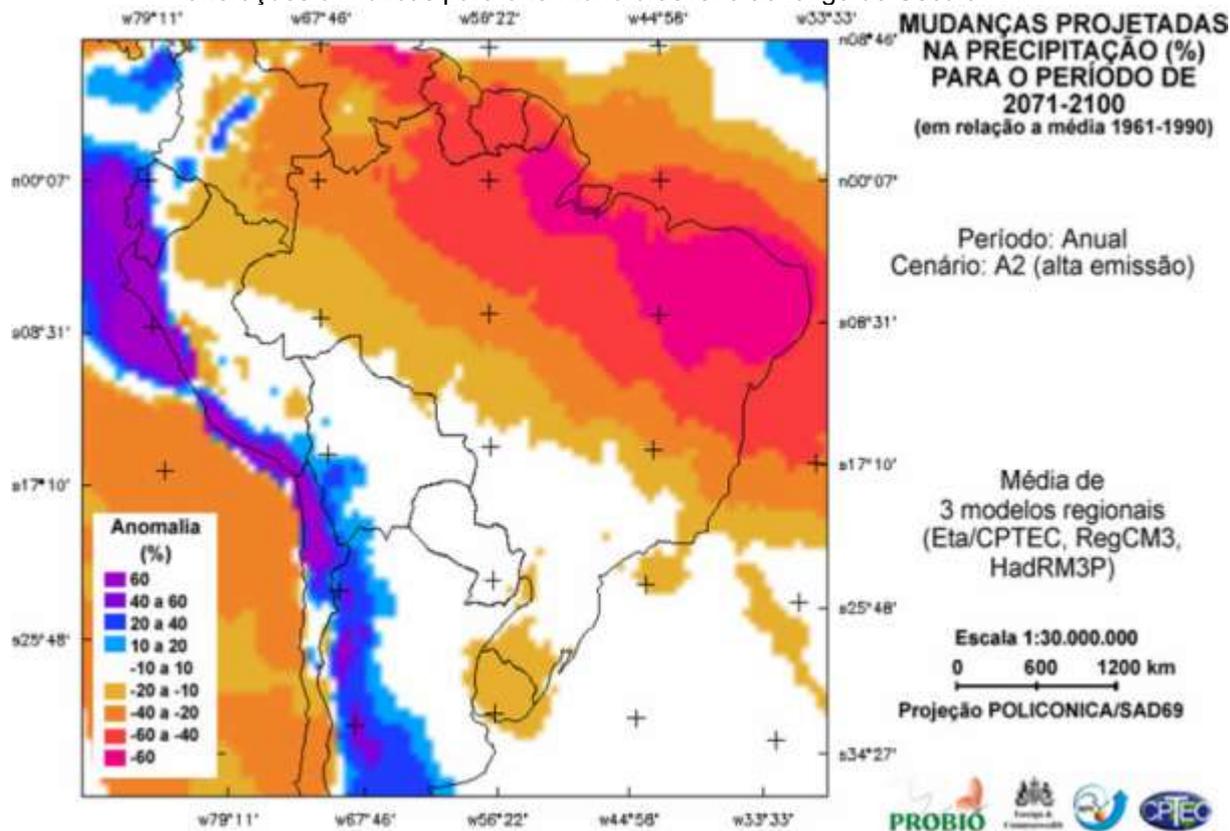
Nesse contexto surgem os modelos climáticos regionais, de maior resolução em relação aos modelos climáticos globais, o que significa maior detalhamento espacial e temporal das variáveis climáticas. No Relatório III do mesmo projeto foram descritas as simulações realizadas, sob as mesmas condições de um dos modelos globais aceitos pelo IPCC, o HadAM3P desenvolvido no *Hadley Centre UK Meteorological Office* do Reino Unido, a partir de três modelos regionais: HadRM3P, Eta/CPTEC/CPTEC e RegCM3 (AMBRIZZI *et al.*, 2007).

Após a realização dos devidos testes e calibrações para validação dos modelos regionais, constatou-se um desempenho satisfatório dos mesmos. Assim, através de técnicas apropriadas, os resultados da rodagem dos modelos regionais foram integrados e publicados através de mapas, incluindo-se médias sazonais e anuais de temperatura do ar à superfície e precipitação pluviométrica, para o período de 2071-2100 em relação a 1960-1990, para dois cenários de emissão (B2, baixas emissões, e A2, altas emissões⁴), na escala para a qual estas projeções estiverem

⁴ Os cenários de emissões de gases de efeito estufa desenvolvidos pelo IPCC são condições futuras com históricos demográficos, sociais, econômicos e de mudanças-técnicas similares. No cenário A2 considera-se um mundo futuro muito heterogêneo, onde a regionalização é dominante, as identidades e tradições locais são fortalecidas. Este cenário projeta o crescimento contínuo da população, sendo o desenvolvimento econômico orientado para a região. O crescimento econômico e os avanços tecnológicos são mais fragmentados e lentos que em outros momentos da história mundial. No cenário B2 a preocupação gira em torno do desenvolvimento de soluções locais para o alcance da sustentabilidade econômica, social e ambiental. O crescimento populacional neste cenário é mais lento que no cenário anterior. As mudanças tecnológicas são mais lentas e diversificadas. Mesmo orientado para a proteção ambiental e equidade social, este cenário concentra-se nos níveis local e regional, em lugar de soluções globais (MARENGO, 2007).

disponíveis. Foram disponibilizados mapas (Figura 16) com as informações geradas por cada modelo regional isolado e também a partir dos resultados dos três modelos integrados estatisticamente (AMBRIZZI *et al.*, 2007).

Figura 16 – Exemplo de mapa resultado do projeto “Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI”.



Fonte: Marengo *et al.* (2007a).

Seguindo a estratégia usada pelo IPCC para o estudo de mudanças climáticas, foi instituído em setembro de 2009 o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) pelos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Meio Ambiente (MMA), atendendo a necessidade de uma abordagem nacionalizada sobre o tema (PBMC, 2012). As avaliações científicas a respeito das mudanças de relevância para o clima no Brasil são publicadas em Relatórios de Avaliação, elaboradas por diferentes comunidades científicas do país, abordando as vertentes ambiental, social e econômica das mudanças climáticas (PBMC, 2012).

2.3.7. Impacto das mudanças climáticas no Brasil

Com relação ao clima do futuro, os resultados da pesquisa citada anteriormente indicaram que a temperatura média do ar à superfície, dependendo do cenário de

emissão de gases de efeito estufa e dos modelos climáticos globais, pode sofrer um aumento de 4°C acima da média climatológica (1961-90) para 2100, com consideráveis variações regionais. Como ainda existem incertezas nessas projeções – mais ou menos acentuadas de acordo com o parâmetro climático analisado ou a região considerada – diversas hipóteses são levantadas com relação aos regimes e distribuição de chuva, variabilidade de ocorrência de eventos extremos – como as ondas de calor e os eventos extremos de chuva – amplitude do fenômeno *El Niño* – Oscilação Sul, variações no ciclo hidrológico, entre outros (MARENGO, 2007).

Essas projeções de mudanças futuras implicariam uma série de consequências à sociedade, lembrando que aqueles que hoje dispõem de menos recursos terão menor capacidade para se adaptar às novas condições ambientais. Nesse sentido, o Nordeste é considerado como a região mais vulnerável às mudanças climáticas do Brasil, pois a atual estação chuvosa – fundamental para a agricultura de subsistência regional, para a disponibilidade de água e para a saúde da população – provavelmente não existirá ou será perceptivelmente prejudicada num clima mais quente.

Relacionam-se, ainda, outras questões preocupantes nestes relatórios sobre mudanças climáticas no Brasil, tais como: a vulnerabilidade de crianças e idosos às possíveis ondas de calor; a queda da produtividade agrária, com consequências para a desnutrição humana; morte de recifes de corais devido ao aumento da temperatura; agravamento do problema das ilhas de calor urbanas; perda de biodiversidade e de recursos naturais; aumento do risco de incidência de doenças como malária, dengue, febre amarela e encefalite, além de doenças respiratórias; dificuldade de acesso à água; entre outros (CPTEC, acesso em 25 set. 2012).

Como reflexo dos eventos descritos nesses relatórios, algumas medidas têm sido aplicadas como estratégia de mitigação das consequências das mudanças climáticas no Brasil. Entre eles, destaca-se a Lei Nº 12.187, que institui a política nacional sobre mudança do clima e visa “a compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a proteção do sistema climático, a redução das emissões antrópicas de gases de efeito estufa”, entre outros (BRASIL, acesso em 16 ago. 2012).

Experimentos científicos são realizados por uma parcela considerável da comunidade acadêmica para uma melhor compreensão dos sistemas climático,

ecológico, biogeoquímico e hidrológico dos ecossistemas na América do Sul. Além dos estudos paleoclimáticos desenvolvidos em diferentes regiões do país, a Amazônia concentra um grande número de pesquisas, tanto para o entendimento da sua influência sobre o clima global, como para avaliação das ações antrópicas sobre aquele território, entre outros fatores. Pesquisadores brasileiros também investigam a criosfera através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera e seu papel para a formação climática atual e futura (INCT, acesso em 25 jan. 2013).

Além dos estudos climatológicos que objetivam, geralmente, identificar anomalias nas sequências de dados que indiquem uma possível alteração nos padrões do clima, estudos ligados à biologia e ciências da terra destacam-se nesta temática. Devido à maior suscetibilidade a mudanças do sistema climático, estudos da área agrícola procuram antecipar as consequências sobre as mais diversas culturas, de acordo com suas regiões de cultivo, aliando-se, inclusive, os impactos à economia local e nacional (FREITAS; AMBRIZZI, 2012).

Outra área cuja importância é ressaltada em estudos sobre a adaptação da sociedade às mudanças climáticas é a saúde. Algumas pesquisas relatam que as grandes metrópoles são regiões de maior vulnerabilidade aos efeitos na saúde, em virtude de suas características sócio-demográficas e geográficas. Acidentes e traumas também devem ser considerados em projetos para adaptação às mudanças climáticas, devido à ocorrência de eventos extremos, como furacões, tornados, inundações, deslizamentos de encostas, entre outros (CONFALONIERI, acesso em 15 set. 2012).

As alterações no regime de chuvas, e conseqüentemente nas vazões dos rios, estão na pauta não somente de estudos acerca de eventos extremos – como inundações e deslizamentos – mas também das pesquisas sobre a oferta de energia elétrica nacional, cuja maior parcela é produzida por hidrelétricas que dependem, em última instância, da água das chuvas. Por este motivo, apesar da hidroeletricidade representar um sistema de produção de energia com fator mínimo de emissão de dióxido de carbono (BARROS, acesso em: 15 set. 2012), as mudanças no comportamento climático futuro, principalmente suas consequências para o sistema hídrico, podem impactar indiretamente o fornecimento de energia elétrica em nível nacional.

Diante do cenário apresentado, é facilmente perceptível que os programas para efficientização do consumo de energia devem assumir um papel fundamental no desenvolvimento de políticas para adaptação da sociedade às mudanças climáticas futuras.

3. METODOLOGIA

Quatro etapas foram delineadas para formulação do método a partir do qual esta pesquisa foi desenvolvida. A primeira etapa tratou da revisão bibliográfica abordando os principais assuntos relacionados a este estudo: as mudanças climáticas, a questão energética e a eficiência de edificações. Posteriormente, foram definidos os procedimentos para obtenção de arquivos climáticos futuros, com base em um levantamento bibliográfico de publicações que correlacionassem o tema mudanças climáticas e seus impactos para o ambiente construído. Em seguida, foram realizadas as simulações termoenergéticas, cuja avaliação dos dados de saída permitiu a elaboração das conclusões sobre o impacto das mudanças climáticas em edifícios comerciais no Brasil.

3.1. Preparação dos arquivos climáticos futuros

Embora a inserção de informações de modelos climáticos futuros em arquivos climáticos para simulação térmica de edificações seja uma técnica relativamente recente, um número considerável de pesquisadores tem aplicado esse método para estudar o comportamento futuro dos espaços construídos. O Quadro 3 apresenta alguns títulos selecionados como referenciais, pois investigam o comportamento das edificações frente às mudanças projetadas para o clima no futuro.

Quadro 3 – Pesquisas relacionadas à preparação de arquivos climáticos futuros para simulação térmica de edifícios.

	Periódico País	Título/Autor/Ano
1	<i>Energy and Buildings</i> Reino Unido	<i>The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings</i> (GATERELL; MCEVOY, 2005)
2	<i>Building Simulation</i> Estados Unidos	<i>Creating weather files for climate change and urbanization impacts analysis</i> (CRAWLEY, 2007)
3	<i>Energy and Buildings</i> Reino Unido	<i>Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files</i> (JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2008)
4	<i>Building and Environment</i> Austrália	<i>Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings</i> (GUAN, 2009)

Continua

Conclusão		
5	<i>Building Simulation</i> Reino Unido	<i>Preliminary application of a methodology for risk assessment of thermal failures in buildings subject to climate change (WILDE; TIAN, 2009)</i>
6	<i>Building and Environment</i> Austrália	<i>Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia (WANG; CHEN; REN, 2010)</i>
7	<i>Energy and Buildings</i> Reino Unido	<i>Towards probabilistic performance metrics for climate change impact studies (WILDE; TIAN, 2011)</i>
8	<i>Building and Environment</i> Reino Unido	<i>Assessing the risk of climate change for buildings: A comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations (KERSHAW; EAMES; COLEY, 2011)</i>
9	<i>Building Simulation</i> Reino Unido	<i>Modelling the impacts of new UK future weather data on a school building (DU; EDGE; UNDERWOOD, 2011)</i>
10	<i>Building Simulation</i> Austrália	<i>Changing climate: ersatz future weather data for lifelong system evaluation (LEE, 2011)</i>
11	<i>Building and Environment</i> Austrália	<i>Global warming and its implication to emission reduction strategies for residential buildings (WANG; CHEN; REN, 2011)</i>
12	<i>Building and Environment</i> Hong Kong	<i>Developing a modified typical meteorological year weather file for Hong Kong taking into account the urban heat island effect (CHAN, 2011a)</i>
13	<i>Energy and Buildings</i> Hong Kong	<i>Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong (CHAN, 2011b)</i>
14	<i>Building and Environment</i> Reino Unido	<i>A comparison of future weather created from morphed observed weather and created by a weather generator (EAMES; KERSHAW; COLEY, 2012)</i>
15	<i>Energy and Buildings</i> Reino Unido	<i>London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings (KOLOKOTRONI et al., 2012)</i>
16	<i>Building and Environment</i> Reino Unido	<i>Simulation of the future performance of low-energy evaporative cooling systems using UKCP09 climate projections (HANBY; SMITH, 2012)</i>
17	<i>Building and Environment</i> Reino Unido	<i>Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso (OUEDRAOGO; LEVERMORE; PARKINSON, 2012)</i>
18	<i>Building and Environment</i> Canadá	<i>Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past (ROBERT; KUMMERT, 2012)</i>
19	<i>Building and Environment</i> Reino Unido	<i>The implications of a changing climate for buildings (WILDE; COLEY, 2012)</i>

Fonte: A autora.

Nesse panorama o método “*morphing*” destaca-se entre diversas publicações, tais como Jentsch, Bahaj e James (2008), Guan (2009), Wilde e Tian (2009), Wang, Chen e Ren (2010), Chan (2011b), Kolokotroni *et al.* (2012), Robert e Kummert (2012). A metodologia “*morphing*”, publicada pela *Chartered Institution of Building Services Engineers* (CIBSE), foi desenvolvida originalmente para transformar arquivos climáticos TRY atuais em arquivos climáticos futuros, considerando-se as mudanças projetadas por modelos de circulação geral desenvolvidos no Reino Unido. Os dados climáticos horários presentes no arquivo TRY são ajustados para representar uma possível condição futura através dos valores mensais de algumas variáveis climáticas, projetados por um modelo climático para a respectiva região (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

Adaptações da metodologia “*morphing*” foram apresentadas posteriormente, geralmente com fornecimento de indicativos voltados para a disponibilidade de dados de cada localidade. No caso da Austrália, por exemplo, algumas variáveis climáticas possuem projeções futuras mais detalhadas que outras, tendo sido desenvolvido um processo de modificação para cada variável, dependendo do nível de informações disponíveis sobre a mesma (GUAN, 2009). A estrutura proposta é constituída por três condições básicas: 1. se determinada variável não possui dados futuros suficientes, deve então permanecer inalterada; 2. caso sejam válidas apenas as projeções futuras das médias de algum parâmetro, aplica-se a metodologia “*morphing*”; e 3. nas situações em que informações mais detalhadas sobre variáveis climáticas estiverem acessíveis deve-se utilizar um método de modelagem diurna, que considera as atuais variações ao longo de um dia para configuração da situação futura.

Conhecendo as incertezas inerentes aos processos de modelagem climática, bem como a variação entre as configurações de diferentes modelos, algumas pesquisas procuram, ainda, a aplicação técnicas que atenuem tais dubiedades. Uma dessas técnicas é a consideração das projeções futuras de mais de um modelo climático, para posterior associação aos dados atuais (WANG; CHEN; REN, 2010; WANG; CHEN; REN, 2011). A integração desses modelos é exequível através de um *software* desenvolvido, para a Austrália, para diminuir as incertezas próprias da utilização de apenas um modelo climático. Destaca-se, no entanto, que a manipulação desses dados requer, na maioria dos casos, o conhecimento de

especialistas em ciências climatológicas, visto que os arquivos climáticos existentes são, geralmente, formatados pelos próprios pesquisadores do ambiente construído. Modelos de circulação geral são somente operados por especialistas em meteorologia e climatologia, e demandam grande quantidade de tempo e equipamentos de alta capacidade de processamento para obtenção de resultados.

No Reino Unido, a diversidade de pesquisas relacionadas ao impacto das mudanças climáticas sobre edifícios, oportunizada principalmente pelos avançados estudos climatológicos da região, possibilitou o aprimoramento dos métodos de preparação de arquivos climáticos futuros. Através de uma ferramenta desenvolvida pelo *Climate Impacts Programme*, arquivos climáticos são formatados com dados probabilísticos das variáveis futuras, diminuindo o grau de incertezas em comparação à utilização de projeções de modelos de circulação geral (EAMES; KERSHAW; COLEY, 2012). Ao invés de modificar as condições climáticas com valores médios gerados por um modelo de circulação geral, essa ferramenta reproduz, com respaldo estatístico, os valores das variáveis climáticas futuras necessárias à formatação do arquivo, com exceção da velocidade e direção do vento, pressão do ar e cobertura de nuvens, que devem ser derivadas das outras variáveis. Para testar os métodos, foram configurados arquivos climáticos para três localidades do Reino Unido, em diferentes cenários de emissões e períodos futuros. Os resultados mostram que ambos os métodos tem potencial para aplicação em estudos sobre os impactos das mudanças climáticas sobre edifícios.

Ainda sobre o preparo de arquivos climáticos futuros, uma abordagem complementar do assunto, originada da preocupação com a adaptação futura dos edifícios ao clima, é a probabilidade de ocorrência de eventos extremos, assunto bastante discutido em estudos climatológicos devido à urgência para investigação das formas de mitigação das suas consequências. Em estudos sobre edificações é usual o ajuste das informações climáticas a partir de arquivos com formato TRY ou TMY, impondo a desconsideração de eventos extremos passados e deixando de projetá-los no futuro, uma vez que seu processo metodológico constitui-se justamente na eliminação de anos com temperaturas médias mensais extremas. Por esse motivo algumas pesquisas têm atuado não somente na inserção de informações climáticas projetadas para o futuro, como também na reformulação de dados de períodos anteriores, passando a considerar um maior intervalo de tempo como base para as

transformações, inclusive seus eventos extremos (DU; EDGE; UNDERWOOD, 2011; KERSHAW; EAMES; COLEY, 2011; ROBERT; KUMMERT, 2012). Um desses métodos consistiu na formatação de 3000 diferentes arquivos climáticos, através da associação de trinta anos climáticos existentes, referentes ao período entre 1961 e 1990, a cem conjuntos de projeções de variáveis climáticas futuras, obtidas a partir de modelos climáticos de diversos países (KERSHAW; EAMES; COLEY, 2011).

Essa preocupação com a representação minuciosa e precisa do meio em que o edifício se insere em *softwares* de simulação termoenergética tem motivado não só o ajuste de informações climáticas projetadas para o futuro, como também a inserção de dados climáticos que registrem as ilhas de calor urbanas, fenômeno observado atualmente na maioria das grandes cidades (KOLOKOTRONI *et al.*, 2012). Para comparar o desempenho de edifícios localizados em áreas urbanas e rurais, Chan (2011a) aplicou a metodologia “*morphing*”, associando dados medidos em alguns pontos do centro de Hong Kong ao seu arquivo climático histórico. Já Crawley (2007) buscou registros bibliográficos para representar o efeito das ilhas de calor das 20 (vinte) regiões consideradas em sua pesquisa. Além das alterações projetadas para o futuro por um modelo de circulação geral, o autor considera que as ilhas de calor urbanas provocam variações de 1°C a 5°C na temperatura do ar, conforme cada localidade.

3.1.1. Método adotado para configuração do arquivo climático futuro

O levantamento das pesquisas publicadas sobre o estudo de arquivos climáticos futuros possibilitou o conhecimento dos principais benefícios proporcionados por esse tipo de investigação, e também das dificuldades encontradas por outros pesquisadores ao elaborar um cenário climático futuro adequado ao uso em *softwares* de simulação de edificações.

Após essa etapa inicial de identificação das possíveis ferramentas a serem utilizadas, foi selecionada a apresentada por Jentsch, Bahaj e James (2008), para conversão de arquivos climáticos atuais em arquivos climáticos futuros. As rotinas internas da ferramenta foram elaboradas, principalmente, a partir do método “*morphing*”, e são descritas detalhadamente no referencial técnico da ferramenta (JENTSCH, acesso em 14 maio 2012).

A escolha pela utilização desse método se justifica, principalmente, pelos cálculos complementares internos à ferramenta, que executam modificações em todas as variáveis presentes no arquivo climático base, ao contrário de outras metodologias consultadas, como a apresentada por Guan (2009). Além do método “*morphing*”, a ferramenta contempla rotinas desenvolvidas a partir de fontes especializadas em assuntos referentes a cada variável em questão.

Dependendo do parâmetro climático a ser modificado, a metodologia “*morphing*” define a aplicação dos seguintes algoritmos (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005):

- I. Um ‘desvio’ no atual parâmetro climático horário através da adição da variação média mensal projetada, em valores absolutos:

$$x = x_o + \Delta x_m$$

onde x é a variável climática futura, x_o é a variável original e Δx_m é a anomalia mensal absoluta de acordo com o modelo de projeções utilizado. Essa é a fórmula utilizada, por exemplo, para ajuste da pressão atmosférica;

- II. Uma ‘extensão’ no atual parâmetro climático horário através de escalonamento com a variação média mensal projetada, em valores relativos:

$$x = a_m x_o$$

onde a_m é a variação mensal fracionada, de acordo com o modelo de projeções utilizado. Essa é a fórmula utilizada, por exemplo, para ajuste da velocidade do vento; e

- III. Uma combinação de ‘desvio’ e ‘extensão’ do atual parâmetro climático horário. Neste caso, o parâmetro atual é ‘desviado’ pela adição da anomalia média mensal projetada, em valores absolutos, e ‘estendido’ pela variação diurna mensal do parâmetro:

$$x = x_o + \Delta x_m + a_m(x_o - (x_o)_m)$$

onde $(x_o)_m$ é a média mensal relativa à variável x_o , e a_m é a razão entre as variações mensais de Δx_m e x_o . Essa é a fórmula utilizada, por exemplo, para ajuste da temperatura de bulbo seco, a fim de integrar as variações do ciclo diurno.

3.1.2. Ferramenta para conversão de dados

Para conversão dos arquivos climáticos atuais em arquivos futuros, é utilizada a ferramenta desenvolvida por Jentsch, Bahaj e James (2008), denominada CCWorldWeatherGen – *Climate Change World Weather File Generator*. A ferramenta é disponibilizada em formato de planilha eletrônica e permite integração de arquivos de extensão EPW (EnergyPlus/EPW Weather) ao modelo climático global HadCM3⁵ (Figura 17).

Figura 17 – Aparência da ferramenta CCWorldWeatherGen.

CCWorldWeatherGen climate change weather file generator V1.6 [manual](#)
 For transforming EPW weather files into climate change TMY2/EPW files. (Acknowledgements & disclaimer of warranties below)

Specify the HadCM3 data file

Summary of combined HadCM3 A2 ensemble climate change predictions for the selected weather file:

No scenario selected

		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANN
Daily mean temperature	TEMP (°C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum temperature	TMAX (°C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Minimum temperature	TMIN (°C)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Horizontal solar irradiation	DSWF W/m ²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total cloud cover	TCLV % points	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total precipitation rate	PREC %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Relative humidity	RHUN % points	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mean sea level pressure	MSLP hpa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wind speed*	WIND %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

* Please note that wind speed resides on a 96x72 grid whilst all the other data is on a 96x73 grid

EPW weather file selector

(1) Please specify the EPW file you want to transform

Select EPW File for Morphing

Current EPW baseline weather file for morphing:

No weather file selected Latitude: 0,00 N
 Longitude: 0,00 E
 Elevation: 0 m

HadCM3 scenario timeframe selector

(2) Please select a HadCM3 A2 scenario ensemble timeframe

2020% 2050% 2080% Load Scenario

Closest four HadCM3 96x73 grid points to No weather file selected

	A	B	C	D
Latitude:	0,00 N	0,00 N	0,00 N	0,00 N
Longitude:	0,00 E	0,00 E	0,00 E	0,00 E

EPW weather file morphing

(3) Click button to start morphing procedure

Start Morphing Procedure

Current morphed EPW weather file:

No morphed weather file

EPW/TMY2 weather file generator

(4) Click the appropriate button for EPW / TMY2 file generation

Generate Climate Change EPW Weather File

Generate Climate Change TMY2 Weather File

To create a TMY2 file of the original EPW file click the button

Generate Present-Day TMY2 Weather File from EPW data

Fonte: Jentsch, Bahaj e James (2008).

As rotinas da ferramenta são baseadas no método “*morphing*”, além de outros cálculos para complementação dos arquivos EPW ou TMY2. Apesar de ser um recurso oferecido gratuitamente, os arquivos climáticos base e o modelo climático

⁵ O HadCM3 é um modelo acoplado oceano-atmosfera, com uma resolução de 417km x 278km na região do Equador e 295km x 278km aos 45° de latitude.

global não são distribuídos pela mesma fonte. O modelo HadCM3 é disponibilizado pelo IPCC e orientações sobre os arquivos necessários estão presentes em Jentsch, Bahaj e James (acesso em 15 maio 2012). Para o funcionamento da ferramenta são necessárias alterações na configuração do computador, como definição do ponto (.) como símbolo decimal padrão e a vírgula (,) como símbolo de agrupamento de dígitos, entre outros.

Após obtenção dos arquivos climáticos base e do modelo climático global, e ajustes nos padrões do computador para permitir o funcionamento da ferramenta, o período para o qual se deseja converter o arquivo deve ser selecionado. Assim, o botão para iniciar o procedimento “*morphing*” deve ser acionado, seguido pelo botão referente à geração do arquivo com a extensão pretendida (EPW ou TMY2).

3.1.3. Modelo de projeções climáticas futuras

Apesar do esforço por parte de instituições brasileiras na busca pelo entendimento das mudanças climáticas e suas consequências para o território brasileiro, para interpretação das relações entre o clima futuro e o ambiente edificado é imprescindível o desenvolvimento de ferramentas adequadas às pesquisas dessa área.

Os relatórios brasileiros, embora contribuam para o desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas do conhecimento, não apresentam dados suficientes para configuração de arquivos climáticos futuros com reduzida margem de incertezas (MARENGO, 2007a).

A habilidade dos Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera – AOGCMs – [modelos globais] em simular climas regionais vai depender da escala horizontal (chamada também de resolução), e as respostas seriam mais restringidas se fossem utilizados modelos globais com resolução da ordem de 300-400km em relação ao uso de modelos regionais, que apresentam uma resolução na ordem de 10-50km. Ainda assim, os AOGCMs [modelos globais] podem oferecer informações sobre mudanças de clima de grande utilidade para escala continental, e considerando a extensão do Brasil, estes modelos podem certamente ajudar a detectar as características gerais do clima futuro (MARENGO, 2007).

Por esse motivo, optou-se pelo método cuja ferramenta utiliza o modelo global HadCM3, elaborado pelo *Meteorological Office Hadley Centre* do Reino Unido para o Terceiro Relatório do IPCC.

O cenário de emissões considerado na ferramenta de Jentsch, Bahaj e James (2008) é o A2, caracterizado pelo crescimento populacional contínuo, crescimento econômico fragmentado, nações autossuficientes e desenvolvimento tecnológico lento. Além do cenário de emissões, os períodos configurados na ferramenta são selecionados a partir dos anos de 2020 (período entre 2011 e 2040), 2050 (período entre 2041 e 2070) e 2080 (período entre 2071 e 2100), e representam mudanças em relação ao período entre 1961 e 1990. A simulação das edificações nos três horizontes climáticos tem por objetivo a avaliação das estratégias para adequação de edificações ao clima durante todo o seu ciclo de vida previsto, considerando a possibilidade de variações no desempenho de tais estratégias ao longo do tempo.

3.1.4. Seleção das cidades

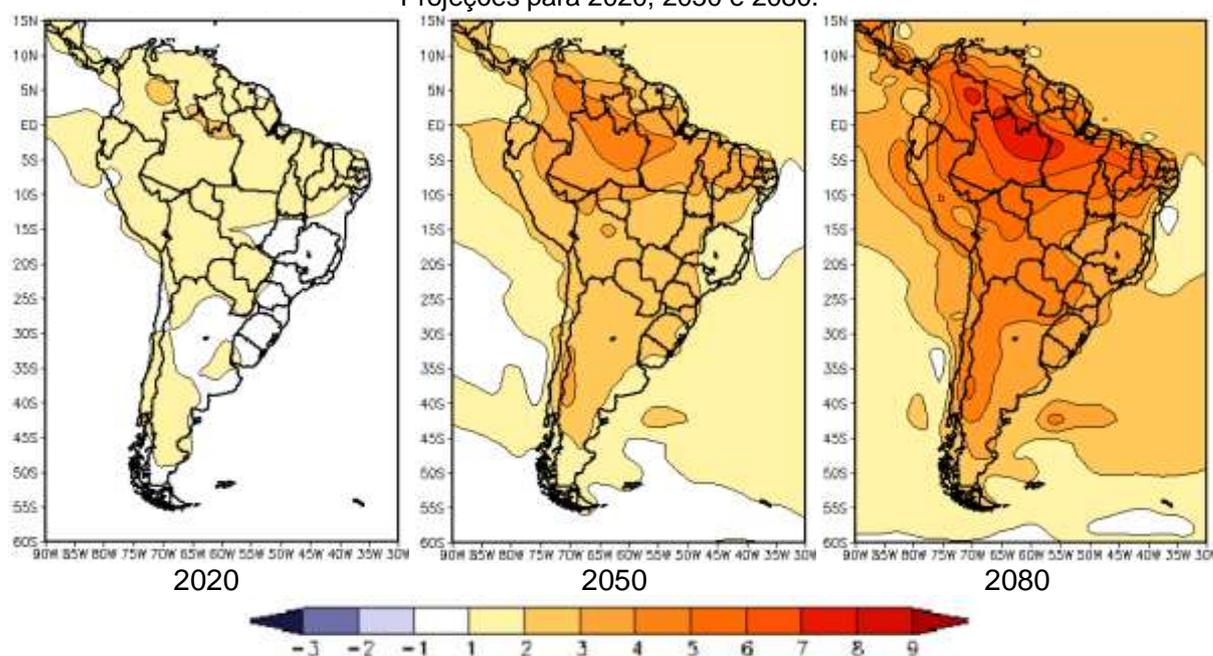
Considerando-se o método adotado para preparação dos arquivos climáticos futuros e, conseqüentemente, o modelo de projeções climáticas futuras, alguns critérios foram estabelecidos para a seleção das cidades a serem investigadas, de modo que possibilitem uma representação o mais ampla possível das diferentes condições geográficas das cidades brasileiras, ponderando-se a importância socioeconômica dos principais centros urbanos do país:

- I. Preferencialmente, cidades submetidas a diferentes condições climáticas futuras, de acordo com projeções do modelo HadCM3, para o cenário de emissões A2, durante o verão;
- II. Necessariamente, cidades com arquivo climático referente ao período entre 1961 e 1990 em formato adequado a ferramenta;
- III. Cidades localizadas, preferencialmente, em diferentes zonas bioclimáticas, ou seja, com diferentes diretrizes de projeto para adequação ao clima onde estiver implantado; e
- IV. Quantidade de cidades adequada ao tempo disponível para finalização da pesquisa.

De acordo com os mapas das anomalias de temperatura apresentados no Quadro 4 projetadas pelo modelo climático global HadCM3 para a América do Sul, pode ser observado que para 2020, as mudanças na temperatura ocorrerão, principalmente, na região Norte, e em partes das regiões Nordeste e Centro-Oeste. Em 2050, as

mudanças atingem todo o território nacional, sendo que na região Sul as mudanças são tão intensas quanto na região Centro-Oeste e parte da região Nordeste. Para esse período, as anomalias de temperatura para a região Norte, em relação ao período entre 1961 e 1990, chegam a 4°C. Para o período de 2080, observa-se que as maiores anomalias concentram-se na região Norte, diminuindo gradativamente em direção ao litoral. Desde o Rio de Janeiro até, aproximadamente, o litoral da Paraíba, a intensidade das mudanças será semelhante, com acréscimo de 2°C nas temperaturas. Outra faixa abrange uma área maior de superfície, iniciando-se no Rio Grande do Sul, passando pelo Sudeste e Nordeste e finalizando, aproximadamente, no Pará, corresponde a um aumento de 3°C nas temperaturas.

Quadro 4 – Projeções de anomalias de temperatura para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, em relação ao período base 1961-90, para a América do Sul no cenário A2, pelo modelo HadCM3. Projeções para 2020, 2050 e 2080.



Fonte: Marengo (2007).

Deste modo, foram selecionadas três regiões, nas quais as alterações climáticas atuam de maneira distinta: a região Norte; a região litorânea do Sudeste, a partir do Rio de Janeiro, e do Nordeste até a Paraíba; e as regiões Sul e Centro-Oeste, junto ao interior de São Paulo.

Com relação ao segundo critério, as cidades que possuem arquivo climático configurado, referente ao período entre 1961 e 1990, estão descritas no Quadro 5. Os arquivos são disponibilizados em diferentes formatos, contudo para esta pesquisa foram considerados os arquivos em formato TRY.

Por fim, a seleção das cidades foi baseada no zoneamento bioclimático brasileiro, descrito na Parte 3 da NBR 15220 (ABNT, 2005c), visto que apresenta recomendações de diretrizes construtivas para a melhoria do desempenho térmico de edificações através da sua melhor adequação ao clima onde será implantada. Foi também consultado o projeto de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro, considerando que a proposta divide o território nacional em um maior número de zonas, com o objetivo de melhor caracterizar as condições climáticas regionais de cada localidade (RORIZ, acesso em 15 maio 2012). O Quadro 5 apresenta a relação das cidades e suas respectivas zonas bioclimáticas.

Quadro 5 – Cidades do Brasil, zonas bioclimáticas conforme NBR 15220 e conforme proposta do novo zoneamento bioclimático brasileiro.

Região	Cidade	Zona Bioclimática (ABNT, 2005c)	Zona Bioclimática (RORIZ, acesso em 15 maio 2012)
N	Belém – PA	8	17
NE	São Luís – MA	8	17
	Fortaleza – CE	8	17
	Natal – RN	8	18
	Recife – PE	8	9
	Maceió – AL	8	9
	Salvador – BA	8	9
SE	Vitória – ES	8	10
	Rio de Janeiro – RJ	8	14
	São Paulo – SP	3	13
S	Curitiba – PR	1	2
	Florianópolis – SC	3	13
	Porto Alegre – RS	3	13
CO	Brasília – DF	4	12

Fonte: ABNT (2005c); Roriz (acesso em 15 maio 2012).

Para representar a região Norte e as particularidades das mudanças climáticas projetadas para a região, foi selecionada a cidade de Belém (Lat. 1° 22' S), no estado do Pará. De acordo com o Censo Demográfico 2010 (IBGE, acesso em 22 ago. 2012), a região metropolitana de Belém, formada por seis municípios, possui aproximadamente 2,1 milhões de residentes e está entre as maiores do Brasil.

Da segunda região delimitada a partir dos mapas de anomalias, entre o litoral Sudeste e Nordeste, foram selecionadas duas cidades, com o objetivo de investigar as características em diferentes latitudes: Recife (Lat. 8° 7' S), capital do estado de Pernambuco; e Vitória (Lat. 20° 16' S), capital do estado do Espírito Santo. A região metropolitana de Recife encontra-se, atualmente, com aproximadamente 3,6 milhões de habitantes, sendo a quinta maior região metropolitana do país em número de habitantes (IBGE, acesso em 22 ago. 2012). A escolha da cidade de Vitória foi motivada principalmente para possibilitar a continuidade de pesquisas desenvolvidas anteriormente sobre o consumo de energia para climatização artificial de edifícios, desenvolvido por Bernabé (2012). Apesar de estas três cidades selecionadas estarem classificadas na zona bioclimática 8, o projeto de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro propõe alterações nessas classificações, o que diferencia significativamente o clima da cidade de Belém das demais (RORIZ, acesso em 15 maio 2012).

Já a seleção das cidades de Porto Alegre (Lat. 30° 0' S), capital do estado do Rio Grande do Sul; e de São Paulo (IBGE, acesso em 22 ago. 2012), capital do estado de São Paulo, apesar da mesma classificação em ambos os zoneamentos bioclimáticos, contempla a importância socioeconômica das regiões metropolitanas em que se situam. A região metropolitana em que se encontra a cidade de São Paulo, a maior do país, possui 19,6 milhões de residentes, aproximadamente, enquanto a região metropolitana de Porto Alegre constitui a quarta maior, com aproximadamente 3,9 milhões de habitantes (IBGE, acesso em 22 ago. 2012).

Por fim, a capital federal, Brasília (Lat. 15° 52'), localizada no Distrito Federal, foi selecionada pela localização distante do litoral e, conseqüentemente, diferenciada classificação em relação ao zoneamento bioclimático.

No mapa da Figura 18 estão em destaque as cidades do Brasil que possuem arquivos climáticos configurados (**negrito**) e as cidades selecionadas para investigação (**contorno em vermelho**).

edifícios comerciais nas oito zonas bioclimáticas do Brasil com relação aos seus aspectos térmicos e energéticos, foi desenvolvida uma pesquisa com apoio de oito instituições federais de ensino superior, representantes de cada zona bioclimática (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006).

Sendo assim, as características do edifício a ser estudado foram extraídas, principalmente, do levantamento realizado em nível nacional (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006), além de outras pesquisas anteriores, que tinham como propósito desde a caracterização de edifícios até a investigação da influência de diferentes componentes construtivos no desempenho de edificações.

O objeto a partir do qual foram testadas as hipóteses desta pesquisa é um edifício de uso comercial, hipoteticamente localizado em seis cidades brasileiras, que procura agrupar as características comuns dos edifícios construídos em diferentes regiões do Brasil. O Quadro 6 resume as principais características construtivas desse edifício e as respectivas fontes consultadas para sua determinação.

Quadro 6 – Características construtivas do edifício.

Tipologia Construtiva		
Variável de controle	Valor	Fonte
Gabarito	11 pavimentos	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006)
Pé-direito	3,00m	Bernabé (2012)
Forma da planta	Retangular	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006)
Proporção da planta	30m x 15m	Bernabé (2012)
Salas por pavimento	12 unidades	Bernabé (2012)
Paredes	Bloco cerâmico, 6 furos, 15cm	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006); Bernabé (2012)
Absortância dos componentes opacos das fachadas	0,4	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006)
Cobertura	Laje protegida por telhado	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006); ABNT (2005a)
Vidros	6mm, transparente	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006)

Fonte: A autora.

De acordo com Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), dos 113 edifícios analisados em sua pesquisa, aproximadamente 20% possuem 11 pavimentos e pouco mais de 15%

possuem 10 pavimentos. Com relação às características da envoltória, todos os edifícios levantados possuem paredes externas de tijolo cerâmico e 50% do total de edifícios possuem paredes externas com espessura de 15 cm, compostas por blocos de seis furos. Conforme NBR 15220 (ABNT, 2005b), paredes com essa configuração possuem capacidade térmica de $168 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$, portanto sua transmitância térmica deve ser inferior a $3,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para ser classificada no nível máximo do RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012). Para o estabelecimento do valor da absorvância dos elementos opacos da envoltória, observou-se que a maior ocorrência, 45% dos edifícios, relatam refletâncias entre 0,5 e 0,7 (LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006), adotando-se aqui o valor intermediário 0,6, equivalente a 0,4 de absorvância.

Embora o limite máximo recomendado pelo RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012) para a transmitância térmica de coberturas seja de $1,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) observaram que a maior ocorrência de tipologia de cobertura nos edifícios analisados foi a laje impermeabilizada, cuja transmitância térmica é de $3,603 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ⁶. Por esse motivo a tipologia construtiva da cobertura selecionada para esta pesquisa foi a segunda maior ocorrência, com aproximadamente 35%, conforme Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), ou seja, a laje protegida por telhado, sem isolamento térmico. Priorizando a representação de uma situação comum em edifícios brasileiros, a seleção dessa tipologia de cobertura ignora o pré-requisito para classificação no nível máximo do RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012), visto que sua transmitância térmica não é inferior a $1,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

3.2.2. Variáveis de teste da edificação

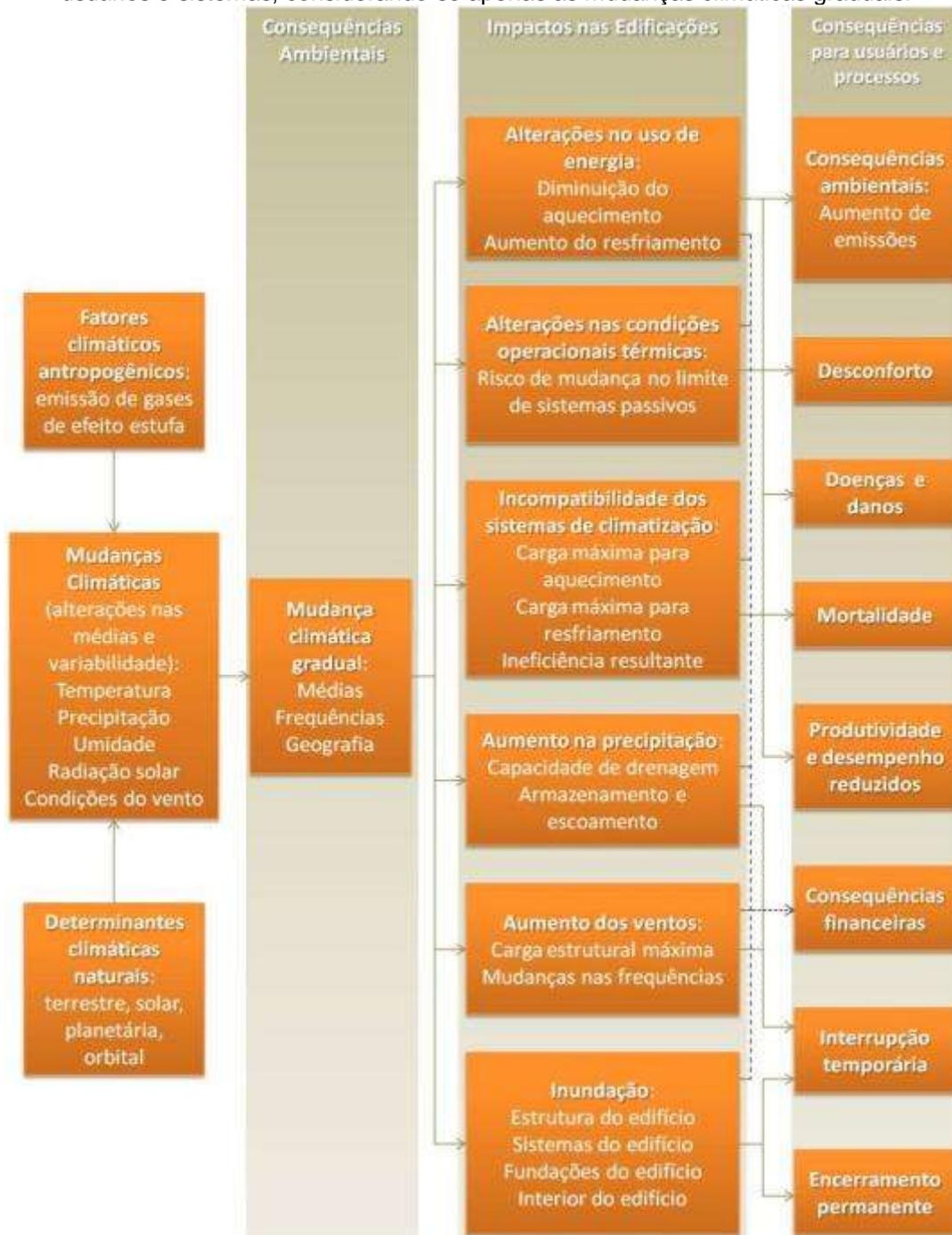
O estudo de diferentes métodos para a preparação de arquivos climáticos futuros objetiva, sobretudo, possibilitar a investigação de estratégias projetuais adequadas não só às condições climáticas atuais, mas principalmente, aos cenários futuros. Algumas pesquisas procuram, unicamente, comprovar a necessidade de consideração das condições climáticas futuras nos projetos, através de estudos de caso em edifícios comerciais e residenciais, enfatizando que toda e qualquer

⁶ Laje com 15 cm de espessura, composta por concreto normal (14 cm de espessura, condutividade térmica de $1,75 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, calor específico de $1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ e densidade de 2300 kg/m^3) e impermeabilizante asfáltico (1 cm de espessura, condutividade térmica de $0,43 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, calor específico de $920 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ e densidade de 1600 kg/m^3) (DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD, acesso em 1 set. 2012; ABNT, 2005a).

construção deve ser planejada para o futuro e não para o passado (LEE, 2011; ROBERT; KUMMERT, 2012).

Conforme esquema da Figura 19, adaptado de Wilde e Coley (2012), mesmo considerando somente as transformações graduais do clima, as consequências de uma postura negligente nesse momento envolvem desde o aumento do consumo energético até o desconforto e o risco de doenças aos usuários no futuro.

Figura 19 – Esquema dos mecanismos de impacto das mudanças climáticas sobre edificações, usuários e sistemas, considerando-se apenas as mudanças climáticas graduais.



Fonte: Adaptado de Wilde; Coley (2012).

De acordo com cada localidade, diversas hipóteses são levantadas sobre o desempenho futuro dos espaços construídos atualmente, na tentativa de identificar quais dessas estratégias serão válidas para o bom funcionamento do edifício durante sua vida útil.

Com base em levantamentos do setor energético do Reino Unido, por exemplo, verificou-se um grande potencial para redução do consumo de energia do setor residencial, motivando a investigação da eficiência de sistemas construtivos considerados, atualmente, adequados às condições climáticas locais. Com esse estudo confirmou-se a importância da utilização de vidros duplos nas aberturas, pois contribuem significativamente para a economia do consumo de energia para aquecimento, tanto para as condições climáticas atuais quanto para as futuras (GATERELL; MCEVOY, 2005). Na Austrália, edifícios residenciais considerados eficientes por um sistema de avaliação da eficiência energética apresentaram-se mais sensíveis às mudanças climáticas que edifícios menos eficientes, sendo que o incremento no consumo de energia projetado para 2050 variou entre 26% e 101%, e para 2100, entre 48% e 350% (WANG; CHEN; REN, 2010).

Em Hong Kong, estudos apontam um aumento substancial no consumo de energia para condicionamento artificial do ar, variando de 2,6% a 14,3% para edifícios de escritório e de 3,7% a 24% para residências (CHAN, 2011b). Em Burkina Faso, país localizado na região noroeste na África, o aumento no consumo de energia para resfriamento é previsto para 56%, para o período entre 2030 e 2049, e 99% para o período entre 2060 e 2079, em comparação ao período entre 2010 e 2029 (OUEDRAOGO; LEVERMORE; PARKINSON, 2012). A pesquisa conclui que a orientação do edifício, a área total envidraçada, a transmitância de elementos opacos e dispositivos de sombreamento são algumas estratégias que contribuem significativamente para a definição desses valores. Edifícios com a classificação net-zero – ou seja, aqueles que produzem a própria energia que irão consumir – também passaram a ser discutidos quanto ao seu desempenho futuro, sendo que no Canadá um estudo de caso aponta que o edifício não conseguirá futuramente suprir sua própria demanda, como acontece atualmente (ROBERT; KUMMERT, 2012).

Jentsch, Bahaj e James (2008) concluíram, através do estudo de um edifício de escritórios naturalmente ventilado, que uma edificação que não utilize condicionamento artificial do ar dificilmente conseguirá manter as condições

apropriadas de conforto em seu interior sem a utilização de estratégias construtivas adequadas, como proteção solar externa, uso de massa térmica, estratégias de ventilação bem desenvolvidas, entre outros. Essa tendência de aumento de desconforto pelo calor em edifícios climatizados naturalmente é confirmada por Du, Edge e Underwood (2011), ao estudarem o impacto das novas projeções climáticas do Reino Unido sobre o desempenho de um edifício que abriga uma escola primária. Na cidade de Londres, Kolokotroni *et al.* (2012) constataram que, no verão, o edifício considerado em sua pesquisa já se apresenta desconfortável, quadro que deverá ser intensificado no futuro, exigindo a instalação de resfriamento artificial em edifícios que hoje são climatizados naturalmente. Os autores ressaltam, ainda, a importância dos ganhos internos de calor como um fator significativo para o desempenho energético do edifício no futuro. Hanby e Smith (2012) demonstram, através de estudos de caso no Reino Unido, que sistemas de resfriamento evaporativo poderão ser uma técnica viável em 2050 para um melhor desempenho termoenergético de edifícios.

Por outro lado, embasados em uma revisão crítica de publicações recentes sobre o estudo do impacto das mudanças climáticas sobre edificações, Wilde e Tian (2011) enfatizam em sua pesquisa a necessidade de estabelecimento de limites nessas avaliações. Os autores ressaltam a carência de correlações entre os parâmetros analisados nas pesquisas e a real expectativa de vida das edificações e dos sistemas. É imprescindível a consideração das incertezas nesses processos, pois é altamente improvável que um edifício e seu regime operacional sejam exatamente os mesmos em 50-100 anos. Além disso, a adoção de suposições a respeito da renovação dos componentes da construção requer previsões sobre a evolução tecnológica e a eficiência dos sistemas para quinze ou vinte anos.

Uma das orientações dos autores para pesquisas futuras é, portanto, concentrar-se em aspectos passivos inerentes à construção, como orientação, massa térmica, e que provavelmente não serão afetados por intervenções futuras. Aplicar corretamente esses aspectos reduz o impacto das incertezas sobre as avaliações (WILDE; TIAN, 2011).

Deste modo, a seleção das variáveis a serem aqui investigadas foi fundamentada nos requisitos avaliados pelo RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012), relacionados à

envoltória da edificação e de difícil reestruturação para adequação a novas condições climáticas.

Para que o edifício seja classificado no nível máximo desse regulamento, deve atender ao pré-requisito específico à envoltória, relativo à transmitância térmica de paredes e coberturas, com variações de acordo com as zonas bioclimáticas definidas na NBR 15220 (ABNT, 2005c). Portanto, para as cidades selecionadas, os limites de transmitância foram definidos conforme demonstrado no Quadro 7.

Quadro 7 – Limite de transmitância térmica para paredes e coberturas, pré-requisito para classificação no nível A do RTQ-C.

Região	Cidade	Zona Bioclimática (ABNT, 2005c)	Transmitância Térmica de Paredes Externas	Transmitância Térmica de Coberturas
N	Belém – PA	8	≤ 2,5 W/m ² K paredes com capacidade térmica ≤ 80 kJ/m ² K e ≤ 3,7 W/m ² K paredes com capacidade térmica ≥ 80 kJ/m ² K	≤ 1,00 W/m ² K
NE	Recife – PE	8		
SE	São Paulo – SP	3		
SE	Vitória – ES	8		
S	Porto Alegre – RS	3	≤ 3,7 W/m ² K	
CO	Brasília – DF	4	≤ 3,7 W/m ² K	

Fonte: Elaborado a partir de MME (Acesso em 16 maio 2012).

A transmitância térmica das paredes externas é exigida apenas nos pré-requisitos do regulamento, pois, segundo Carlo (2008) a variabilidade nos resultados das simulações com diferentes transmitâncias não pode ser descrita em uma equação de regressão linear, como foram inseridas as outras variáveis. Por esse motivo, a transmitância das paredes externas nessa pesquisa observará os limites impostos pelo RTQ-C, mas não será um parâmetro variável.

A absortância solar, apesar da influência significativa sobre o consumo energético de edificações observada em pesquisas anteriores (BERNABÉ, 2012; CARLO, 2008), não oferece tantos obstáculos para renovação quanto outros elementos da envoltória. Assim, mesmo sendo considerada na quantificação do consumo pela envoltória no RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012), a absortância não será parâmetro de avaliação nesse estudo.

Considerando-se, portanto, as demais variáveis equacionadas no regulamento e relacionadas à envoltória, serão investigados nesta pesquisa o percentual de

abertura nas fachadas e os dispositivos de proteção solar, além da orientação das maiores fachadas (Quadro 8).

Quadro 8 – Variações adotadas para os elementos em análise.

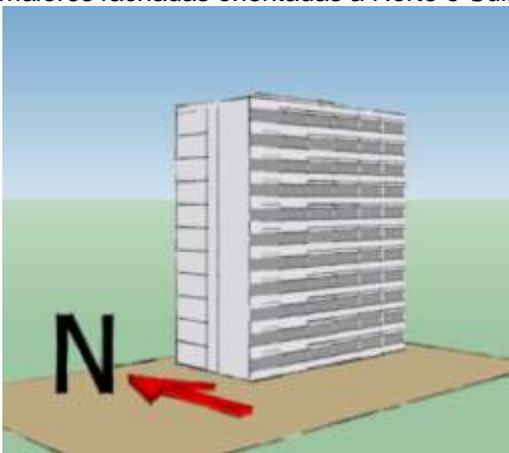
Variáveis de Teste	
Orientação da maior fachada	Norte-Sul (NS)
	Leste-Oeste (LO)
PAF Percentual de Abertura nas Fachadas ¹	50%
	90%
PS Proteção Solar	Sem proteção (SP)
	Com proteção (CP)

Fonte: A autora.

¹ Este percentual aplica-se somente às maiores fachadas.

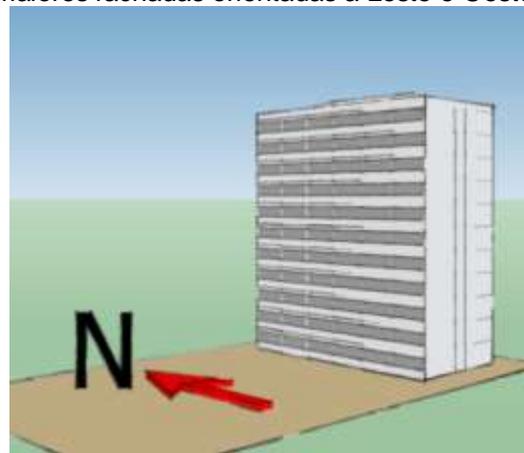
A variação da orientação das maiores fachadas e, conseqüentemente, das aberturas possibilitou a investigação de questões determinadas em projeto, principalmente a forma do edifício; e também estratégias ao nível de planejamento urbano, como o traçado das vias. A direção e o dimensionamento das ruas podem contribuir para o sombreamento não só dos edifícios no entorno, mas inclusive do passeio público e dos pedestres (FROTA, 2004; SILVA; SCARIONE; ALVAREZ, 2012). Nas Figuras 21 e 22 estão representadas as duas variações selecionadas nesta pesquisa para a orientação das maiores fachadas.

Figura 20 – Representação do edifício com as maiores fachadas orientadas a Norte e Sul.



Fonte: A autora.

Figura 21 – Representação do edifício com as maiores fachadas orientadas a Leste e Oeste.



Fonte: A autora.

Em situações em que a temperatura externa esteja menor que a temperatura interna, ambientes com grandes aberturas podem ser favorecidos por facilitar a

ventilação. Porém, grandes aberturas não protegidas da radiação solar direta podem representar excessivo ganho de calor e dificultar o alcance do conforto térmico no interior da construção, além de aumentar a demanda de energia para climatização artificial do ambiente (FROTA, 2004). Assim, a determinação do valor de 90% para o percentual de abertura na fachada pretende investigar o desempenho de uma tipologia de edificação bastante difundida atualmente, na qual fachadas são totalmente envidraçadas, em comparação a um percentual médio de abertura, 50% (Figuras 23 e 24).

Figura 22 – Representação do edifício com 50% de abertura nas maiores fachadas.



Fonte: A autora.

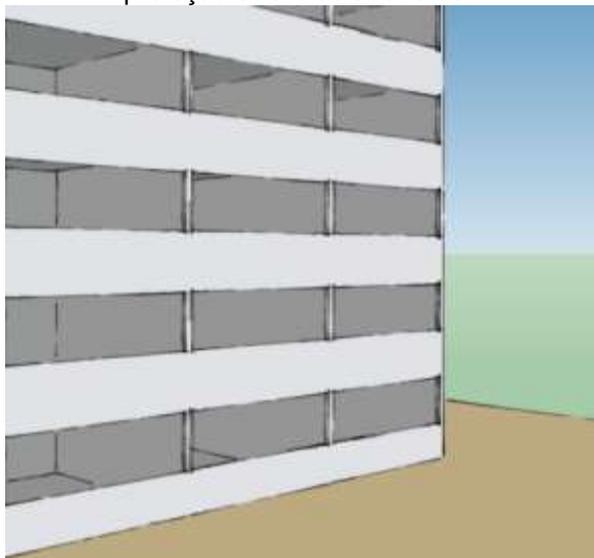
Figura 23 – Representação do edifício com 90% de abertura nas maiores fachadas.



Fonte: A autora.

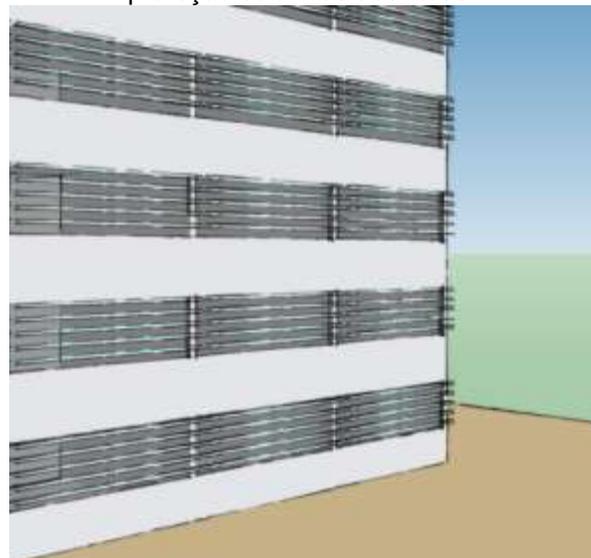
A utilização de dispositivos de proteção solar externa representa uma importante solução para o sistema construtivo da envoltória de edifícios, uma vez que impede a entrada da radiação solar direta por transmissividade através dos elementos translúcidos das paredes. Os edifícios foram configurados, portanto, sem dispositivos de proteção solar (Figura 24) e com dispositivos de proteção solar (Figura 25).

Figura 24 – Representação do edifício sem proteção solar nas aberturas.



Fonte: A autora.

Figura 25 – Representação do edifício com proteção solar nas aberturas.



Fonte: A autora.

3.2.3. Software para simulação termoenergética de edificações

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) disponibiliza informações sobre mais de 400 *softwares* para simulação e avaliação de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade em edificações. O *EnergyPlus* é uma dessas ferramentas e entre suas funções está a análise de aspectos térmicos e energéticos de edificações. A partir da inserção das características do edifício – as quais permitem um detalhamento para que o modelo seja construído o mais próximo possível da realidade –, o *software* calcula as cargas necessárias para aquecimento e resfriamento para que as temperaturas dos ambientes sejam mantidas dentro de determinado limite (DOE, 15 maio 2012).

No entanto, a inserção das características do edifício no *EnergyPlus* é realizada somente através da digitação de dados, obedecendo os padrões de sintaxe do programa (VENÂNCIO, 2007). A ausência de uma interface gráfica amigável configura um entrave para a difusão da ferramenta entre projetistas, pois dificulta o processo de modelagem.

Conhecendo essa variabilidade de informações necessárias à simulação, a seleção do *software* foi guiada por critérios que otimizassem o desenvolvimento da pesquisa. Logo, foi selecionado o *software DesignBuilder* para a realização das simulações, considerando ser uma interface gráfica amigável para o *software EnergyPlus*, principalmente pela reprodução tridimensional da geometria da edificação.

Simplificar o processo de modelagem foi o principal objetivo do desenvolvimento do *DesignBuilder*, de forma que possa ser utilizado em qualquer etapa da concepção do edifício, desde as fases iniciais – quando muitos parâmetros ainda não estão definidos – até as fases mais detalhadas do projeto (DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD, acesso em 1 set. 2012).

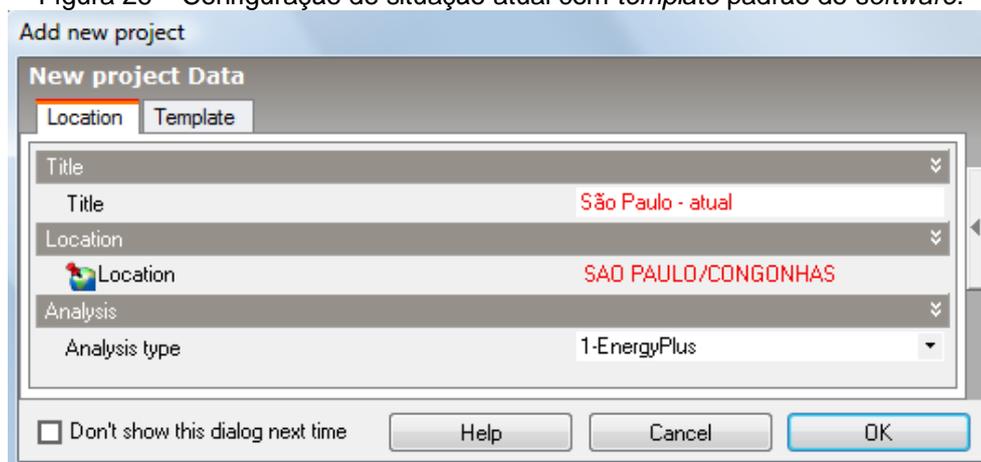
3.2.4. Processo de modelagem

As etapas do processo de simulação no *DesignBuilder* são apresentadas a seguir, juntamente com os valores inseridos em cada parâmetro configurado. Os parâmetros constantes no *software* e não mencionados aqui, como as *sub-surfaces*, não foram inseridas no modelo, por isso não foram especificados valores para tais variáveis.

3.2.4.1. Configurações do sítio

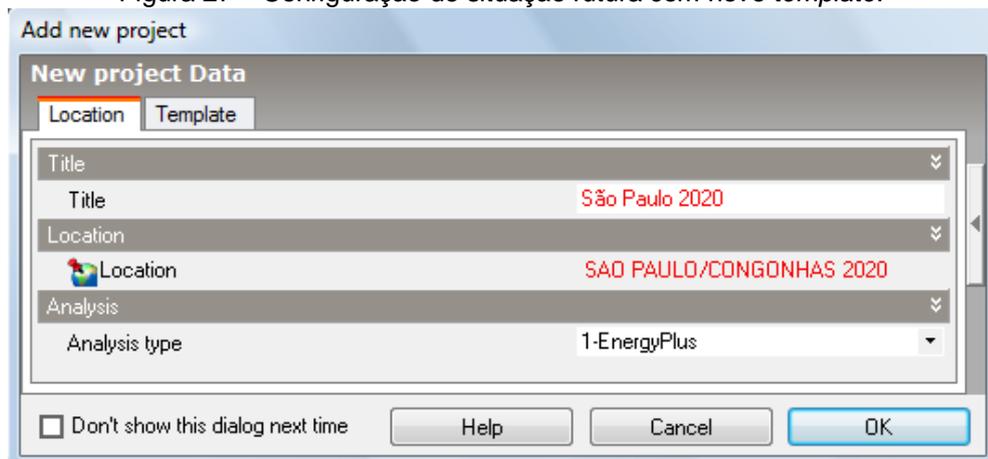
Na criação de um novo arquivo, são configuradas as características do local através da seleção de um arquivo *template* constante na biblioteca do programa. Para as simulações com arquivos climáticos atuais, o *template location* selecionado foi o padrão do *software* (Figura 26), associado ao arquivo climático atual da localidade. Já para as simulações futuras, foram configurados novos *templates* (Figura 27), associando-se os arquivos climáticos futuros às respectivas cidades.

Figura 26 – Configuração de situação atual com *template* padrão do *software*.



Fonte: Designbuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

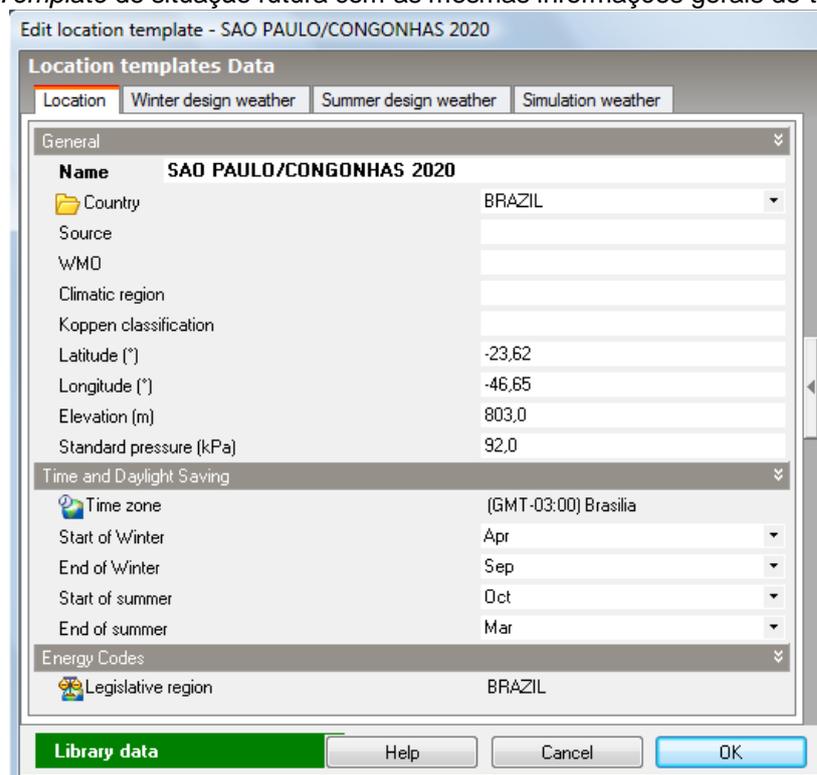
Figura 27 – Configuração de situação futura com novo *template*.



Fonte: Designbuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

A seleção de um *template* modifica automaticamente algumas propriedades, características de cada local, enquanto outras devem ser selecionadas conforme a situação em estudo. Para as simulações das situações futuras, o *template location* foi configurado a partir do padrão do *software* para cada cidade, como por exemplo, para a cidade de São Paulo, do *template location* padrão da cidade de São Paulo, associado ao arquivo climático atual, foram extraídas as informações principais (Figura 28), alterando-se o arquivo climático para representação das condições futuras.

Figura 28 – *Template* de situação futura com as mesmas informações gerais do *template* atual.

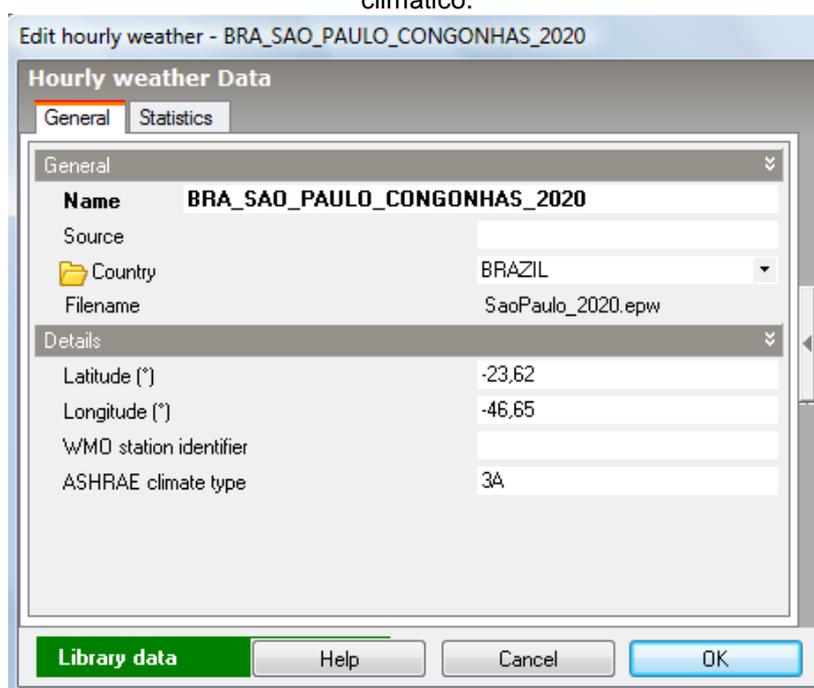


Fonte: Designbuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

Os arquivos climáticos futuros preparados pela ferramenta CCWorldWeatherGen em formato EPW foram inseridos nos *templates* das cidades. Foram configurados, portanto, três *templates* para cada cidade (2020, 2050, 2080), além da situação atual já disponibilizada pelo *software*.

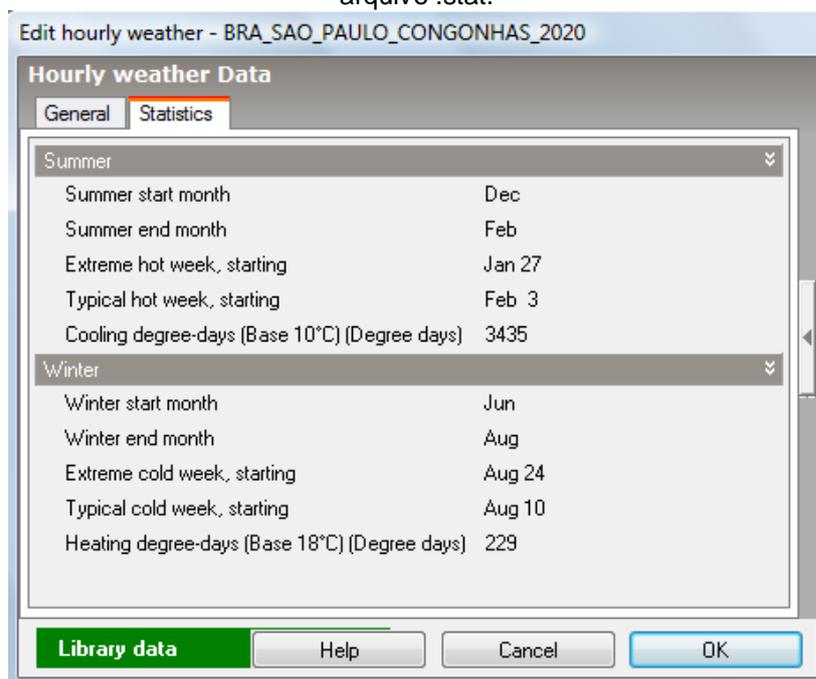
Quando um novo arquivo climático é inserido no *DesignBuilder*, são configuradas automaticamente algumas informações geográficas do local (Figura 29), além de dados climáticos estatísticos (Figura 30). Para isso, além do arquivo com extensão .epw, é necessária a associação de um arquivo com extensão .stat. Os arquivos climáticos futuros em formato .epw foram convertidos em arquivos com formato .stat através do próprio conversor do *DesignBuilder/EnergyPlus*, o *Weather Data Converter*.

Figura 29 – Informações geográficas inseridas automaticamente a partir da seleção de um arquivo climático.



Fonte: Designbuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

Figura 30 – Dados climáticos estatísticos configurados automaticamente pelo software, a partir de arquivo .stat.



Fonte: Designbuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

Ainda na configuração do *template location*, Venâncio (20--) recomenda a manutenção do padrão de 14°C, pré estabelecido pelo programa para a temperatura de chão para todos os meses, para que as possibilidades de erro sejam reduzidas. Uma das recomendações do autor, caso não haja disponibilidade de dados de temperatura do chão, é a adoção das médias de temperaturas do ar mensais. Esse procedimento foi aplicado tanto para as simulações atuais quanto para as futuras, uma vez que não foram encontrados dados de temperatura do solo para todas as cidades (Figura 31).

Figura 31 – Configurações de sítio com temperaturas de chão alteradas.

The screenshot shows a software interface for site configuration. The main settings are for 'São Paulo 2020'. The 'Site Details' section includes:

- Elevation above sea level (m): 803,0
- Exposure to wind: 2-Normal
- Site orientation (°): 0

The 'Ground' section includes:

- Add ground construction layers to surfaces in contact with ground (separate constructions only)
- Texture: GranulatedGray453M

The 'Monthly Temperatures' section shows the following data:

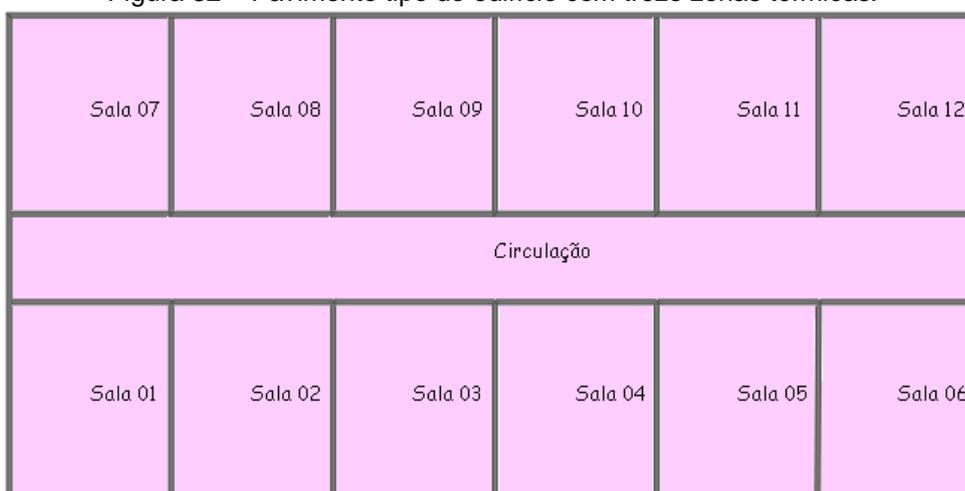
Month	Temperature (°C)
Jan	23,2
Feb	22,7
Mar	21,9
Apr	19,3
May	17,4
Jun	17,4
Jul	16,6
Aug	17,6
Sep	18,5
Oct	18,3
Nov	19,4
Dec	20,7

Fonte: Designbuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

3.2.4.2. Construção da geometria

A modelagem do edifício corresponde à inserção das características geométricas da edificação, resumidas no Quadro 6. O pavimento tipo da edificação (Figura 32) foi dividido em treze zonas térmicas: doze salas e uma circulação central.

Figura 32 – Pavimento tipo do edifício com treze zonas térmicas.



Fonte: A autora. Elaborado a partir de Designbuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

3.2.4.3.Dados dos componentes do edifício

No *DesignBuilder* os componentes representam elementos isolados do edifício, e são agrupados em sete categorias, a partir das quais foram configurados os valores das variáveis de teste e das variáveis de controle deste estudo. A seguir estão descritas as categorias e os componentes com os valores adotados.

Atividades

Nessa aba são definidos os padrões de uso e operação do edifício, resumidos no Quadro 9 a seguir.

Quadro 9 – Características de ocupação e equipamentos do edifício.

Padrão de Ocupação e Equipamentos		
Variável de controle	Valor	Fonte
Atividade	Escritório: leve Fator metabólico: 0,9	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) Bernabé (2012)
Horário de ocupação	<u>Segunda a Sexta</u> Ocupação total: 8h às 12h e 14h às 18h Ocupação reduzida em 50%: 12h às 14h <u>Sábado</u> Ocupação total: 8h às 12h	Lamberts, Ghisi e Ramos (2006) Bernabé (2012)
Densidade de ocupação	0,14 pessoas/m ²	NBR 16401 (ABNT, 2008)
Carga de iluminação	7,0 W/m ²	Didoné e Pereira (2010)
Carga de equipamentos	9,7 W/m ²	Didoné e Pereira (2010)
Temperatura de controle	24°C	Ghisi e Tinker (2005)
Nível de iluminação de referência	500 lux	NBR 5413 (ABNT, 1992)

Fonte: A autora.

Construção

No Quadro 10 estão detalhados os principais componentes do edifício e suas respectivas transmitâncias.

Quadro 10 – Características dos componentes do edifício

Componente	Material	Espessura	Transmit. [W/(m ² .K)]	Imagem
Paredes internas Paredes externas	Argamassa comum	25 mm	2,806	
	Tijolo cerâmico	100 mm		
	Argamassa comum	25 mm		
Laje de cobertura	Concreto normal	250 mm	3,535	
Forro	Gesso	20 mm	5,072	
Piso	Argamassa comum	20 mm	4,661	
	Concreto normal	100 mm		

Continua

Conclusão				
Telhado inclinado	Telha de barro	10 mm	6,481	
Portas	Aglomerado de partículas de madeira com pintura na cor branca	35mm	2,660	

Fonte: A autora.

Para caracterização dos componentes, os materiais devem ser configurados de acordo com suas propriedades térmicas e de superfície. No Quadro 11 estão detalhadas as características dos materiais presentes em cada componente.

Quadro 11 – Propriedades dos materiais presentes nos componentes do edifício.

Material	Propriedades Térmicas			Propriedades de superfície			Fonte
	Condutividade [W/(m.K)]	Calor Específico [J/(kg.K)]	Densidade [kg/m ³]	Emissividade	Absortância Solar	Absortância da Radiação Visível	
Argamassa comum	1,15	1000	2000	0,7	0,4	0,4	NBR 15220 (ABNT, 2005b); (LABEEE, acesso em 25 maio 2012)

Continua

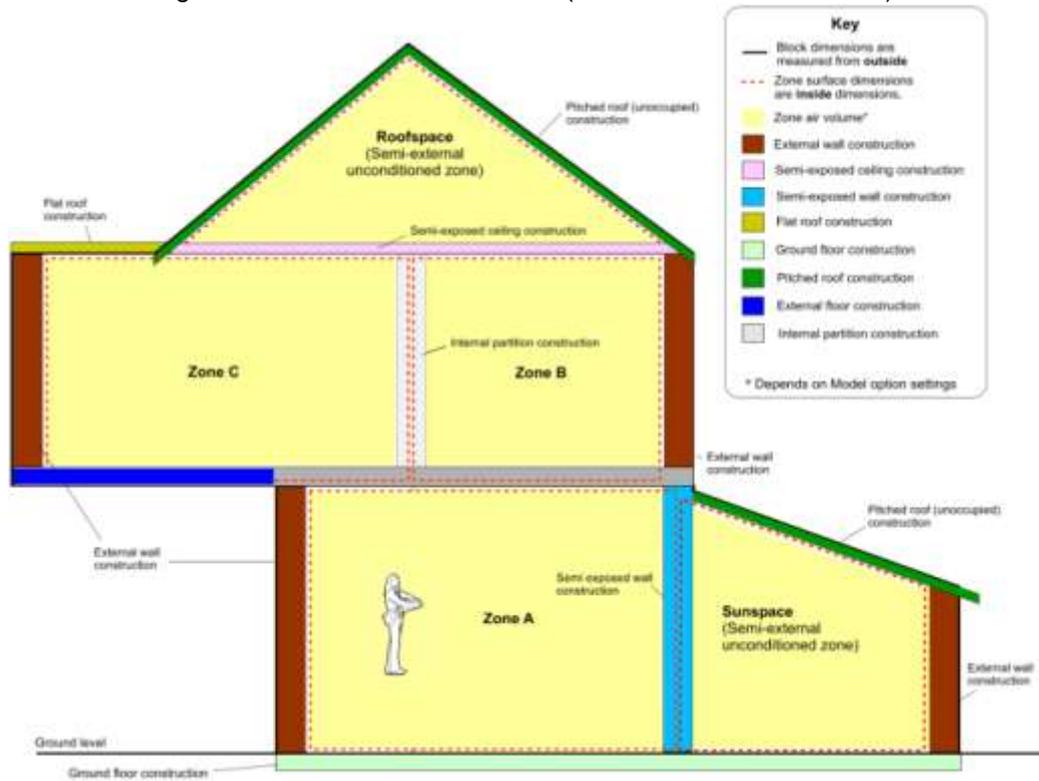
Conclusão							
Tijolo cerâmico	0,7	920	1600	0,9	0,7	0,7	NBR 15220 (ABNT, 2005b); (LABEEE, acesso em 25 maio 2012)
Concreto normal	1,75	1000	2200	0,9	0,7	0,7	NBR 15220 (ABNT, 2005b); (LABEEE, acesso em 25 maio 2012)
Gesso	0,35	840	750	0,9	0,2	0,2	NBR 15220 (ABNT, 2005b); (LABEEE, acesso em 25 maio 2012)
Telha de barro	1,05	920	2000	0,9	0,77	0,77	NBR 15220 (ABNT, 2005b); (LABEEE, acesso em 25 maio 2012)
Aglomerado de partículas de madeira com pintura na cor branca	0,17	2300	700	0,9	0,2	0,2	NBR 15220 (ABNT, 2005b)

Fonte: A autora.

O *DesignBuilder* oferece duas opções para configuração de pisos, tetos e lajes: de forma combinada (Figura 33), onde paredes, pisos e cobertura são definidos por sistemas construtivos simples; ou separada (Figura 34), onde piso/forro e cobertura são definidos pela associação de cada sistema separado.

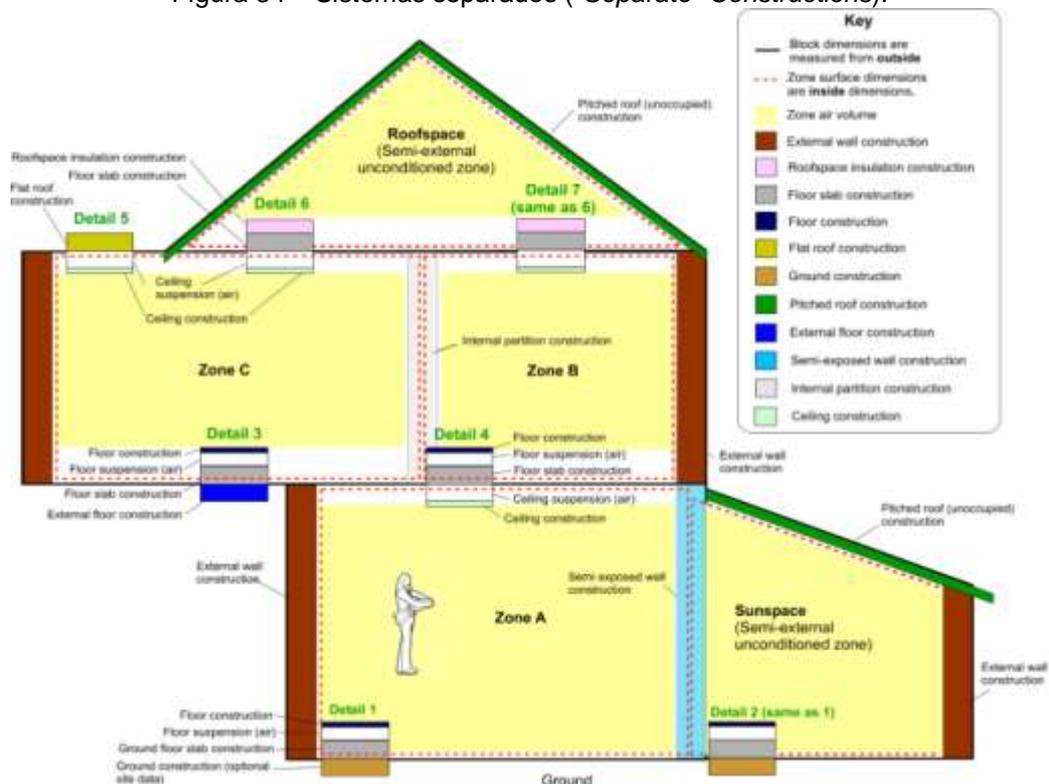
Nesta pesquisa optou-se pela configuração dos sistemas separados, para ser possível a representação dos forros suspensos das lajes.

Figura 33 – Sistemas combinados (“*Combined*” Constructions).



Fonte: DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

Figura 34 – Sistemas separados (“*Separate*” Constructions).



Fonte: DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

A cobertura da edificação é composta por uma laje de 25 cm de espessura, coberta por um telhado inclinado, resultando num sistema cuja transmitância térmica é de

1,75 W/m².K segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005b), a menor entre os sistemas que associam laje protegida por telhado, sem isolamento, relacionados nesta norma.

Considerou-se forro de gesso em todos os pavimentos do edifício, suspenso 20 cm da laje. O piso de todos os ambientes foi considerado sem revestimento, somente uma laje regularizada, devido à dificuldade de caracterização de um padrão que representasse a maioria das situações existentes.

Para configuração das taxas de infiltração do modelo, é necessário anteriormente definir o modo de cálculo de ventilação natural que será adotado durante a simulação. O *DesignBuilder* possui duas opções para efetuar esse cálculo: na opção “programada” as taxas de ventilação são pré-definidas pelo estabelecimento de um valor máximo de renovação do ar por hora, considerando-se os padrões de uso e operação dos ambientes; na opção “calculada” as taxas de ventilação consideram o tamanho das aberturas, frestas, orientação em relação à direção dos ventos, etc. (DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD, acesso em 1 set. 2012). Recomenda-se o uso da segunda opção somente quando as taxas de renovação do ar sejam um parâmetro em estudo (VENÂNCIO, 20--; DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD, acesso em 1 set. 2012), configurando-se aqui o cálculo da ventilação natural no modo “programado”, com o objetivo também de diminuir a complexidade do modelo e, conseqüentemente, o tempo de simulação. A taxa de infiltração foi fixada em uma renovação de ar por hora, ou seja, enquanto estiverem ocupados haverá a cada hora uma troca de todo volume de ar do interior do ambiente.

Aberturas

Nessa aba são configuradas as características das janelas externas e internas, além das aberturas localizadas na cobertura do edifício. No Quadro 12 estão descritas as características inseridas no *software* referentes às janelas externas.

Quadro 12 – Características das janelas externas.

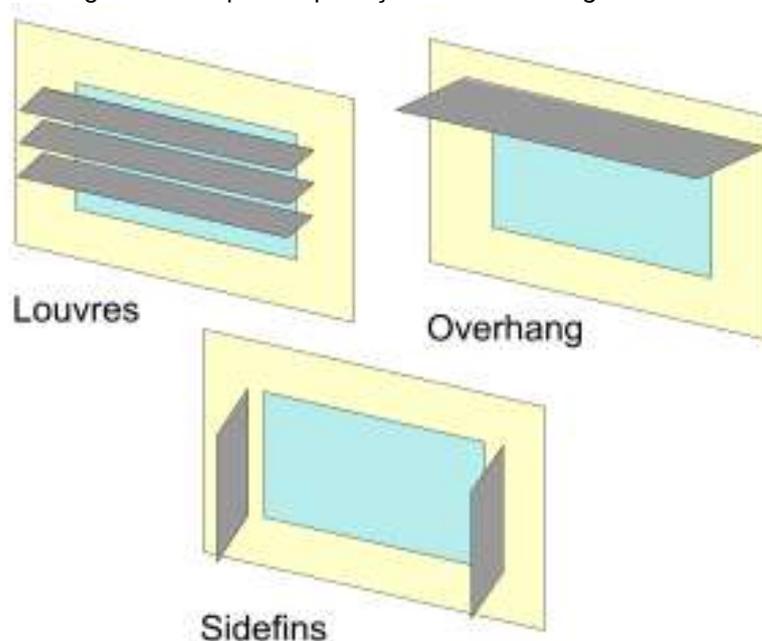
Componente	Material	Espessura	Transmitância [W/(m ² .K)]
Janelas externas	Vidro transparente	6 mm	5,778
	Moldura em alumínio	4 cm	5,881

Fonte: A autora.

O percentual de abertura na fachada, uma das variáveis estudadas, é inserido nessa etapa da modelagem. Para modelos com 50% de abertura nas maiores fachadas, foi selecionada a opção de faixas horizontais 50% envidraçadas para o arranjo das janelas, com peitoril de 1 m. Os modelos com 90% de abertura nas maiores fachadas foram configurados a partir da opção de faixas horizontais 90% envidraçadas.

As proteções solares das aberturas foram configuradas na terceira aba do *Glazing template*, ativando-se a opção *Local shading*, que disponibiliza três categorias para representar dispositivos de proteção solar (Figura 35).

Figura 35 – Tipos de proteção solar do *DesignBuilder*.



Fonte: DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

Para este estudo foram ativadas as opções louvres e overhang, com especificações detalhadas no Quadro 13 e no Quadro 14, respectivamente.

Quadro 13 – Detalhes geométricos do *brise* horizontal.

Louvres	PAF50	PAF90
Número de lâminas	4	8
Distância entre lâminas	30 cm	
Inclinação das lâminas	0°	
Continua		

Conclusão	
Distância entre lâminas e janela	30 cm
Profundidade das lâminas	30 cm
Afastamento do limite superior da janela	30 cm
Afastamento dos limites laterais da janela	0 cm
Ângulo de altitude (α)	45°

Fonte: A autora.

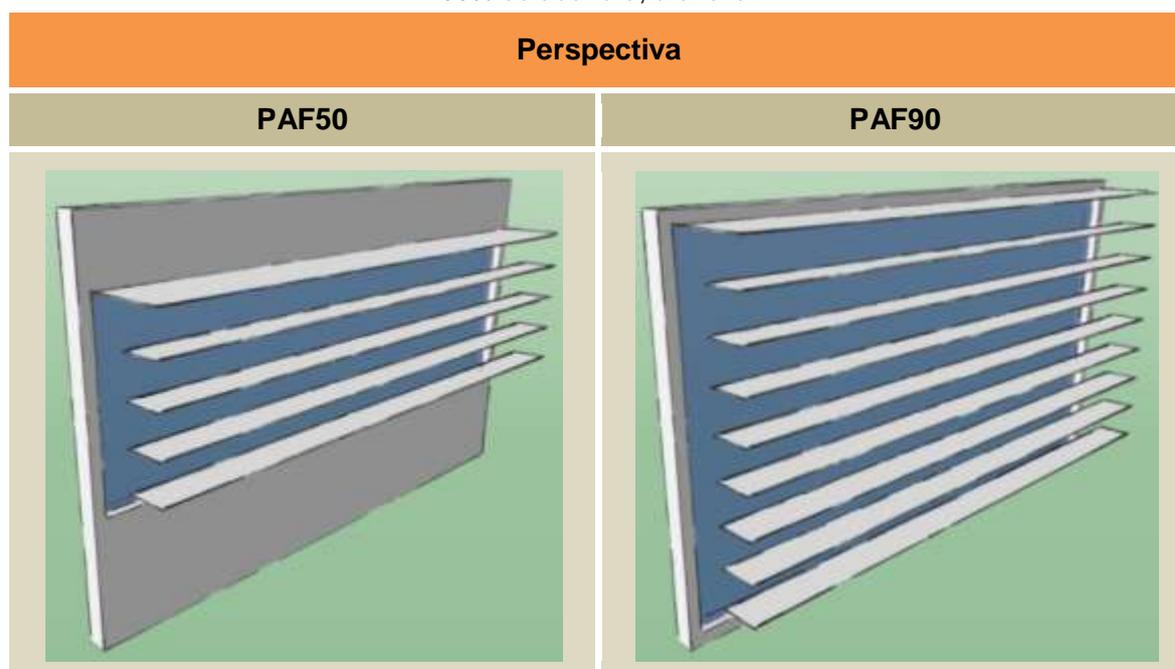
Quadro 14 – Detalhes geométricos do *brise* superior.

Overhang	PAF50	PAF90
Afastamento do limite superior da janela	0 cm	0 cm
Profundidade	60 cm	60 cm
Afastamento dos limites laterais da janela	0 cm	0 cm

Fonte: A autora.

A representação dos dispositivos descritos anteriormente pode ser observada no Quadro 15, para os modelos com 50% e 90% de abertura nas fachadas.

Quadro 15 – Dispositivos de proteção solar das fachadas com 50% de abertura, à esquerda, e com 90% de abertura, à direita.



Fonte: A autora.

Cada uma das doze salas possui uma porta para a circulação, que funcionam 90% abertas durante 5% do tempo em que o edifício é utilizado.

Iluminação

Nessa aba são inseridas algumas características do sistema de iluminação dos ambientes, sendo o consumo de energia um dos principais parâmetros, além de características das lâmpadas e luminárias. Os padrões de utilização do sistema de iluminação seguem os padrões de ocupação do edifício, ou seja, é utilizado enquanto o edifício estiver ocupado. No Quadro 16 estão relacionados os valores inseridos no *DesignBuilder*, na aba Iluminação, e suas respectivas fontes.

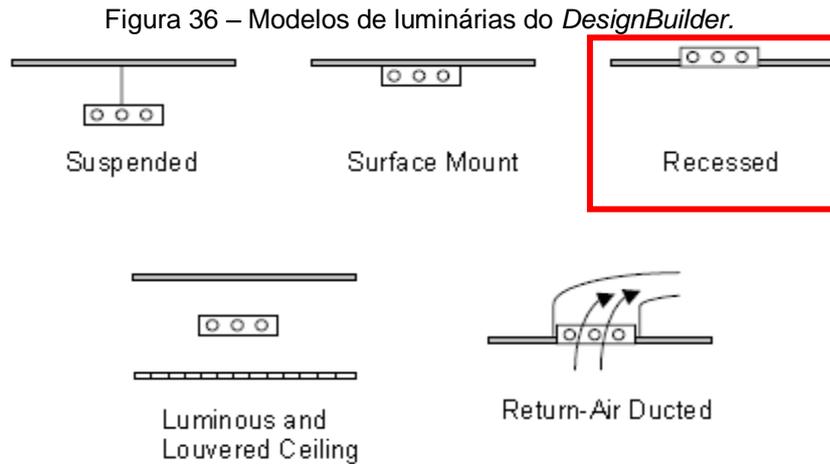
Quadro 16 – Características do sistema de iluminação.

Padrões do Sistema de Iluminação		
Variável de controle	Valor	Fonte
Energia de iluminação	2 W/m ² .100lux	Bernabé (2012)
Tipo de luminária	Embutida	Bernabé (2012)
Fração radiante	0,37	DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012)
Fração visível	0,18	DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012)
Controle da iluminação artificial	Acionamento em três fases	DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012) Definido pelo autor

Fonte: A autora.

A energia de iluminação foi calculada por Bernabé (2012) para o atendimento do nível de eficiência A do RTQ-C (MME, acesso em 16 maio 2012), que limita a densidade de potência de iluminação relativa em função de um índice, variável para cada ambiente de acordo com suas dimensões (comprimento, largura e altura).

O *DesignBuilder* (DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD, acesso em 1 set. 2012) dispõe cinco modelos de luminárias (Figura 36): suspensa, apoiada na superfície, teto luminoso com grelha de proteção, posicionada em duto de retorno e embutida (VENÂNCIO, 20--). O tipo de luminária considerada nesta pesquisa (embutida) está destacado na Figura 36.



Fonte: DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

O controle da iluminação artificial é feito em três fases, de forma que, em cada sala, a potência de iluminação instalada pode ser acionada em, aproximadamente, 100%, 66% ou 33%, quando a incidência de luz natural não for suficiente para iluminar todo o ambiente (Quadro 17).

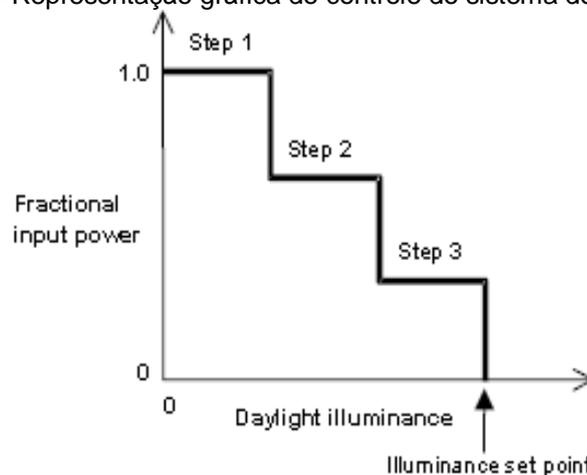
Quadro 17 – Controle do sistema de iluminação artificial em três passos.

Iluminância – Luz Natural	Fração da iluminação artificial acionada
0-200	1 (100%)
200-400	2/3 (33%)
400-600	1/3 (66%)
600 e acima	0

Fonte: DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

Essas frações de acionamento representam a divisão de circuitos, ativadas conforme a incidência de luz natural no ambiente (Figura 37).

Figura 37 – Representação gráfica do controle do sistema de iluminação.



Fonte: DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

Climatização (HVAC)

Quanto às características dos sistemas de aquecimento e resfriamento, além das informações de acionamento já fornecidas na aba atividades, os padrões de cada um dos possíveis sistemas de uma edificação devem ser configurados na aba climatização ou HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*).

O modelo de equipamento condicionador de ar considerado foi o *split* piso-teto, com capacidade de refrigeração de 48 000 Btu/h e consumo energético de 92,1 kWh/mês, indicado pelo INMETRO com nível A de eficiência energética (BERNABÉ, 2012; INMETRO, acesso em: 15 ago. 2012). No Quadro 18 estão descritas as características do sistema inseridas na aba HVAC.

Quadro 18 – Características do sistema de climatização.

Padrões do Sistema de Climatização		
Variável de controle	Valor	Fonte
<i>Chiller</i> CoP ¹	3,52 W/W	Bernabé, 2012 INMETRO, acesso em 15 ago. 2012)
Tipo de sistema	<i>Unitary Single Zone</i> (aparelhos atendem a uma única zona, representante de pequenos ou médios ambientes)	DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012) Venâncio (20--)

Fonte: A autora.

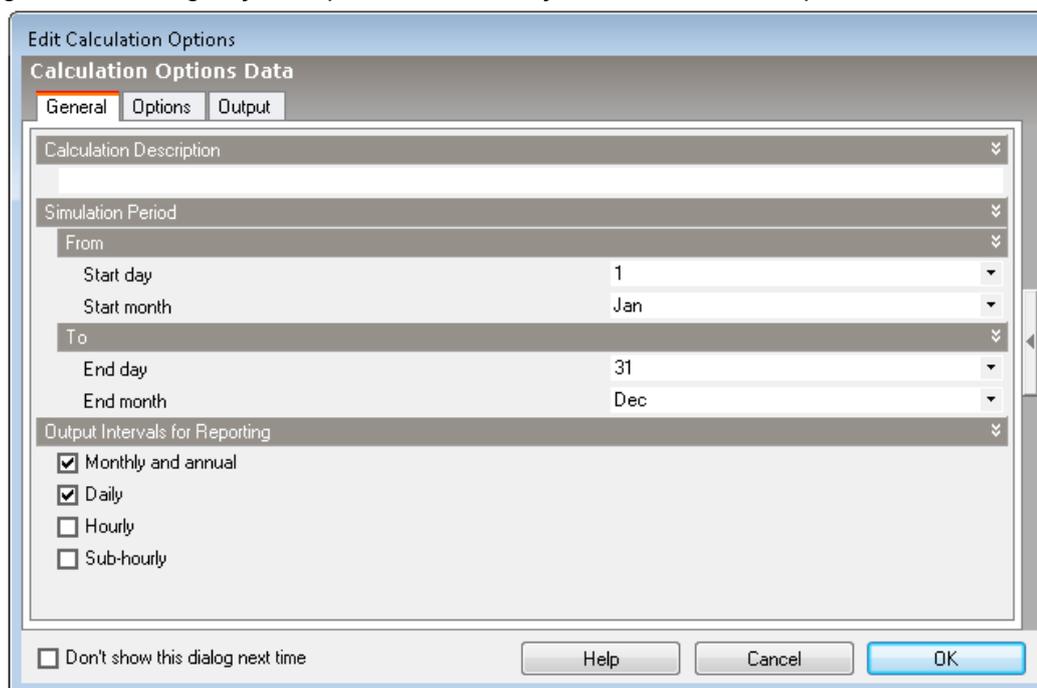
¹ Coeficiente de desempenho (eficiência do resfriador): unidade adimensional que relaciona capacidade e consumo do sistema (VENÂNCIO, 20--).

Os sistemas de climatização foram configurados no modo *Compact*, que permite uma modelagem detalhada e usa o motor de cálculo do *EnergyPlus* (VENÂNCIO, 20--).

3.2.4.4. Simulações

Na aba opções foram selecionados dois itens para composição dos dados de saída, após o processamento das simulações: *Internal Gains* e *Energy, HVAC etc.* Na edição das opções de cálculo (Figura 38), foi indicado o período de simulação (01 de janeiro a 31 de dezembro) e os intervalos de tempo entre os resultados (mensal e anual, e diária).

Figura 38 – Configuração do período de simulação e intervalo de tempo entre os resultados.



Fonte: DesignBuilder Software LTD (Acesso em 1 set. 2012).

3.3. Processamento das simulações

Com as variáveis de teste e de controle estabelecidas, os modelos para simulação foram organizados por cidade. Considerando-se os oito modelos configurados a partir das variáveis de teste, nos quatro períodos (atual, 2020, 2050 e 2080), para as seis cidades a serem investigadas, tendo então sido simulados 192 modelos (Quadro 19).

Quadro 19 – 32 modelos a simular para cada cidade.

				ATUAL	2020	2050	2080
(Cidade)	O ¹	PAF ²	PS ³	Consumo	Consumo	Consumo	Consumo
	Norte Sul (NS)	50%	Sem Proteção (SP)				
			Com Proteção (CP)				
		90%	Sem Proteção (SP)				
			Com Proteção (CP)				
	Leste Oeste (LO)	50%	Sem Proteção (SP)				
			Com Proteção (CP)				
		90%	Sem Proteção (SP)				
			Com Proteção (CP)				

Fonte: A autora.

¹ O – Orientação

² PAF – Percentual de Abertura na Fachada

³ PS – Proteção Solar

3.4. Análise e interpretação dos resultados

Para quantificar o incremento no consumo de energia em diferentes cenários climáticos, atuais e projetados para o futuro, os resultados extraídos das simulações de cada modelo foram seus respectivos consumos energéticos, incluindo gastos com climatização, iluminação e equipamentos.

Primeiramente são apresentados os dados gerais de consumo organizados por cidades, considerando-se o somatório do consumo de todos os modelos. Desta forma foi possível apontar as cidades com as maiores e menores taxas de aumento, conforme se avança do período atual para o futuro.

A seguir são expressos os consumos individuais de cada modelo, organizados por cidade, para cada período. Os edifícios foram ordenados em gráficos, do menos consumidor ao mais consumidor, para identificação de comportamentos divergentes conforme a configuração das variáveis em teste.

A partir da elaboração dos gráficos, foi realizada a análise dos resultados com foco no impacto das variáveis manipuladas na fase de modelagem da edificação, ou seja: orientação, percentual de abertura na fachada e proteção solar. O consumo total dos modelos, isolando-se cada uma das variáveis, é apresentado por período, considerando-se o somatório do consumo em todas as cidades. Além dessa análise geral, são apresentados os percentuais de aumento do consumo, para cada cidade, nos três períodos futuros, visando a identificação daquelas mais suscetíveis à alteração de determinada variável. Esse último arranjo permitiu, principalmente, um comparativo do quanto cada cidade é influenciada pela alteração de determinada variável.

Por fim, apresenta-se uma análise dos resultados em cada uma das seis cidades. Os dados são apresentados em gráficos de percentual de aumento x período (2020, 2050 e 2080), com a exposição de todos os modelos de uma mesma cidade. Para uma avaliação das variações de consumo entre estações do ano, são apresentados gráficos de aumento de consumo x mês (para os períodos de 2020, 2050 e 2080). Com o objetivo de analisar o impacto das variáveis de teste sobre o desempenho dos edifícios em cada uma das cidades, foram representados, ainda, os somatórios dos consumos dos modelos com a mesma configuração da variável em questão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A respeito da primeira parte da metodologia, após a execução das etapas pré-definidas obteve-se como resultados os arquivos climáticos referentes aos quatro períodos – atual, 2020, 2050 e 2080 –, para seis cidades brasileiras. A ferramenta utilizada (CCWorldWeatherGen) não apresentou problemas durante o processamento das informações.

Apesar da facilidade de aplicação desse método e, principalmente, pela disponibilidade gratuita da ferramenta, é importante ressaltar a necessidade de desenvolvimento de subsídios nacionais para a geração de dados com menor índice de incertezas, uma vez que a referida ferramenta está associada a um modelo climático global. Nesse sentido, diversas pesquisas têm investigado novas formas de preparação de dados climáticos futuros, para posterior análise do desempenho de edifícios (DU; EDGE; UNDERWOOD, 2011; EAMES; KERSHAW; COLEY, 2012; KERSHAW; EAMES; COLEY, 2011; ROBERT; KUMMERT, 2012; WANG; CHEN; REN, 2010; WANG; CHEN; REN, 2011).

Sobre a segunda parte da metodologia, composta pela modelagem e simulação com os arquivos climáticos mencionados anteriormente, também não ocorreram imprevistos. A inserção de dispositivos de proteção solar no modelo altera consideravelmente o tempo para o processamento das simulações. Enquanto os modelos mais simples, com menor percentual de abertura na fachada e sem proteção solar, permaneceram em média quatro horas em processo de simulação, os modelos mais complexos, com maior percentual de abertura e dispositivos de proteção solar, exigiram, no mínimo, vinte horas para execução de todo o processo.

A necessidade de maior tempo para simulação dos modelos protegidos já era suposto e não representou um obstáculo para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa. É importante ressaltar, porém, que o tempo necessário para a simulação desses edifícios é consideravelmente superior, o que deve ser planejado anteriormente em estudos com grande quantidade de simulações.

Os resultados extraídos das simulações serão apresentados nos itens a seguir, organizados por períodos, conforme as variáveis e por cidades.

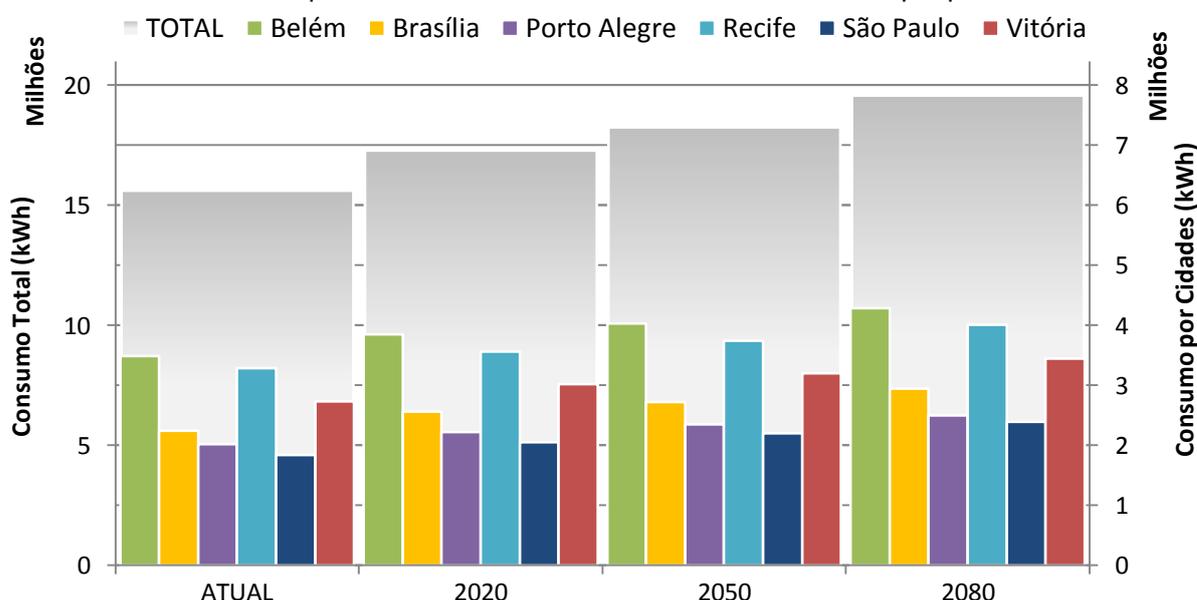
4.1. Análise por períodos

Ao contrário dos resultados apresentados por alguns estudos a respeito do desempenho futuro de edificações, nos quais há uma diminuição do consumo de energia em determinados períodos futuros, todos os modelos desta pesquisa, em todas as cidades, apresentaram aumento no consumo de energia anual. Considerando-se a totalidade de modelos e cidades, esse aumento representa 10,7% do atual consumo em 2020, 16,9% em 2050 e 25,6% em 2080.

Apesar dos maiores aumentos observados em 2050 e 2080, destaca-se que o aumento de aproximadamente 10% em 2020 equivale, em parte, à situação atual, uma vez que esse arquivo climático resume as mudanças projetadas para o período entre 2011 e 2040. Considerando-se, porém, que grande parte dos estudos sobre simulação de edifícios no Brasil considera os arquivos formatados com base nas séries de 1961-1990 como atuais, neste estudo foi seguido o mesmo critério.

A análise do conjunto de todos os modelos simulados evidencia duas cidades cujos edifícios apresentaram os maiores consumos, tanto no período atual quanto nos futuros: Belém e Recife (Gráfico 6). São Paulo foi a cidade com o menor consumo nos quatro períodos, seguida por Porto Alegre. O consumo relativamente maior corresponde às cidades com as menores latitudes, enquanto os menores consumos representam as cidades com maiores latitudes.

Gráfico 6 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de todos os modelos simulados, organizados por cidades, nos quatro períodos – atual, 2020, 2050 e 2080. Em cinza está representado o somatório do consumo das cidades por período.

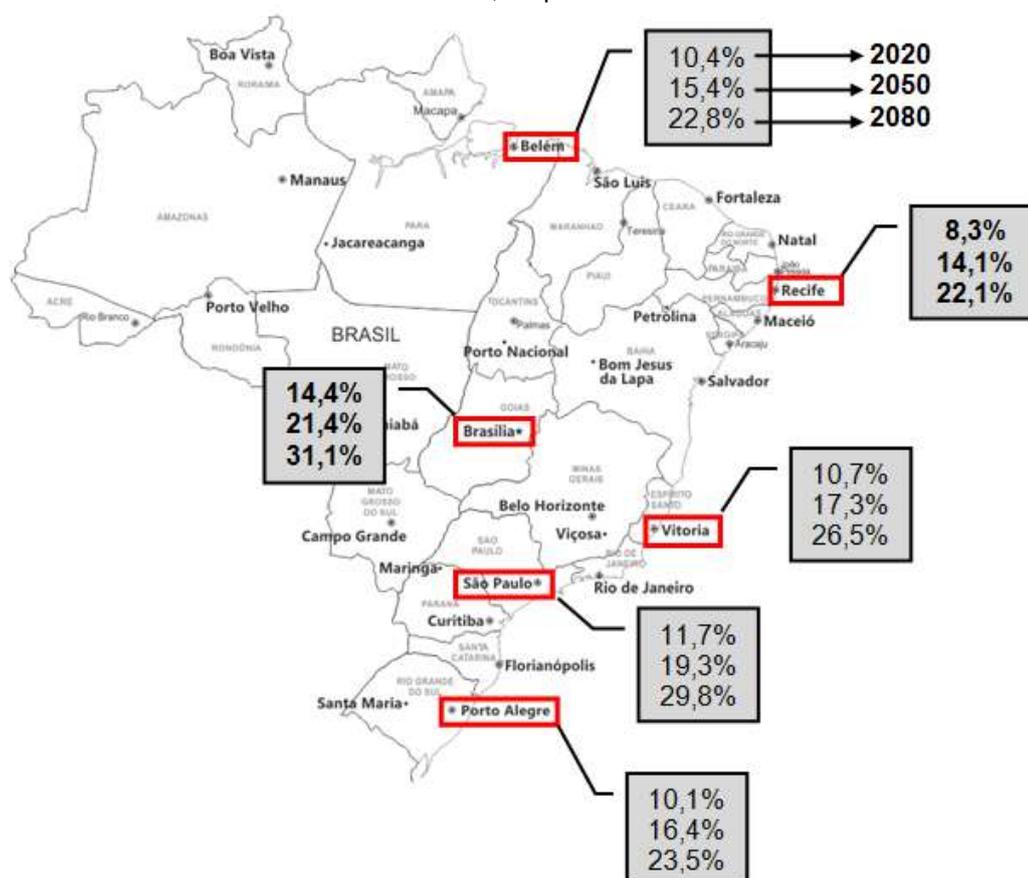


Fonte: A autora.

A cidade que sofreu maior aumento no consumo ao avançar do período atual para 2080 foi Belém, com aproximadamente 794 mil kWh, e Porto Alegre foi a cidade com o menor aumento, com aproximadamente 474 mil kWh.

A análise do aumento relativo do consumo, ou seja, quanto o edifício apresentou de aumento em relação ao consumo no período atual, percebe-se um comportamento distinto do observado anteriormente. O percentual de aumento no consumo de energia, em relação ao período atual, aponta Brasília como a cidade com o maior aumento relativo no consumo, em todos os períodos; e Recife como a cidade com o menor aumento relativo (Figura 39).

Figura 39 – Percentual de aumento no consumo de energia anual para as seis cidades, em 2020, 2050 e 2080, respectivamente.



Fonte: A autora.

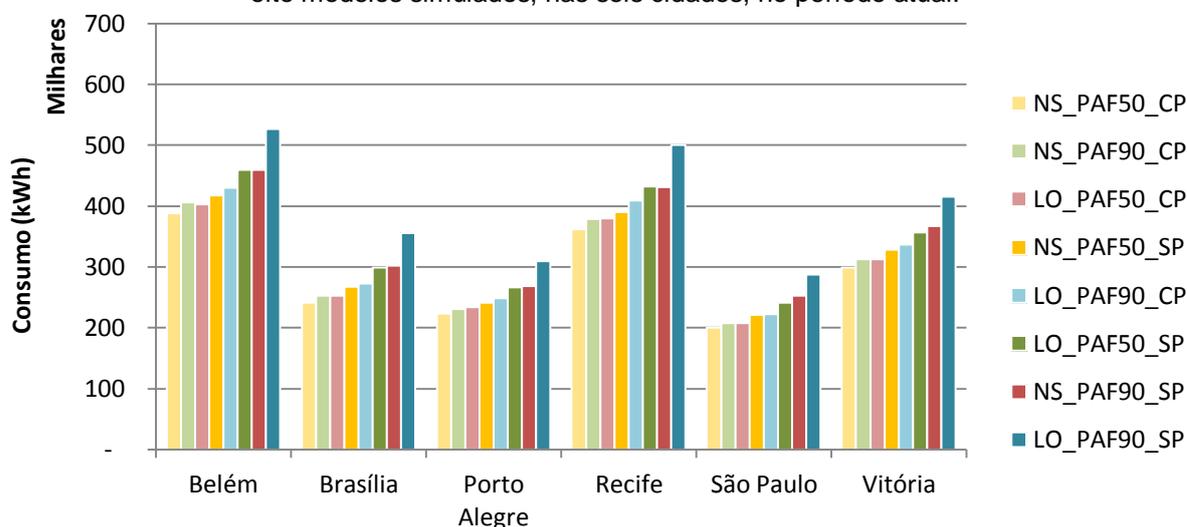
Desse modo, as cidades que mais consomem atualmente continuariam sendo as mais consumidoras no futuro. No entanto, isso não representa que seu aumento percentual seja o maior, ou seja, as cidades com os maiores consumos não são as cidades que apresentaram os maiores aumentos.

Ao reunir os modelos de um período e organizá-los por cidade, foi possível identificar uma semelhança significativa na ordenação dos edifícios, do menos consumidor ao mais consumidor, em todos os períodos. A seguir são apresentados esses resultados, atentando para as respectivas exceções.

4.1.1. Atual

A ordenação dos edifícios, do menos consumidor ao mais consumidor, é semelhante para todas as cidades no período atual, conforme Gráfico 7. Em Belém, São Paulo e Vitória, ao contrário das outras cidades, os modelos orientados a Norte e Sul, com 90% de abertura e dispositivos de proteção solar (NS_PAF90_CP) apresentaram maior consumo que os modelos orientados a Leste e Oeste, com 50% de abertura e dispositivos de proteção solar (LO_PAF50_CP). Outra situação diferencial pode ser observada em Recife, onde o modelo orientado a Leste e Oeste, com 50% de abertura e sem proteção solar (LO_PAF50_SP) apresentou maior consumo que o modelo orientado a Norte e Sul, com 90% de abertura e sem proteção solar (NS_PAF90_SP).

Gráfico 7 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, no período atual.



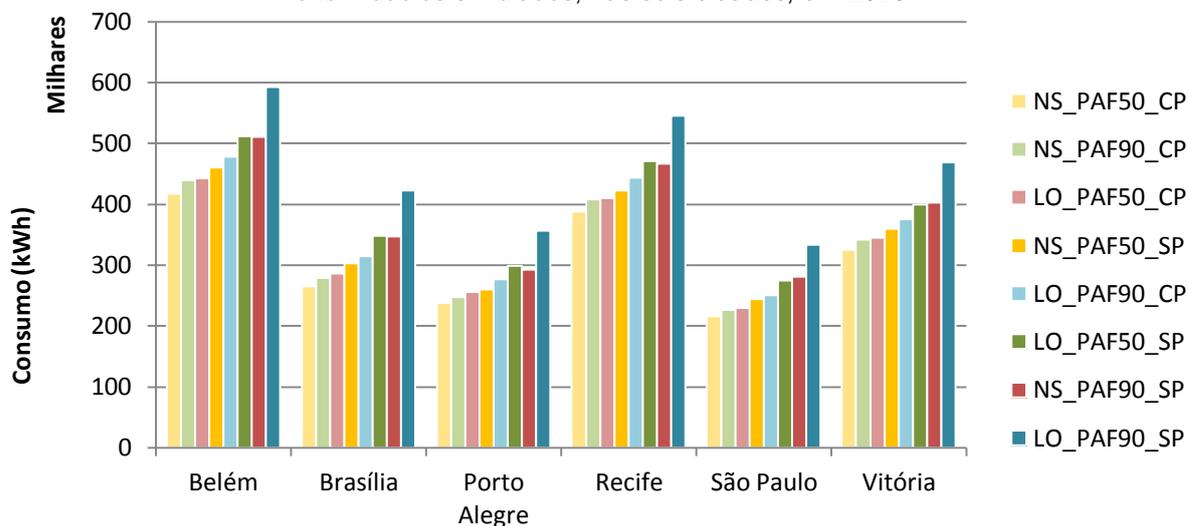
Fonte: A autora.

4.1.2. 2020

Assim como ocorre no período atual, a ordenação dos edifícios, do menos consumidor ao mais consumidor, é semelhante para todas as cidades em 2020, conforme Gráfico 8. Os modelos orientados a Leste e Oeste, com 50% de abertura e sem proteção solar (LO_PAF50_SP) apresentaram maior consumo que os modelos

orientados a Norte e Sul, com 90% de abertura e sem proteção solar (NS_PAF90_SP), em quatro das seis cidades – Belém, Brasília, Porto Alegre e Recife.

Gráfico 8 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, em 2020.

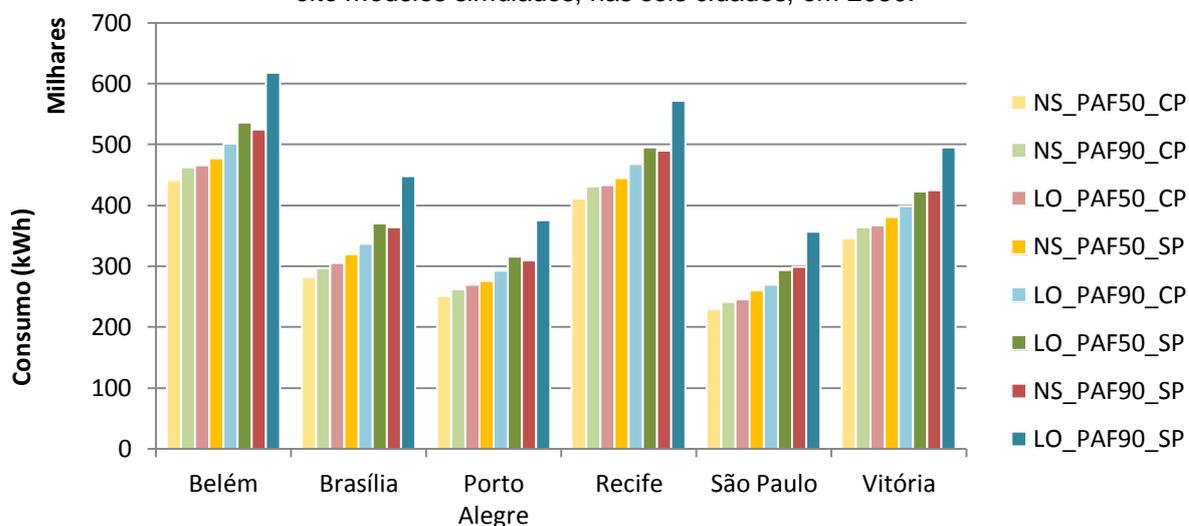


Fonte: A autora.

4.1.3. 2050

Conforme Gráfico 9, os modelos orientados a Leste e Oeste, com 50% de abertura e sem proteção solar (LO_PAF50_SP) permaneceram, em 2050, com maior consumo que os modelos orientados a Norte e Sul, com 90% de abertura e sem proteção solar (NS_PAF90_SP), em Belém, Brasília, Porto Alegre e Recife.

Gráfico 9 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, em 2050.

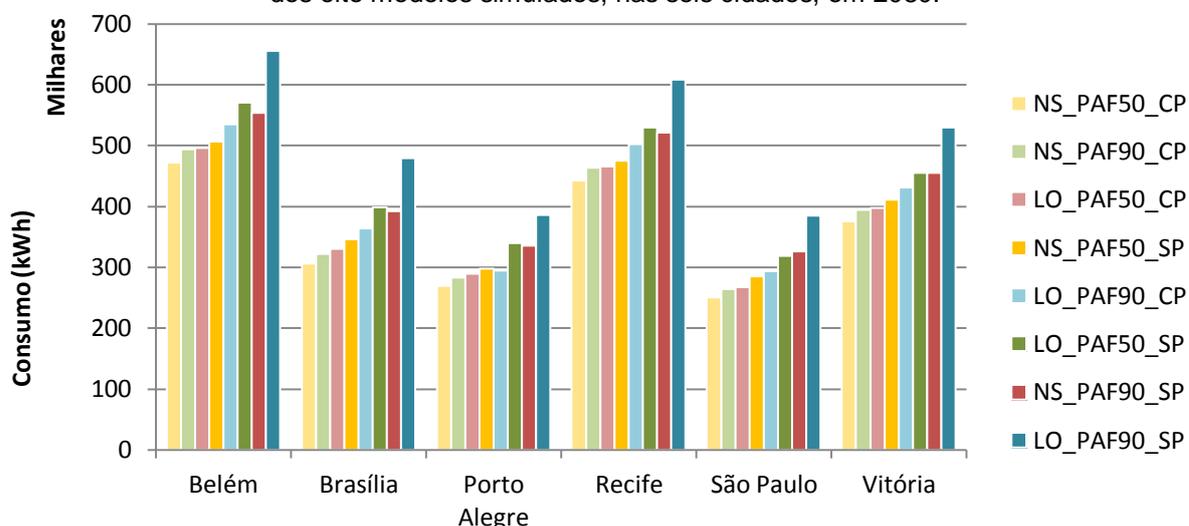


Fonte: A autora.

4.1.4. 2080

Assim como ocorre em 2050, os modelos orientados a Leste e Oeste, com 50% de abertura e sem proteção solar (LO_PAF50_SP) apresentaram maior consumo que os modelos orientados a Norte e Sul, com 90% de abertura e sem proteção solar (NS_PAF90_SP), em Belém, Brasília, Porto Alegre e Recife (Gráfico 10). Em Porto Alegre, o modelo orientado a Norte e Sul, com 50% de abertura e sem proteção solar (NS_PAF50_SP) passou a consumir mais que o modelo orientado a Leste e Oeste com 90% de abertura e dispositivos de proteção solar (LO_PAF90_CP).

Gráfico 10 – Consumo de energia anual para climatização, iluminação e equipamentos de cada um dos oito modelos simulados, nas seis cidades, em 2080.



Fonte: A autora.

4.2. Impacto das variáveis

Isolar os modelos conforme a orientação, o percentual de abertura nas fachadas e a presença de dispositivos de proteção solar permitiu o levantamento das estratégias mais relevantes para a economia no consumo de energia, tanto no período atual quanto nos períodos futuros. Sendo assim, na análise geral do impacto das variáveis, sem distinção de cidades, a utilização de dispositivos de proteção solar apontou as maiores diferenças entre os grupos. Entretanto, na análise do percentual de aumento do consumo por cidades foi observada uma inversão nesse panorama, sendo que em Recife, Belém e Vitória obtiveram maiores aumentos percentuais de consumo por edifícios com proteção solar em 2080.

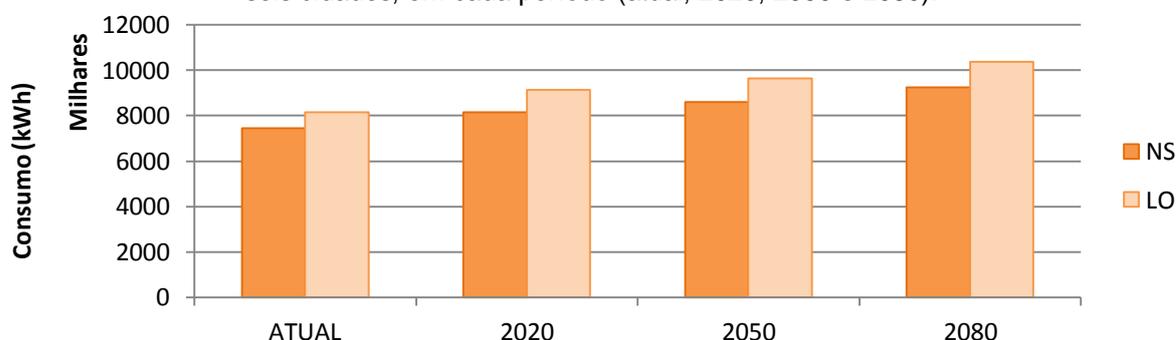
Essa inversão não foi observada somente na análise relativa aos dispositivos de proteção solar. O percentual de abertura nas fachadas também mostrou

divergências: ora o agrupamento de edifícios com 50% de abertura, ora o agrupamento de edifícios com 90% de abertura apresentou maior aumento percentual. Somente a variação da orientação representou comportamentos semelhantes no aumento percentual dos grupos, sendo que edifícios orientados a Leste e Oeste tendem a aumentar mais o consumo anual de energia que os edifícios orientados a Norte e Sul em todas as cidades e em todos os períodos futuros.

4.2.1. Orientação

Os resultados das simulações dos vinte e quatro modelos orientados a Leste e Oeste reproduzem um aumento no consumo de energia de 9,5% em relação aos modelos orientados a Norte e Sul no período atual. Nos períodos futuros o maior consumo de energia por edifícios orientados a Leste e Oeste permanece, sendo que em 2020 a diferença é de 12,17%, em 2050 é de 12,36% e em 2080 é de 12,07% (Gráfico 11).

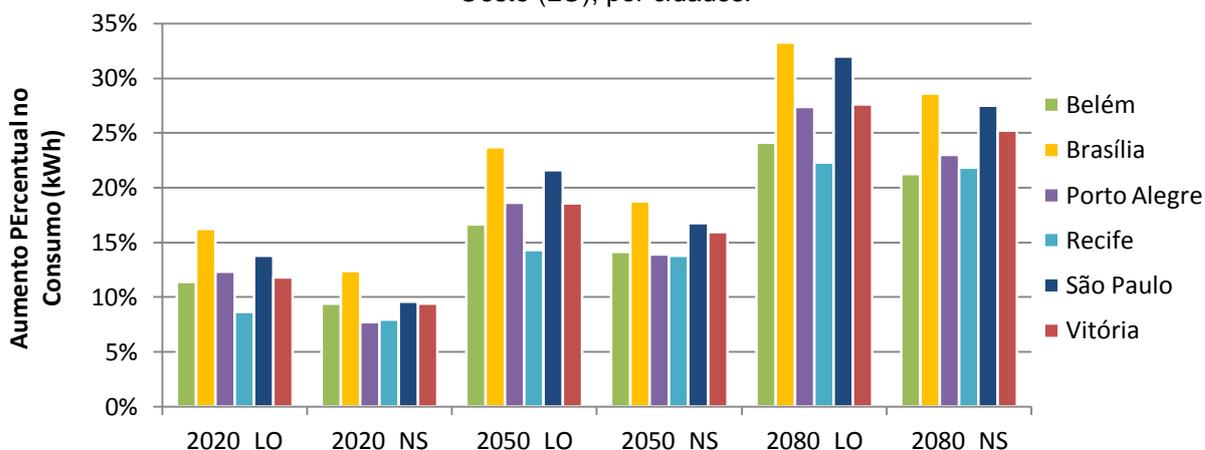
Gráfico 11 – Consumo total dos modelos orientados a Norte e Sul (NS) e a Leste e Oeste (LO), nas seis cidades, em cada período (atual, 2020, 2050 e 2080).



Fonte: A autora.

O aumento percentual do consumo, em relação ao período atual, também foi maior para edifícios orientados a Leste e Oeste em todas as cidades, para todos os períodos futuros (Gráfico 12). Entretanto, algumas cidades, como Brasília e Porto Alegre, apresentaram diferenças mais significativas entre estes percentuais, em cada período. Em Recife esta diferença é mínima, não alcançando 1% em nenhum período futuro.

Gráfico 12 – Aumento percentual do consumo dos modelos orientados a Norte e Sul (NS) e a Leste e Oeste (LO), por cidades.

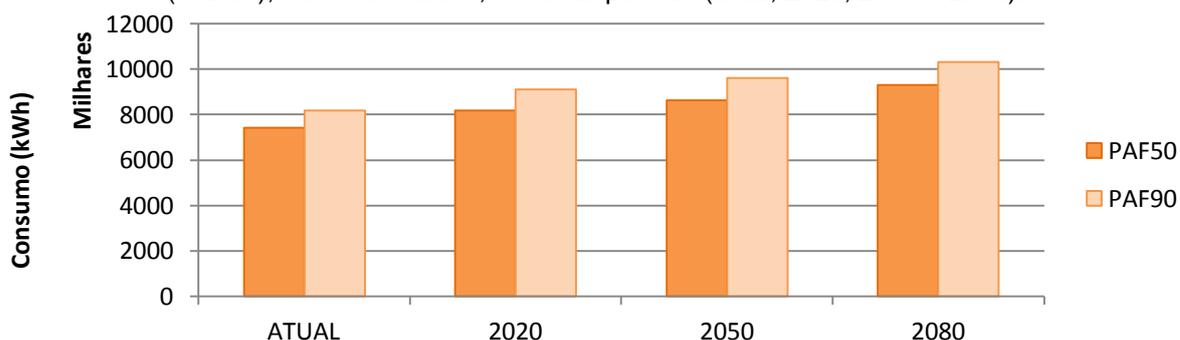


Fonte: A autora.

4.2.2. Percentual de Abertura nas Fachadas

Os resultados das simulações dos vinte e quatro modelos com 90% de abertura reproduzem um aumento no consumo de energia de 10,21% em relação aos modelos com 50% de abertura no período atual. Nos períodos futuros o maior consumo de energia por edifícios com 90% de abertura permanece, sendo que em 2020 a diferença é de 11,38%, em 2050 é de 11,12% e em 2080 é de 10,84% (Gráfico 13).

Gráfico 13 – Consumo total dos modelos com 50% de abertura (PAF50) e com 90% de abertura (PAF90), nas seis cidades, em cada período (atual, 2020, 2050 e 2080).

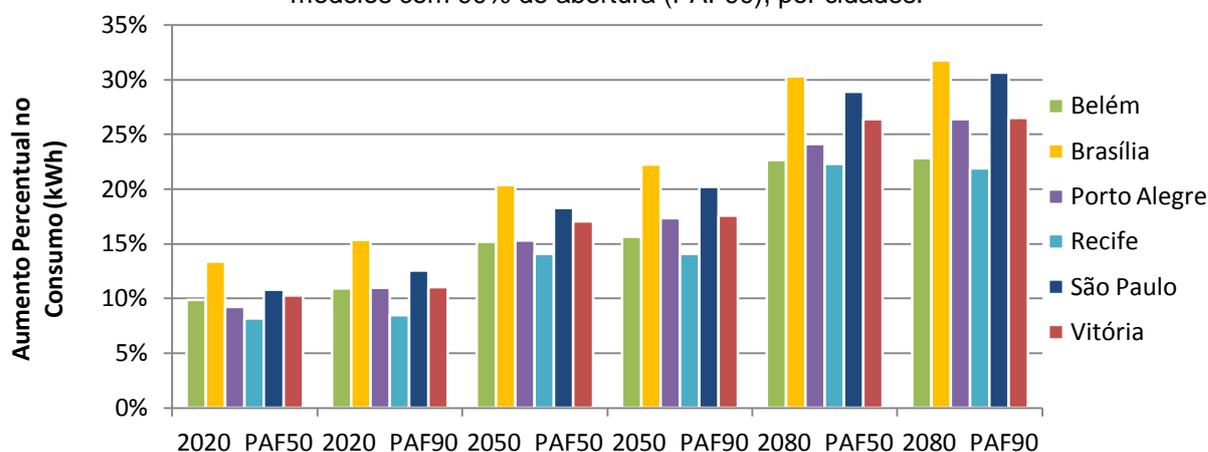


Fonte: A autora.

O aumento percentual do consumo, em relação ao período atual, foi maior para os edifícios com 90% de abertura em quase todas as cidades (Gráfico 14). As diferenças mais significativas entre estes percentuais ocorreram em Brasília e Porto Alegre. Em Vitória esta diferença é mínima, não alcançando 1% em nenhum período futuro. Em Recife, assim como em Vitória, as diferenças entre os aumentos percentuais de consumo em 2020 e em 2050 foram mínimas, sendo que, em 2080,

os edifícios com 90% de abertura em Recife apresentaram menor percentual de aumento que edifícios com 50% de abertura.

Gráfico 14 – Aumento percentual do consumo dos modelos com 50% de abertura (PAF50) e dos modelos com 90% de abertura (PAF90), por cidades.

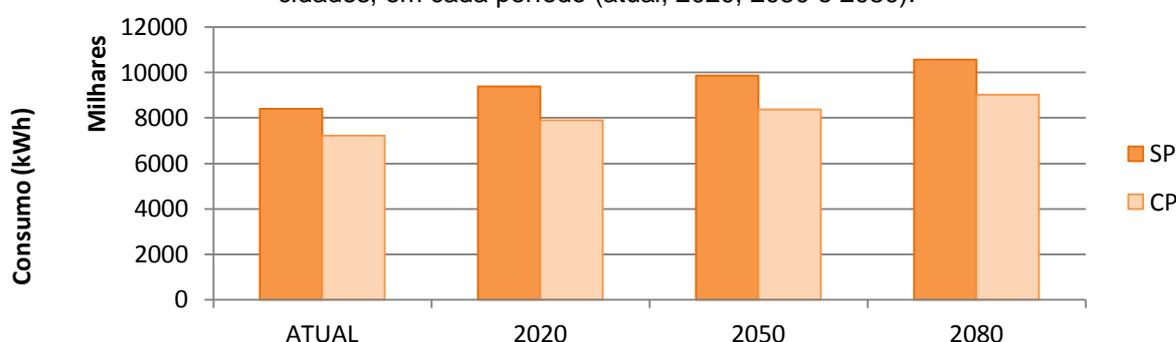


Fonte: A autora.

4.2.3. Proteção Solar

Os resultados das simulações dos vinte e quatro modelos sem proteção solar reproduzem um aumento no consumo de energia de 14,12% em relação aos modelos com proteção solar no período atual. Nos períodos futuros o maior consumo de energia por edifícios sem proteção solar permanece, sendo que em 2020 a diferença é de 15,72%, em 2050 é de 15,16% e em 2080 é de 14,68% (Gráfico 15).

Gráfico 15 – Consumo total dos modelos sem proteção solar (SP) e com proteção solar (CP), nas seis cidades, em cada período (atual, 2020, 2050 e 2080).

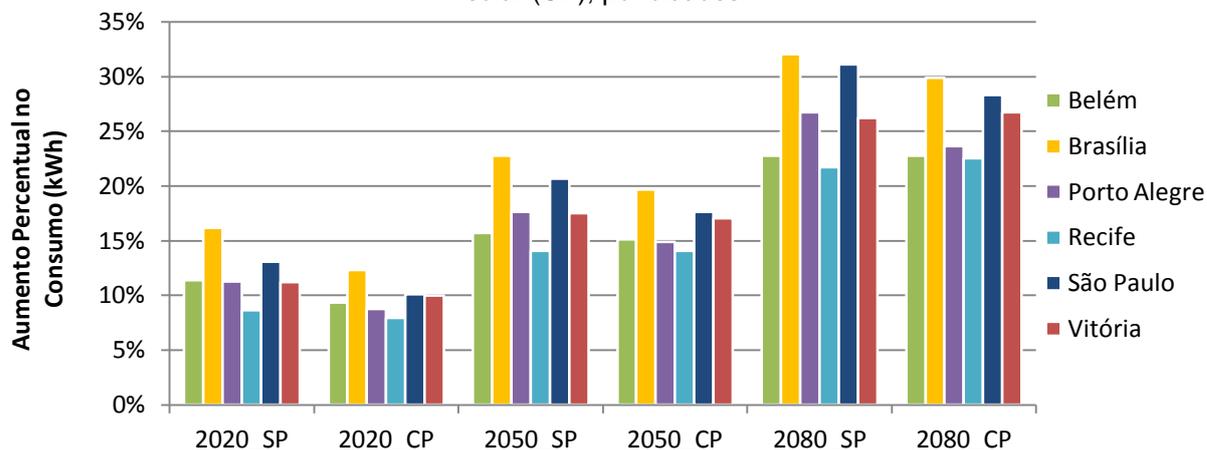


Fonte: A autora.

O aumento percentual do consumo, em relação ao período atual, foi maior para os edifícios sem proteção solar em quase todas as cidades e em quase todos os períodos (Gráfico 16). As diferenças mais significativas entre estes percentuais ocorreram em Brasília, Porto Alegre e São Paulo. Recife apresentou diferenças

mínimas, não alcançando 1% em nenhum período futuro. Observou-se, ainda, em Recife, Belém e Vitória, um maior aumento percentual em edifícios com proteção solar em 2080, situação inversa à observada em outros períodos e cidades.

Gráfico 16 – Aumento percentual do consumo dos modelos sem proteção solar (SP) e com proteção solar (CP), por cidades.



Fonte: A autora.

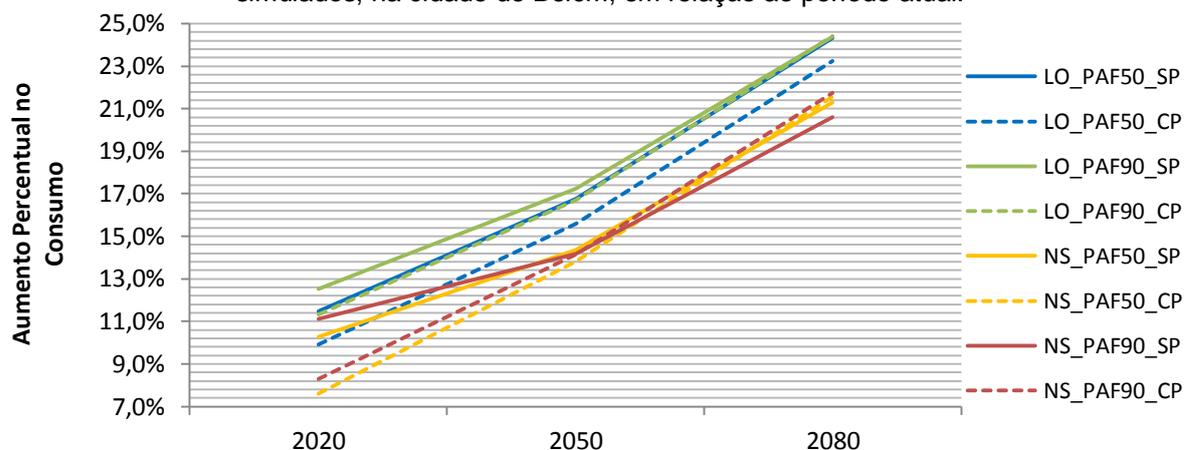
4.3. Análise por cidades

Alguns edifícios apresentaram peculiaridades na evolução do consumo, conforme a cidade e o período em análise. Nos itens a seguir essas situações específicas foram descritas, além de apresentada a evolução mensal do percentual de aumento do consumo. Em geral, os aumentos mensais se comportam de maneira semelhante para todos os modelos, salvo algumas exceções. Por fim, foram apresentados, para cada cidade, os aumentos do consumo dos modelos, isolando-se as variáveis em teste neste estudo. Em cada cidade foi possível indicar a variável com maior impacto sobre o aumento do consumo de energia, tanto no período atual, quanto nos períodos futuros.

4.3.1. Belém

Dois edifícios apresentaram particularidades nos padrões de consumo futuros: os modelos com orientação Norte e Sul, sem proteção solar (Gráfico 17, NS_PAF50_SP e NS_PAF90_SP). Em comparação aos outros modelos, o aumento percentual do seu consumo não foi tão representativo ao avançar do presente para o futuro.

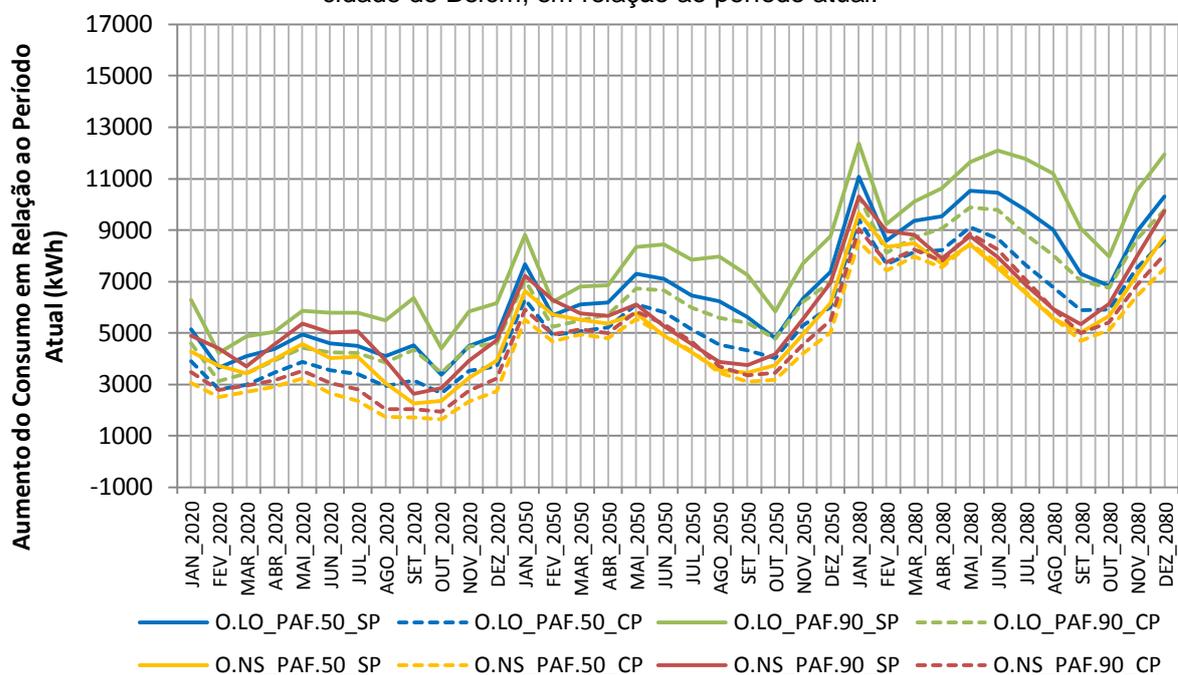
Gráfico 17 – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Belém, em relação ao período atual.



Fonte: A autora.

No Gráfico 18 é possível observar que esse comportamento pode ser justificado pelo baixo consumo de energia entre os meses de maio a outubro, aproximadamente, nos períodos de 2050 e 2080; diferente de 2020, quando estes edifícios se encontram entre os maiores consumidores em quase todos os meses.

Gráfico 18 – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Belém, em relação ao período atual.

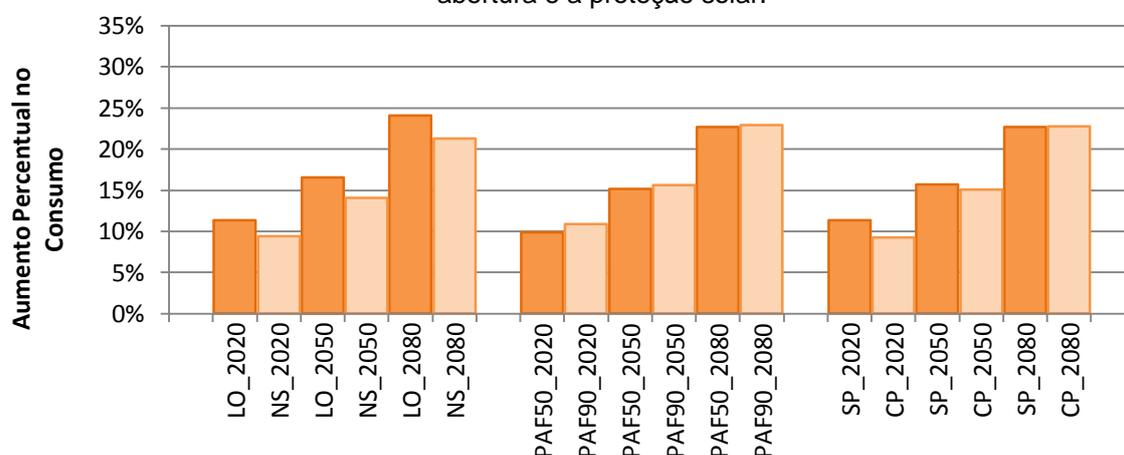


Fonte: A autora.

Com relação ao impacto das variáveis de teste, na cidade de Belém a alteração da orientação causou a maior diferença entre as taxas médias de aumento do consumo (Gráfico 19). Apesar de a diferença nas taxas médias de aumento do consumo ocasionada pela variação do percentual de abertura na fachada não ter sido tão

significativa, edifícios com 50% de abertura apresentaram menores taxas de aumento que edifícios com 90% de abertura em todos os períodos. A utilização de dispositivos de proteção solar externos não provocou comportamentos análogos na análise por períodos, ou seja, em 2020 e em 2050 os edifícios desprotegidos obtiveram taxas de aumento do consumo, em média, maiores que dos edifícios protegidos; em 2080, apesar de estas médias atingirem valores semelhantes, a situação é invertida, ou seja, edifícios protegidos apresentaram taxas de aumento maiores que edifícios desprotegidos.

Gráfico 19 – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Belém, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar.



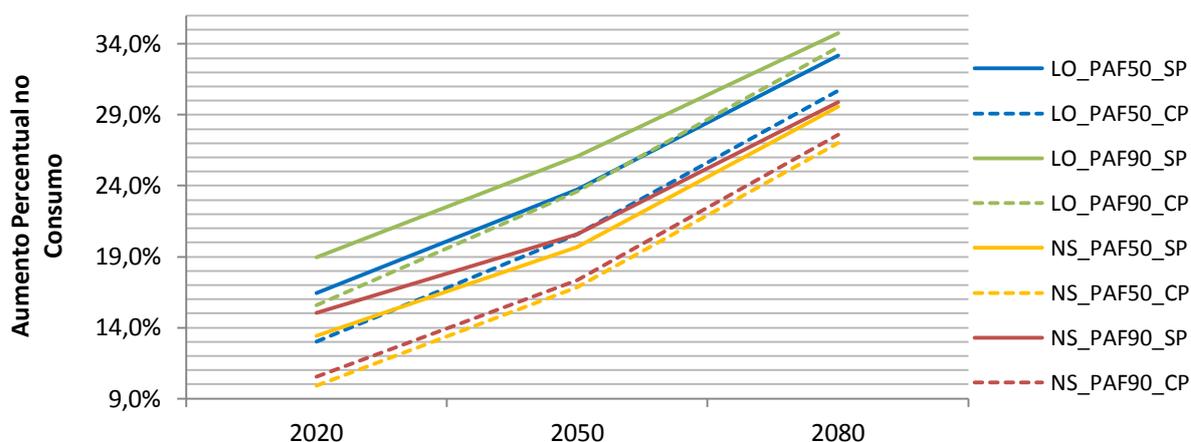
Fonte: A autora.

4.3.2. Brasília

Assim como ocorre em Belém, foi observado em Brasília que uma menor variação das taxas de aumento do consumo, conforme se avança de 2020 para 2050, ocorreu para os edifícios com orientação Norte e Sul desprotegidos (Gráfico 20, NS_PAF50_SP e NS_PAF90_SP).

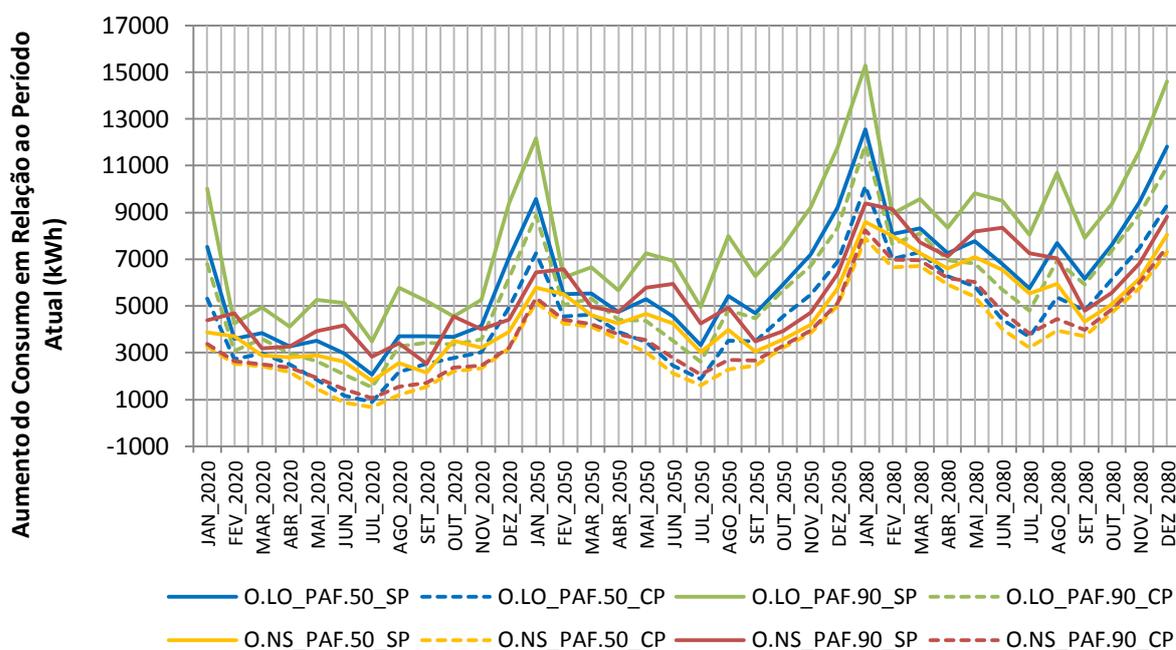
No Gráfico 21 é possível observar que estes edifícios com menor variação apresentam, em alguns meses de 2050, um aumento no consumo muito próximo ao aumento no mesmo período de 2020, principalmente nos meses de setembro, outubro e novembro.

Gráfico 20 – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Brasília, em relação ao período atual.



Fonte: A autora.

Gráfico 21 – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Brasília, em relação ao período atual.

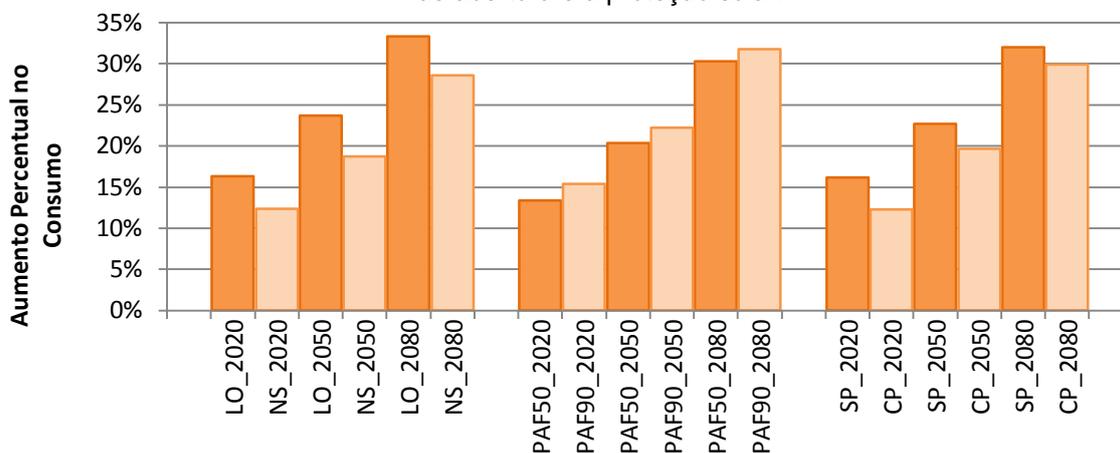


Fonte: A autora.

A alteração da orientação e a utilização de dispositivos de proteção solar foram os parâmetros que causaram maior diferenciação nas taxas médias de aumento do consumo em Brasília (Gráfico 22). Os edifícios com orientação Norte e Sul obtiveram menores taxas de aumento que os edifícios com orientação Leste e Oeste, assim como os edifícios com proteção solar obtiveram menores taxas de aumento que os edifícios sem proteção solar, em todos os períodos futuros. Embora a variação do percentual de abertura nas maiores fachadas evidencie um maior aumento no

consumo de energia anual por edifícios com 90% de abertura, esta diferença não foi tão significativa quanto a variação dos outros parâmetros.

Gráfico 22 – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Brasília, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar.

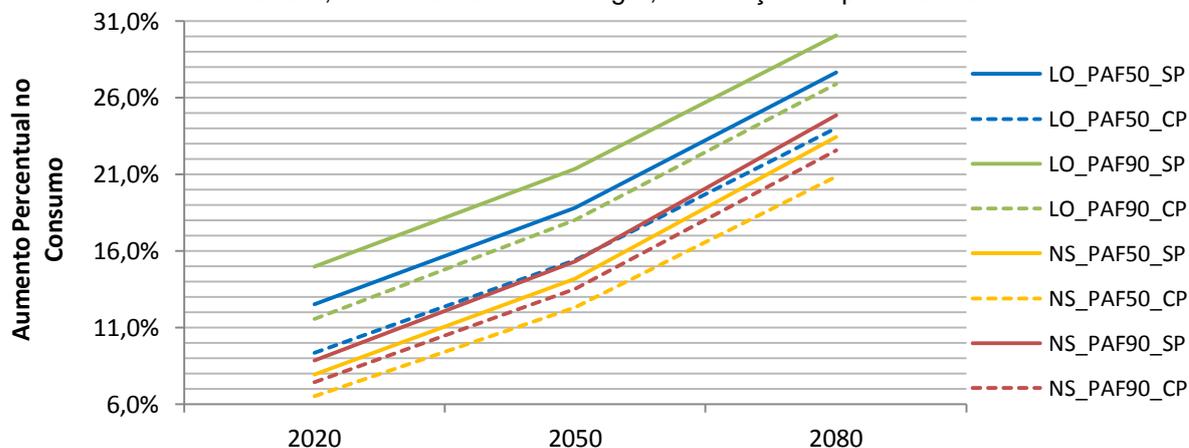


Fonte: A autora.

4.3.3. Porto Alegre

A variação nas taxas de aumento do consumo em Porto Alegre não apresentaram diferenças tão significativas entre si. Entretanto, ao contrário do que ocorreu em Belém e em Brasília, os edifícios com orientação Norte e Sul desprotegidos estão entre os edifícios com as maiores variações da cidade (Gráfico 23, NS_PAF50_SP e NS_PAF90_SP). De acordo com o Gráfico 23, a menor variação das taxas de aumento do consumo ocorreu para o edifício orientado a Norte e Sul, com 50% de abertura e proteção solar nas aberturas (NS_PAF50_CP).

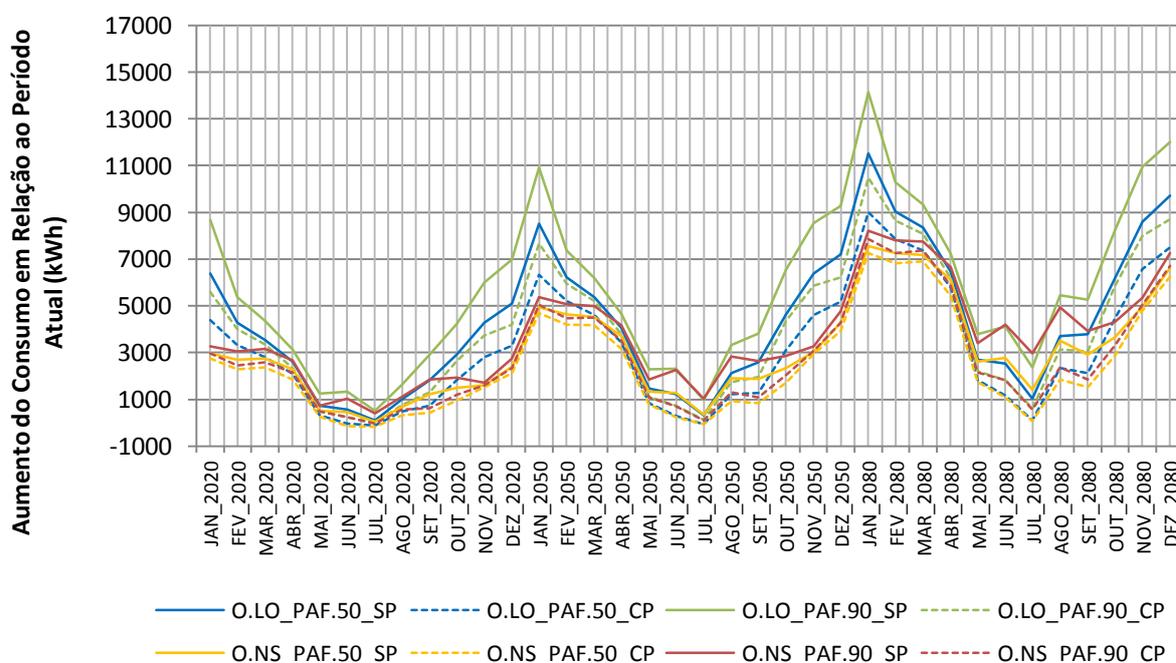
Gráfico 23 – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Porto Alegre, em relação ao período atual.



Fonte: A autora.

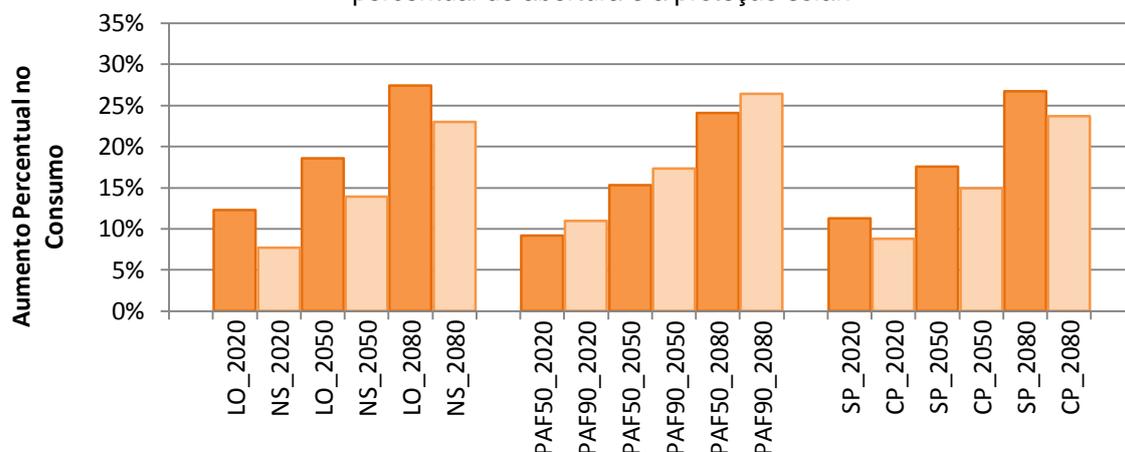
O aumento no consumo de energia em todos os meses do ano, resultado observado na grande maioria das cidades, não ocorreu Porto Alegre. Em alguns modelos, o efeito das mudanças projetadas para o clima reflete numa diminuição no consumo de energia em alguns meses futuros, em relação aos atuais (Gráfico 24). Os edifícios com 50% de abertura e dispositivos de proteção solar (LO_PAF50_CP e NS_PAF50_CP) apresentaram uma diminuição do consumo de energia em junho e julho de 2020, e em julho de 2050. Os edifícios com 90% de abertura e dispositivos de proteção solar (LO_PAF90_CP e NS_PAF90_CP) apresentaram uma diminuição do consumo de energia em julho de 2020.

Gráfico 24 – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Porto Alegre, em relação ao período atual.



Quanto ao impacto das variáveis de teste sobre os resultados, a orientação e a proteção solar foram os parâmetros que provocaram maior diferenciação entre as taxas médias de aumento do consumo (Gráfico 25). Observa-se, entretanto, que a diferença entre as taxas de aumento do consumo de edifícios orientados a Leste e Oeste, em relação aos orientados a Norte e Sul, diminui consideravelmente em 2080. Edifícios com 90% de abertura nas maiores fachadas apresentaram aumento médio no consumo relativamente maior que edifícios com 50% de abertura, em todos os períodos.

Gráfico 25 – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Porto Alegre, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar.

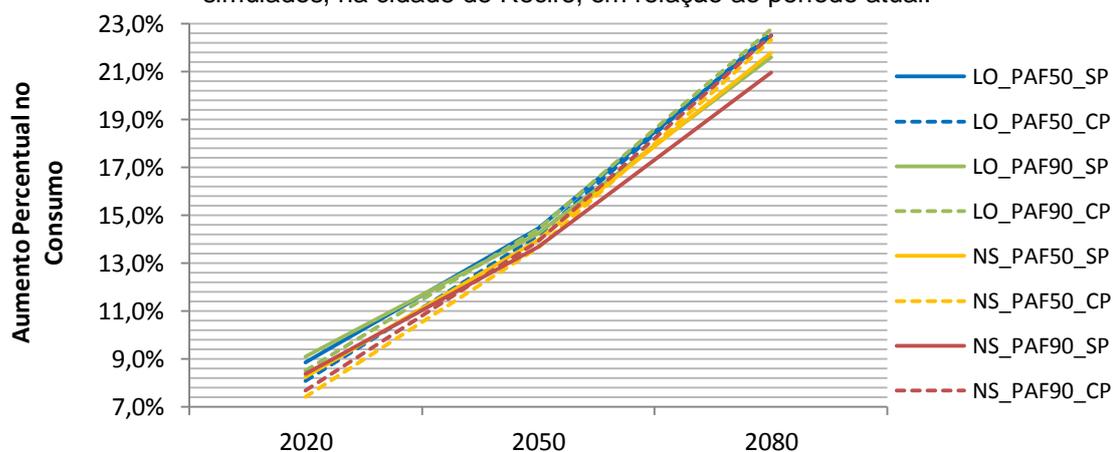


Fonte: A autora.

4.3.4. Recife

Os percentuais de aumento no consumo dos edifícios localizados em Recife se comportam de maneira semelhante, principalmente em 2050 (Gráfico 26). Ainda assim, a ordenação destes percentuais em 2020 não se mantém até 2080, já que as menores e maiores taxas de aumento não correspondem ao mesmo edifício. Ao contrário das outras cidades, o edifício com orientação Leste e Oeste, com 90% de abertura e sem proteção solar (LO_PAF90_SP) obteve uma das menores taxas de aumento do consumo em 2080.

Gráfico 26 – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Recife, em relação ao período atual.

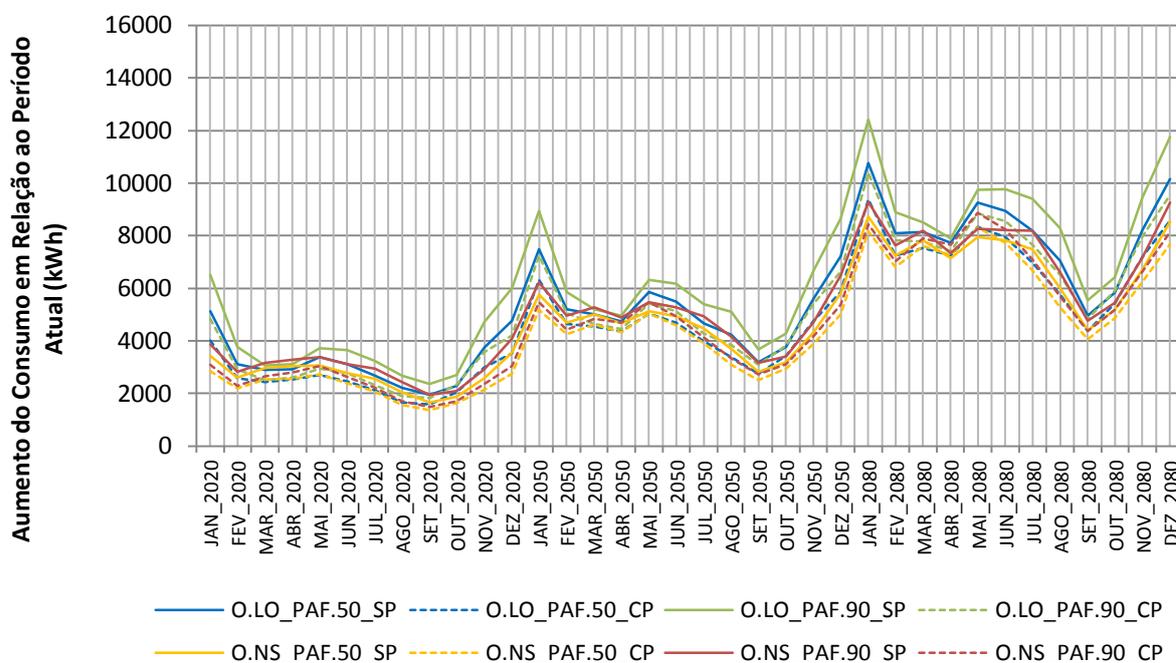


Fonte: A autora.

No Gráfico 27 é possível observar que não ocorrem eventos mensais isolados divergentes do padrão, ou seja, a evolução do consumo conforme se avança do

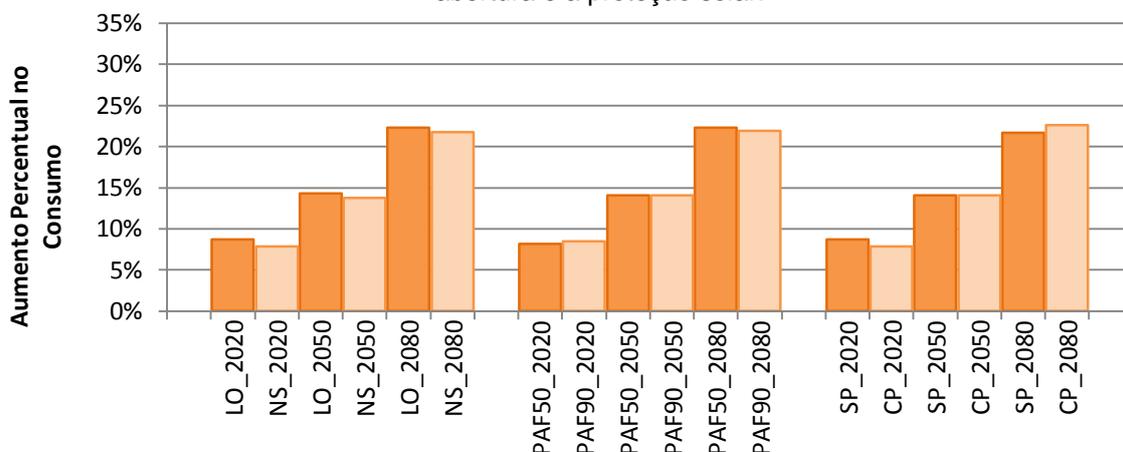
presente para o futuro apresenta um comportamento semelhante, em cada mês, para os períodos futuros analisados.

Gráfico 27 – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Recife, em relação ao período atual.



A respeito do impacto das variáveis de teste sobre os resultados, em Recife tais parâmetros não provocaram diferenciação significativa entre as taxas médias de aumento do consumo, quando comparada às outras cidades (Gráfico 28). Com relação ao percentual de abertura nas maiores fachadas, em 2020, os edifícios com 50% de abertura apresentaram, em média, aumento no consumo relativamente menor que os edifícios com 90% de abertura. Em 2050, esses aumentos médios percentuais se equiparam e, em 2080, os edifícios com 50% de abertura passam a apresentar um aumento médio maior que os edifícios com 90% de abertura. A comparação entre edifícios com e sem proteção solar externa se configura de maneira semelhante ao percentual de abertura na fachada. Em 2020, o percentual de aumento no consumo dos edifícios com proteção solar foi, em média, menor que dos edifícios sem proteção solar. Em 2050, esses aumentos médios se equiparam e, em 2080, os edifícios com proteção solar passam a apresentar aumento médio maior que os edifícios sem proteção solar.

Gráfico 28 – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Recife, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar.

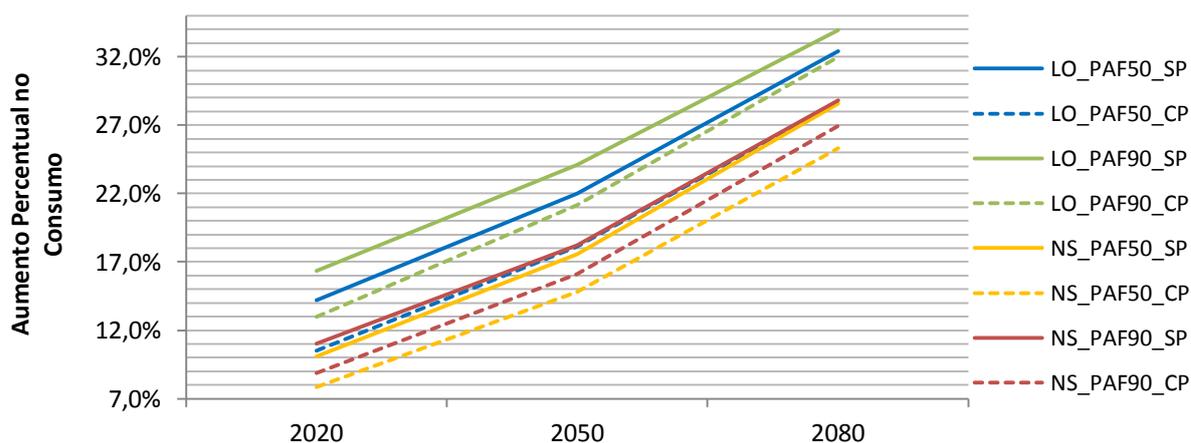


Fonte: A autora.

4.3.5. São Paulo

Os aumentos percentuais no consumo de cada um dos edifícios simulados em São Paulo apresentaram, em 2020, certa distinção, enquanto em 2080 algumas destas taxas tendem a se equiparar (Gráfico 29). É importante ressaltar, porém, que a ordenação dos edifícios em 2020 – da menor até a maior taxa de aumento do consumo – é mantida em 2050 e 2080. Ou seja, as mudanças climáticas provocam alterações relativamente homogêneas sobre os edifícios em São Paulo.

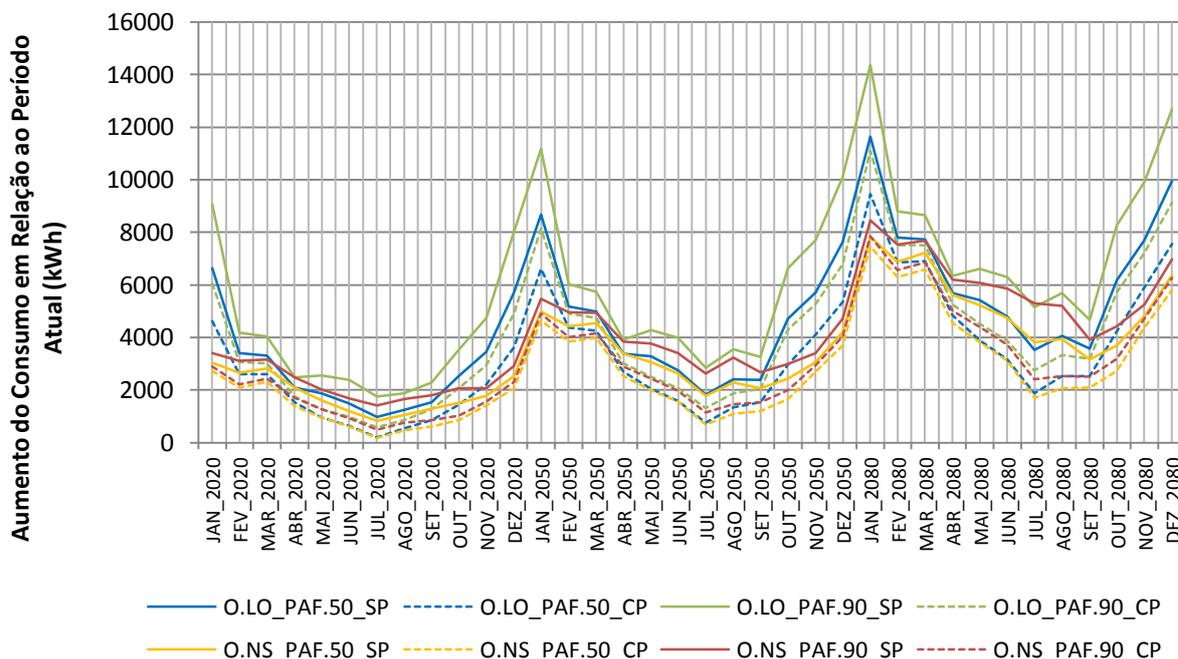
Gráfico 29 – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de São Paulo, em relação ao período atual.



Fonte: A autora.

No Gráfico 30 é possível analisar a evolução mensal do aumento do consumo, observando-se que o avanço do presente para o futuro não revela distinção considerável entre os meses.

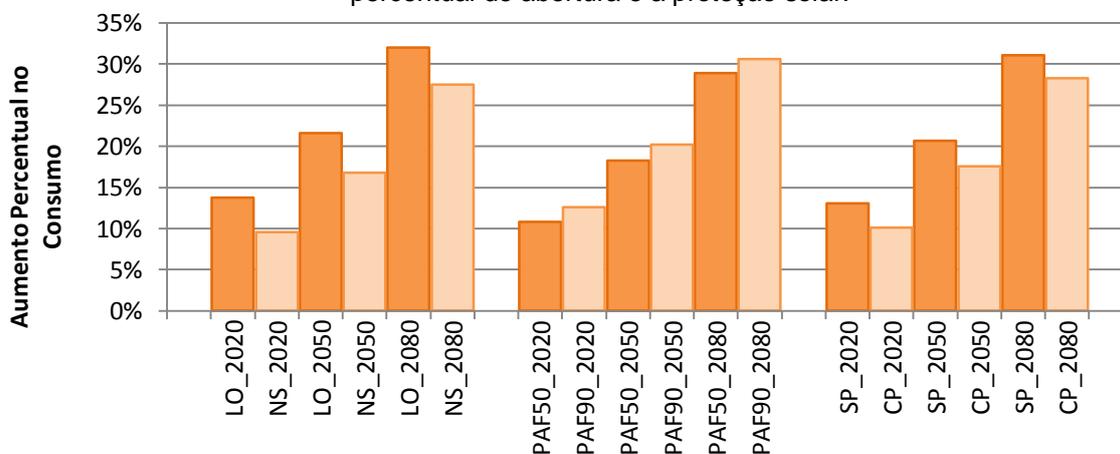
Gráfico 30 – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de São Paulo, em relação ao período atual.



Fonte: A autora.

A variação da orientação provocou maiores diferenças entre as taxas médias de aumento do consumo, observando-se que a utilização de dispositivos de proteção solar também ocasionaram diferenças significativas (Gráfico 31). A análise das diferenças no consumo devidas às alterações no percentual de abertura na fachada demonstra uma tendência de maior aumento no consumo por edifícios com 90% de abertura.

Gráfico 31 – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em São Paulo, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar.

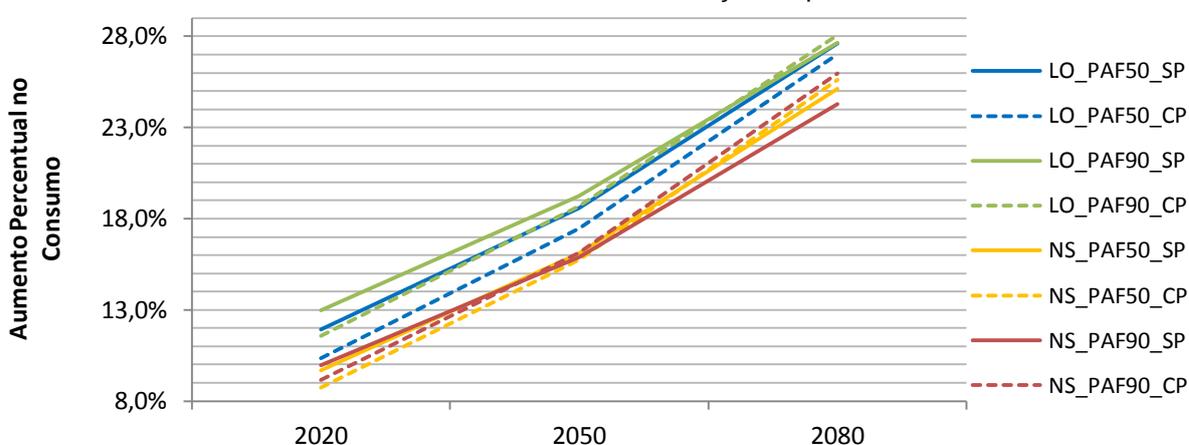


Fonte: A autora.

4.3.6. Vitória

Alguns edifícios apresentaram comportamentos distintos na variação do consumo de energia ao avançar do presente para o futuro em Vitória (Gráfico 32). As maiores variações nas taxas de aumento do consumo ocorreram justamente em edifícios com dispositivos de proteção solar, enquanto os edifícios desprotegidos e com 90% de abertura nas maiores fachadas sofreram as menores variações (LO_PAF90_SP e NS_PAF90_SP).

Gráfico 32 – Percentual de aumento no consumo de energia anual de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Vitória, em relação ao período atual.

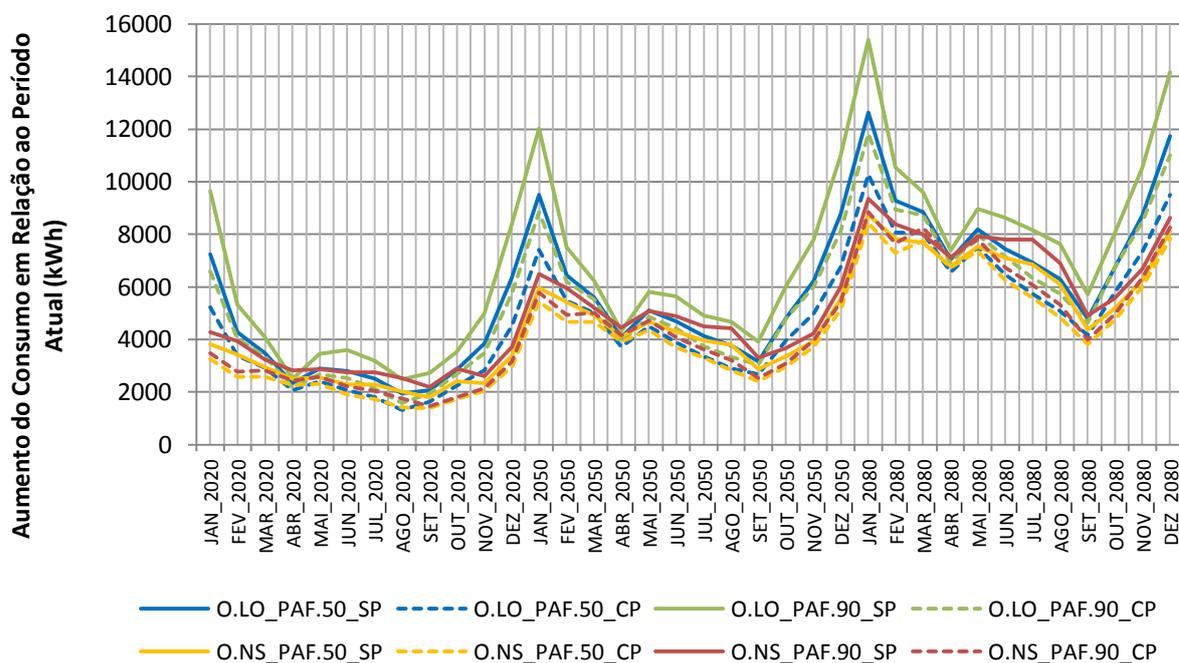


Fonte: A autora.

No Gráfico 33 é possível analisar a evolução mensal do aumento do consumo, observando-se que o avanço do presente para o futuro não revela distinção considerável entre os meses.

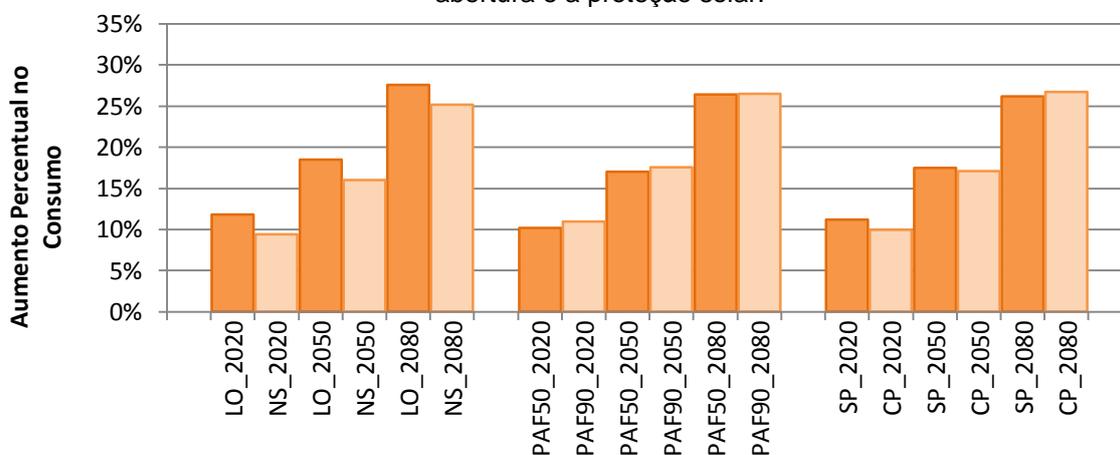
A alteração da orientação causou maior diferença entre as taxas médias de aumento do consumo, em Vitória, que a alteração do percentual de abertura ou a utilização de dispositivos de proteção solar (Gráfico 34). A variação do percentual de abertura na fachada não provoca alterações tão acentuadas, comparativamente, nas taxas de aumento do consumo, sendo que em 2080 estas taxas quase se equiparam. A análise da utilização de dispositivos de proteção solar externa evidencia, também, uma semelhança entre as taxas médias de aumento de edifícios protegidos e desprotegidos. Em 2020 e em 2050, os edifícios desprotegidos apresentaram, em média, maiores taxas de aumento do consumo. Em 2080 essa situação é invertida e edifícios desprotegidos passam a apresentar taxas de aumento, em média, menores que dos edifícios protegidos.

Gráfico 33 – Aumento do consumo de energia mensal de cada um dos oito modelos simulados, na cidade de Vitória, em relação ao período atual.



Fonte: A autora.

Gráfico 34 – Percentual de aumento no consumo de energia em 2020, 2050 e 2080, em relação ao período atual, dos modelos simulados em Vitória, organizados conforme a orientação, o percentual de abertura e a proteção solar.



Fonte: A autora.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fundamentada no princípio de que o sistema climático funciona em estado de equilíbrio não estático, mas dinâmico, esta pesquisa procurou investigar o desempenho termoenergético de edificações quanto às demandas energéticas futuras, considerando-se as projeções de modelos climáticos para o século XXI. Como um esforço para representação das diferentes condições geográficas e socioeconômicas do território brasileiro, foram selecionadas seis cidades, para as quais foram formatados quatro arquivos climáticos: um referente ao clima atual e três referentes a possíveis cenários climáticos futuros. Através do processo de simulação computacional, os consumos de energia de diferentes modelos de edificações foram obtidos e, posteriormente, comparados conforme as configurações de suas características arquitetônicas, também investigadas nesta pesquisa.

Embora um número crescente de estudos a respeito dos impactos das mudanças climáticas sobre edifícios terem sido desenvolvidas recentemente, é elevado o índice de incertezas nesse tipo de pesquisa, seja pela utilização de modelos climáticos de baixa resolução, seja pela dificuldade de prever a real expectativa dos sistemas constituintes de um edifício. Contudo, mesmo ao considerar somente as transformações graduais do clima, as consequências de uma postura negligente em situações de planejamento, execução e renovação de construções, abarcam desde o aumento do consumo energético até o desconforto e o risco de doenças aos usuários no futuro. Essa constatação faz com que alguns autores reforcem o ponto de vista de que toda e qualquer construção deve ser planejada para o futuro e não para o passado (LEE, 2011; ROBERT; KUMMERT, 2012).

Sendo assim, os resultados da aplicação da metodologia descrita no capítulo três mostram, de forma generalizada, um aumento no consumo de energia pelos edifícios de 10,7% em 2020, 16,9% em 2050 e 25,6% em 2080, em relação ao consumo atual. Apesar da significância desse aumento, inclusive para o planejamento energético nacional, aumentos mais expressivos foram registrados em estudos internacionais (WANG; CHEN; REN, 2010; CHAN, 2011b; OUEDRAOGO; LEVERMORE; PARKINSON, 2012), reforçando a necessidade de consideração dos fenômenos climáticos regionais na preparação de dados climáticos futuros.

É importante ressaltar, ainda, que o aumento registrado em 2020 refere-se ao período entre 2011 e 2040, ou seja, o consumo de um edifício real hoje poderia considerar um acréscimo no consumo de energia de aproximadamente 10%, caso a previsão tenha sido simulada com um arquivo climático formatado a partir da série 1961-90.

Com relação à evolução do consumo por cidades, aquelas com as maiores demandas atuais apresentam as maiores demandas também nos períodos futuros. No entanto, isso não representa que seu aumento percentual seja o maior. Ao avançar do período atual para 2080, Belém foi a cidade que sofreu maior aumento no consumo em valores absolutos, aproximadamente 794 mil kWh, e Porto Alegre foi a cidade com o menor aumento, aproximadamente 474 mil kWh. Já em valores relativos, Brasília foi a cidade com os maiores percentuais de aumento e Recife a cidade com os menores percentuais, em todos os períodos.

5.1.Considerações específicas

Quanto ao desempenho dos edifícios considerando-se as diferentes configurações das variáveis arquitetônicas, a partir da ordenação dos edifícios, do menos consumidor ao mais consumidor, foi possível identificar uma considerável semelhança para todas as cidades, em todos os períodos, com discretas variações. O edifício orientado a Leste e Oeste, com 90% de abertura e sem dispositivos de proteção solar apresentou consumo de energia significativamente superior aos outros modelos, em todas as cidades, atual e futuramente.

Ao isolar os resultados dos modelos conforme a orientação, o percentual de abertura nas fachadas e a proteção solar – incluindo-se os edifícios de todas as cidades –, a presença de dispositivos de proteção solar foi a variável com maior impacto para diminuição do consumo. Entretanto, na análise do percentual de aumento do consumo por cidades foi observada uma inversão nesse panorama em algumas cidades, onde os edifícios sem proteção apresentaram maiores taxas de aumento que edifícios protegidos.

A alteração do percentual de abertura nas fachadas não implica em diferenças tão expressivas nas taxas de aumento do consumo, ainda assim, a maioria dos edifícios com 90% de abertura apresentou maior consumo de energia que os edifícios com

50% de abertura. É importante ressaltar, porém, que aumentar o percentual de abertura nas fachadas não significa necessariamente um maior aumento no consumo para o futuro.

Somente a variação da orientação representou comportamentos semelhantes no aumento percentual médio dos grupos, sendo que edifícios orientados a Leste e Oeste tendem a aumentar mais o consumo anual de energia que os edifícios orientados a Norte e Sul em todas as cidades e em todos os períodos futuros. Apesar disso, é necessário salientar que o controle da orientação de edifícios decorre, em muitos casos, de determinações anteriores, principalmente em consequência do desenvolvimento da cidade e do planejamento das principais vias. Atualmente os instrumentos de avaliação da eficiência energética de edifícios no Brasil não consideram diretamente a orientação da edificação para o estabelecimento do nível de eficiência da mesma. Acredita-se, portanto, que estratégias de planejamento urbano, e os respectivos instrumentos que as regulam, devem considerar os impactos ao conforto térmico e à eficiência energética dos edifícios.

A respeito do desempenho dos edifícios por cidade, em Recife, a variação de parâmetros construtivos não provocou diferenças tão significativas nas taxas de aumento do consumo quanto nas outras cinco localidades. Em Belém e em Vitória, as maiores diferenças nessas taxas foram causadas pela alteração da orientação da edificação. Brasília, Porto Alegre e São Paulo mostraram-se sensíveis tanto à alteração da orientação quanto do percentual de abertura nas fachadas.

Ao contrário da grande maioria dos resultados mensais observados, em Porto Alegre ocorreu uma diminuição no consumo de energia em alguns meses de 2020 e 2050. Observando-se a ocorrência dessa diminuição somente em meses de inverno, uma das possíveis justificativas seria a diminuição de horas de desconforto no futuro e, conseqüentemente, menores períodos de utilização da climatização artificial para aquecimento.

5.2.Limitações da pesquisa

O estudo das mudanças climáticas é um campo de pesquisa em si, constituído por cientistas do clima e da terra, além de outros especialistas, cuja preocupação é

centrada na manutenção dos registros climáticos e nas projeções do clima para o futuro. No entanto, a investigação desses eventos futuros é uma questão controversa, mesmo dentro desse campo de pesquisa, e algumas lacunas para compreensão de determinados fatores ainda permanecem. Por mais avançados que sejam os modelos climáticos utilizados para geração das projeções futuras, alguns parâmetros de difícil reprodução ainda são desconsiderados, fazendo com que qualquer estudo utilizando-se desses modelos esteja limitado a um determinado nível de incertezas.

Além disso, modelos climáticos são produzidos, primeiramente, em escala global, sendo que para uma análise regional é necessária a adaptação desses resultados e consideração de fenômenos locais. Países como a Inglaterra e a Austrália têm investido nessa regionalização (GUAN, 2009; EAMES; KERSHAW; COLEY, 2012; WANG; CHEN; REN, 2010; WANG; CHEN; REN, 2011; WILDE; COLEY, 2012), o que possibilita uma diminuição das incertezas nos estudos realizados a partir dessas informações.

Ao contrário de estudos desenvolvidos a partir cenários atuais, esta pesquisa apresenta uma limitação devido à impossibilidade de teste dos resultados, uma vez que é baseada na hipótese de mudanças climáticas futuras e não existem meios para comprovação do que ainda é considerado uma tendência.

5.3.Sugestões para trabalhos futuros

O uso de simulações computacionais como ferramenta auxiliar para a concepção de projetos é uma prática recente e em desenvolvimento, uma vez que muitas das informações de entrada em *softwares* de simulação ainda são investigadas e testadas quanto à sua capacidade de representação da realidade. Os arquivos climáticos utilizados em simulações vêm sendo atualizados por profissionais pesquisadores da área de edificações, a partir de dados obtidos em instituições especializadas em estudo do clima. Porém, a consideração de projeções climáticas futuras na preparação de arquivos climáticos é uma estratégia relativamente recente e requer mais investigações para eliminação das incertezas ainda presentes nesses estudos e possíveis de serem solucionadas. No Brasil, o primeiro obstáculo a ser ultrapassado seria a regionalização das projeções climáticas futuras de forma passível de utilização em *softwares* de simulação termoenergética de edificações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413**: Iluminância de interiores – procedimento. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16.401-3**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas Centrais e Unitários – Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I.; ALVES, L. M.; FERNANDEZ, J. P. R. Relatório 3. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA; SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF; DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007.

BARROS, V. Energia e gerenciamento de água e mudanças globais. In: DINIZ, E. M. **Um Diálogo Interdisciplinar sobre Mudanças Globais**. Relatório Científico da II Conferência Regional sobre Mudanças Globais: América do Sul. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.iea.usp.br/iea/textos/relatorio2confregmudancasglobaisal.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2012.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BELCHER, S. E.; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, 26, p. 49–61, 2005.

BERNABÉ, A. C. A. **A influência da Envoltória no Consumo Energético em Edifícios Comerciais Artificialmente Climatizados na Cidade de Vitória-ES**.

2012. 133 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

BRASIL. Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2001. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/D4059.htm>. Acesso em: 17 maio 2012.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2001. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm> Acesso em: 16 maio 2012.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm> Acesso em: 16 ago. 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. COORDENAÇÃO-GERAL DE MUDANÇAS GLOBAIS DE CLIMA. **Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança no Clima**. Brasília: 2004. Disponível em: <www.mct.gov.br/clima>. Acesso em: 15 jul. 2012.

BRASIL. MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2011**: Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio 2012.

BRASIL. MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**: Análise Retrospectiva. V. 1. Brasília: MME; EPE, 2007. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 19 maio 2012.

BRASIL. MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030**: Eficiência Energética. V. 11. Brasília: MME; EPE, 2007. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 20 maio 2012.

BRUNDTLAND, G. H. (Ed.). **Our Common Future**: The World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 398 p. 1987.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. 2008. 215 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Brasília: CGEE, 2010. Disponível em:

<<http://www.cgee.org.br/busca/ConsultaProdutoNcomTopo.php?f=1&idProduto=6827>>. Acesso em: 20 ago. 2012.

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

CHAN, A. L. S. Developing future hourly weather files for studying the impact of climate change on building energy performance in Hong Kong. **Energy and Buildings**, 43, p. 2860–2868, 2011b.

CONFALONIERI, U. E. C. Mudança climática regional e saúde. In: DINIZ, E. M. **Um Diálogo Interdisciplinar sobre Mudanças Globais**. Relatório Científico da II Conferência Regional sobre Mudanças Globais: América do Sul. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.iea.usp.br/iea/textos/relatorio2confregmudancasglobaisal.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2012.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos**: Conforto Ambiental. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

CPTEC – CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. **Fundo de Oportunidades Globais – Mudanças Climáticas e Programas de Energia**. Boletim do Projeto Uso de Cenários de Mudanças Climáticas Regionais em Estudos de Vulnerabilidade e Adaptação no Brasil e na América do Sul (GOF-UK-CPTEC). Disponível em: <<http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 25 set. 2012.

CRAWLEY, D. B. Creating weather files for climate change and urbanization impacts analysis. **Building Simulation**, p. 1075–1082, 2007.

DESIGNBUILDER SOFTWARE LTD. **DesignBuilder**. Disponível em: <<http://www.designbuilder.co.uk>>. Acesso em: 1 set. 2012.

DIAS, M. A. F. da S. Efeito Estufa e Mudanças Climáticas Regionais. **Revista USP**, 71, p. 44–51, 2006.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 139–154, 2010.

DOE – UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Efficiency and Renewable Energy. **EnergyPlus Energy Simulation Software**. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 15 maio 2012.

DU, H.; EDGE, J.; UNDERWOOD, C. Modelling the impacts of new UK future weather data on a school building. **Building Simulation**, p. 538–545, 2011.

EAMES, M.; KERSHAW, T.; COLEY, D. A comparison of future weather created from morphed observed weather and created by a weather generator. **Building and Environment**, 56, p. 252–264, 2012.

FREITAS, E. D. de; AMBRIZZI, T. Impacto da Rio-92 na produção científica da USP considerando o tópico Mudanças Climáticas. **Estudos Avançados**, 26, p. 341–349, 2012.

FROTA, A. B. **Geometria da Insolação**. São Paulo: Geros, 2004.

GATERELL; M. R.; MCEVOY, M. E. The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. **Energy and Buildings**, 37, p. 982–995, 2005.

GHISI, E.; TINKER, J. An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, 40, p. 51–61, 2005.

GOULART, S.; FIRMINO, S.; LAMBERTS, R. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: PROCEL/Núcleo de Pesquisa em Construção; UFSC, 1998.

GUAN, L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. **Building and Environment**, 44, p. 793–800, 2009.

HANBY, V. I.; SMITH, S. TH. Simulation of the future performance of low-energy evaporative cooling systems using UKCP09 climate projections. **Building and Environment**, 55, p. 110–116, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: 22 ago. 2012.

INCT – INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera**. Disponível em: <http://memoria.cnpq.br/programas/inct/apresentacao/inct_criosfera.htmlhttp://memoria.cnpq.br/programas/inct/apresentacao/inct_criosfera.html - missao>. Acesso em: 25 jan. 2013.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM. **Eficiência Energética – Condicionadores De Ar Split Piso-Teto Com Rotação Fixa Monofásicos – Critérios 2012**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/splitTeto.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2012.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Understanding Climate Change: 22 years of IPCC assessment**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/press/ipcc_leaflets_2010/ipcc-brochure_understanding.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2012.

JANSEN, E.; OVERPECK, J.; BRIFFA, K. R.; DUPLESSY, J. C.; JOOS, F.; MASSON-DELMOTTE, V.; OLAGO, D.; OTTO-BLIESNER, B.; PELTIER, W. R.; RAHMSTORF, S.; RAMESH, R.; RAYNAUD, D.; RIND, D.; SOLOMINA, O.; VILLALBA, R.; ZHANG, D. Palaeoclimate. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. **Climate**

Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.

JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. S.; JAMES, P. A. B. Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. **Energy and Buildings**, 40, p. 2148–2168, 2008.

JENTSCH, M. F. **Climate change world weather file generator:** Technical reference manual for the CCWeatherGen and CCWorldWeatherGen tools. Versão 1.1. Southampton: University of Southampton, 2012. Disponível em: <www.serg.soton.ac.uk/ccworldweathergen>. Acesso em: 14 maio 2012.

JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. S.; JAMES, O. A. B. **Climate change world weather file generator:** Manual. Versão 1.6. Southampton: University of Southampton, 2012. Disponível em: <www.serg.soton.ac.uk/ccworldweathergen>. Acesso em: 15 maio 2012.

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**, 46, p. 1303–1308, 2011.

KOLOKOTRONI, M.; REN, X.; DAVIES, M.; MAVROGIANNI, A. London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. **Energy and Buildings**, 47, p. 302–311, 2012.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes e Coberturas.** Florianópolis. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/catalogo_propriedades_termicas_parede_e_cobertura_out2011_2.pdf>. Acesso em: 25 maio 2012.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos em formato TRY, SWERA, CSV e BIN.** Florianópolis. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-try-swera-csv-bin>>. Acesso em: 15 maio 2012.

LABEEE – LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Relatório 200504** – Processamento de arquivos climáticos para simulação do desempenho energético de edificações. Florianópolis: 2005. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/RT200504.pdf>. Acesso em: 05 maio 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura.** 2. ed. rev. São Paulo: ProLivros, 2004.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; RAMOS, G. (Org.). **Impactos da Adequação Climática Sobre a Eficiência energética e o Conforto Térmico de Edifícios de Escritórios no Brasil.** Florianópolis: LABEEE, 2006.

LE TREUT, H.; SOMERVILLE, R.; CUBASCH, U.; DING, Y.; MAURITZEN, C.; MOKSSIT, A.; PETERSON, T.; PRATHER, M. Historical Overview of Climate Change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.

LEE, T. Changing climate: ersatz future weather data for lifelong system evaluation. **Building Simulation**, p. 633–640, 2011.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. B. **Introdução à química da atmosfera: ciência, vida e sobrevivência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

LOMARDO, L. L. B. **Eficiência Energética nos Edifícios e Sustentabilidade no Ambiente Construído**. Guia Procel Edifica. Rio de Janeiro, 2011.

MARENGO, J. A. Relatório 1. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA; SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF; DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L.; NOBRE, C. A.; PISNITCHENKO, I. Atlas de Cenários Climáticos Futuros para o Brasil (Versão 1.0): Projeções climáticas (precipitação e temperatura) para o Brasil durante a segunda metade do Século XXI usando modelos regionais, nos cenários de baixas emissões (otimista IPCC-B2) e de altas emissões (pessimista IPCC-A2). In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA; SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF; DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Cachoeira Paulista, 2007a.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SALATI, E.; AMBRIZZI, T. Sumário Técnico. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA; SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS – SBF; DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio. **Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade**: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, 2007b.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA, J. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p.47-68, 2005.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Etiquetagem de Eficiência Energética em Edificações**. Rio de Janeiro: Procel/Eletronbras, 2009. Disponível em: <www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 25 maio 2012.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Manual para Aplicação dos Regulamentos: RTQ-C e RAC-C.** Rio de Janeiro: Procel/Eletrobras, 2009. Disponível em: <www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 16 maio 2012.

OUEDRAOGO, B. I.; LEVERMORE, G. J.; PARKINSON, J. B. Future energy demand for public buildings in the context of climate change for Burkina Faso. **Building and Environment**, 49, p. 270–282, 2012.

PMBC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Sumário Executivo do Volume 1** – Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1º Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Volume Especial para a Rio+20. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2012.

PITA, M. F. La climatología como ciencia geográfica. In: CUADRAT, J. M.; PITA, M. F. **Climatología**. 4. ed. Madrid: Ediciones Cátedra, 2006a.

PITA, M. F. Los cambios climáticos. In: CUADRAT, J. M.; PITA, M. F. **Climatología**. 4. ed. Madrid: Ediciones Cátedra, 2006b.

ROBERT, A.; KUMMERT, M. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. **Building and Environment**, 55, p. 150–158, 2012.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. São Carlos: ANTAC, 2012. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/sobre_epw.pdf>. Acesso em: 05 maio 2012.

RORIZ, M. **Uma proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro**. São Carlos: 2012. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/projetos/proposta-de-revisao-do-zoneamento-bioclimatico-brasileiro>>. Acesso em: 15 maio 2012.

SILVA, F. T. ; SCARIONE, P. ; ALVAREZ, C. E. . A influência da rugosidade e porosidade da tipologia urbana na ventilação em área litorânea e a percepção de conforto do transeunte. In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012, Juiz de Fora. **Anais do XIV ENTAC**. São Paulo: ANTAC, 2012. p. 1-10.

TOLMASQUIM, M. As origens da crise energética brasileira. **Ambiente & Sociedade**, 6-7, p. 179–183, 2000.

TRENBERTH, K. E.; JONES, P. D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; KLEIN TANK, A.; PARKER, D.; RAHIMZADEH, F.; RENWICK, J. A.; RUSTICUCCI, M.; SODEN, B.; ZHAI, P. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2. Recife: 2006.

VENÂNCIO, R. **A influência de decisões arquitetônicas na eficiência energética do Campus/UFRN**. 2007. 221 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

VENÂNCIO, R. **Treinamento para o Programa Design Builder**. Natal: Laboratório de Conforto Ambiental – UFRN, [20--].

WANG, X.; CHEN, D.; REN, Z. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. **Building and Environment**, 45, p. 1663–1682, 2010.

WANG, X.; CHEN, D.; REN, Z. Global warming and its implication to emission reduction strategies for residential buildings. **Building and Environment**, 46, p. 871–883, 2011.

WILDE, P. de; COLEY, D. The implications of a changing climate for buildings. **Building and Environment**, 55, p. 1–7, 2012.

WILDE, P. de; TIAN, W. Preliminary application of a methodology for risk assessment of thermal failures in buildings subject to climate change. **Building Simulation**, p. 2077–2084, 2009.

WILDE, P. de; TIAN, W. Towards probabilistic performance metrics for climate change impact studies. **Energy and Buildings**, 43, p. 3013–3018, 2011.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Understanding Climate**. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/themes/climate/understanding_climate.php#b>. Acesso em: 15 maio 2012.