

LETÍCIA GABRIELA ELI

**AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA  
EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR POR MEIO DO REGULAMENTO BRASILEIRO  
DE ETIQUETAGEM**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD.

Coorientadora: Eng. Civil Ana Paula Melo, Dra.

FLORIANÓPOLIS

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Eli, Leticia Gabriela  
Avaliação de Medidas de Eficiência Energética em uma  
Edificação Multifamiliar por meio do Regulamento Brasileiro  
de Etiquetagem / Leticia Gabriela Eli ; orientador, Roberto  
Lamberts, coorientadora, Ana Paula Melo, 2017.  
100 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Eficiência Energética em  
Edificações. 3. Edificação Multifamiliar de Baixa Renda. 4.  
Novo Método de Etiquetagem Brasileiro. I. Lamberts,  
Roberto. II. Melo, Ana Paula. III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Letícia Gabriela Eli

**AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA  
EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR POR MEIO DO NOVO REGULAMENTO  
BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM**

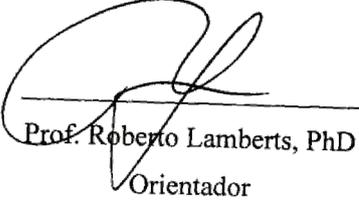
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharela em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Programa Graduação.

Florianópolis, 30 de novembro de 2017.

Profa. Luciana Rohde, Dra.

Coordenadora do Curso

**Banca Examinadora:**



Prof. Roberto Lamberts, PhD  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Civil Ana Paula Melo, Dra.

Coorientadora

Prof. Ricardo Rütther, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família, meu namorado e aos amigos que sempre estiveram comigo e me apoiaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente quero agradecer a Deus, sem Ele nada seria possível.

Agradeço a minha família, meus pais Eloir e Salete, meus irmãos Graziela e Júnior, sem o apoio deles em minhas decisões, em especial de sair de casa e cursar a graduação de engenharia civil, este trabalho não seria possível.

Ao meu namorado Nardel Cassaniga, por estar ao meu lado a cada obstáculo, por me ouvir, me apoiar sempre em todas as minhas decisões, todos os caminhos escolhidos, dizendo que eu era capaz de conseguir, acreditando em mim mais do que eu mesma.

Ao professor Roberto Lamberts, pela orientação neste trabalho, me proporcionando um ano de muito aprendizado. A minha coorientadora Ana Paula Melo, pela dedicação, paciência, por acreditar em meu trabalho e me auxiliar em todos os momentos.

A todos os meus colegas de laboratório, em especial Renata De Vecchi, Greici Ramos e Leonardo Mazzaferro, por me darem suporte técnico e emocional.

A Maria Andrea Triana Montes, por disponibilizar os projetos utilizados neste trabalho.

A minha querida amiga Maria Paula Silveira, agora colega de profissão, por estar sempre ao meu lado, desde os primeiros anos de graduação me acompanhando, me incentivando nos momentos difíceis, não deixando eu desistir.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma me auxiliaram a concluir não só este trabalho, mas toda a minha graduação.

Coisas pequenas tornam-se grandes quando feitas com amor.  
(Autor Desconhecido)

## RESUMO

Este trabalho apresenta como medidas de eficiência energética podem influenciar na demanda de energia para resfriamento de uma edificação multifamiliar de baixa renda. A edificação residencial utilizada foi definida com base no programa do governo federal brasileiro “Minha Casa Minha Vida”. O trabalho explora diferentes medidas de eficiência energética, como diferentes paredes e coberturas; absorvância térmica da envoltória da edificação; sombreamento e aumento do fator de abertura. As análises foram executadas usando os dados climáticos de São Paulo e Salvador. Os resultados de carga térmica anual para resfriamento obtidos por cada medida de eficiência energética foram comparados. O primeiro passo da análise consistiu na avaliação dos resultados obtidos para cada medida de eficiência energética usando o metamodelo presente no Regulamento Brasileiro para Etiquetagem de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Após isto, a análise de retorno financeiro foi aplicada para cada medida de eficiência energética adotada. O segundo passo da análise consistiu na avaliação dos resultados obtidos pelo metamodelo do Regulamento brasileiro e comparação com os resultados obtidos usando o estado da arte de programas de simulação energética para edificações. Os resultados obtidos para o clima da cidade de São Paulo indicaram que a combinação de medidas mais eficiente foram o uso de isolante térmico nas paredes e cobertura, baixa transmitância térmica e sombreamento. Para o clima de Salvador foram obtidos os mesmos resultados, com exceção do uso de isolamento térmico nas paredes. Além disso, o metamodelo apresentou diferenças significativas comparado com a simulação para a edificação residencial analisada. O metamodelo pode requerer melhorias para indicar devidamente o correto consumo de energia da envoltória da edificação.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética em Edificações. Novo Regulamento Brasileiro de Etiquetagem Residencial. Edificações de Baixa Renda.

## ABSTRACT

This paper reports how energy efficiency measures may influence on the cooling energy demand of a low incoming multifamily residential building. The residential building was defined based on a Brazilian federal government program “*Minha Casa Minha Vida*”. This paper explores different measures of energy efficiency, such as different walls and roof construction; thermal absorptance of building envelope; shading and window opening factor. The analyses were carried out using the weather data for São Paulo e Salvador. The annual thermal load for cooling achieved using each energy efficiency measures was then compared. The first step of the assessment consisted on evaluating thermal load results of each measures using the metamodel presented in the Regulation for Energy Efficiency Labeling of Residential Buildings in Brazil. Therefore, a payback analysis was applied for each energy efficiency measure adopted. The second step of the assessment consisted on applying the Brazilian regulation metamodel to evaluate its results, and compare the results with those obtained using a state of the art building energy simulation program. The results obtained for the weather data of São Paulo indicate that the mostly efficiently measure combined the use of thermal insulation on wall and roofs, low thermal transmittance and shading. The results obtained for the weather data of Salvador were the same, except for the use of thermal insulation on the walls. Moreover, the metamodel was found to yield significant difference with the building energy simulation results for the residential building analyzed. The metamodel may require improvements to properly indicate the actual energy performance of residential building envelopes.

**Key-Words:** Building Energy Efficiency. New Brazilian Residential Labeling Regulation. Low Income Building.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo de eletricidade por uso final no setor residencial em TWh .....	22
Figura 2 - Perspectiva edificação multifamiliar. ....	40
Figura 3 - Planta baixa edificação multifamiliar formato H, caso base. ....	40
Figura 4 – Consumo em kWh/m <sup>2</sup> ano do caso base por ambiente de permanência prolongada nas unidades habitacionais de São Paulo.....	52
Figura 5 - Consumo em kWh/m <sup>2</sup> ano do caso base por ambiente de permanência prolongada nas unidades habitacionais de Salvador.....	53
Figura 6 – Comparação entre os consumos das unidades habitacionais de São Paulo e Salvador.....	54
Figura 7 - Consumo de energia elétrica para refrigeração do caso base e referência em São Paulo .....	55
Figura 8 – Classificação de eficiência energética das UHs do caso base em São Paulo .....	56
Figura 9 - Consumo de energia elétrica para refrigeração do caso base e referência em Salvador.....	56
Figura 10 - Classificação de eficiência energética das UHs do caso base em Salvador .....	57
Figura 11 – Consumo das unidades habitacionais em São Paulo com a aplicação das MEEs. ....	58
Figura 12 - Consumo das unidades habitacionais em São Paulo com a mudança de absorvância.....	59
Figura 13 - Consumo das unidades habitacionais em Salvador com a aplicação das MEEs.....	60
Figura 14 - Consumo das unidades habitacionais em Salvador com a mudança de absorvância.....	60
Figura 15 - Consumo das unidades habitacionais em São Paulo com a aplicação das MEEs com relação à condição de referência.....	61
Figura 16 - Consumo das unidades habitacionais em Salvador com a aplicação das MEEs com relação à condição de referência.....	62
Figura 17 – Demanda de energia elétrica das UHs em São Paulo para caso base e com a implantação dos pacotes de MEEs.....	71

Figura 18 - Demanda de energia elétrica das UHs em Salvador para caso base e com a implantação dos pacotes de MEEs .....	71
Figura 19 – Consumos dos pacotes ideais em São Paulo.....	76
Figura 20 - Consumos dos pacotes ideais melhorados em São Paulo.....	78
Figura 21 - Consumos dos pacotes ideais em Salvador .....	79
Figura 22 – Comparação entre os consumos para o pacote de medidas 5 com veneziana na sala e sem veneziana na sala para São Paulo e Salvador .....	81
Figura 23 – Planta baixa pavimento cobertura.....	82
Figura 24 – Modelo para simulação computacional da UH A do pavimento cobertura .....	82
Figura 25 - Comparação resultados simulação computacional e metamodelo para o caso base.....	83
Figura 26 - Comparação resultados da simulação computacional e metamodelo para os pacotes ideais .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Área útil de cada ambiente das UHs do caso base. ....	41
Tabela 2 - Características térmicas componentes construtivos .....	41
Tabela 3 – Informações aberturas dos ambientes das unidades habitacionais. ....	42
Tabela 4 – Medidas de eficiência energética aplicadas no caso base. ....	44
Tabela 5 – Características edificação caso base e de referência .....	46
Tabela 6 - Área de fachada e abertura das UHs por orientação .....	47
Tabela 7 – Escala de classificação de eficiência energética da envoltória.....	49
Tabela 8 – Equações para análise financeira.....	50
Tabela 9 – Consumo anual, em reais, das unidades habitacionais de São Paulo/SP e Salvador/BA .....	55
Tabela 10 – Classificação de eficiência energética para as medidas aplicadas no caso base para São Paulo e Salvador .....	64
Tabela 11 – Custos de implantação referentes ao caso base e a aplicação de medidas de eficiência energética .....	66
Tabela 12 – Custos de implantação das medidas de eficiência energética e sua classificação.....	67
Tabela 13 – Classificação de eficiência energética dos pacotes de medidas testados. ....	68
Tabela 14 – Melhorias nos pacotes de medidas de eficiência energética para Salvador .....	69
Tabela 15 – Pacotes de medidas de eficiência energética para São Paulo .....	70
Tabela 16 - Pacotes de medidas de eficiência energética para Salvador.....	70
Tabela 17 – Custos de implantação e gasto anual com energia elétrica dos pacotes de medidas aplicados em São Paulo.....	72
Tabela 18 - Custos de implantação e gasto anual com energia elétrica dos pacotes de medidas aplicados em Salvador.....	72
Tabela 19 – TIR e <i>payback</i> dos pacotes de medidas aplicados em São Paulo.....	73
Tabela 20 – Pacotes ideais de medidas de eficiência energética para as edificações em São Paulo e Salvador .....	74
Tabela 21 – Classe de eficiência energética dos pacotes ideais aplicados em São Paulo e porcentagem de economia com relação a edificação de referência .....	75

Tabela 22 - Classe de eficiência energética dos pacotes ideais aplicados em Salvador e porcentagem de economia com relação a edificação de referência .....	76
Tabela 23 - Classe de eficiência energética dos pacotes ideais melhorados aplicados em São Paulo e porcentagem de economia com relação a edificação de referência .....	77
Tabela 24 – Gastos anuais em reais para resfriamento das edificações em São Paulo e Salvador .....	79
Tabela 25 – Consumo para resfriamento em reais com relação ao metamodelo e a simulação .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APP – Ambiente de Permanência Prolongada

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

bEQ – *Building Energy Quocient*

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

CgT – Carga Térmica

COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

COP – Coeficiente de Performance

E+ - *EnergyPlus*

EPS – Poliestireno Expansível

EMS – *Energy Management System*

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GCL – Grupo Climático

HIS – Habitações de Interesse Social

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*

MCMV – Minha Casa Minha Vida

MEE – Medida de Eficiência Energética

NBR – Norma Brasileira

PHOC<sub>T</sub> – Percentual de Horas Ocupadas com Conforto Total

PIS – Programa de Integração Social

PNE – Plano Nacional de Energia

RAC – Requisitos de Avaliação da Conformidade de Eficiência Energética de Edificações

RNA – Redes Neurais Artificiais

RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

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

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SUSHI – *Sustainable Social Housing Initiative*

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

VPL – Valor Presente Líquido

UH – Unidade Habitacional

VRV – Fluxo de Gás Refrigerante Variável (condicionamento de ar)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	19
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>21</b>
2.1	CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES.....	21
2.2	DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS 23	
<b>2.2.1</b>	<b>Medidas de eficiência energética.....</b>	<b>27</b>
2.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	29
2.4	O ESTADO DA ARTE DO DESENVOLVIMENTO DE METAMODELOS.....	31
2.5	ANÁLISE DE RETORNO FINANCEIRO .....	34
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
<b>3</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>39</b>
3.1	CASO BASE .....	39
3.2	MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA CONSIDERADAS .....	42
3.3	REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA O NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS .....	45
<b>3.3.1</b>	<b>Avaliação da eficiência energética da envoltória da unidade habitacional.....</b>	<b>49</b>
3.4	ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA .....	49
3.5	COMPARAÇÃO MÉTODO SIMPLIFICADO E SIMULAÇÃO .....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
4.1	CASO BASE.....	52
4.2	APLICAÇÃO DAS MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CASO BASE	57

4.3	PACOTE IDEAL DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA A EDIFICAÇÃO.....	67
4.4	EDIFICAÇÃO FINAL.....	74
<b>4.4.1</b>	<b>Adoção de veneziana em todos os ambientes de permanência prolongada .....</b>	<b>80</b>
4.5	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CARGA TÉRMICA PARA RESFRIAMENTO: METAMODELO <i>VERSUS</i> SIMULAÇÃO.....	81
4.6	LIMITAÇÕES DO METAMODELO.....	85
4.7	QUANTO AO USO .....	85
4.8	QUANTO A ELABORAÇÃO DA FERRAMENTA.....	86
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>88</b>
5.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....	90
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	90
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXO A – COMPONENTES SINAPI.....</b>	<b>100</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo o Balanço Energético Nacional do ano de 2015 (EPE, 2016a), a demanda de energia elétrica, para o setor de edificações no Brasil, foi de 50,72% do total produzido, sendo o setor residencial o responsável por consumir a maior parcela, com 25,12%, e segundo levantamentos, este percentual vem aumentando aproximadamente 0,50% ao ano.

Medidas para auxiliar o planejamento energético nacional, garantindo a infraestrutura necessária para suprir o aumento da demanda de eletricidade e estimular o desenvolvimento econômico, começaram a ser tomadas no ano de 2001, após o racionamento de energia elétrica.

A falta de planejamento econômico do governo, que não investiu de forma adequada na área de geração e distribuição de energia, juntamente com a escassez de chuvas ocorrida em 2001 afetaram a produção de energia nas hidrelétricas, principal fonte no Brasil (GLOBO, 2017). Buscando soluções para a crise no setor de energia, em outubro de 2001 foi promulgada a Lei nº 10.295, chamada de “Lei da Eficiência Energética”, e posteriormente assinado o Decreto nº 4.059 em dezembro do mesmo ano, onde ficou estabelecido que equipamentos elétricos, máquinas e edificações devem obedecer a índices máximos de consumo e mínimos de eficiência energética (BRASIL, 2001a; BRASIL, 2001b).

Em 2004, o governo instituiu a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), através da Lei nº 10.847/2004, com o objetivo de auxiliar no planejamento do setor energético brasileiro. A EPE tornou-se a empresa estatal responsável por apresentar ao Estado as pesquisas referentes ao consumo de energia. (BRASIL, 2004). Em 2007, a EPE lançou a primeira coletânea de estudos sobre a demanda de energia até o ano de 2030, chamada de Plano Nacional Energético 2030 (PNE 2030). Nas pesquisas foram considerados fatores como: aumento populacional, investimento em energias renováveis e mudanças socioeconômicas (BRASIL, 2007). Em 2015, seis anos após a publicação do PNE 2030, foi lançado o Plano Nacional Energético 2050 (PNE 2050), com as mesmas diretrizes, porém com projeções até o ano de 2050. Este plano considera um cenário atualizado de demanda, atribuído a fatores como: avanços tecnológicos, eficiência energética de equipamentos, mudanças no regime de chuvas e escassez de água para abastecimento de hidrelétricas (BRASIL, 2015).

Dentre as projeções lançadas pelo PNE 2050 (2015), está o aumento da demanda de energia elétrica para as edificações residenciais, justificado principalmente pelo crescimento da população brasileira, aliado às facilidades de compra e aumento do poder aquisitivo.

O aumento da demanda de energia elétrica para edificações residenciais é influenciado também pela forma em que a construção civil elabora os projetos atualmente. Segundo pesquisa realizada por Montes (2016), o programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), lançado pelo governo federal no ano de 2009 com o objetivo de incentivar a construção de habitações para a população de baixa renda, apresenta milhares de habitações construídas, porém os projetos não incluem uma análise do clima da região em que ele será implantado, sendo construídos da mesma forma de norte a sul do país. Dessa maneira, durante a fase de uso da edificação, a pesquisa apontou que em diversas regiões do país, o usuário apresentará desconforto, em especial por calor, e assim investirá em equipamentos de climatização aumentando o consumo de energia elétrica da residência.

Para que as edificações residenciais se tornem mais econômicas durante a sua fase de ocupação, é necessário que medidas de eficiência energética (MEEs) sejam incorporadas de acordo com o clima da região de implantação, tais como: aplicação de componentes construtivos mais adequados, uso de sistemas corretamente dimensionados, uso da ventilação natural (FERREIRA; ALMEIDA; RODRIGUES, 2016). As aplicações de medidas, como as citadas anteriormente, acabam não sendo efetuadas devido ao maior custo inicial, falta de conhecimento sobre os benefícios da sua aplicação e falta de profissionais capacitados.

Em contrapartida ao custo e complexidade de aplicação, algumas medidas simples como a alteração das cores das fachadas e cobertura, escolha de um melhor *layout* ainda na fase de projeto, utilização de arborização para sombreamento das fachadas, favorecimento à ventilação natural, auxiliam de forma a melhorar o desempenho térmico da edificação (HAMDY; HASAN; SIREN, 2013; CBCS, 2010). Estas são MEEs de baixo ou igual custo quando comparadas com o que é usualmente aplicado nas edificações. Uma forma de justificar e apresentar ao usuário as vantagens de escolher determinadas estratégias para o projeto é apresentar o estudo do *payback* da edificação.

O *payback* é uma forma de calcular o tempo de retorno que medidas consideradas em um projeto retornarão ao investidor, seja retorno financeiro e/ou energético. Esta análise é constantemente empregada em estudos de viabilidade de implantação de tecnologias, como por exemplo o aproveitamento de água pluvial, a utilização de aquecimento de água por energia solar, o uso de diferentes materiais na envoltória e substituição de vidros comumente utilizados

por outros considerados mais eficientes (MARINOSKI; GHISI, 2008; NASPOLINI; RÜTHER, 2012).

Alguns estudos aliam a simulação computacional com o estudo do *payback*, de forma a não somente avaliar o desempenho da edificação e sua economia de energia, mas também tornar possível analisar quais as estratégias mais viáveis financeiramente, visto que, mesmo trazendo menores consumos de eletricidade, determinado componente pode não ser viável economicamente, pois demorará muitos anos a se pagar e o usuário por vezes não terá o retorno do seu investimento em um prazo razoável. Porém, como a simulação computacional possui elevada complexidade, foram criados os metamodelos, que são formas de tornar a predição de resultados mais prática. Os metamodelos são desenvolvidos a partir de diversas simulações, onde seus dados de entrada e saída são anexados a uma inteligência artificial (redes neurais, por exemplo), capaz de aprender com as análises e predizer resultados com elevada precisão. Esses metamodelos são capazes de predizer resultados como carga térmica para resfriamento, como é o caso de um dos metamodelos construídos para o método simplificado do novo regulamento brasileiro de etiquetagem.

Frente a isso, o presente trabalho tem por objetivo analisar o impacto da aplicação de medidas de eficiência energética em uma edificação multifamiliar localizada nas cidades de São Paulo/SP e Salvador/BA, por meio do metamodelo desenvolvido para o novo regulamento de etiquetagem de edificações residenciais. Com base nos resultados obtidos, é analisado o *payback* da edificação com a aplicação das MEEs.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é analisar o uso de medidas de eficiência energética na envoltória de uma edificação multifamiliar de baixa renda localizada na cidade de São Paulo e Salvador, por meio do método simplificado da nova proposta de Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R).

### 1.2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- Calcular o consumo de energia elétrica e classe de eficiência energética das unidades habitacionais da edificação multifamiliar base e com a aplicação de cada medida, através do método simplificado da proposta de novo RTQ-R;
- Comparar medidas de eficiência energética, a fim de escolher o pacote ideal a ser aplicado na edificação;
- Analisar o retorno do investimento, *payback* corrigido, para verificar em quanto tempo cada medida de eficiência energética e o pacote ideal irão se pagar;
- Comparar os resultados obtidos para consumo de energia elétrica para resfriamento de uma unidade habitacional, através do método simplificado e de simulação da nova proposta de RTQ-R.

## 2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### 2.1 CONSUMO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES

Com o crescimento populacional e as tecnologias cada vez mais acessíveis, a energia consumida no mundo cresce a cada ano. Fossati et al. (2016) indicam que o crescimento da demanda energética é realidade tanto em países desenvolvidos quanto subdesenvolvidos, sendo que em grande parte do mundo o setor de edificações residenciais é responsável por consumir um terço da demanda, tornando o consumo de energia e busca por construções mais eficientes um dos temas mais debatidos nas últimas décadas. Kapsalaki, Leal e Santamouris (2012), por exemplo, procuraram desenvolver um método para avaliação de casas autossuficientes em energia, utilizando como motivação o consumo atual das residências nos países desenvolvidos, onde segundo eles, a demanda de energia oscila entre 30% e 40%, sendo em sua maioria eletricidade, e dessa forma, o setor é o responsável por grande parte da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

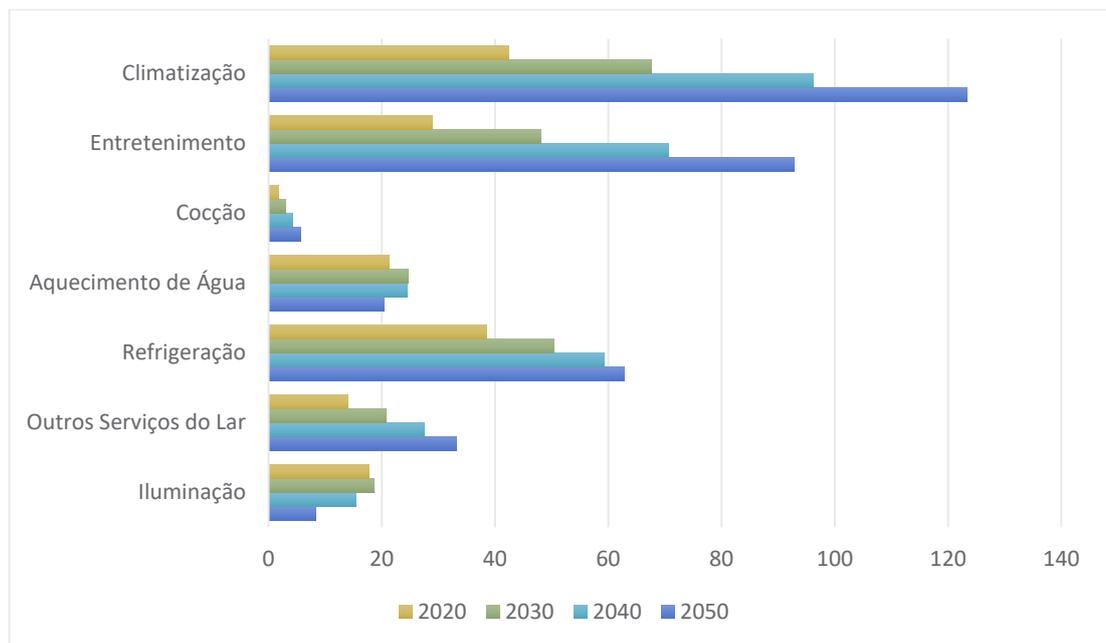
Nas edificações residenciais, as fontes de energia que mais apresentam crescimento no consumo são a eletricidade e o gás natural, sendo a energia elétrica a que apresenta a maior demanda (EIA, 2017). Isto ocorre devido ao aumento da temperatura ao longo dos anos, levando a uma maior necessidade de climatização dos ambientes, aliada ao aumento do poder aquisitivo da população e facilidade de pagamento dos equipamentos, tornando a população de baixa renda capaz de investir para melhorar o seu conforto. Segundo dados da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) (2015), em 2014 somente 18% das residências brasileiras possuíam ar condicionado, e a perspectiva era de aumento nas vendas para os anos subsequentes tendo como principal mercado a região sudeste. Dados do PNE 2050 também demonstram que a posse de ar condicionados irá aumentar, segundo as projeções e levantamentos, em 2012 a posse era de 0,23 equipamentos por domicílio, e no ano de 2050 passará a ser 1,23/domicílio (EPE, 2016b).

Analisando as projeções do PNE 2050, a demanda de eletricidade por parte do setor residencial é dividida nos usos: climatização, entretenimento, cocção (preparo de alimentos e bebidas), aquecimento de água, refrigeração, outros serviços do lar e iluminação. Os critérios utilizados para a estimativa de consumo levam em consideração aumento do poder aquisitivo, redução do número de habitantes por domicílio e maior eficiência dos equipamentos. Cabe ressaltar que este estudo não considera o aquecimento global nas suas projeções. A justificativa

para isto é que as medidas que estão sendo aplicadas internacionalmente para conter as emissões de CO<sub>2</sub> trarão resultados positivos até 2050.

Na Figura 1 estão os valores de consumo em TWh divididos por usos do setor residencial. Transformando estes dados em porcentagens, o uso que apresentará maior aumento na demanda até 2050 é o de entretenimento, com 221% em relação a 2020. A justificativa para isto é a facilidade de acesso a equipamentos como smartphones, notebooks, vídeo games, televisão. O uso que apresentou queda no consumo de 2020 até 2050 foi o de iluminação, com uma redução de 53% na participação da demanda de energia elétrica das residências. Isto se dá pelo aumento na eficiência das lâmpadas que passam a consumir menos energia. No uso voltado à climatização, maior parcela na demanda total, a participação no consumo de eletricidade nas residências brasileiras crescerá 191%, comparando 2020 com 2050. Quando analisado o consumo total do setor residencial, o aumento na demanda de energia ficará por volta de 110%.

Figura 1: Consumo de eletricidade por uso final no setor residencial em TWh



Fonte: Adaptado de Demanda de Energia 2050 (EPE, 2016b).

O estudo de Invidiata e Ghisi (2016), aponta que até o ano de 2050 ocorrerá um aumento entre 56% e 112% na demanda para resfriamento e aquecimento da mesma residência unifamiliar construída nas cidades de Curitiba, Florianópolis e Belém. Na pesquisa foram realizadas as seguintes considerações: aumento da temperatura aliado às mudanças climáticas, aplicação de medidas de eficiência energética na envoltória, modelo do conforto adaptativo da ASHARE 55 que estipula temperaturas limites de conforto térmico, e possibilidade de utilizar

ventilação natural na residência. Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa, citados anteriormente, com as considerações apresentadas pelo PNE 2050, os resultados de ambas as projeções podem ser analisados em conjunto, visto que uma projeção complementa a outra. Dessa forma o aumento na demanda voltada à climatização até 2050 pode ser considerado variando entre 247% até 303%.

## 2.2 DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

Uma edificação eficiente é aquela que, comparada com outra edificação não eficiente, atende da mesma forma as exigências do usuário, porém com um menor consumo energético (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Para que este conceito de edificação se torne mais presente no cotidiano da construção civil, são necessárias mudanças desde a fase de concepção de projeto, até a sua execução e uso.

Com a necessidade de se desenvolver economicamente e ao mesmo tempo poupar energia, diversos países investiram em pesquisas envolvendo a eficiência energética das edificações. No ano de 1953 foi criada a associação *Council International for Buildings* (CIB) de forma a estimular a cooperação entre pesquisas sobre edificações e construção civil entre diversos países. Porém somente pesquisas não são suficientes para garantir o desempenho básico das edificações, assim como forma de verificar que o setor da construção civil está atendendo aos critérios de desempenho térmico e eficiência energética, por exemplo, é aplicando normativas, avaliando e classificando a edificação.

As primeiras normas para avaliação do desempenho energético das edificações começaram a surgir em 1970 nos países desenvolvidos, e até os dias atuais estes países, em especial os de climas frios, são os que mais adotam as avaliações, que em sua maioria são obrigatórias (LIU; MEYER; HOGAN, 2010). Nos Estados Unidos em 1975 foi lançada pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) a primeira versão da norma ASHRAE 90.1, que conta atualmente com revisão e lançamento atualizado a cada três anos, sendo a última versão disponibilizada em 2016 (ASHRAE, 2016). A norma norte americana, traz os requisitos mínimos de eficiência energética para edificações, com exceção daquelas consideradas pequenas residências (residências unifamiliares ou multifamiliares de até três pavimentos). Entre os critérios e sistemas avaliados estão a envoltória, iluminação, climatização e ventilação, aquecimento de água, sistemas mecânicos possivelmente instalados e outros equipamentos.

Os estudos referentes ao desempenho térmico e energético das edificações começaram também na década de 70 na União Europeia, mas foi no ano de 2007 que surgiu a primeira versão da diretiva europeia sobre eficiência energética. A nova versão desta diretiva foi lançada no ano de 2010, tendo como objetivo promover a melhoria da eficiência energética nas edificações e entre as metas, tornar até o final de 2020 todas as novas edificações com necessidade quase nula de energia (UE, 2010).

No Brasil, a preocupação em poupar energia começou a partir do ano de 2001, com a promulgação da Lei da Eficiência Energética, incentivo do governo para a implementação das pesquisas envolvendo o desempenho energético de diversos produtos, entre eles as edificações (BRASIL, 2001). Em 2005, como tentativa de trazer para o mercado o atendimento de requisitos mínimos de desempenho térmico nas edificações, foi lançada a NBR 15220, que apresenta as diretrizes construtivas para as edificações residenciais de interesse social (ABNT, 2005). A norma dividiu o país em oito zonas bioclimáticas, agrupando cidades com características climáticas semelhantes e definindo as estratégias para ventilação natural, sombreamento de aberturas e propriedades térmicas dos materiais da envoltória.

Em 2008, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a NBR 15575, com o objetivo de garantir o atendimento dos desempenhos mínimos das edificações residenciais e entre estes requisitos a serem atendidos foi incluído o desempenho térmico, utilizando como base a norma anterior NBR 15220 (ABNT, 2013). A NBR 15575 é dividida em seis partes, sendo o desempenho térmico abordado nas partes 1, 4 e 5, onde a norma traz os critérios mínimos a serem atendidos pela edificação de acordo com a sua zona bioclimática e indica três procedimentos para a avaliação: simplificado, simulação e medição, este último somente informativo. No método simplificado, são verificadas as características dos materiais utilizados nas paredes e cobertura; no procedimento de simulação computacional indicado na norma, é avaliada a edificação como um todo; já a avaliação através de medição é realizada com a edificação construída, *in loco*. A norma NBR 15575 foi revisada em 2013, e passou a ser obrigatória desde então.

Como forma de apoiar e incentivar as melhorias propostas pelas normativas, diversos países, em especial os mais desenvolvidos, passaram a lançar programas de certificação, a fim de mensurar o quão eficiente a edificação se torna com a adoção de diretrizes de eficiência energética. Nos EUA, após o lançamento da ASHRAE 90.1, começaram a surgir os mais variados sistemas de certificação de edificações. O de maior destaque é o *Leadership in Energy and Environmental Design*, popularmente conhecido como LEED. Lançado na década de 90, este selo está presente em centenas de países e a avaliação considera diversos critérios além da

eficiência energética do empreendimento (USGBC, 2017). Ainda nos EUA, em 2011 foi apresentada a etiqueta do Programa *Building Energy Quocient* (bEQ), que ao contrário do selo LEED, apresenta em destaque a classificação energética dos edifícios comerciais, utilizando como escala o conceito de A até F, sendo A a classificação para as edificações que autoproduzem sua demanda de energia (Lopes et. al, 2016). Na Europa, no mesmo período que os EUA, foram lançadas etiquetas com o mesmo objetivo da bEQ, o de classificar a eficiência energética das edificações. Em Portugal no ano de 2007, por exemplo, foi lançado o Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que emite etiquetas para as edificações portuguesas, com classificação variando de A (máximo) até G (mínimo), e como regra as edificações novas devem atender no mínimo classe B- de eficiência.

Em países em desenvolvimento, as pesquisas para a implantação de etiquetas de avaliação da eficiência energética das edificações surgiram por volta de 1990, mas com baixos incentivos e em sua maioria constituindo de avaliações voluntárias, onde poucas edificações passam pelo processo de classificação da sua eficiência (FOSSATI et. al, 2016). Nestes países, a maioria dos regulamentos para avaliação da eficiência energética das edificações residenciais avaliam os sistemas de climatização, aquecimento de água, iluminação e envoltória.

A etiqueta de eficiência energética brasileira foi oficialmente lançada no ano de 2009, onde foi apresentado o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, conhecido como RTQ-C, e após dois anos foi divulgado o RTQ-R, destinado às edificações residenciais (BRASIL, 2010; BRASIL, 2012). Os regulamentos expõem as diretrizes para emissão da etiqueta nacional de conservação de energia (ENCE), que traz em uma escala, de A (máximo) até E (mínimo), o nível de eficiência energética das edificações no Brasil.

A avaliação das edificações residenciais, setor escopo deste trabalho de conclusão de curso, é realizada em dois sistemas principais: a envoltória da edificação e o sistema de aquecimento de água. A etiqueta pode ser obtida para uma unidade habitacional autônoma (UH), edificação multifamiliar ou áreas de uso comum (por exemplo, sauna, salão de festas) como etiqueta de projeto, que tem validade de cinco anos, e posteriormente ou simultaneamente é avaliada a edificação construída e emitida a etiqueta de edificação construída. Até dezembro de 2016, foram registradas no Brasil 4.379 unidades habitacionais etiquetadas (INMETRO, 2016).

O RTQ-R utiliza dois métodos de avaliação: simplificado<sup>1</sup> e de simulação. No método simplificado a classificação da envoltória é calculada utilizando como base uma equação obtida por regressão linear, que varia de acordo com a zona bioclimática em que a edificação é localizada. A avaliação da envoltória realizada pelo método de simulação, tem como maior diferencial a precisão do resultado e também a possibilidade de considerar a edificação ventilada naturalmente ou condicionada artificialmente, diferentemente do método simplificado que a edificação é considerada somente naturalmente ventilada e o condicionamento de ar entra como bonificação (no caso de etiqueta A de eficiência do aparelho). Para a classificação geral, por ambos os métodos, é considerada a pontuação da envoltória, do sistema de aquecimento de água, bonificações, e o atendimento a determinados pré-requisitos de fatores que influenciam na eficiência da edificação, mas não entram na equação, como por exemplo transmitância térmica das paredes e cobertura.

Os regulamentos brasileiros de eficiência energética, RTQ-R e RTQ-C, encontram-se em revisão desde 2012, e no ano de 2017 entraram em consulta pública para posterior lançamento. Na proposta de novo método, continua sendo avaliada a envoltória e o sistema de aquecimento de água nas edificações residenciais (CB3E, 2017a). Nesta proposta, a classificação é obtida por meio da avaliação do consumo da edificação em energia primária, obtida através da conversão dos valores de demanda em energia térmica e elétrica. Caso a unidade habitacional tenha geração de energia por fontes renováveis, o valor gerado é descontado do valor consumido em eletricidade. São expostos ainda, sem interferência na classificação da edificação, os valores de emissão de CO<sub>2</sub> e economia de água.

O novo método de avaliação é apresentado como uma forma mais simples e rápida de analisar a eficiência energética da edificação. Os métodos para avaliar a unidade habitacional passam a ser: prescritivo, simplificado e simulação. O método prescritivo, novidade na nova proposta de regulamento, é uma forma de *checklist*, voltado especialmente para as residências unifamiliares de baixa renda, de forma a facilitar e reduzir os custos da avaliação. A única classe final de eficiência energética que pode ser alcançada é A. Assim, se um dos requisitos do *checklist* não for atendido, a edificação deve ser avaliada pelo método simplificado ou simulação. O método simplificado deixa de avaliar por regressão linear e passa a utilizar um metamodelo desenvolvido através de redes neurais inteligentes, treinadas com simulações computacionais. O metamodelo traz como resultado para a envoltória a carga térmica necessária para resfriamento e aquecimento (quando necessário). Esse novo formato do método

---

<sup>1</sup> Denominado prescritivo no método de avaliação vigente.

simplificado torna a avaliação mais próxima da realidade, além de abordar uma gama maior de tipologias de edificações. Por fim, o método de avaliação através da simulação computacional, é aplicável a todas as tipologias de edificações. A escala de eficiência energética no método simplificado e de simulação computacional é calculada com base no consumo da edificação real comparado com o de uma edificação de referência (nível C de eficiência). Por meio da análise da porcentagem de economia de energia da edificação real em relação a de referência é dada a sua classe final de eficiência energética.

### **2.2.1 Medidas de eficiência energética**

A edificação é resultado do conjunto de componentes construtivos que foram utilizados e os sistemas instalados. Assim, para que a edificação tenha um bom desempenho térmico e energético, se faz necessária a escolha dos seus componentes de acordo com o clima em que a mesma se encontra (INVIDIATA et al., 2016). Ferreira, Almeida e Rodrigues (2016) indicam que edificações quando construídas em um determinado local, podem apresentar um ótimo custo-benefício, porém quando levadas para outra região, a sua instalação não compensa financeiramente, sendo necessário estudar não só as condições climáticas do local, mas também a viabilidade econômica e a disponibilidade dos materiais na região.

Como forma de tornar mais efetiva a preocupação com o clima da região em que a edificação está inserida e o desempenho térmico da mesma, foi lançada a NBR 15220, norma brasileira que contém os requisitos mínimos de desempenho térmico para edificações de acordo com a sua zona bioclimática. Após seu lançamento, diversos pesquisadores começaram a estudar os limites impostos pela normativa. Matos et. al (2006) utilizaram o programa computacional *EnergyPlus* para avaliar os limites estabelecidos pela norma em uma edificação na cidade de Florianópolis, zona bioclimática 3, e através dos resultados observaram que a norma garante um bom desempenho térmico. Yoshida (2006) estudou uma edificação localizada em São Paulo, também zona bioclimática 3, e da mesma forma que a pesquisa anterior, encontrou um bom desempenho térmico aplicando os limites estipulados pela norma NBR 15220, porém alguns pontos, segundo a pesquisadora, merecem maior atenção, como por exemplo o fato dos requisitos não considerarem a influência da proporção da edificação para a escolha dos valores limitantes de transmitância térmica da parede, visto que além da absorvância térmica, o volume também influencia significativamente neste parâmetro.

Da mesma forma, quando lançada a NBR 15575, pesquisadores começaram a estudar os requisitos normativos. No estudo de Silva et. al (2014) foi simulada uma residência unifamiliar de baixa renda no *EnergyPlus* a fim de avaliar a influência dos parâmetros não considerados nos critérios da norma referentes ao “dia típico” da simulação, ou seja, o dia com as características extremas do ano. Foi observado que para certas variáveis, como tipo de céu e modelo da habitação, que a norma não estabelece valores limitantes. Estes fatores, influenciam significativamente no desempenho térmico mínimo aceito e dessa forma podem ser manipulados para que a edificação atenda aos critérios. Sorgato et. al (2014) também buscaram simular uma residência unifamiliar no *EnergyPlus* utilizando os padrões indicados pela NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico. A pesquisa analisou a temperatura do solo e o seu contato com o piso nas condições de verão e inverno, variável essa não considerada pela normativa. Os resultados demonstraram que mais uma vez são negligenciadas características importantes da edificação.

O programa Minha Casa Minha Vida (MCMV), adotou os níveis mínimos da NBR 15575 como requisito obrigatório de atendimento em 2016, na terceira fase do programa (BRASIL; MINCIDADES, 2016). Com o programa MCMV foram construídas de 2009 até 2015 cerca de 3,9 milhões de moradias (BRASIL, 2015). Frente à grande quantidade de projetos executados em seis anos, Montes (2016) elaborou modelos de projetos representativos do MCMV utilizando levantamentos dos empreendimentos contratados. A pesquisa apontou que projetos similares são aplicados em zonas bioclimáticas distintas e devido a isto, o desempenho térmico da edificação é consideravelmente baixo em especial no verão, época mais crítica no Brasil. Além de produzir modelos representativos, foram analisadas também a aplicação de melhorias nesses projetos e o seu desempenho ao longo dos anos frente às mudanças climáticas. Os resultados obtidos apontaram que medidas simples como: aplicação de esquadrias que melhoram a ventilação, mudança nos componentes construtivos e absorvância solar da envoltória e aplicação de sombreamento, podem melhorar significativamente o desempenho térmico da edificação, e consequentemente gerar economia.

O Projeto *Sustainable Social Housing Initiative* (SUSHI), desenvolvido pela *United Nations Environment Programme* (UNEP/PNUMA), foi criado com o objetivo de analisar as práticas de construção sustentável no mundo, com o foco nas habitações de interesse social (HIS) nos países da Tailândia e Brasil (CBCS, 2017). No Brasil o projeto é liderado pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) e até o momento, foram lançados três relatórios sobre os dados obtidos, dividindo o projeto em: mapeamento de parceiros e de tecnologias visando a sustentabilidade, lições aprendidas durante o projeto e avaliação das

tecnologias existentes no mercado e quais soluções melhor se adequam às HIS. Segundo os relatórios, quando o projeto de uma habitação de baixa renda é realizado utilizando estratégias que visem a eficiência energética, ocorre uma redução no consumo de eletricidade, sendo citado como exemplo, a redução no uso de condicionamento de ar, já que o conforto térmico é alcançado por técnicas passivas (abertura de janelas, por exemplo). Além disso, no seu terceiro relatório, sobre a avaliação das tecnologias existentes e soluções, é indicado que para a escolha das medidas que visem a eficiência, é necessário que sejam avaliadas as dimensões ambiental, social e econômica, ou seja, que a medida adotada auxilie na redução da necessidade do uso de energia elétrica, que garanta o conforto do usuário e que ele saiba operá-la e mantê-la, e por fim, garanta o baixo custo inicial e gere economia.

Muitas vezes essas MEEs não são aplicadas devido ao preconceito do mercado diante de mudanças, visto que elas indicam um aumento do custo inicial do projeto e posteriormente da obra (CBCS, 2010b; 2010c). Porém algumas medidas simples, se aplicadas de forma correta no projeto, podem reduzir os consumos em energia elétrica e ainda garantir um maior conforto do usuário sem necessitarem de grandes investimentos. O projeto SUSHI em seu primeiro relatório sobre o mapeamento das tecnologias utilizadas nas habitações de interesse social, indica que estratégias visando sombreamento e ventilação, por exemplo, são MEEs de baixo ou igual custo, quando comparadas com o que é usualmente construído, e melhoram a eficiência energética e conforto durante a fase de uso da edificação (CBCS, 2010a).

### 2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional permite analisar o desempenho de uma edificação com relação à: tipologia da edificação, seus componentes construtivos, clima, sistemas instalados, forma como os usuários se comportam. Diante disso, é possível observar que a simulação é uma importante ferramenta na avaliação dos impactos que determinadas estratégias podem gerar, pois pode-se escolher de forma precisa quais as medidas de eficiência energética a serem utilizadas e qual o seu impacto na edificação estudada, antes mesmo de sua implantação (CARLO; LAMBERTS, 2006).

Os programas de simulação do desempenho energético de edificações começaram a surgir nos países europeus e nos Estados Unidos a partir da década de 70, com o advento da computação aliado com a crise do petróleo que fez os países mais desenvolvidos buscassem alternativas para a redução do consumo de eletricidade, visto que a principal fonte desta energia

era o petróleo (MENDES et. al, 2005). Os primeiros programas a surgir foram o NBSLD, DOE-2, BLAST, RADIANCE e ESP-r, sendo os quatro primeiros desenvolvidos nos EUA e o último na Escócia, Reino Unido. Posteriormente, com a união dos *softwares* DOE-2 e BLAST, surgiu o ENERGYPLUS elaborado com o apoio do Departamento de Energia dos Estados Unidos e com domínio gratuito. O *EnergyPlus* possibilita ao usuário informar os dados de entrada e simulada a edificação são demonstrados os resultados, como por exemplo, a demanda de resfriamento ou aquecimento dos ambientes, sua capacidade de ventilação natural, iluminação, cálculo das cargas térmicas, ou seja, o desempenho de todo o edifício e seus sistemas (DOE, 2017).

Embora a simulação computacional represente um auxílio para a tomada de decisões, é uma ferramenta pouco utilizada pelos projetistas no Brasil. Um dos principais motivos é a interface pouco amigável dos *softwares* gratuitos, como o *EnergyPlus*, que faz com que o usuário demore para entender e colocar em prática nos projetos, além da necessidade de maior conhecimento sobre as variáveis de entrada e saída e como elas influenciam no resultado da simulação (CARLO; SANTANA; FONSECA, 2016). Diante dessa preocupação surgiram alguns plug-ins para auxiliar na compreensão dos modelos de simulação. Porém estes apresentam diversas limitações, pois devido às simplificações realizadas eles muitas vezes não permitem a inserção de todos os dados de entrada, utilizando como referência padrões pré-determinados, o que pode afastar o resultado do real.

Silva, Almeida e Ghisi (2016) estudaram o nível de incertezas físicas que podem ocorrer na simulação computacional aplicada a edificações residenciais, utilizando o programa *EnergyPlus* e métodos estatísticos para analisar as incertezas e a sensibilidade das variáveis de entrada e as suas respectivas variáveis dependentes. A edificação simulada foi uma residência unifamiliar de interesse social localizada na cidade de Florianópolis e os componentes da envoltória utilizados foram blocos cerâmicos revestidos por argamassa e pintura nas paredes, piso de concreto com revestimento cerâmico, cobertura com telhas cerâmicas, forro de madeira e por fim, vidro comum incolor de 3mm nas aberturas. Para a carga interna e operação dos ambientes foi realizada uma auditoria em 53 residências de Florianópolis e os valores considerados foram a mediana da distribuição. O objeto de estudo do trabalho foram as variáveis relacionadas às propriedades térmicas dos elementos construtivos, ventilação natural e aberturas. Para o cálculo das incertezas relacionadas foram consideradas porcentagens de variação que poderiam ocorrer nos valores de entrada utilizados no *EnergyPlus* e para a análise de sensibilidade foi utilizado o programa Simlab 2.2, por meio do cálculo dos coeficientes de correlação padronizado e de correlação parcial, ambos índices estatísticos. Os resultados

obtidos para incertezas foram mais significativos para graus-hora de desconforto por calor, com uma porcentagem de 53%. Para graus-hora de desconforto por frio o valor obtido foi de 32%. Utilizando a sensibilidade foi possível analisar que as variáveis que mais impactam no desconforto por calor foram a absorvância solar da cobertura, juntamente com o calor específico da argamassa das paredes e a condutividade térmica do concreto do piso. Para o desconforto por frio as variáveis relacionadas aos materiais das paredes foram os que mais impactaram no desconforto foi a de temperatura do solo.

Sorgato, Melo e Lamberts (2016) avaliaram o comportamento de uma residência unifamiliar na cidade de Florianópolis/SC. Foram aplicados diferentes valores de transmitância e capacidade térmica e analisados os períodos de conforto térmico dos ambientes de permanência prologada (quarto do casal, quarto das crianças e sala de estar) diante do uso de três diferentes cenários para ventilação natural: ventilação presente da manhã até a noite, ventilação automatizada e ventilação noturna. Foi considerado o conceito de conforto adaptativo da ASHRAE 55 para estimar os valores aceitáveis de temperatura para uso de ventilação natural e condicionamento de ar. Os resultados obtidos mostraram que para residências com baixa inércia térmica, o modo com que a ventilação natural é utilizada pouco influencia no consumo de condicionamento de ar. Para as edificações com média inércia térmica a ventilação natural pode ser utilizada de forma mais efetiva no conforto térmico quando utilizada de forma controlada.

## 2.4 O ESTADO DA ARTE DO DESENVOLVIMENTO DE METAMODELOS

A fim de tornar a simulação computacional uma ferramenta mais presente no dia a dia de projetistas e pesquisadores, foram desenvolvidos, não somente plug-ins, mas também metamodelos, que são elaborados através de um banco de dados de simulações computacionais, onde são adotadas suposições quanto ao clima, padrões de uso, tipo de construção. Dessa forma, os metamodelos não necessitam de muitos parâmetros como entrada e tornam-se mais simplificados para o uso, sendo uma ferramenta rápida para a avaliação do desempenho da edificação, pois são capazes de predizerem com precisão os resultados que são obtidos para várias combinações de dados de entrada, incluindo até mesmo uma análise a longo prazo da edificação (MADERSPACHER et. al, 2015).

Existem várias técnicas estatísticas utilizadas para a determinação de metamodelos. Os mais populares são os métodos de engenharia, estatísticos e de inteligência artificial (ZHAO e

MAGOULÊS, 2012). Dentro da inteligência artificial, as redes neurais e máquinas de vetores de suporte são as duas formas mais utilizadas em casos não-lineares como as edificações, tendo como principal aplicação a de prever o consumo de energia. Porém, mesmo sendo uma ferramenta útil, construir um metamodelo demanda estudos e considerações frente a diversos fatores que influenciam no comportamento da edificação, como: condições climáticas, geometria, os componentes construtivos, forma como é ocupada a edificação, cargas térmicas instaladas (iluminação, condicionamento de ar). Dessa forma, os metamodelos podem apresentar falhas, pois dentro das várias combinações estudadas pelo modelo, podem ser geradas incertezas que alteram seus resultados.

Neto e Fiorelli (2008), usaram redes neurais artificiais (RNA) e simulação computacional com o *EnergyPlus* para prever o consumo de energia do edifício administrativo da Universidade de São Paulo. A rede foi alimentada com dados referentes a temperatura, umidade, radiação solar e consumo da edificação para cada dia do ano analisado. Quando comparados os resultados obtidos pela rede e pela simulação com o medido *in loco*, foram alcançados erros aproximados a 10% e 13%, respectivamente. Esses valores de erro são considerados aceitáveis, uma vez que estão relacionados ao comportamento dos usuários dentro da edificação e também a falta de calibração adequada dos modelos.

Jain et. al (2014) utilizaram o método chamado de Regressão por Vetor de Suporte para prever o consumo de uma edificação multifamiliar na cidade de Nova York. Para a construção do metamodelo a inteligência artificial foi treinada considerando valores climáticos, modelagem e consumo de energia do edifício real. A validação do modelo, foi realizada através de métodos estatísticos, e a análise dos resultados foi dividida em três cenários: a edificação como um todo, por pavimento e por unidade habitacional. Além dessa análise, foi incluído o estudo temporal, por dia, hora e com um *timestep* de 10 minutos. A pesquisa demonstrou que o metamodelo apresentou bons resultados, mas os melhores foram para o pavimento térreo e com análise horária do consumo de energia, quando comparados os valores obtidos pelo modelo aos valores reais.

Os modelos simplificados de predição de desempenho térmico e energético de edificações variam a complexidade de acordo com o fim ao qual são destinados. Alguns exemplos de finalidades dos metamodelos são: predição das cargas térmicas, conforto das edificações naturalmente ventiladas e uso em regulamentos e certificações de eficiência energética (VERSAGE, 2015; RACKES; MELO; LAMBERTS, 2016). Nos últimos anos, muitos países, como Portugal e Holanda, vêm desenvolvendo seus próprios métodos para a avaliação da eficiência energética de edificações. No Brasil, ressalta-se o desenvolvimento de

metamodelos para importantes iniciativas de eficiência energética de edificações no país, como o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais, Comerciais, de Serviços e Públicos, já citado nas referências deste trabalho.

A evolução do desenvolvimento de metamodelos para os regulamentos brasileiros iniciou com Signor (1999) que desenvolveu equações de modelos para a predição de consumo de energia elétrica de edifícios comerciais artificialmente condicionados. Em 2007, Westphal e Lamberts através da simulação de 23.040 casos no *EnergyPlus*, construíram equações de regressão linear múltipla para predizer o consumo de energia de edificações comerciais no Brasil. Carlo e Lamberts (2008) desenvolveram um metamodelo, através de equações de regressão linear, para a avaliação de envoltórias, a fim de ser utilizado no regulamento brasileiro de etiquetagem. Devido ao comportamento não-linear das edificações, Melo (2012) e Versage (2015) buscaram desenvolver um novo método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais artificiais. Para as edificações residenciais, Sorgato (2015) apresentou uma nova abordagem para o desenvolvimento e aprimoramento do metamodelo, através do estudo do comportamento do usuário e como ele influencia no desempenho térmico da edificação.

Para o novo método para etiquetagem de edificações residenciais, foi elaborado um metamodelo para predizer a carga térmica de resfriamento e aquecimento dos ambientes de permanência prolongada da unidade habitacional (CB3E, 2017b), utilizando como referência os trabalhos de Melo (2012), Versage (2015) e Sorgato (2015), citados anteriormente. Para o desenvolvimento, foram utilizadas redes neurais que estudaram seis diferentes tipologias de unidades habitacionais simuladas no *EnergyPlus*, com diferentes combinações de padrões geométricos para os ambientes de permanência prolongada, características construtivas e de uso, sendo consideradas híbridas, ou seja, com a possibilidade de utilizar ventilação natural ou condicionamento de ar, através do *Energy Management System* (EMS) acoplado ao *EnergyPlus* (Melo et. al, 2016; SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2016). O EMS é uma classe de objetos que cria um pequeno programa dentro da simulação, possibilitando criar situações antes não programáveis no *EnergyPlus*. Uma das configurações que pode ser criada com o auxílio do EMS é o acionamento do sistema de ar condicionado quando existir pessoas ocupando determinado ambiente com temperaturas fora do limite de conforto adaptado da ASHRAE 55 e desligando o sistema somente quando não existir mais ocupação no ambiente. Além do acionamento do condicionamento de ar, o EMS possibilita o uso de ventilação natural quando alguma das condições citadas anteriormente não foram satisfeitas. Dessa forma, o uso do

condicionamento de ar e ventilação natural se torna mais próximo do real. Quando analisado o metamodelo construído para o novo RTQ-R, o fato de conter diversas tipologias, uso do EMS e outras características, o tornam uma ferramenta complexa, e, portanto, o metamodelo desenvolvido até o momento (outubro de 2017), para o novo regulamento brasileiro para edificações residenciais, contém falhas, que serão abordadas mais adiante neste trabalho.

## 2.5 ANÁLISE DE RETORNO FINANCEIRO

Para que a aplicação de medidas de eficiência energética seja aprovada pelo usuário, é ideal que além da exposição dos números referentes ao desempenho térmico e economia de energia da edificação, seja apresentado em quanto tempo o investimento será pago, ou seja, seu retorno financeiro. O *payback* é um método bastante aplicado nos estudos de viabilidade de projetos, sendo utilizado na sua forma simples ou corrigida. Na forma simples não são consideradas as taxas de juros, inflação do período ou o custo de oportunidade. Já na forma corrigida são considerados os valores do fluxo de caixa do período para o valor presente.

Diversos trabalhos científicos utilizaram o *payback* como forma de analisar se os projetos propostos são viáveis economicamente e valem o investimento de serem implantados. Melo (2005) aplicou simulação computacional e estudo da viabilidade econômica para analisar a aplicação de melhorias em eficiência energética em um hotel já construído na cidade de Florianópolis/SC. Como edificação construída, foi realizada a calibração do modelo base utilizando dados levantados em visitas técnicas realizadas no hotel e a verificação da sensibilidade de cada variável na simulação. Realizada a calibração do modelo, foram simuladas as propostas de *retrofit*, sendo elas: troca de lâmpadas fluorescentes de 40W para 32W juntamente com instalação de refletor de alumínio anodizado de alta pureza e reator eletrônico em todas as lâmpadas, troca dos equipamentos de ar condicionado para um sistema central e a compra de um gerador a diesel de potência de 125kVA para funcionar nos horários de maior consumo (17h30 às 22h30, conforme levantamentos) e diminuir a demanda da energia elétrica da rede. Realizadas as simulações, foi analisada a viabilidade econômica, através do cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), da Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* Corrigido, somente das alternativas que apresentaram melhoria na eficiência energética da edificação estudada. Para os cálculos foi utilizada a Taxa Mínima de Atratividade de 12% a.a.. Os resultados obtidos pela pesquisa indicaram que a mudança no sistema de iluminação proporciona uma economia de 10,65% na conta de energia elétrica, e considerando o período de estudo de 10 anos, a TIR alcançada foi de 115% a.a. com um *payback* inferior a 1 ano, logo

a alternativa foi considerada viável. Para o sistema de condicionamento de ar, a economia em eletricidade chega a 18,61%, porém a TIR encontrada para 10 anos e 20 anos é inferior à TMA, o que torna a proposta de instalação de sistema central de condicionamento de ar inviável. A proposta de compra de gerador de energia inclui a mudança do tipo de tarifa a ser cobrada pela concessionária, visto que o gerador irá funcionar nos horários de pico. Para esta proposta a redução na conta de energia elétrica chegou a 53,58% em relação ao modelo base, mas da mesma forma que o sistema de condicionamento de ar, quando avaliada a TIR do projeto, o seu valor fica abaixo da TMA para os períodos de 10 anos e 20 anos, e dessa forma torna o investimento inviável.

Marinoski e Ghisi (2008) estudaram a viabilidade de implantação de aproveitamento de água pluvial em uma instituição de ensino na cidade de Florianópolis. O dimensionamento do sistema de aproveitamento de água foi realizado através do programa Netuno, e o estudo da viabilidade econômica através do método de cálculo do retorno de investimento. No estudo foi verificado um potencial de economia de água potável de 45,8%. Analisando os custos de implantação e a economia de água mensal, foi alcançado um *payback* de 4 anos e 10 meses para o projeto.

O Guia para Eficiência Energética nas Edificações Públicas (BRASIL, 2015) apresenta em anexo a simulação energética e o estudo de viabilidade econômica em transformar o prédio do Ministério de Minas e Energia (MME), construído em Brasília/DF no ano de 1979, em um edifício de energia zero. O trabalho foi desenvolvido em três etapas, a primeira foi a de simulação da edificação real. Para a definição do modelo foram levantadas variáveis como: a geometria e propriedades construtivas da edificação, equipamentos instalados, padrão de ocupação. Como edificação já existente, as variáveis puderam ser levantadas *in loco*, através de medições durante visitas técnicas. A segunda etapa foi referente à calibração do modelo computacional e a simulação das MEEs. A calibração consiste em tornar o mais próximo da realidade os resultados obtidos pela simulação. Para isto, como o objeto de estudo foi uma edificação construída, foram obtidos os valores da conta de energia elétrica referente ao ano de 2012, e realizadas medições dos valores de cargas internas (equipamentos e pessoas) *in loco* da edificação. Com esses valores foi possível analisar o consumo de energia da edificação real e do modelo, e ver a porcentagem de diferença entre eles. Com uma diferença inferior a 10% o modelo foi considerado calibrado e dessa forma, foram simuladas as alternativas de *retrofit*, sendo elas: utilização de vidros de alto desempenho, uso de sistema de condicionamento de ar de mais eficientes e instalação de painel fotovoltaico. Cada uma dessas medidas foi simulada

separadamente na edificação, de forma a possibilitar a análise da porcentagem máxima de economia obtida por cada uma com relação ao modelo base. Realizada esta análise, foram criados também dois pacotes de MEEs a serem aplicados na edificação, a fim de quantificar a redução no consumo de energia do conjunto. Na terceira e última etapa, foi realizado o estudo de viabilidade econômica de implantação das MEEs estudadas e os pacotes propostos, com levantamentos de orçamentos reais e foi analisado o seu *payback* simples e corrigido com relação ao custo de implantação e a economia gerada. Cabe indicar que neste estudo, o *payback* corrigido difere do simples pelo fato de considerar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de acordo com a taxa Selic do dia 17/03/2014, no valor de 10,65% a.a.. O pacote de medidas que apresentou a maior redução no consumo de energia, com 15,07%, foi o que considera o uso de condicionamento de ar por meio do VRF, com vidro duplo de controle solar, ar mais vidro laminado, além da instalação do painel fotovoltaico. O estudo utilizou como taxa mínima de retorno o período de 10 anos, no que todas as intervenções resultaram em retorno do investimento maior do que este período.

Mi et. al (2016) motivados pelo aumento da demanda de energia pelas edificações, decidiram estudar a aplicação do material conhecido como PCM – *Phase Change Material* em edificações de escritórios na China. Esse material, que tem a capacidade de mudar de fase de acordo com a temperatura e absorver grande quantidade de calor, foi aplicado em algumas paredes das edificações e simulado o seu comportamento no *EnergyPlus*. Com a simulação foi possível analisar o comportamento térmico da edificação e com o estudo do retorno financeiro foi possível identificar em quais cidades a aplicação desse material era favorável.

Friess e Rakhshan (2017) estudaram dois casos de edificações residenciais na cidade de Dubai, Emirados Árabes Unidos, avaliando a sua economia de energia e viabilidade econômica. As residências estudadas compreendem dois períodos distintos da construção civil de Dubai, primeiro uma vila mais tradicional com pouco ou nenhum isolamento, construída antes do lançamento dos primeiros regulamentos voltados para eficiência energética de edificações em 2003, e uma vila mais moderna, construída a partir de 2008, onde já existiam regulamentos. Para a análise do desempenho energético das edificações, foi utilizado uma interface gráfica do *EnergyPlus*, chamada de *DesignBuilder*, onde foram simuladas as edificações em sua condição existente, chamada de edifício base, e estudadas as opções de *retrofit* de acordo com o Regulamento para Construção Verde de Dubai e os Requisitos de Construção Alemães. Dessa forma as medidas de eficiência energética aplicadas envolveram maior isolamento térmico na envoltória baixando o valor de transmitância térmica de paredes, cobertura e vidros e utilização de ar condicionado com COP de 2,78. Cada MEE foi simulada

individualmente na edificação base, de forma a verificar o seu impacto no consumo energético. Na vila mais tradicional, os maiores impactos foram obtidos para a troca do ar condicionado com 17,1% de redução no consumo de energia, e para a troca de transmitância térmica das paredes com 13,3% de redução; para a vila mais moderna, os impactos obtidos para a troca de condicionamento de ar foram maiores, com redução de 31,2% no consumo de energia, para a troca das características das paredes a redução obtida foi de 13,2%, outra medida de eficiência que impactou na edificação foi a troca de vidro, com redução de 13,8%. Para o cálculo da viabilidade econômica, foram levantados os custos de implantação de cada uma das medidas de eficiência energética e analisado o seu *payback* simples e valor presente líquido (VPL). Com essa análise os pesquisadores chegaram em um pacote de MEEs mais viável para ser implantado nas edificações, sendo ele o de redução da transmitância térmica da parede e a troca do sistema de condicionamento de ar, a troca do tipo de vidro das aberturas não foi considerada viável depois da análise econômica, visto que o valor empregado era muito alto diante da economia gerada. Os resultados obtidos após novas simulações para a vila mais tradicional, foram de um retorno financeiro estimado de 7,8 anos e uma redução de 27,7% no consumo de energia, e para a vila mais moderna o retorno financeiro estimado foi de 6,5 anos com uma redução de 39,8% na demanda de eletricidade.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos trabalhos expostos neste capítulo é possível verificar a importância de serem realizados estudos voltados à eficiência energética das edificações. Considerando o cenário atual de mudanças climáticas e a necessidade de construção de residências para famílias de baixa renda, a fim de diminuir o *déficit* habitacional brasileiro, estudos envolvendo a viabilidade econômica da aplicação de melhorias nas edificações é uma importante ferramenta para a aprovação dos projetos.

Diversas pesquisas apresentam como base a simulação computacional para a avaliação da economia gerada pela mudança de determinado parâmetro construtivo, de ocupação ou ambiental, nas edificações; outros apresentam além da simulação a análise econômica da aplicação de determinadas medidas de eficiência energética em edificações. Porém não foram encontrados trabalhos com foco em aplicação de melhorias na envoltória de edificações multifamiliares de baixa renda.

Com a construção do metamodelo, para predição da carga térmica necessária para resfriamento de edificações residenciais, para o novo regulamento brasileiro, o uso desta ferramenta ao invés da simulação computacional, por exemplo, é uma forma de aplicar o metamodelo para avaliar o seu comportamento frente à implantação de diferentes medidas de eficiência energética em uma edificação, a fim de ser possível verificar se os resultados obtidos estão de acordo com o que está exposto na literatura.

Desse modo, os próximos capítulos têm a finalidade de unir as referências bibliográficas expostas e demonstrar quais as medidas de eficiência energética são mais viáveis à edificação multifamiliar de estudo.

### 3 MÉTODO

O método empregado neste trabalho consiste em determinar o consumo de energia elétrica dos ambientes de permanência prolongada das unidades habitacionais da edificação multifamiliar adotada, por meio do método simplificado elaborado para a proposta de novo regulamento de etiquetagem de edificações residenciais. A envoltória da edificação será classificada de acordo com as escalas presentes na nova proposta do regulamento brasileiro.

Com o caso base definido, serão aplicadas medidas de eficiência energética na edificação multifamiliar, a fim de estipular quais destas impactam na redução do consumo das unidades habitacionais.

Além da avaliação da eficiência energética da edificação do caso base e com a aplicação de medidas de eficiência energética, será analisada a viabilidade econômica de cada configuração estudada. Este impacto será estipulado através do cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e *Payback* Corrigido. As medidas de eficiência energética que apresentarem os melhores índices financeiros e melhor classificação de eficiência energética pelo método simplificado, serão agrupadas em um pacote de medidas ideal para a edificação multifamiliar e novamente será realizada a classificação das UHs e calculada a sua viabilidade econômica de implantação.

Além disso, a fim de verificar a precisão do metamodelo, será realizada uma análise comparativa entre os resultados de consumo em kWh/m<sup>2</sup>ano para resfriamento obtidos por meio do método simplificado e do método de simulação, do novo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.

Cada uma dessas etapas é descrita detalhadamente neste capítulo.

#### 3.1 CASO BASE

A escolha para a determinação da tipologia do caso base levou em consideração o trabalho realizado por Montes (2016). A autora levantou projetos representativos para edificações de baixa renda construídas pelo Programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal. Dentre os modelos analisados, optou-se em adotar um caso representativo para a faixa de renda 1 (renda familiar de até R\$ 1.600,00) de edificação multifamiliar em formato H com quatro pavimentos. Na Figura 2 e Figura 3 podem ser visualizadas, respectivamente, a perspectiva e a planta baixa da edificação multifamiliar.

Figura 2 - Perspectiva edificação multifamiliar.

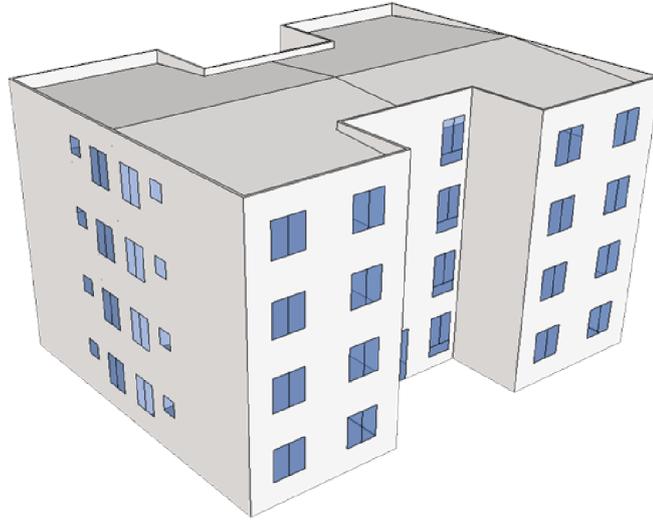
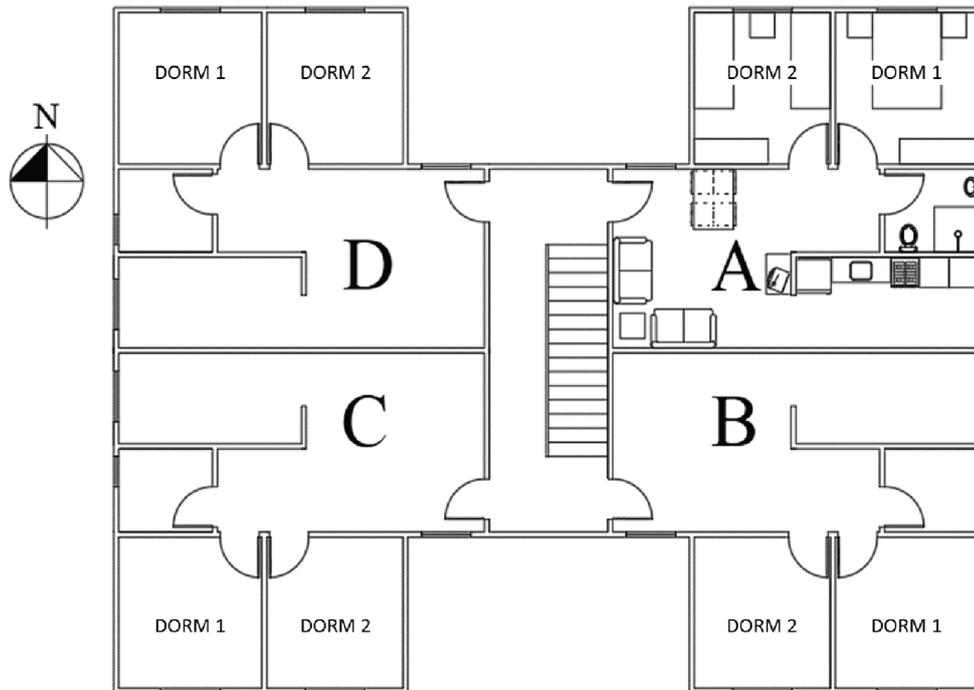


Figura 3 - Planta baixa edificação multifamiliar formato H, caso base.



Conforme a planta baixa, são quatro apartamentos por andar, totalizando 16 unidades habitacionais na edificação. A geometria da edificação consiste em fachadas Norte e Sul com 17,20 m de comprimento, Leste e Oeste com 13,30 m, o pé-direito dos pavimentos é de 2,50 m, considerando uma laje de 0,10 m entre os pavimentos mais a altura da cobertura, a altura total da edificação é de 10,60 m. Além disso, como a sala de estar e cozinha são conjugadas, as suas

áreas se somam, juntamente com a circulação e fica um único ambiente de permanência prolongada de 22,62m<sup>2</sup>.

A área construída da edificação é de 777,04 m<sup>2</sup> e área útil é 683,68 m<sup>2</sup>. Na Tabela 1 estão os valores das áreas úteis dos ambientes das unidades habitacionais.

Tabela 1 – Área útil de cada ambiente das UHs do caso base.

<b>Ambiente</b>	<b>Área Útil</b>
Sala de Estar	12,81
Cozinha	6,84
Quarto 1	8,70
Quarto 2	8,28
Banheiro	3,13
Circulação	2,97
<b>Total UH:</b>	<b>42,73</b>

Para a análise, serão consideradas as quatro UHs localizadas na cobertura da edificação, visto que, dentre todos os apartamentos da multifamiliar, elas representam o pior caso para o desempenho térmico. Dessa forma, o que for viável para elas será para as demais UHs.

Como componentes construtivos da envoltória, as amostras levantadas na pesquisa de Montes (2016) indicaram a maior utilização de painel de concreto nas paredes externas, cobertura de telha de fibrocimento com laje em concreto maciço e piso cerâmico. Os valores das propriedades térmicas destes itens são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características térmicas componentes construtivos

	<b>Descrição</b>	<b>Transmitância térmica - U (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>Capacidade térmica - CT (kJ/m<sup>2</sup>K)</b>
<b>Parede</b>	Painel de concreto com 10 cm de espessura	4,40	240
<b>Cobertura</b>	Telhado em fibrocimento e laje maciça de concreto com 10 cm de espessura	2,06	233

<b>Piso</b>	Laje em concreto 10 cm e piso cerâmico	3,65	244
-------------	-------------------------------------------	------	-----

Para a absorvância das paredes do caso base optou-se por adotar o valor de 0,5, valor aproximado de cores como amarelo antigo e areia, segundo o Anexo V do RAC (BRASIL, 2013). Para a cobertura o valor adotado foi 0,80, referente ao cinza escuro, dessa forma, foi considerada uma telha de fibrocimento já desgastada com o tempo.

Para as aberturas dos ambientes foram levantadas como representativas as seguintes esquadrias: nos quartos e cozinha foram recorrentes as janelas com duas folhas de correr; na sala de estar a esquadria levantada foi com duas folhas de correr mais uma folha de vidro fixa embaixo; nos banheiros foi utilizada esquadria basculante. Nenhuma das esquadrias possui dispositivo de sombreamento. O vidro adotado foi de 3mm, com fator solar (FS) de 0,87 e transmitância térmica de 5,70 W/m<sup>2</sup>K. Na Tabela 3 está a informação detalhada das aberturas de cada ambiente. O fator de ventilação utilizado no metamodelo foi arredondado para 0,50. Considerando todas as aberturas, o percentual de abertura na fachada (também chamado de WWR e PAF) da edificação multifamiliar é de 13%, e de cada UH é de 12%. Por tanto os apartamentos são considerados com ventilação cruzada.

Tabela 3 – Informações aberturas dos ambientes das unidades habitacionais.

<b>Ambiente</b>	<b>Área de abertura (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Fator de Ventilação</b>	<b>Fator de Iluminação</b>
<b>Sala de estar</b>	1,60	0,375	0,80
<b>Quartos</b>	1,44	0,45	0,80
<b>Cozinha</b>	1,20	0,45	0,80
<b>Banheiro</b>	0,36	0,80	0,80

Por fim, como pode-se observar na Figura 2, a edificação não possui sacadas.

As cidades escolhidas para análise foram São Paulo/SP e Salvador/BA, visto que são regiões com características climáticas bem distintas.

### 3.2 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA CONSIDERADAS

Para o estudo, foram consideradas doze medidas de eficiência energética distintas. O projeto *Sustainable Social Housing Initiative*, conhecido como SUSHI, propõe em seus relatórios algumas medidas visando o aumento da eficiência energética de habitações de

interesse social (CBCS, 2010b; 2010c). Algumas das recomendações são voltadas ao uso de materiais em conformidade com a norma de desempenho para edificações residenciais, NBR 15575 e também para o uso de sombreamento nas aberturas. Em sua tese, Montes (2016) apresentou resultados aplicando MEEs em uma unidade unifamiliar (dos projetos de baixa renda representativos levantados na mesma pesquisa) nas cidades de São Paulo e Salvador, com dados climáticos futuros, considerando o avanço das mudanças climáticas até o ano de 2050. As MEEs adotadas podem ser visualizadas na Tabela 4; elas buscaram abranger ambos estudos citados anteriormente. Lembrando que o caso base tem como características: paredes externas com transmitância térmica de  $4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  e capacidade térmica de  $240 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ , cobertura com transmitância térmica de  $2,06 \text{ W/m}^2\text{K}$  e capacidade térmica de  $233 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ , absorptância da parede igual a 0,50 e da cobertura no valor de 0,80 e por fim, esquadrias com área de vão de  $1,44 \text{ m}^2$  nos dormitórios,  $1,20 \text{ m}^2$  na sala e  $1,60 \text{ m}^2$  na cozinha.

As absorptâncias solares escolhidas como medidas foram cores claras para as paredes e coberturas, com 0,30 e 0,40, respectivamente, e para analisar a sensibilidade do metamodelo com relação à absorptância, foram consideradas também cores escuras, com 0,70 para parede e cobertura.

Tabela 4 – Medidas de eficiência energética aplicadas no caso base.

Componente Construtivo	Medidas de Eficiência Energética				
	MEE1 - Parede 1	MEE2 - Parede 2	MEE3 - Parede 3	MEE7 - $\alpha$ Parede 1	MEE8 - $\alpha$ Parede 2
Paredes Externas	Gesso interno (2 cm) Bloco de concreto (9x19x39 cm) Argamassa externa (2,5 cm) <b>U: 2,72 W/m<sup>2</sup>K</b> <b>CT: 178 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Argamassa interna (2,5 cm) Bloco cerâmico (9x14x24 cm) Argamassa externa (2,5 cm) <b>U: 2,46 W/m<sup>2</sup>K</b> <b>CT: 150 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Concreto (10 cm) Isolante lã de rocha (2,5 cm) Argamassa externa (2 cm) <b>U: 0,55 W/m<sup>2</sup>K</b> <b>CT: 281 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Cores claras: 0,3	Cores escuras: 0,7
	MEE4 - Cobertura 1	MEE5 - Cobertura 2	MEE6 - Cobertura 3	MEE9 - $\alpha$ Cob 1	MEE10 - $\alpha$ Cob 2
Cobertura	Laje pré-moldada (12 cm) (com EPS 7 cm) Câmara de ar (> 5 cm) Telha de fibrocimento <b>U: 1,52 W/m<sup>2</sup>K</b> <b>CT: 145 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Laje pré-moldada (12 cm) (com EPS 7 cm) Câmara de ar (> 5 cm) Telha metálica <b>U: 1,54 W/m<sup>2</sup>K</b> <b>CT: 134 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Laje maciça (10 cm) Câmara de ar (> 5 cm) Telha metálica sanduíche, com poliuretano como isolante (4,2 cm) <b>U: 0,55 W/m<sup>2</sup>K</b> <b>CT: 230 kJ/m<sup>2</sup>K</b>	Cores claras: 0,4	Cores escuras: 0,7
	MEE11 - Esquadrias 1	MEE12 - Esquadrias 2			
Esquadrias	Uso de venezianas nos dormitórios	Aumento da Área de abertura para ventilação (com o aumento de aproximadamente 30% na área de vão) Dormitórios: 1,90 m <sup>2</sup> ; Cozinha: 1,60 m <sup>2</sup> ; Sala de Estar: 2,10 m <sup>2</sup>			

As MEEs 7 e 9 não são consideradas medidas de eficiência energética, mas foram consideradas na análise para verificar a sensibilidade deste parâmetro no consumo.

A avaliação da eficiência energética e economia das MEEs consiste na aplicação individual destas na edificação. Com os resultados obtidos são indicados pacotes de medidas de eficiência energética, que serão analisados e por fim agrupados em um pacote ideal para o edifício multifamiliar.

### 3.3 REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA O NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

O método simplificado, proposto no novo regulamento brasileiro para etiquetagem de eficiência energética de edificações residenciais, consiste em testar as edificações sob duas condições: a condição real e a de referência.

Para aplicação neste trabalho, a avaliação referente à envoltória foi realizada com a versão do metamodelo disponibilizada pelo Núcleo de Edificações Residenciais do Centro Brasileiro em Eficiência Energética em Edificações (CB3E), no mês de outubro de 2017.

Para as UHs os parâmetros da edificação real (caso base) e de referência que devem ser inseridos na rede para este estudo são apresentados na Tabela 5. A geometria da edificação de referência permanece igual, o que muda são as características da envoltória. Estas características são determinadas pelo regulamento brasileiro de acordo com o grupo climático da cidade onde a edificação está localizada. O conceito de grupos climáticos vem sendo desenvolvido desde 2012, e divide as regiões brasileiras em 24 grupos, nomeados de 1 a 24, sendo o grupo 1 subdividido em “a”, “b” e “c”. Nesta divisão, São Paulo faz parte do GCL 1-B e Salvador do GCL 21 (CB3E, 2017b).

Tabela 5 – Características edificação caso base e de referência

<b>Parâmetro</b>	<b>Edificação Caso Base (Real)</b>	<b>Edificação Referência</b>
Transmitância térmica das paredes externas e internas ( $U_{ParExt}$ e $U_{ParInt}$ )	4,40 W/m <sup>2</sup> K	3,65 W/m <sup>2</sup> K
Transmitância térmica da cobertura ( $U_{Cob}$ )	2,06 W/m <sup>2</sup> K	2,29 W/m <sup>2</sup> K
Transmitância térmica do piso ( $U_{Piso}$ )	3,65 W/m <sup>2</sup> K	
Capacidade térmica das paredes externas e internas ( $CT_{ParExt}$ e $CT_{ParInt}$ )	240 kJ/m <sup>2</sup> K	158 kJ/m <sup>2</sup> K
Capacidade térmica do piso ( $CT_{Piso}$ )	243,80 kJ/m <sup>2</sup> K	
Capacidade térmica da cobertura ( $CT_{Cob}$ )	233,00 kJ/m <sup>2</sup> K	22,87 kJ/m <sup>2</sup> K
Condição da exposição do piso	Térreo: contato com o solo Demais UHs: adiabático	
Condição da exposição da cobertura	Cobertura: exposta Demais UHs: adiabático	
Absortância solar das paredes externas ( $\alpha$ )	0,50	0,60
Absortância solar da cobertura ( $\alpha$ )	0,80	São Paulo: 0,60 Salvador: 0,40
Vidro das aberturas (fator solar)	0,87	0,87
Sombreamento das aberturas	Sem	Sem
Ventilação cruzada	Possui ventilação cruzada	
Densidade de pessoas (pessoas/m <sup>2</sup> )	Dormitórios: 2 pessoas Sala de Estar: 4 pessoas	
Fachadas	Vide Tabela 6	
Aberturas	Vide Tabela 6	
Fator de ventilação <sup>1</sup>	0,50	São Paulo: 0,50 Salvador: 0,75

Nota <sup>1</sup>: O fator de ventilação para a condição de referência é com base na porcentagem de área de ventilação pela área de piso do ambiente. São Paulo necessita de 7% e Salvador 12%; por este motivo o fator de ventilação fica maior na condição de referência do que na real.

Tabela 6 - Área de fachada e abertura das UHs por orientação

Ambiente	Área de fachada	Área de abertura
<b>Dormitório 1</b>	UH A: Fachada principal <b>norte</b> : 7,25m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>leste</b> : 7,50m <sup>2</sup> UH B: Fachada principal <b>sul</b> : 7,25m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>leste</b> : 7,50m <sup>2</sup> UH C: Fachada principal <b>sul</b> : 7,25m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>oeste</b> : 7,50m <sup>2</sup> UH D: Fachada principal <b>norte</b> : 7,25m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>oeste</b> : 7,50m <sup>2</sup>	UH A: Abertura <b>norte</b> : 1,44m <sup>2</sup> UH B: Abertura <b>sul</b> : 1,44m <sup>2</sup> UH C: Abertura <b>sul</b> : 1,44m <sup>2</sup> UH D: Abertura <b>norte</b> : 1,44m <sup>2</sup>  Este ambiente não tem aberturas nas fachadas secundárias.
<b>Dormitório 2</b>	UH A: Fachada principal <b>norte</b> : 6,90m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>oeste</b> : 7,50m <sup>2</sup> UH B: Fachada principal <b>sul</b> : 6,90m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>oeste</b> : 7,50m <sup>2</sup> UH C: Fachada principal <b>sul</b> : 6,90m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>leste</b> : 7,50m <sup>2</sup> UH D: Fachada principal <b>norte</b> : 6,90m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>leste</b> : 7,50m <sup>2</sup>	UH A: Abertura <b>norte</b> : 1,44m <sup>2</sup> UH B: Abertura <b>sul</b> : 1,44m <sup>2</sup> UH C: Abertura <b>sul</b> : 1,44m <sup>2</sup> UH D: Abertura <b>norte</b> : 1,44m <sup>2</sup>  Este ambiente não tem aberturas nas fachadas secundárias.

Continuação Tabela 6 - Área de fachada e abertura das UHs por orientação

<b>Ambiente</b>	<b>Área de fachada</b>	<b>Área de abertura</b>
<b>Sala de Estar/Cozinha</b>	UH A: Fachada principal <b>leste</b> : 4,50m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>norte</b> : 3,88m <sup>2</sup>	UH A: Abertura principal <b>leste</b> : 1,20m <sup>2</sup> Abertura secundária <b>norte</b> : 1,60m <sup>2</sup>
	UH B: Fachada principal <b>leste</b> : 4,50m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>sul</b> : 3,88m <sup>2</sup>	UH B: Abertura principal <b>leste</b> : 1,20m <sup>2</sup> Abertura secundária <b>sul</b> : 1,60m <sup>2</sup>
	UH C: Fachada principal <b>oeste</b> : 4,50m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>sul</b> : 3,88m <sup>2</sup>	UH A: Abertura principal <b>oeste</b> : 1,20m <sup>2</sup> Abertura secundária <b>sul</b> : 1,60m <sup>2</sup>
	UH D: Fachada principal <b>oeste</b> : 4,50m <sup>2</sup> Fachada secundária <b>norte</b> : 3,88m <sup>2</sup>	UH A: Abertura principal <b>oeste</b> : 1,20m <sup>2</sup> Abertura secundária <b>norte</b> : 1,60m <sup>2</sup>

O metamodelo para análise da envoltória da edificação de acordo com a nova proposta de RTQ-R considera 22 variáveis no cálculo da carga térmica. Na Tabela 5 estão 13 das 22 variáveis, as demais são: tipo de edificação (unifamiliar ou multifamiliar), tipo de ambiente (dormitório ou sala), exposição do piso (em pilotis, adiabático ou em contato com o solo), geometria da parede (área de fachada em relação à área de piso do ambiente, de acordo com a orientação da fachada), geometria da abertura (área de vão da abertura em relação à área de piso do ambiente, de acordo com a orientação das aberturas) e por fim, quatro variáveis relacionadas ao clima da região: temperatura anual média (TMA), desvio padrão da temperatura média (dpT), amplitude média anual (AMA) e desvio padrão da amplitude (dpA). Todas essas variáveis são consideradas iguais para a edificação real (no caso deste estudo, o caso base) e de referência.

Como já citado, o metamodelo usado para a avaliação da envoltória pelo novo regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações residenciais, tem como *output* o valor da carga térmica (CgT) para resfriamento e aquecimento dos APPs da unidade habitacional. A conversão para consumo em quilowatt hora por metro quadrado no ano (kWh/m<sup>2</sup>ano) é realizada através da divisão do valor obtido pelo *Coefficient of Performance* (COP) do sistema de condicionamento de ar utilizado. A nova proposta de método indica que o valor do COP a

ser considerado é o de 3,24 para resfriamento e aquecimento. O consumo de energia elétrica (C) pode ser obtido pela equação 1.

$$C_{\text{AQUECIMENTO,RESFRIAMENTO}} = \frac{CgT_{\text{AQUECIMENTO,RESFRIAMENTO}}}{3,24} \quad \text{Eq. (1)}$$

### 3.3.1 Avaliação da eficiência energética da envoltória da unidade habitacional

A proposta de escala para classificação de eficiência energética da envoltória, baseia-se no percentual de economia (E) da UH real em relação à de referência. A Tabela 7 apresenta as escalas de redução de consumo consideradas para cada classe de eficiência energética. O valor de E pode ser obtido através da Equação 2.

Tabela 7 – Escala de classificação de eficiência energética da envoltória

A	B	C (referência)	D	E
$E \geq 50\%$	$50\% > E \geq 25\%$	$25\% > E \geq 0\%$	$0\% > E \geq -10\%$	$-10\% > E$

Fonte: Proposta de Novo Regulamento Técnico para Etiquetagem de Edificações Residenciais.

$$E = \left( 1 - \frac{\text{Consumo real}}{\text{Consumo referência}} \right) * 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

### 3.4 ANÁLISE DA VIABILIDADE FINANCEIRA

A análise de viabilidade financeira é realizada através do cálculo do índice Taxa Interna de Retorno (TIR) e o *payback* corrigido. Para o cálculo desses valores, é necessário indicar o Valor Presente Líquido (VPL) do fluxo de caixa e também estipular a Taxa de Mínima de Atratividade, que para pessoas físicas é considerada a partir da rentabilidade da caderneta de poupança. O cálculo do VPL, TIR e *payback* corrigido está na Tabela 8 abaixo. O tempo de retorno máximo considerado será 5 anos.

Tabela 8 – Equações para análise financeira

Variável	Equação
<b>VPL</b>	$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{FC_n}{(1 + TMA)^n}$ Eq. (3)
<b>TIR</b> Se $TIR > TMA$ o projeto é viável.	$0 = \sum_{n=0}^N \frac{FC_n}{(1 + TIR)^n}$ Eq. (4)
<b>Payback corrigido</b>  É calculado os VPL para os 5 anos, se não retornar a um valor 0 nesse período, é realizado o seguinte cálculo:	$\text{payback} = \frac{ \text{último FC negativo} }{ \text{último FC negativo} - \text{primeiro FC positivo} }$ Eq. (5)

O Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) disponibiliza mensalmente os valores referentes a materiais e insumos empregados na construção civil (CAIXA, 2017). O arquivo utilizado para este trabalho foi referente ao mês de setembro de 2017, considerando a opção desonerada disponibilizada pelo SINAPI.

Para o consumo em reais da edificação, deve ser considerado o valor do quilowatt hora em reais para cada cidade, somado com o valor de três impostos: referente ao Programa de Integração Social (PIS), a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), este último variando de estado para estado, e os demais sendo tributos federais. O cálculo da tarifa com os tributos segue o apresentado na equação 6 abaixo.

$$Tarifa = \frac{Tarifa_{ANEEL}}{[1 - (ICMS + PIS + COFINS)]}$$
 Eq. (6)

Com o valor da tarifa de energia elétrica de São Paulo e Salvador, o gasto em reais com energia elétrica para refrigeração é obtido pela Equação 7 abaixo.

$$\text{Consumo em reais} = \text{Tarifa} * \text{Consumo UH} * \text{Área UH} \quad \text{Eq. (7)}$$

Com o valor do consumo da unidade habitacional para refrigeração em kWh/m<sup>2</sup>ano e a área da UH em m<sup>2</sup>.

### 3.5 COMPARAÇÃO MÉTODO SIMPLIFICADO E SIMULAÇÃO

Como já exposto nas referências bibliográficas deste trabalho, metamodelos são métodos de treinamento, que através de dados de entrada são capazes de prever um determinado resultado. Eles são construídos com base em simulações computacionais e adotam simplificações para tornar mais rápido e prático a determinação da carga térmica para resfriamento de edificações, por exemplo.

Devido às simplificações e por falhas durante o treinamento do metamodelo, eles podem apresentar falhas e a forma de avaliar o quão precisa se encontra a ferramenta é através da simulação computacional.

Para a simulação computacional da unidade habitacional, foram consideradas diretrizes impostas pelo RTQ-R, que indicam a densidade de potência dos equipamentos e de iluminação, densidade de pessoas nos quartos e cozinha e o seu período de ocupação. Além disso, o RTQ-R indica que a edificação deve ser modelada com sistema híbrido, ou seja, com a possibilidade de utilizar o ar condicionado e a ventilação natural. Para a modelagem deste sistema, deve-se utilizar o EMS, que acoplado ao *EnergyPlus*, verifica qual a temperatura do ambiente durante o período de ocupação. Caso a temperatura do ambiente ultrapasse o valor de conforto determinado com base na ASHRAE 55, o sistema de ar condicionado é ligado e só é desligado quando o ambiente é desocupado. Dessa forma, o uso do sistema de climatização fica mais próximo do real (SORGATO, 2015).

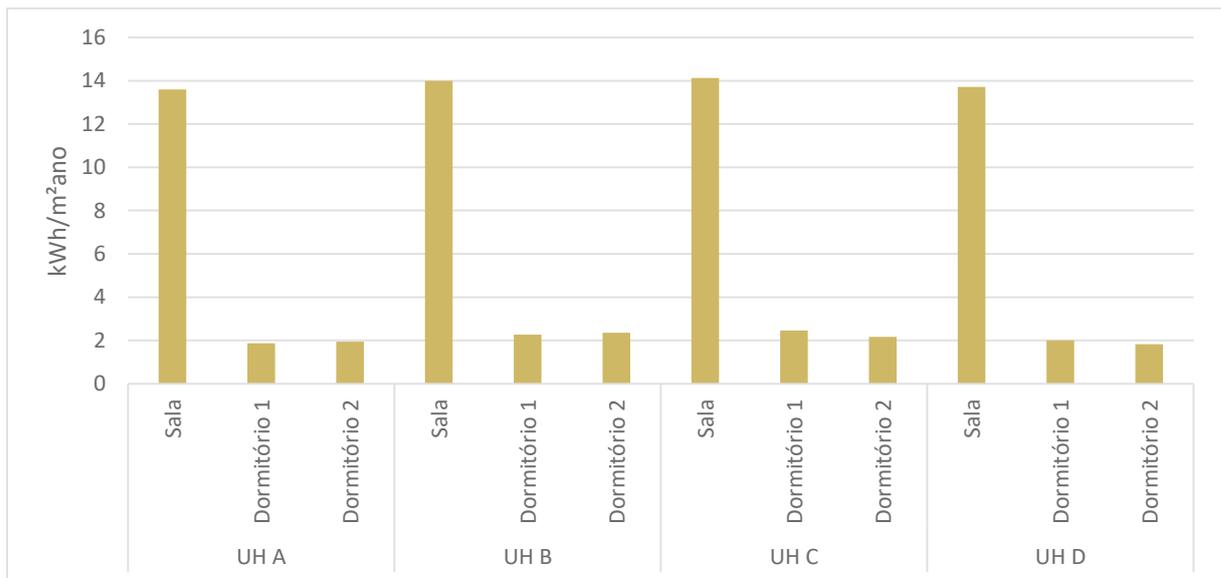
Neste trabalho, a comparação consistirá em modelar uma unidade habitacional da cobertura da edificação no programa *EnergyPlus*, conforme o RTQ-R, a fim de analisar os resultados obtidos de resfriamento da edificação por meio da simulação computacional do caso base e com a aplicação dos pacotes de medidas, para compará-los com os resultados obtidos para demanda de resfriamento pelo metamodelo desenvolvido para a proposta do novo método simplificado de etiquetagem de edificações residenciais.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CASO BASE

Para São Paulo, o consumo de energia elétrica para refrigeração encontrado para a cobertura do caso base foi pequeno e apresentou pouca variação. As unidades habitacionais com as aberturas dos dormitórios voltadas para o norte (UH A e D) apresentaram valores menores, por volta de 17,4 kWh/m<sup>2</sup>ano, enquanto que as com aberturas voltadas para o sul (UH B e C) apresentaram consumos de 18,8 kWh/m<sup>2</sup>ano. Quando analisados os ambientes separadamente, os que apresentaram maior consumo de energia elétrica para resfriamento em todas as UHs foram as salas de estar, com mais de 70% da demanda total. A justificativa para essa diferença entre os valores obtidos para dormitórios e sala é que o metamodelo considera a ocupação da sala durante o dia e a noite, enquanto os dormitórios são considerados ocupados somente à noite, período com temperaturas mais amenas. Na Figura 4 abaixo estão representados os consumos em energia elétrica para refrigeração de cada ambiente por UH. Os resultados de consumo expostos neste capítulo consideram a carga térmica anual dividida pelo COP do ar condicionado e pela área dos ambientes da edificação.

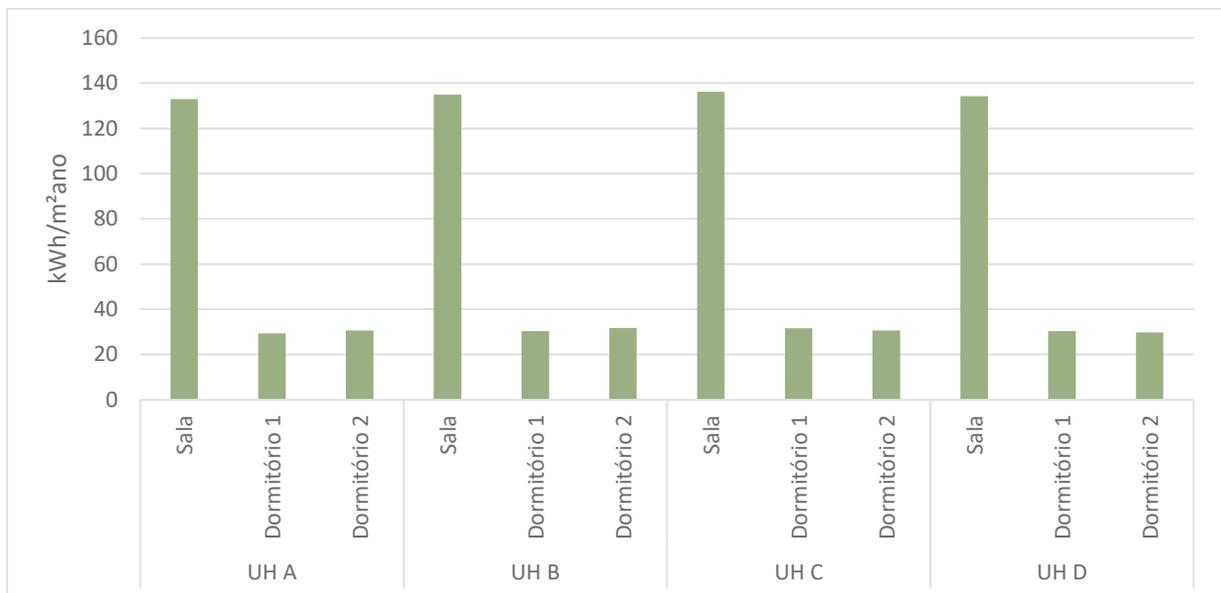
Figura 4 – Consumo em kWh/m<sup>2</sup>ano do caso base por ambiente de permanência prolongada nas unidades habitacionais de São Paulo



Para Salvador, o consumo de energia para refrigeração do caso base, da mesma forma que para a cidade de São Paulo, apresentou baixas variações e as unidades habitacionais com

as aberturas dos dormitórios voltadas para o norte (UH A e D) apresentaram melhor desempenho, com aproximadamente 193 kWh/m<sup>2</sup>ano de consumo. As UHs com as aberturas dos dormitórios voltadas para sul (UH B e C) tiveram o consumo aproximado de 197 kWh/m<sup>2</sup>ano. Analisando somente o ambiente sala de estar com cozinha conjugada, a demanda de energia elétrica para resfriamento neste ambiente é mais de 60% da demanda total da UH. Na Figura 5 estão representados os consumos em energia elétrica para refrigeração de cada ambiente por UH.

Figura 5 - Consumo em kWh/m<sup>2</sup>ano do caso base por ambiente de permanência prolongada nas unidades habitacionais de Salvador

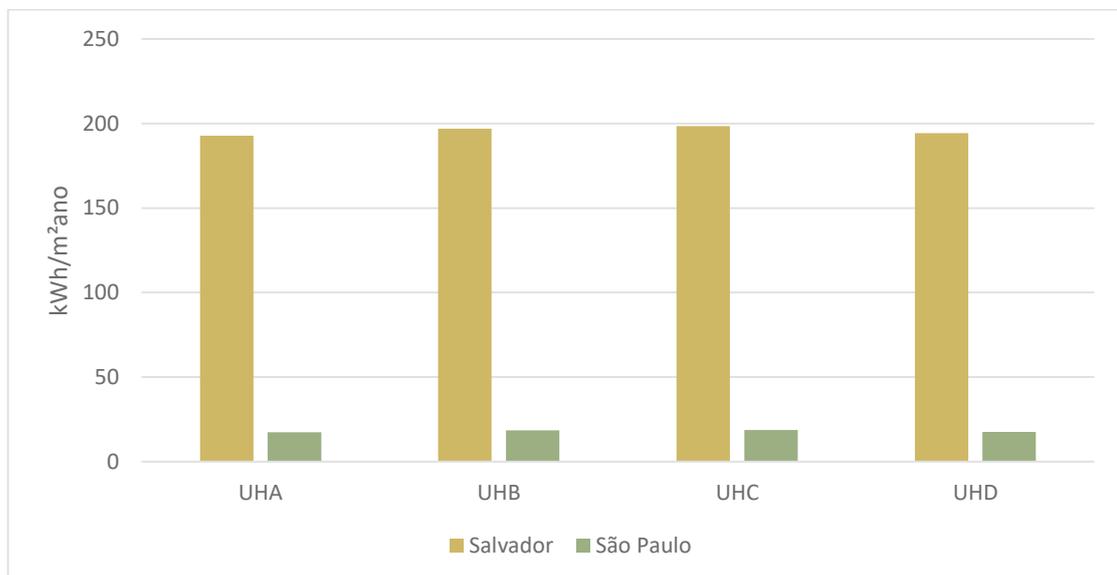


O dormitório 2 nas unidades habitacionais A e B, tem a sua parede externa com maior área voltada para a orientação oeste, e nas UHs C e D, voltada para o leste. Já o dormitório 1 nas UHs C e D tem a sua parede externa de maior área voltada para a orientação oeste e nas UHs A e B voltada para o leste. Mesmo com orientações distintas, não foi possível perceber uma diferença significativa no consumo dos dormitórios 1 e 2 em cada UH, principalmente quando comparados os ambientes com a abertura voltada para igual orientação, porém com a fachada de maior área voltada para orientações diferentes, por exemplo: dormitório 2 nas UHs A e D (UH A fachada voltada para o oeste, UH D fachada para o leste) teve consumo igual a 1,39 kWh/m<sup>2</sup>ano na UH A e 1,29 kWh/m<sup>2</sup>ano na UH D para São Paulo, e consumo igual a 12,45 kWh/m<sup>2</sup>ano para o UH A e 11,91 kWh/m<sup>2</sup>ano na UH D para Salvador.

Analisando os dados obtidos para as cidades de São Paulo e Salvador, o consumo de energia elétrica para refrigeração na cidade de Salvador é aproximadamente onze vezes maior do que São Paulo. A carga térmica necessária para resfriamento em Salvador superior a necessária em São Paulo, confirma as referências bibliográficas que dizem que é necessário um estudo do clima do local em que a edificação será implantada e não somente replicar projetos implantados em uma determinada região para outra, visto que o fator climático influencia diretamente no consumo (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; INVIDIATA et al., 2016; FERREIRA; ALMEIDA; RODRIGUES, 2016; CBCS, 2017). Porém, quanto a diferença significativa entre as cidades, de onze vezes mais consumo para resfriamento em Salvador do que em São Paulo, é necessário um estudo mais aprofundado do metamodelo desenvolvido e da base de dados de simulações, pois mesmo que Salvador possua um clima mais quente do que São Paulo, a diferença entre as cidades não deveria chegar a um patamar tão elevado.

Na Figura 6 abaixo, é apresentada uma síntese com os consumos das unidades habitacionais nas cidades de São Paulo e Salvador.

Figura 6 – Comparação entre os consumos das unidades habitacionais de São Paulo e Salvador



Para a conversão do kWh/m²ano em reais, foram consideradas as tarifas residenciais aplicadas pelas concessionárias em São Paulo e pela concessionária que atende Salvador, além dos tributos incidentes sob as tarifas: os federais, referentes ao PIS e COFINS, e o tributo estadual, ICMS. Em São Paulo as tarifas variaram de R\$ 0,40 até R\$ 0,71 no mês de outubro de 2017, como média o valor encontrado foi de R\$ 0,49, e Salvador a única concessionária utilizou uma tarifa de R\$ 0,44. Os tributos considerados foram PIS/COFINS com 11,75% e

ICMS de ambas as cidades com 25% (BRASIL, 2017; SÃO PAULO, 2017; SALVADOR, 2017). Dessa forma os valores das tarifas utilizadas foram: R\$ 0,78 para São Paulo e R\$ 0,70 para Salvador. Os gastos com energia elétrica para refrigeração do caso base para cada UH estão na Tabela 9.

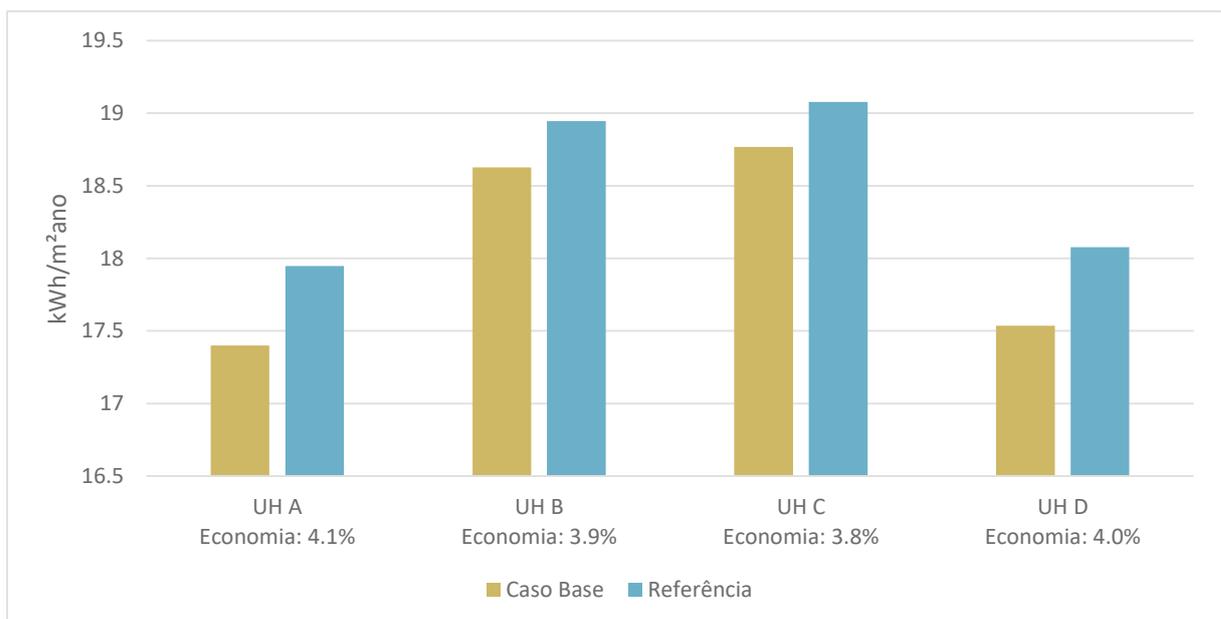
Tabela 9 – Consumo anual, em reais, das unidades habitacionais de São Paulo/SP e Salvador/BA

<b>Unidade Habitacional</b>	<b>São Paulo/SP</b>	<b>Salvador/BA</b>
<b>UH A</b>	R\$ 537,60	R\$ 5.346,76
<b>UH B</b>	R\$ 575,46	R\$ 5.459,91
<b>UH C</b>	R\$ 579,83	R\$ 5.501,41
<b>UH D</b>	R\$ 541,80	R\$ 5.387,74

Cabe ressaltar que o valor da tarifa não considera o desconto do governo federal para a população de baixa renda, chamado de “Tarifa Social”, visto que necessita a comprovação de alguns itens impostos pela ANEEL, entre eles o consumo médio até 80 kWh por mês ou entre 80 a 220 kWh, o que não é a faixa de consumo do caso base em estudo (ANEEL, 2017).

A eficiência energética das unidades habitacionais apresentou bastante diferença entre as capitais. Em São Paulo, a economia, apesar de pequena, ficou positiva em relação à edificação de referência, como pode-se observar na Figura 7.

Figura 7 - Consumo de energia elétrica para refrigeração do caso base e referência em São Paulo



Dessa forma, segundo a Tabela 7 – Escala de classificação de eficiência energética da envoltória do item 3.3.1 deste trabalho, adaptada na Figura 8 abaixo, a classe de eficiência energética das UHs em São Paulo ficou como C, classificação igual à edificação de referência.

Figura 8 – Classificação de eficiência energética das UHs do caso base em São Paulo

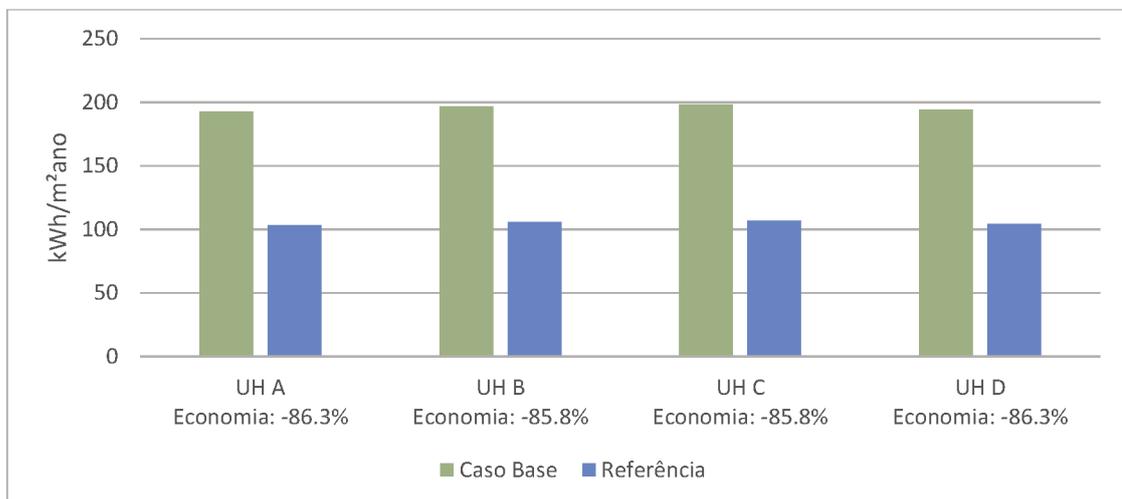
A	B	C (referência)	D	E
$E \geq 50\%$	$50\% > E \geq 25\%$	$25\% > E \geq 0\%$	$0\% > E \geq -10\%$	$-10\% > E$

  
 UHs em São Paulo com economias entre 3,8% e 4,1%

A classe C em São Paulo não era esperada, uma vez que os componentes construtivos da envoltória do caso base apresentam características consideradas piores para o desempenho térmico do que a edificação de referência. Nas paredes externas a transmitância térmica e capacidade térmica é mais elevada do que o caso de referência, na cobertura, a transmitância é maior e a capacidade menor. Além disso, a absorvância da envoltória tem valores maiores para a cobertura do caso base, o que deveria piorar ainda mais a classe do caso base.

Em Salvador, como era esperado, devido aos componentes construtivos da edificação apresentarem alta transmitância térmica e absorvância da cobertura também alta (no limite da aplicação do método simplificado do RTQ-R com 0,80), e o clima quente da região, a economia das unidades habitacionais do caso base com relação à referência ficou negativa, ou seja, além de não existir, o caso base consome mais do que o de referência. Na Figura 9 abaixo pode-se observar que o caso base chega a consumir quase 100 kWh/m<sup>2</sup>ano a mais que o caso de referência em algumas UHs.

Figura 9 - Consumo de energia elétrica para refrigeração do caso base e referência em Salvador



Na Figura 10 abaixo, está a classificação de eficiência energética das unidades habitacionais de Salvador.

Figura 10 - Classificação de eficiência energética das UHs do caso base em Salvador

A	B	C (referência)	D	E
$E \geq 50\%$	$50\% > E \geq 25\%$	$25\% > E \geq 0\%$	$0\% > E \geq -10\%$	$-10\% > E$

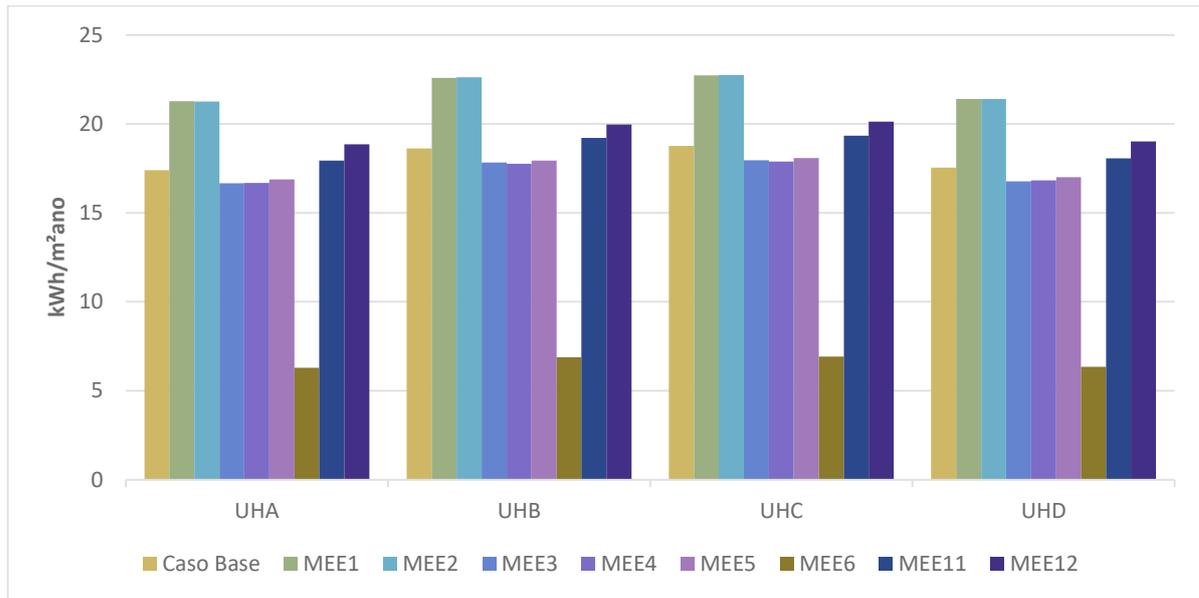


UHs em Salvador com  
"economias" entre -85% e -86%

#### 4.2 APLICAÇÃO DAS MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CASO BASE

Os resultados para São Paulo se mostraram satisfatórios quando foi utilizada parede e cobertura com isolamento (MEE3 e MEE6, respectivamente), como também absorvância baixa na parede (MEE7) e cobertura (MEE9). As medidas de eficiência energética que pioraram o consumo foram as MEE1 e 2, referentes à mudança no tipo de parede. Este comportamento é ligado, entre outros fatores, à redução na capacidade térmica. A MEE12, referente ao aumento na área de vão para influenciar no aumento da área de ventilação, também aumentou o consumo. Este comportamento é resultado da maior área exposta de vidro. Na Figura 11 é apresentado o resultado no consumo em relação ao caso base, com a aplicação das MEEs referentes à mudança da parede, cobertura e esquadrias. O consumo, quando modificada a absorvância, está indicado na Figura 12.

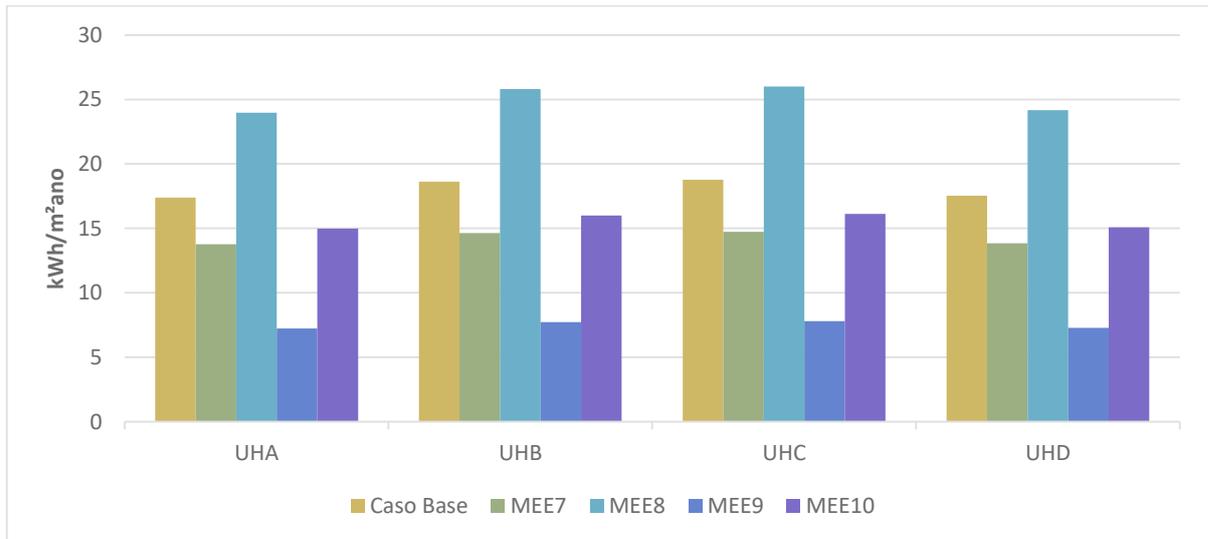
Figura 11 – Consumo das unidades habitacionais em São Paulo com a aplicação das MEEs.



A mudança na absorvância foi avaliada individualmente, pois os valores de 0,70 foram considerados para verificar como varia o consumo da unidade habitacional com a troca de cores. Dessa forma pode-se verificar que quando alterada a parede de 0,50 para 0,70 o consumo eleva-se em aproximadamente 7 kWh/m<sup>2</sup>ano, e quando troca-se de 0,50 para 0,30 ocorre uma redução de aproximadamente 4 kWh/m<sup>2</sup>ano. Já para a absorvância da cobertura, quando é realizada a mudança de 0,80 para 0,40 a redução fica na casa dos 11 kWh/m<sup>2</sup>ano, enquanto que mudando a cor da telha para uma com absorvância de 0,70 é obtida uma redução de aproximadamente 3 kWh/m<sup>2</sup>ano, ou seja, um quarto da redução encontrada para 0,40.

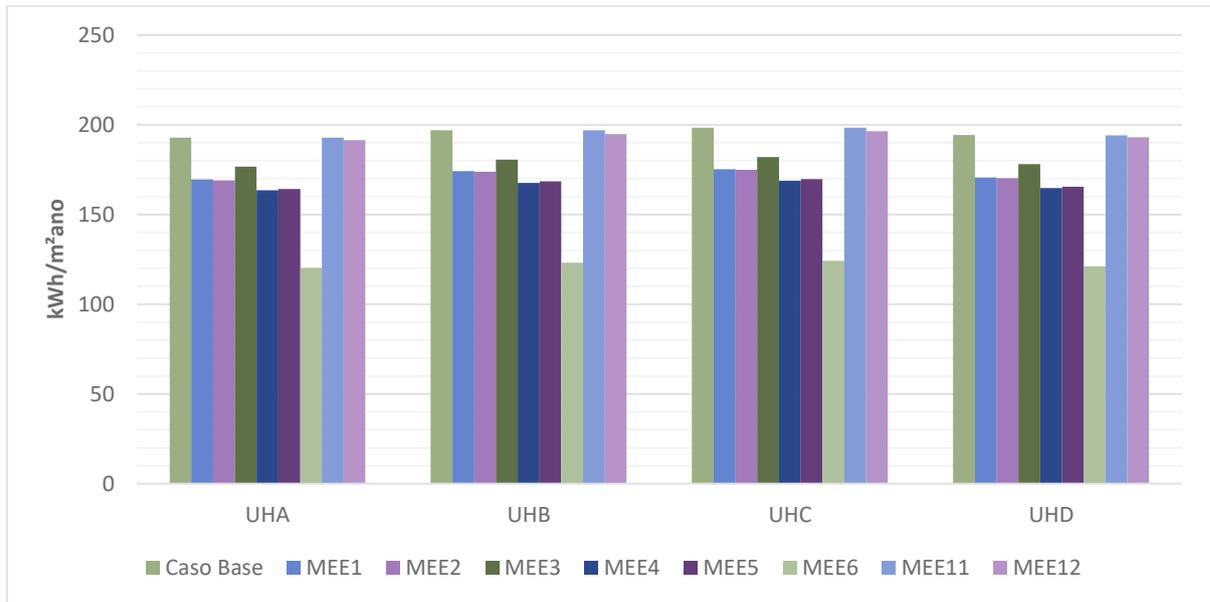
Quando observada a Figura 11 e Figura 12 é verificado que as medidas aplicadas 1, 2 e 12 aumentaram o consumo da edificação, mas não chegaram a valores acima de 25 kWh/m<sup>2</sup>ano de consumo, enquanto que a simples troca de absorvância da parede de 0,50 para 0,70 elevou a demanda de energia elétrica para resfriamento a valores acima de 25 kWh/m<sup>2</sup>ano.

Figura 12 - Consumo das unidades habitacionais em São Paulo com a mudança de absorvância.



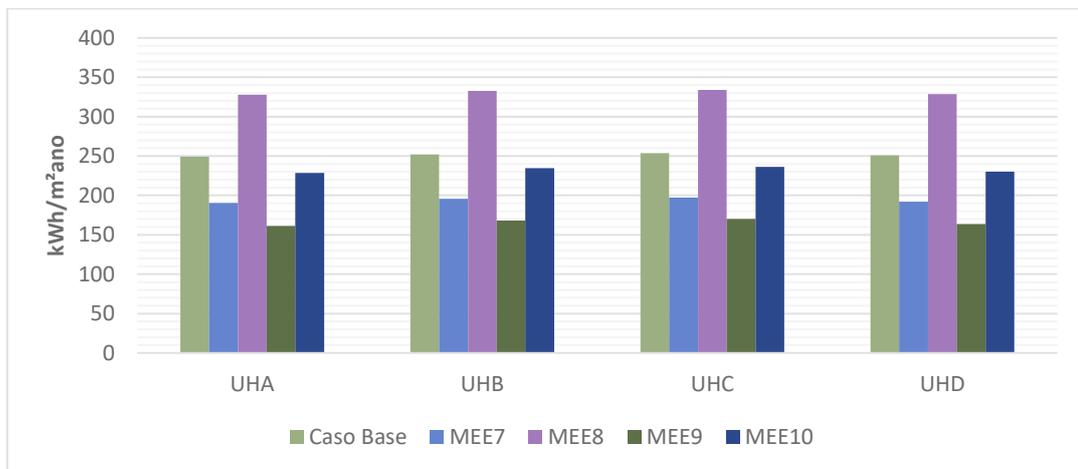
Em Salvador, com exceção da MEE8 referente ao aumento da absorvância da parede, todas as medidas de eficiência energética aplicadas apresentaram redução no consumo da unidade habitacional. Com destaque para a MEE6 da cobertura com isolamento, que apresentou a maior redução, como pode-se observar na Figura 13 abaixo. Um dos resultados que mais chamou a atenção foi a MEE3, referente à parede com isolamento, que apresentou um consumo maior do que as MEE1 e MEE2, paredes sem isolamento. Esse aumento no consumo foi objeto de diversos estudos que indicam que paredes muito isoladas não apresentam resultados satisfatórios para climas quentes (MELO, 2012; MELO; SORGATO; LAMBERTS, 2013). Outro resultado que chamou a atenção foi para a MEE11, com o uso de venezianas nos quartos, devido ao fato de utiliza-las somente nos quartos, a sala com cozinha conjugada permaneceu com o consumo do caso base e por isso elevou o consumo de carga térmica de todo o apartamento.

Figura 13 - Consumo das unidades habitacionais em Salvador com a aplicação das MEEs.



As mudanças no consumo com a aplicação de diferentes absorvâncias se comportaram como esperado. Reduzindo o consumo quando utilizadas absorvâncias mais baixas e aumentando quando utilizada absorvância mais alta, como é o caso da MEE8 referente ao uso de cor com valor 0,70 na parede. Novamente observa-se que a mudança da cor da parede de 0,50 para 0,70 impactou significativamente no aumento do consumo de energia elétrica para resfriamento, apresentando valores acima de 250 kWh/m²ano, influência que nenhuma outra medida aplicada alcançou.

Figura 14 - Consumo das unidades habitacionais em Salvador com a mudança de absorvância.



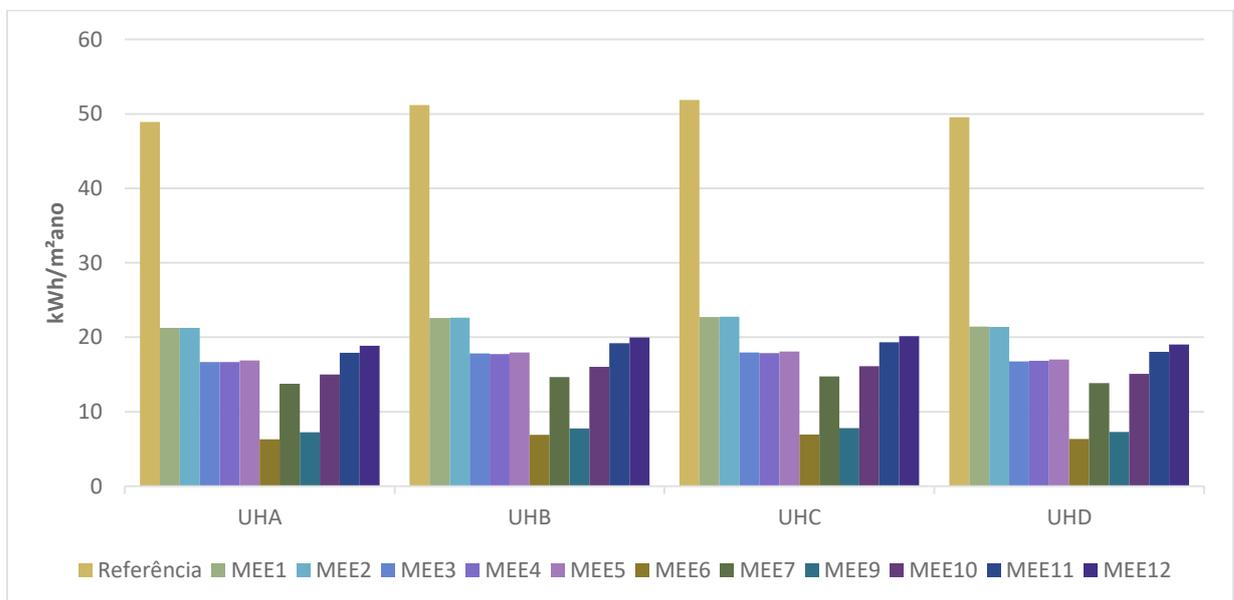
Para a avaliação da eficiência energética o consumo de cada uma das medidas aplicadas foi comparado com o obtido para a edificação de referência, que possui as seguintes características: parede externa com transmitância térmica 3,65 W/m²K e capacidade térmica de

158 kJ/m<sup>2</sup>K, cobertura com transmitância térmica de 2,29 W/m<sup>2</sup>K e capacidade térmica de 22,87 kJ/m<sup>2</sup>K, absorvâncias da parede igual a 0,60 e cobertura 0,60 para São Paulo e 0,40 para Salvador. Por fim, as esquadrias são consideradas com fator de ventilação igual a 0,50 para São Paulo e 0,75 para Salvador.

Para São Paulo, o caso base apresentou classe de eficiência energética igual a C e com a aplicação de algumas das medidas foi observado um aumento no consumo, dessa forma, ao invés de obter uma melhor classificação, continuou como classe C ou elevou para D ou E. A MEE que apresentou classe E foi a 8, com aumento da absorvância da parede. As medidas que obtiveram melhor classificação de eficiência energética foram: MEE 9, redução da absorvância da cobertura de 0,80 para 0,40, que apresentou classe A de eficiência e a MEE 6, troca da cobertura para uma com telha metálica e isolante, que apresentou classe A de eficiência.

Na Figura 15 abaixo, pode-se observar as variações no consumo para cada UH com a aplicação de cada uma das medidas de eficiência em relação à condição de referência; a medida 8 foi desconsiderada neste gráfico, por ela não ser considerada uma medida de eficiência energética.

Figura 15 - Consumo das unidades habitacionais em São Paulo com a aplicação das MEEs com relação à condição de referência.



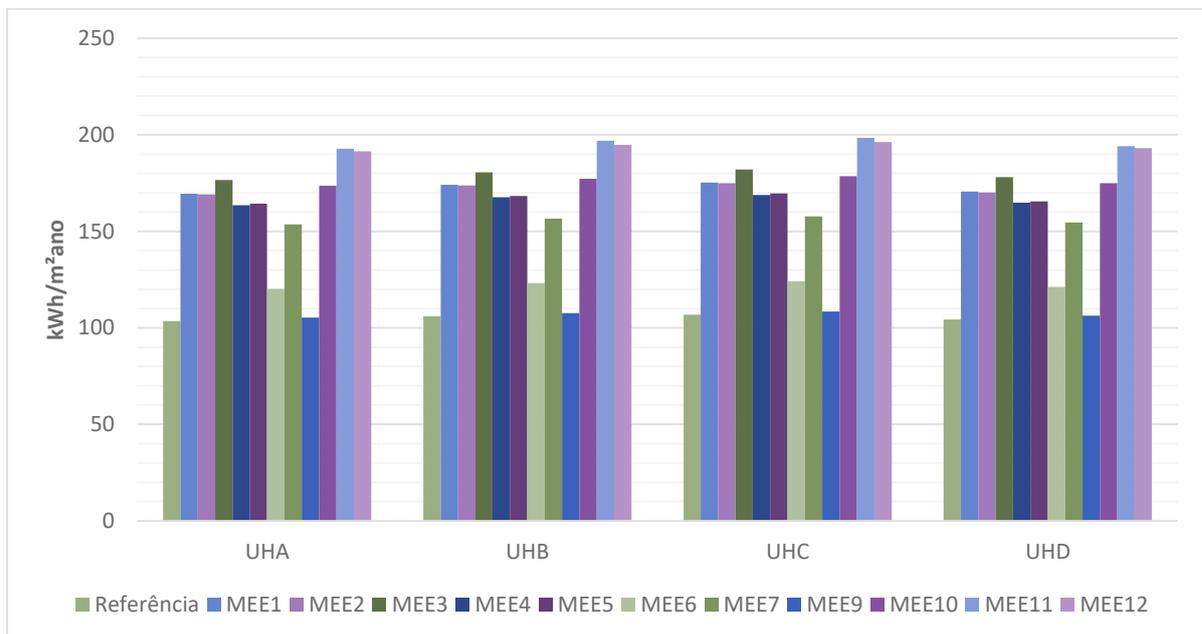
Em Salvador os resultados obtidos foram de classificação E para a grande maioria das medidas de eficiência energética aplicadas, resultado coerente com o consumo visto para o caso base, já que para a medida elevar a classificação energética, ela deveria apresentar uma redução

de aproximadamente 80 kWh/m<sup>2</sup>ano no consumo de energia elétrica para refrigeração com relação ao caso base, como foi o resultado obtido para a aplicação da MEE6 em duas unidades habitacionais da edificação e da MEE9, que obtiveram classe D de eficiência.

A diferença no resultado da classificação entre UHs do mesmo pavimento é referente à orientação das aberturas dos ambientes de permanência prolongada. Os apartamentos que obtiveram classe D de eficiência para a MEE6 foram os A e D, que possuem suas aberturas voltadas para o Norte e dessa forma, recebem o sol durante a manhã e no restante do dia não há mais ganho direto de calor. Esse padrão pode ser notado em todas as análises, para Salvador e São Paulo, porém em alguns casos a mudança de consumo é muito pequena, especialmente para São Paulo.

Na Figura 16, pode-se observar que nenhuma medida de eficiência energética aplicada reduziu o consumo a ponto de se tornar menor que a condição de referência.

Figura 16 - Consumo das unidades habitacionais em Salvador com a aplicação das MEEs com relação à condição de referência.



Como já exposto nas referências bibliográficas, vários fatores influenciam na eficiência energética da edificação e avaliar a medida individualmente serve para verificar qual o impacto da mesma em relação ao caso base em estudo. Dessa forma, é essencial verificar quais as medidas que apresentaram os melhores resultados para a redução do consumo em cada cidade e criar pacotes de medidas ideais para serem aplicados na edificação.

Com relação à eficiência energética, as melhores e piores classificações podem ser observadas na Tabela 10, lembrando que o caso base em São Paulo ficou com classe C e com economia entre 3,8% e 4,1%, enquanto Salvador ficou com classe E e economia de -86,3% e -85,8%. Para São Paulo, cinco medidas pioraram o consumo das unidades habitacionais com relação à edificação de referência; já para Salvador, duas aumentaram ainda mais o consumo.

Tabela 10 – Classificação de eficiência energética para as medidas aplicadas no caso base para São Paulo e Salvador

Medida de Eficiência Energética	Propriedade	São Paulo/SP		Salvador/BA	
<b>MEE1:</b> Parede bloco de concreto.	U: 2,72 W/m <sup>2</sup> K CT: 178 kJ/m <sup>2</sup> K	-19,3% a -18,4%	E	-64,3% a -63,8%	E
<b>MEE2:</b> Parede bloco cerâmico.	U: 2,46 W/m <sup>2</sup> K CT: 150 kJ/m <sup>2</sup> K	-19,4% a -18,4%	E	-63,9% a -63,1%	E
<b>MEE3:</b> Parede com concreto + isolante.	U: 1,24 W/m <sup>2</sup> K CT: 281 kJ/m <sup>2</sup> K	5,8% a 7,2%	C	-70,6% a -70,4%	E
<b>MEE4:</b> Cobertura laje com EPS + telha fibrocimento.	U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K	6,2% a 7,0%	C	-58,1% a -57,9%	E
<b>MEE5:</b> Cobertura laje com EPS + telha metálica.	U: 1,54 W/m <sup>2</sup> K CT: 134 kJ/m <sup>2</sup> K	5,2% a 6,0%	C	-58,7% a -58,9%	E
<b>MEE6:</b> Laje maciça + telha sanduíche com isolante.	U: 0,55 W/m <sup>2</sup> K CT: 230 kJ/m <sup>2</sup> K	63,7% a 64,9%	A	-16,2%	E
<b>MEE7:</b> redução na absorvância da parede.	$\alpha$ : 0,30	22,7% a 23,3%	C	-48,3% a -47,7%	E
<b>MEE8:</b> aumento na absorvância da parede.	$\alpha$ : 0,70	-36,3% a -33,6%	E	-143,4% a -142,8%	E
<b>MEE9:</b> redução na absorvância da cobertura.	$\alpha$ : 0,40	59,1% a 59,7%	A	-1,8% a -1,6%	D
<b>MEE10:</b> redução na absorvância da cobertura.	$\alpha$ : 0,70	15,5% a 16,5%	C	-67,2% a -67,7%	E
<b>MEE11:</b> uso de veneziana nas esquadrias.	Aplicada nos dormitórios	UHA e D: 0,1%	C	-86,2% a -85,7%	E
		UHB e C: -1,4%	D		
<b>MEE12:</b> aumento na área de vão das aberturas.	-	-5,1% a -5,5%	D	-85,1% a -83,7%	E

Com a análise de eficiência energética concluída, a análise financeira pôde ser iniciada. Para esta etapa foram consideradas a área de fachada externa do pavimento, a área de cobertura e a quantidade de aberturas nos ambientes de permanência prolongada. A área de parede externa é de 40,52 m<sup>2</sup> por apartamento e 162,07 m<sup>2</sup> por pavimento. Esta área desconsidera partes de circulação da edificação multifamiliar, visto que será considerado somente o consumo das unidades habitacionais, como também as áreas de vão das aberturas. A área de cobertura total do pavimento é de 197,43 m<sup>2</sup> e de laje é de 194,26 m<sup>2</sup>. A quantidade de aberturas por unidade habitacional é de quatro, o total no pavimento é dezesseis. Porém, a UH possui diferentes aberturas entre os dormitórios e a sala de estar conjugada com cozinha. Isto será considerado no cálculo do custo da aplicação das medidas.

As mudanças consideradas para o cálculo da viabilidade financeira do projeto serão a troca de parede e cobertura, pintura da cobertura e a troca das janelas. A pintura das paredes externas não será contabilizada porque essa atividade é realizada na edificação por estética e não por medida de eficiência. Dessa forma este trabalho apresenta como a utilização de cores mais claras pode impactar positivamente na eficiência energética sem acarretar custo adicional. Para os custos das mudanças nas paredes e cobertura, foi considerado o valor da mão de obra, sempre verificando como foi realizada a composição dos custos através da planilha de custos analítica do SINAPI (CAIXA, 2017). Já para as aberturas, foi considerado somente o valor unitário, visto que não existe alteração no valor da mão de obra para instalação de cada tipo de janela.

As medidas que apresentaram baixa economia em ambas as cidades foram descartadas para a análise de viabilidade econômica, são elas: 5 e 12, que representam a mudança na cobertura para laje com EPS e telha metálica e o aumento da área de vão das aberturas. A medida 11 também apresentou um dos piores desempenhos em ambas as cidades, mas será considerada no cálculo juntamente com outras medidas, a fim de verificar o seu potencial de economia, além de que, o metamodelo considera simplificações na área de ventilação natural e isso pode refletir no resultado obtido.

A medida 3 será desconsiderada na análise financeira para Salvador, devido à sua baixa eficiência energética para climas quentes. As medidas 1 e 2, mesmo apresentando baixo desempenho serão consideradas para o cálculo da viabilidade financeira em São Paulo, pois, a baixa economia, com relação ao caso base, pode ser resultado da combinação dos componentes construtivos.

Foram consideradas algumas simplificações para a composição dos custos, são elas:

- Para a MEE1 não foi considerado o serviço de aplicação de gesso no interior da edificação, mas sim o serviço de reboco e pintura, composição dada pelo SINAPI. Porém analisando de forma individual o serviço de aplicação de gesso e aplicação de reboco é visto uma diferença pequena de valores, de cerca de R\$ 1,00 por m<sup>2</sup>. Mais detalhes podem ser vistos na tabela do Anexo A deste trabalho;
- Não foram consideradas as estruturas do telhado para a análise, visto que independentemente da cobertura instalada, este serviço deverá ser executado;
- O serviço de instalação da lâ de rocha utilizada na MEE3 foi considerado como da instalação em *drywall*, visto que não existia nenhuma outra composição ou insumo semelhante na planilha do SINAPI;
- A pintura considerada para as telhas foi a automotiva, por ser a única composição apresentada no SINAPI para este fim;
- Esta considerado somente o serviço onde ocorreu mudança, não é considerado nenhum outro custo referente à estrutura da edificação, pisos, instalações, etc.

Na Tabela 11 abaixo, estão os custos do caso base e de implantação das medidas de eficiência energética 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 11.

Tabela 11 – Custos de implantação referentes ao caso base e a aplicação de medidas de eficiência energética

Caso		São Paulo/SP	Salvador/BA
<b>Paredes Externas</b>	<b>Caso Base</b>	R\$ 8.492,92	R\$ 9.880,11
	<b>MEE1</b>	R\$ 7.356,36	R\$ 6.461,73
	<b>MEE2</b>	R\$ 5.518,48	R\$ 5.550,90
	<b>MEE3</b>	R\$ 14.730,35	-
<b>Cobertura</b>	<b>Caso Base</b>	R\$ 13.743,55	R\$ 14.936,64
	<b>MEE4</b>	R\$ 13.713,15	R\$ 14.610,57
	<b>MEE6</b>	R\$ 25.641,27	R\$ 21.464,70
	<b>MEE9</b>	R\$ 3.725,50	R\$ 3.504,38
<b>Esquadrias</b>	<b>Caso Base</b>	R\$ 1.404,90	R\$ 699,26
	<b>MEE11</b>	R\$ 2.107,34	R\$ 1.048,90

Na Tabela 11 pode-se observar que a MEE6, que representa a cobertura metálica com isolante térmico, foi a mais cara e mesmo possuindo uma alta eficiência energética, será

desconsiderada para a construção dos pacotes de medidas devido a seu custo. Como a edificação em estudo é uma multifamiliar de baixa renda (nível 1, renda familiar de até R\$ 1.600,00) e este tipo de cobertura se torna inviável.

#### 4.3 PACOTE IDEAL DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA A EDIFICAÇÃO

Para a escolha dos pacotes ideais de medidas de eficiência energética, foi analisada a classificação de eficiência energética segundo o RTQ-R e o custo para implantação. Dessa forma, foi decidido abordar inicialmente a classe de eficiência e depois o custo. Na Tabela 12 abaixo está um resumo das medidas aplicadas e seu investimento para implantação, juntamente com o valor do caso base. O valor do caso base é referente ao custo de implantação das paredes, cobertura e esquadrias consideradas como caso base e esta soma serviu como parâmetro para indicar se a medida de eficiência implantada significaria um aumento no valor da construção ou não.

Tabela 12 – Custos de implantação das medidas de eficiência energética e sua classificação

Caso		São Paulo/SP		Salvador/BA	
<b>Paredes Externas</b>	<b>Caso Base</b>	R\$ 8.492,92	C	R\$ 9.880,11	E
	<b>MEE1</b>	R\$ 7.356,36	E	R\$ 6.461,73	E
	<b>MEE2</b>	R\$ 5.518,48	E	R\$ 5.550,90	E
	<b>MEE3</b>	R\$ 14.730,35	C	-	E
<b>Cobertura</b>	<b>Caso Base</b>	R\$ 13.743,55	C	R\$ 14.936,64	E
	<b>MEE4</b>	R\$ 13.713,15	C	R\$ 14.610,57	E
	<b>MEE9</b>	R\$ 3.725,50	A	R\$ 3.504,38	D
	<b>Caso Base</b>	R\$ 1.404,90	C	R\$ 699,26	E
<b>Esquadrias</b>	<b>MEE11</b>	R\$ 2.107,50	D C	R\$ 1.048,90	E

Para os pacotes de medidas, existem oito combinações possíveis para Salvador e doze para São Paulo. Em São Paulo, seis pacotes de medidas de eficiência energética elevaram a classificação das unidades habitacionais para A; já para Salvador nenhum pacote conseguiu chegar a esta classe, sendo que somente três conseguiram que todas as UHs obtivessem classe B, que são os pacotes que consideram a telha de fibrocimento pintada com absorvância de 0,40,

o restante dos pacotes testados obtiveram classificação E. Todas as vinte combinações e seus resultados podem ser visualizadas na

Tabela 13, todas foram testadas no metamodelo

Tabela 13 – Classificação de eficiência energética dos pacotes de medidas testados.

	Pacotes de medidas de eficiência energética			São Paulo/SP	Salvador/BA	
	Parede	Cobertura	Esquadrias			
PCT 1	MEE1	MEE4 + MEE9	MEE11	A	B	
PCT 2	MEE1	MEE4 + MEE9		A	UHA e D: B	UHB e C: C
PCT 3	MEE1	MEE4	MEE11	D	E	
PCT 4	MEE1	MEE4		D	E	
PCT 5	MEE2	MEE4 + MEE9	MEE11	A	B	
PCT 6	MEE2	MEE4 + MEE9		A	B	
PCT 7	MEE2	MEE4	MEE11	D	E	
PCT 8	MEE2	MEE4		D	E	
PCT 9	MEE3	MEE4 + MEE9	MEE11	A	-	
PCT 10	MEE3	MEE4 + MEE9		A	-	
PCT 11	MEE3	MEE4	MEE11	C	-	
PCT 12	MEE3	MEE4		C	-	

Para Salvador, como nenhum dos pacotes obteve classificação A, foram realizados mais alguns testes com aumento das aberturas para ventilação de 50% para 75% e a combinação do aumento da abertura de ventilação com a redução na absorvância das paredes de 0,50 para 0,30. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 14 abaixo.

Tabela 14 – Melhorias nos pacotes de medidas de eficiência energética para Salvador

Pacote	Primeiro Teste		Abertura para ventilação: 75%	Ventilação 75% e $\alpha$ das paredes de 0,40	Ventilação 75% e $\alpha$ das paredes de 0,30
PCT 1	B		B	B	B
PCT 2	UHA e D: B	UHB e C: C	B	B	B
PCT 3	E		E	D	C
PCT 4	E		E	D	C
PCT 5	B		B	B	B
PCT 6	B		B	B	B
PCT 7	E		E	D	C
PCT 8	E		E	D	C

Mesmo com as melhorias não foi possível obter classificação A para as unidades habitacionais de Salvador. Foram verificados os limites impostos para desempenho térmico na NBR 15220 (2008) e 15575 (2013) e visto que, com exceção dos pacotes 3, 4, 7 e 8 (transmitância térmica da cobertura acima de 1,50 W/m<sup>2</sup>K), o restante está dentro do estipulado por norma. Os quatro pacotes que não atendem as diretrizes das normativas, também são os que segundo o RTQ-R atual obteriam classificação máxima C, o que também foi encontrado na avaliação pelo novo RTQ-R.

Mesmo não alcançando classificação A, os quatro pacotes que obtiveram classificação B com a mudança do fator de ventilação e da absorvância da parede foram os considerados para a análise de custo.

Para São Paulo, os pacotes escolhidos para análise financeira foram os que obtiveram classe A de eficiência, ou seja, 1, 2, 5, 6, 9 e 10. Para Salvador, mesmo nenhum dos pacotes alcançando A, foram escolhidos para análise os pacotes 1, 2, 5 e 6, ou seja, os que obtiveram classificação B, com a mudança do fator de ventilação para 75% e a redução da absorvância das paredes para 0,30.

Nas Tabela 15 e Tabela 16 abaixo, está um resumo dos pacotes de medidas escolhidos para cada cidade. Pode-se observar que em São Paulo, todas as composições de paredes testadas tiveram resultados positivos quando reduzida a absorvância térmica destas.

Tabela 15 – Pacotes de medidas de eficiência energética para São Paulo

	<b>Parede</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Esquadria</b>
<b>Pacote 1</b>	<b>MEE1</b> U: 2,72 W/m <sup>2</sup> K CT: 178 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE4+MEE9</b> U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE11</b> Com veneziana
<b>Pacote 2</b>	$\alpha$ : 0,50	$\alpha$ : 0,40	Sem veneziana
<b>Pacote 5</b>	<b>MEE2</b> U: 2,46 W/m <sup>2</sup> K CT: 150 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE4+MEE9</b> U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE11</b> Com veneziana
<b>Pacote 6</b>	$\alpha$ : 0,50	$\alpha$ : 0,40	Sem veneziana
<b>Pacote 9</b>	<b>MEE3</b> U: 1,24 W/m <sup>2</sup> K CT: 281 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE4+MEE9</b> U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE11</b> Com veneziana
<b>Pacote 10</b>	$\alpha$ : 0,50	$\alpha$ : 0,40	Sem veneziana

Tabela 16 - Pacotes de medidas de eficiência energética para Salvador

	<b>Parede</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Esquadria</b>
<b>Pacote 1</b>	<b>MEE1</b> U: 2,72 W/m <sup>2</sup> K CT: 178 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE4+MEE9</b> U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE11</b> Com veneziana
<b>Pacote 2</b>	$\alpha$ : 0,30	$\alpha$ : 0,40	Sem veneziana
<b>Pacote 5</b>	<b>MEE2</b> U: 2,46 W/m <sup>2</sup> K CT: 150 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE4+MEE9</b> U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K	<b>MEE11</b> Com veneziana
<b>Pacote 6</b>	$\alpha$ : 0,30	$\alpha$ : 0,40	Sem veneziana

O consumo de energia elétrica para resfriamento em kWh/m<sup>2</sup>ano do caso base e com a aplicação dos pacotes de medidas das unidades habitacionais para São Paulo e Salvador podem ser visualizados nas Figura 17 e Figura 18 abaixo.

Para São Paulo o consumo de energia foi metade com a implantação dos pacotes, em relação à edificação do caso base. Em Salvador a implantação dos pacotes de medidas teve um impacto maior na redução do consumo, alcançando um terço do que a edificação consumiria com os componentes construtivos do caso base.

Figura 17 – Demanda de energia elétrica das UHs em São Paulo para caso base e com a implantação dos pacotes de MEEs

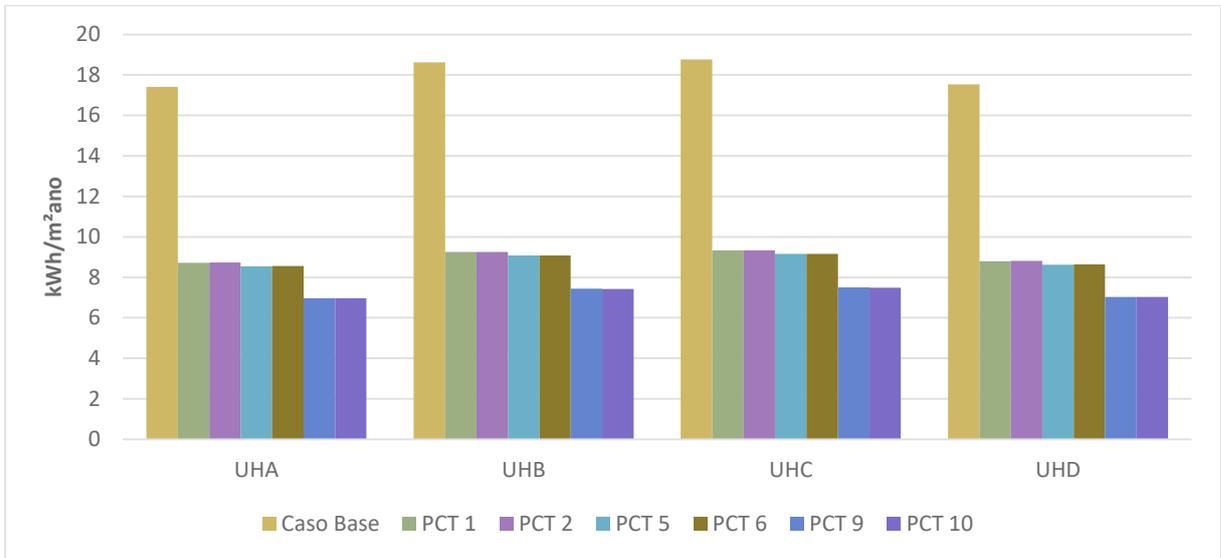
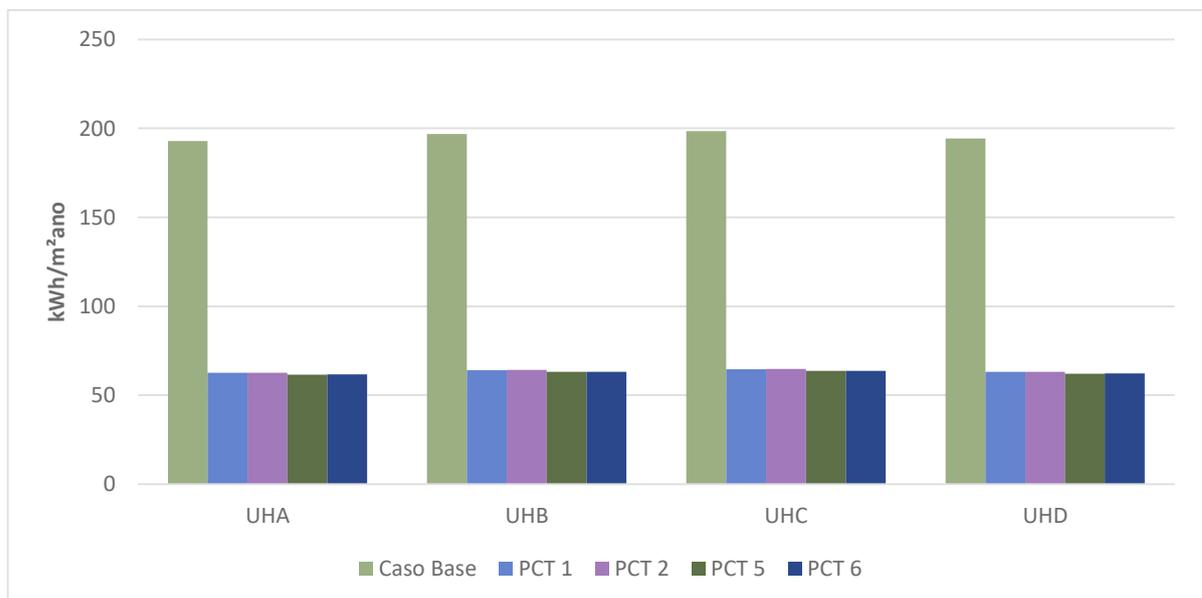


Figura 18 - Demanda de energia elétrica das UHs em Salvador para caso base e com a implantação dos pacotes de MEEs



Para o cálculo do custo da demanda energia elétrica para resfriamento, serão considerados os quatro apartamentos do pavimento cobertura, visto que o custo de implantação das medidas será considerado em conjunto para estas unidades.

Para São Paulo, somente o pacote de medidas 6 apresentou valor de implantação abaixo do caso base, como pode ser visualizado na Tabela 17, e seu valor foi considerado como negativo, já que não houve investimento. Para Salvador, dos quatro pacotes três tiveram o custo

para implantação menor do que o considerado no caso base. Para estes pacotes, da mesma forma que em São Paulo, o investimento para implantação foi colocado como negativo na

Tabela 18. Em ambas as cidades e pacotes levaram a uma redução na conta de energia com relação ao caso base.

Tabela 17 – Custos de implantação e gasto anual com energia elétrica dos pacotes de medidas aplicados em São Paulo

	Custo de Implantação		Consumo de energia	
	Valor do pacote (R\$)	Investimento (R\$)	Consumo do pacote (R\$)	Redução em relação ao caso base (R\$)
<b>Caso Base</b>	25.231,45	-	2.234,69	-
<b>PCT 1</b>	29.629,35	3.260,98	1.115,28	1.119,41
<b>PCT 2</b>	24.795,01	1.153,64	1.116,05	1.118,64
<b>PCT 5</b>	27.791,48	1.423,10	1.094,44	1.140,25
<b>PCT 6</b>	22.957,14	-684,24	1.094,98	1.139,71
<b>PCT 9</b>	34.276,34	10.634,97	893,86	1.340,83
<b>PCT 10</b>	32.169,00	8.527,63	892,86	1.341,83

Tabela 18 - Custos de implantação e gasto anual com energia elétrica dos pacotes de medidas aplicados em Salvador

	Custo de Implantação		Consumo de energia	
	Valor do pacote (R\$)	Investimento (R\$)	Consumo do pacote (R\$)	Redução em relação ao caso base (R\$)
<b>Caso Base</b>	27.106,09	-	21.695,82	-
<b>PCT 1</b>	25.625,59	109,58	7.054,18	14.641,64
<b>PCT 2</b>	24.576,69	-939,32	7.068,33	14.627,49
<b>PCT 5</b>	24.714,75	-801,26	6.948,32	14.747,50
<b>PCT 6</b>	23.665,85	-1.850,16	6.958,71	14.737,11

A análise financeira visa mostrar qual dos pacotes de medidas escolhidos é o recomendável para a edificação. Como já exposto no método, é utilizada a Taxa Interna de Retorno e o *payback* corrigido para a análise. O cálculo da TIR necessita da escolha de uma Taxa Mínima de Atratividade do projeto, que para pessoas físicas é considerada como a rentabilidade da poupança. Dessa forma, foi considerada a média dos últimos 10 anos de

rentabilidade real, que é a rentabilidade absoluta descontado o valor da inflação, chegando em um valor de TMA igual a 1,50%. O período de análise foi de 5 anos e não foi considerado gastos com manutenção neste período, como por exemplo, a repintura das telhas de fibrocimento.

Os pacotes de medidas 9 e 10 em São Paulo tiveram a TIR abaixo da TMA, logo são os únicos pacotes inviáveis. O retorno do investimento ficou entre 0 e 4 anos. No pacote 6, como não há acréscimo no valor de implantação com relação ao caso base, teve seu retorno financeiro no ano 0. Na Tabela 19 pode-se observar os valores da TIR e *payback* de cada pacote aplicado. O pacote de medidas que apresentou o retorno do investimento em menor tempo foi o 6, sendo o segundo melhor pacote o 5, que tem os mesmos componentes construtivos que o pacote 6, mas inclui a adoção de veneziana.

Tabela 19 – TIR e *payback* dos pacotes de medidas aplicados em São Paulo

Pacotes	Parede Externa	Cobertura	Esquadria	TIR (a.a.)	Payback
1	U: 2,72 W/m <sup>2</sup> K CT: 178 kJ/m <sup>2</sup> K $\alpha$ : 0,50	U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K $\alpha$ : 0,40	Com veneziana	21,2%	4 anos
2			Sem veneziana	93,4%	2 anos
5	U: 2,46 W/m <sup>2</sup> K CT: 150 kJ/m <sup>2</sup> K $\alpha$ : 0,50		Com veneziana	139,4%	2 anos
6			Sem veneziana	-	0 anos
9	U: 1,24 W/m <sup>2</sup> K CT: 281 kJ/m <sup>2</sup> K $\alpha$ : 0,50		Com veneziana		mais de 5 anos
10			Sem veneziana		mais de 5 anos

Em Salvador, com exceção do pacote 1, os pacotes apresentaram retorno do investimento já na data inicial, visto que os seus valores de implantação são menores do que o valor do caso base. Dessa forma o pacote escolhido foi o que necessitou de menor investimento inicial, ou seja, o pacote 6.

Porém, além do pacote 5 para São Paulo, foi considerado também como pacote ideal o 6, que contém as mesmas características construtivas, mas inclui a adoção de veneziana. O mesmo foi considerado para Salvador. Isto se dá pelo fato de que o uso de veneziana influencia diretamente no conforto térmico das edificações e a sua não escolha na análise financeira pode ser resultado de simplificações nas composições do SINAPI.

#### 4.4 EDIFICAÇÃO FINAL

Ao contrário do que era esperado, os pacotes ideais para São Paulo e Salvador foram os mesmos. Uma explicação para isto, é o fato de que os consumos para resfriamento em São Paulo, preditos pelo metamodelo, foram baixos e dessa forma, a economia que a implantação de medidas de eficiência energética proporciona não justifica o investimento. Na Tabela 20 estão os pacotes de medidas para as cidades de São Paulo e Salvador.

Tabela 20 – Pacotes ideais de medidas de eficiência energética para as edificações em São Paulo e Salvador

	<b>Parede</b>	
<b>Pacotes 5 e 6</b>	<b>MEE2</b>	
	Argamassa interna (2,5 cm)	U: 2,46 W/m <sup>2</sup> K
	Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm)	CT: 150 kJ/m <sup>2</sup> K
	Argamassa externa (2,5 cm)	abs: 0,30
	<b>Cobertura</b>	
	<b>MEE4 + MEE9:</b>	
Laje pré-moldada (12 cm) (com EPS 7,0 cm)	U: 1,52 W/m <sup>2</sup> K	
Câmara de ar (>5,0 cm)	CT: 145 kJ/m <sup>2</sup> K	
Telha de fibrocimento	abs: 0,40	
Pintura		
	<b>Esquadrias</b>	
<b>Pacote 5</b>	<b>MEE11:</b> Com venezianas nos dormitórios	
<b>Pacote 6</b>	Sem venezianas nos dormitórios	

O estudo desenvolvido neste trabalho, para esta edificação, considerou somente as unidades habitacionais da cobertura, visto que elas representam o pior caso. Nesta seção, estão expostas a classificação de todos os apartamentos da edificação multifamiliar, ou seja, do térreo, pavimento tipo (pavimentos 1 e 2) e da cobertura, com o objetivo de demonstrar se estudando as medidas somente para a cobertura é possível também melhorar a classificação dos demais apartamentos. Porém, através da aplicação do metamodelo, este não foi o resultado obtido para a cidade de São Paulo.

Conforme esperado, as unidades habitacionais do térreo obtiveram os menores consumos, para ambas as cidades, quando comparadas com as unidades do pavimento tipo e cobertura. Esse comportamento é efeito da troca de calor com o solo, componente que tem grande importância no desempenho térmico das edificações (SORGATO et. al, 2014; SILVA et. al, 2014).

Em São Paulo, quando analisadas as economias proporcionadas pelo pacote ideal de medidas, frente às escalas propostas pelo novo regulamento de etiquetagem de edificações residenciais, os apartamentos do térreo foram os que obtiveram a pior economia com relação à edificação de referência. Da mesma maneira, o pavimento tipo reduziu a economia com a aplicação dos pacotes de medidas, ao invés de aumentar. Com estes resultados piores, com relação ao caso base, houve rebaixamento da classificação das UHs dos pavimentos térreo e tipo, de B para C, em São Paulo. Os únicos apartamentos que tiveram melhora na classificação de eficiência energética, passando de C para A, foram os localizados na cobertura, pavimento considerado em todo o estudo. A mudança na classificação, de B para C, nos pavimentos térreo e tipo de São Paulo, não era esperada, uma vez que a edificação do caso base possui componentes construtivos com baixa eficiência (com destaque para parede de concreto) e dessa forma deveria apresentar uma classe de eficiência pior.

Em Salvador, quando analisada a classificação de eficiência energética, é visto que em todos os pavimentos a aplicação do pacote ideal de medidas melhorou a classificação, passando de C para B no térreo e D para B no pavimento tipo. O pavimento cobertura, que foi considerado para a escolha do pacote ideal de medidas, apresentou melhorou a classificação de E para B.

Para ambas as cidades, o pacote com venezianas apresentou maior economia, porém não foi um valor significativo. Logo, segundo o metamodelo, a adoção de veneziana não impacta significativamente no consumo de energia para resfriamento. Os resultados podem ser visualizados nas Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 21 – Classe de eficiência energética dos pacotes ideais aplicados em São Paulo e porcentagem de economia com relação a edificação de referência

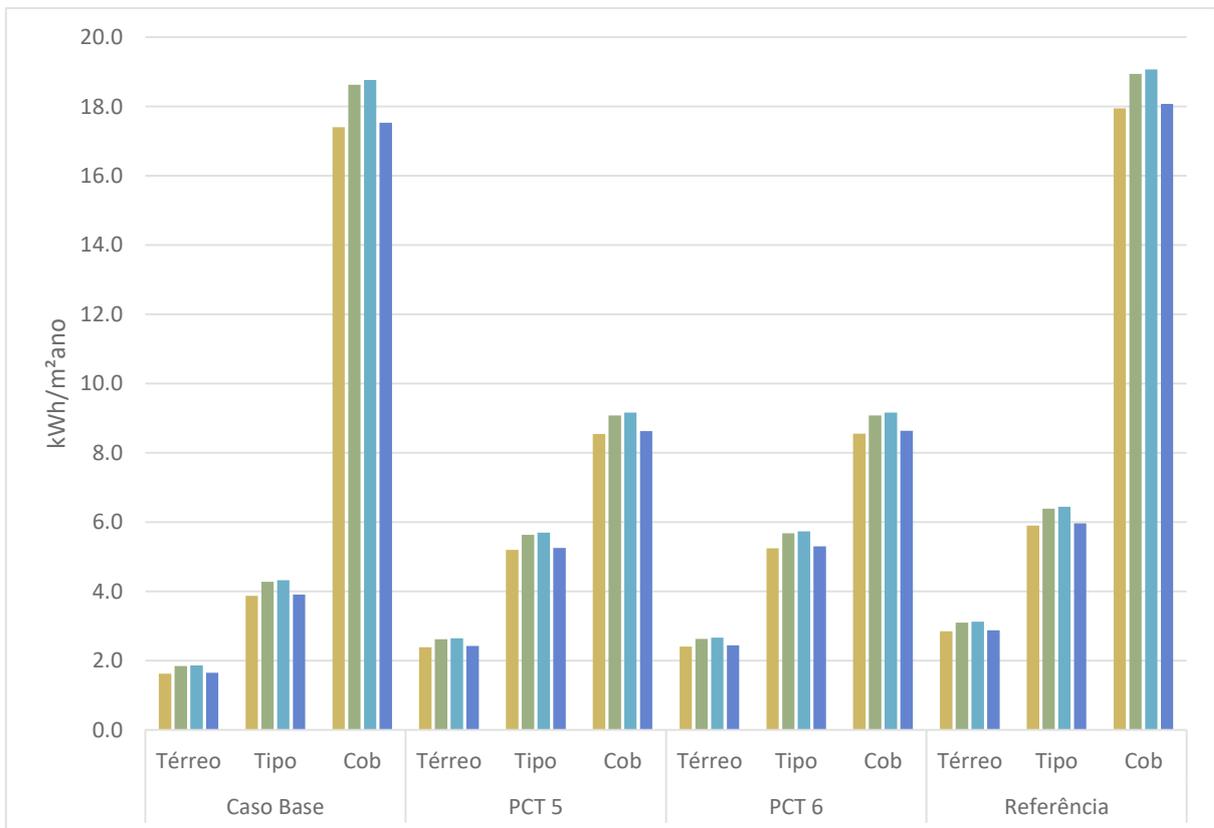
<b>Pavimento</b>	<b>Classe Caso Base</b>	<b>Classe PCT 5</b>	<b>Classe PCT 6</b>	<b>Economia Caso Base</b>	<b>Economia PCT 5</b>	<b>Economia PCT 6</b>
<b>Térreo</b>	B	C	C	41,6%	15,7%	15,1%
<b>Tipo</b>	B	C	C	33,7%	11,8%	11,1%
<b>Cobertura</b>	C	A	A	2,3%	52,2%	52,1%

Tabela 22 - Classe de eficiência energética dos pacotes ideais aplicados em Salvador e porcentagem de economia com relação a edificação de referência

Pavimento	Classe Caso Base	Classe PCT 5	Classe PCT 6	Economia Caso Base	Economia PCT 5	Economia PCT 6
Térreo	C	B	B	3,9%	46,1%	45,8%
Tipo	D	B	B	-9,0%	48,7%	48,4%
Cobertura	E	B	B	-86,0%	40,4%	40,3%

Os consumos de energia para resfriamento em São Paulo, podem ser visualizados na Figura 19. É possível observar a diferença de consumo entre os pacotes 5 e 6, com veneziana e sem veneziana, respectivamente, é pequena e isso pode ser resultado de simplificações realizadas dentro do metamodelo, que serão melhor abordadas no item 4.6 deste trabalho. A Figura 19 traz também os consumos do caso base e da edificação de referência.

Figura 19 – Consumos dos pacotes ideais em São Paulo



Na Figura 19 quando analisados os consumos dos pavimentos térreo e tipo do caso base com relação aos pacotes 5 e 6, é possível visualizar que o caso base possui um consumo

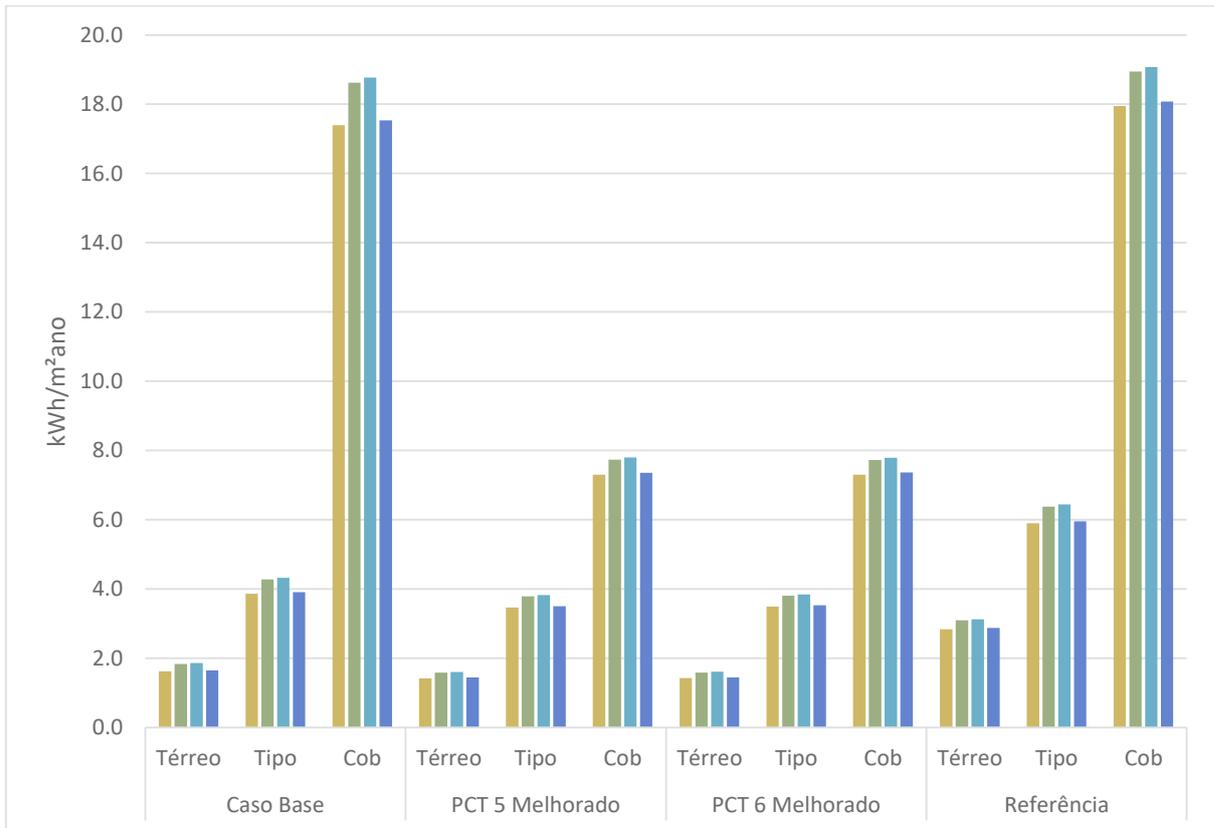
de energia para resfriamento menor, o que não era esperado. Buscando uma justificativa para esse comportamento, foram comparados os dados de entrada, inseridos no metamodelo para os pavimentos térreo e tipo, da edificação com o pacote ideal de medidas e do caso base, onde foi constatado que os valores são bastante semelhantes, mudando somente os parâmetros referentes aos componentes das paredes externas e internas. A transmitância térmica da parede externa do caso base igual a  $4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  e a do pacote ideal  $2,46 \text{ W/m}^2\text{K}$  e a capacidade térmica das paredes externas e internas do caso base iguais a  $240 \text{ kJ/m}^2\text{K}$  e do pacote ideal de medidas igual a  $150 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ .

Voltando à análise da aplicação das medidas de eficiência energética isoladas, é possível constatar que quando aplicada a medida 2 isoladamente, o pavimento cobertura obteve aumento no consumo de energia para resfriamento. Dessa forma, o comportamento dos pavimentos térreo e tipo quando aplicado os pacotes de medidas já poderia ter sido previsto, uma vez que conforme citado, os únicos dados de entrada alterados para esses pavimentos com relação ao caso base, foram referentes às paredes, da mesma forma que a aplicação isolada da medida de eficiência energética 2. Uma forma de buscar melhorar a classificação dos pavimentos térreo e tipo para São Paulo, é reduzindo a absorvância das paredes externas de 0,50 para 0,30. Foi analisado também o aumento do fator de ventilação em conjunto com a troca da absorvância, mas como era esperado, devido ao clima de São Paulo ser considerado ameno, ele não melhora a economia de energia. Os resultados obtidos considerando a troca da absorvância das paredes externas de 0,50 para 0,30, melhoraram significativamente os consumos e podem ser visualizados na Tabela 23 e Figura 20 abaixo

Tabela 23 - Classe de eficiência energética dos pacotes ideais melhorados aplicados em São Paulo e porcentagem de economia com relação a edificação de referência

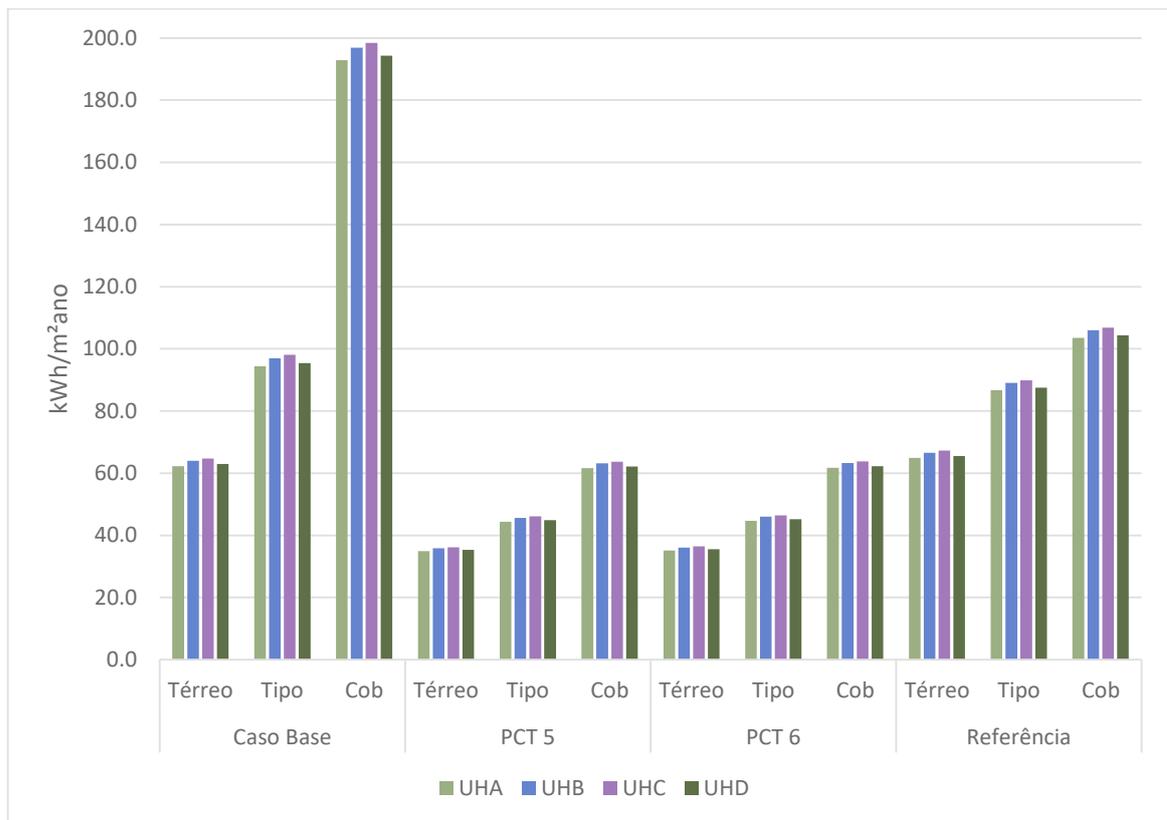
<b>Pavimento</b>	<b>Classe Caso Base</b>	<b>Classe PCT 5 Melhorado</b>	<b>Classe PCT 6 Melhorado</b>	<b>Economia Caso Base</b>	<b>Economia PCT 5 Melhorado</b>	<b>Economia PCT 6 Melhorado</b>
<b>Térreo</b>	B	B	B	41,6%	49,3%	49,1%
<b>Tipo</b>	B	B	B	33,7%	40,9%	40,6%
<b>Cobertura</b>	C	A	A	2,3%	59,2%	59,2%

Figura 20 - Consumos dos pacotes ideais melhorados em São Paulo



Os consumos de energia para Salvador podem ser visualizados na Figura 21. Como já apresentado, os pacotes ideais de medidas apresentaram bom comportamento nos pavimentos térreo e tipo para a edificação na cidade de Salvador. É importante ressaltar que, para Salvador, os pacotes de medidas já foram melhorados, com o aumento do fator de ventilação, passando de 0,50 para 0,75, e com a redução da absorvância das paredes externas, passando de 0,50 para 0,30. Da mesma forma que para São Paulo, o uso de venezianas não impactou da forma esperada no consumo da edificação, de forma que o pacote 5, que considera o uso de venezianas, teve um consumo de energia para refrigeração levemente menor do que o pacote 6, sem venezianas.

Figura 21 - Consumos dos pacotes ideais em Salvador



A demanda de energia elétrica para resfriamento, em reais, da edificação final para São Paulo e Salvador pode ser visualizada na Tabela 24. Os pacotes 5 e 6 para São Paulo, aqui considerados, são os com a redução de absorvância das paredes externas de 0,50 para 0,30.

Tabela 24 – Gastos anuais em reais para resfriamento das edificações em São Paulo e Salvador

UH	São Paulo		Salvador	
	PCT 5	PCT 6	PCT 5	PCT 6
<b>Térreo</b>	R\$ 187,36	R\$ 188,03	R\$ 3.946,49	R\$ 3.970,76
<b>Tipo</b>	R\$ 450,77	R\$ 453,44	R\$ 5.020,74	R\$ 5.057,21
<b>Cobertura</b>	R\$ 932,65	R\$ 932,58	R\$ 6.948,32	R\$ 6.958,71

O consumo encontrado para Salvador, mesmo após a aplicação do pacote de medidas, é muito superior ao consumo para a cidade de São Paulo. Para uma edificação de baixa renda, como é o caso do projeto em estudo (renda familiar de até R\$ 1.600,00), esses valores anuais de consumo de energia se tornam inviáveis. Confirmando mais uma vez que é necessário analisar de forma mais detalhada o metamodelo e a base de dados de simulação utilizada.

#### 4.4.1 Adoção de veneziana em todos os ambientes de permanência prolongada

Como forma de entender o impacto do uso de venezianas em todos os ambientes de permanência prolongada da unidade habitacional, foi realizado o teste com o pacote 5 considerando às aberturas da sala de estar conjugada com cozinha também com venezianas.

Em São Paulo, adotando veneziana na sala e comparando com o pacote com veneziana somente nos dormitórios, foi encontrado pelo metamodelo uma redução de consumo para resfriamento de 11% para o térreo, 9% para o pavimento tipo e 6% para a cobertura, considerando como base o pacote com as venezianas somente nos dormitórios. Para a classificação de eficiência energética, o pavimento térreo passou de classe B para A, os demais permaneceram com a mesma classificação. Em Salvador, foi encontrada redução no consumo para resfriamento de 5% no térreo, 4% no pavimento tipo e 1% na cobertura. Quando analisada a classificação de eficiência energética o pavimento tipo passou de classe B para A, os demais permaneceram com a mesma classe. É importante ressaltar que foi utilizado para comparação os pacotes 5 melhorados, ou seja, adoção de absorvância da parede 0,30 para São Paulo e Salvador e fator de ventilação de 75% em Salvador.

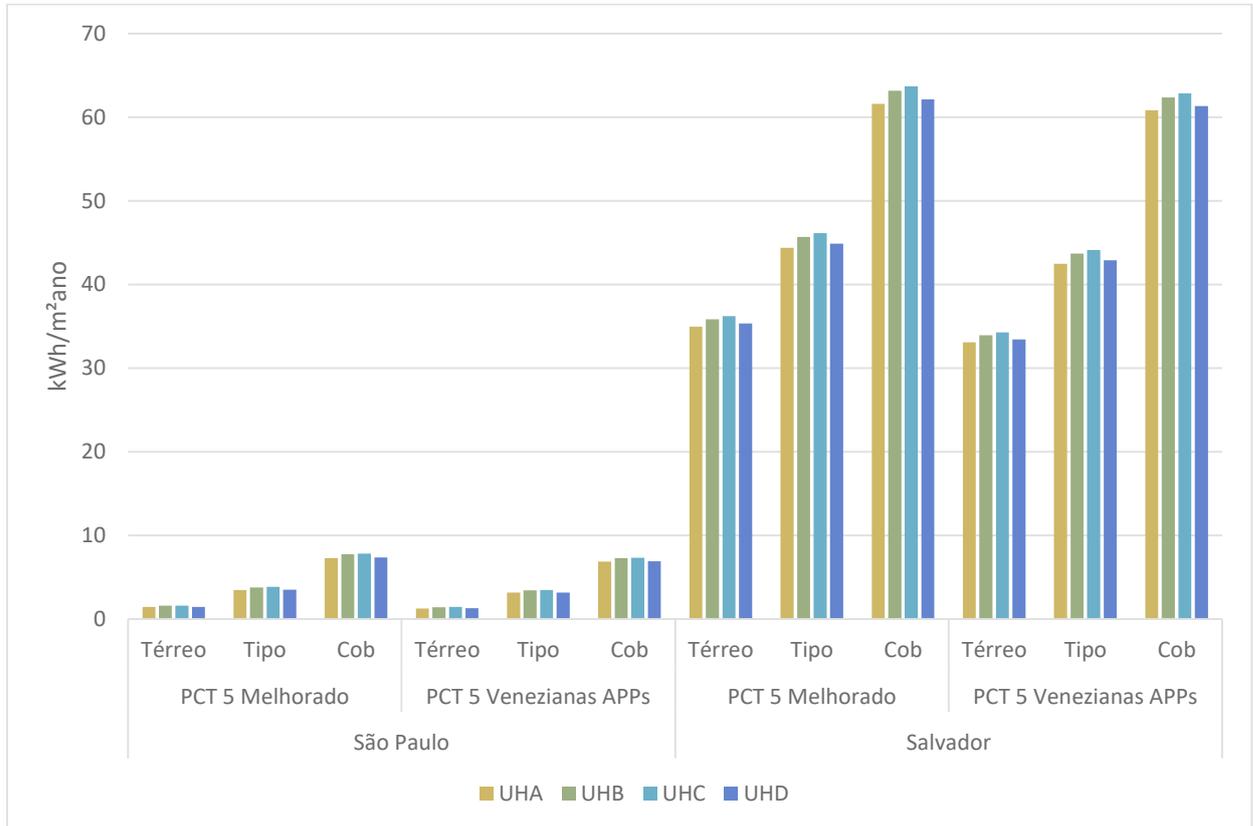
Da mesma forma que nos dados analisados anteriormente, o consumo para resfriamento em São Paulo foi muito inferior ao da cidade de Salvador, cerca de vinte quatro vezes menor no térreo e oito vezes menor na cobertura. Além disso, o uso de venezianas em todos os ambientes de permanência prolongada teve mais impacto na cidade de São Paulo do que em Salvador, o que não era esperado. Salvador por ser uma cidade com clima mais quente do que São Paulo, o uso de venezianas em todas os ambientes de permanência prolongada deveria impactar mais significativamente, visto que a veneziana permite ventilar a unidade habitacional e sombrear ao mesmo tempo.

Dessa maneira, segundo os resultados obtidos pelo metamodelo, adotar venezianas em todos os ambientes de permanência prolongada não impactou da forma como era esperado no consumo para resfriamento. As simplificações referentes a ventilação natural e uso de venezianas devem ser revistas na base de dados de simulações desenvolvida para o aprendizado do metamodelo. É importante também, verificar quais são as considerações adotadas para cada clima, visto que os valores extremamente altos para a cidade de Salvador podem não ser condizentes com a realidade de consumo.

Os resultados de carga térmica para resfriamento em todos os pavimentos da edificação multifamiliar em São Paulo e Salvador, para o pacote de medidas 5 com venezianas em todas

os ambientes de permanência prolongada e somente com venezianas nos dormitórios, podem ser visualizados na Figura 22 abaixo.

Figura 22 – Comparação entre os consumos para o pacote de medidas 5 com veneziana na sala e sem veneziana na sala para São Paulo e Salvador



#### 4.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CARGA TÉRMICA PARA RESFRIAMENTO: METAMODELO *VERSUS* SIMULAÇÃO

Para a comparação dos resultados de carga térmica para resfriamento, a edificação simulada no programa *EnergyPlus* foi modelada com as mesmas características geométricas e construtivas de uma unidade habitacional da cobertura avaliada pelo metamodelo. Cabe ressaltar que o arquivo utilizado para a execução desta simulação computacional, utiliza as mesmas classes e objetos, referentes ao EMS e ventilação natural, utilizados nas simulações realizadas para a construção do metamodelo.

A Figura 23 apresenta a planta baixa do pavimento com a nomenclatura de cada UH, sendo a unidade A modelada na simulação, com aberturas dos dormitórios voltadas para o norte,

conforme a imagem. Na Figura 24 está representado o modelo 3D da unidade habitacional simulada.

Figura 23 – Planta baixa pavimento cobertura

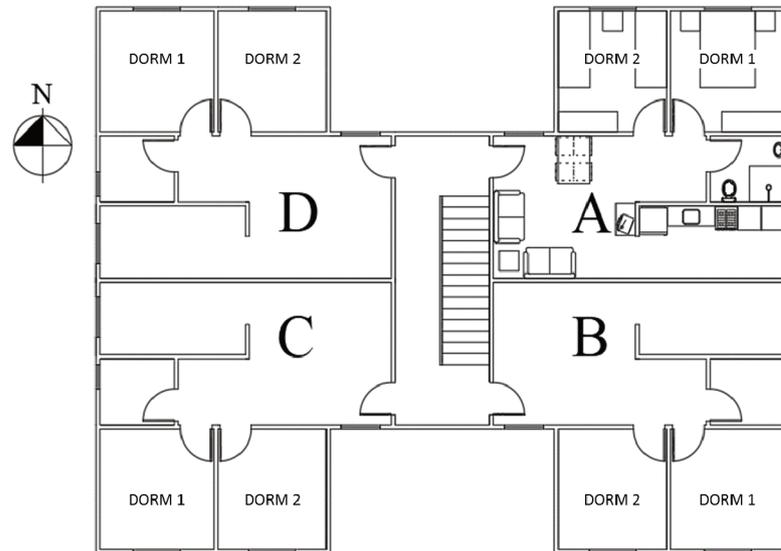
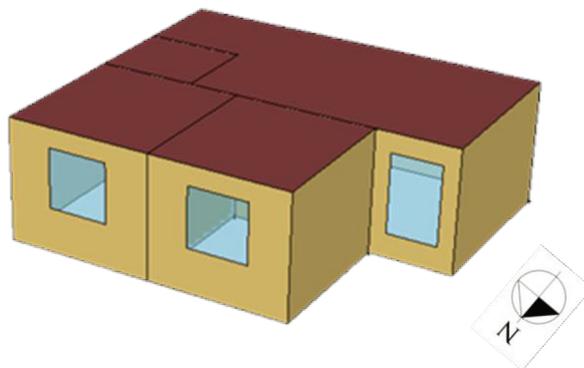
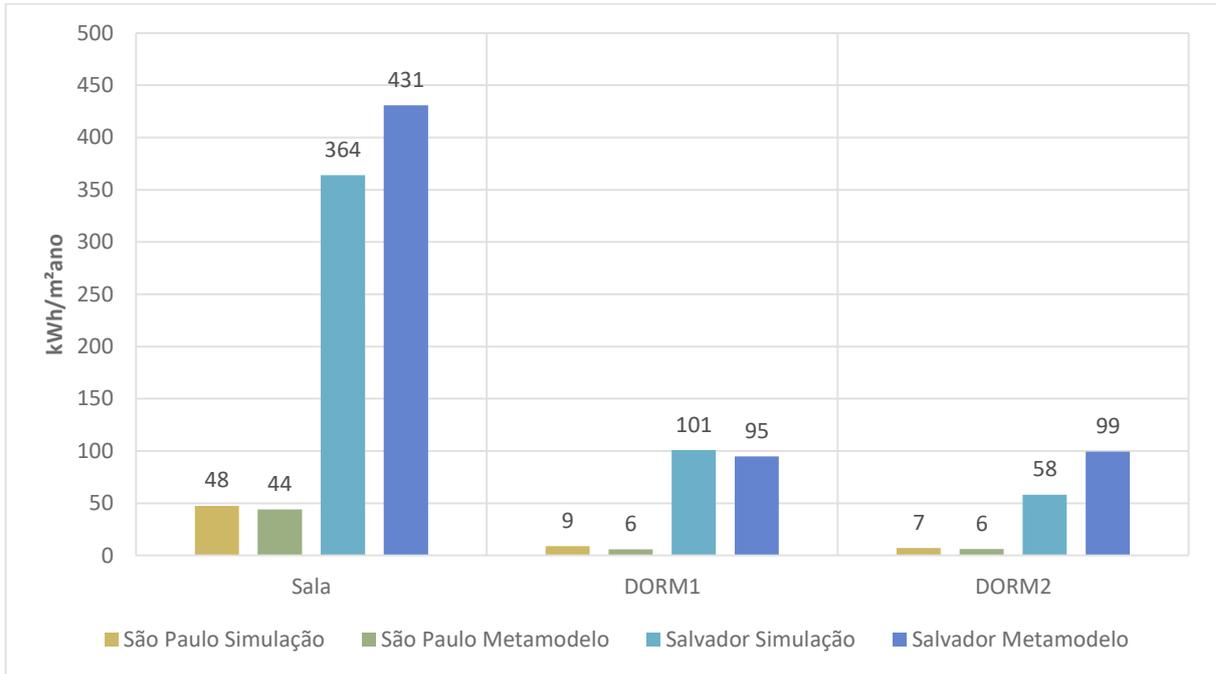


Figura 24 – Modelo para simulação computacional da UH A do pavimento cobertura



Os resultados obtidos para o caso base mostraram que o metamodelo se comporta melhor quando analisado o clima de São Paulo, ao invés de Salvador. Em São Paulo, os valores obtidos para o caso base pelo metamodelo ficaram entre 0,6 kWh/m<sup>2</sup>ano e 3 kWh/m<sup>2</sup>ano maiores do que o obtido por simulação. Já para Salvador, os resultados obtidos pelo metamodelo diferiram entre 2 kWh/m<sup>2</sup>ano até 97 kWh/m<sup>2</sup>ano a mais o que o predito pela simulação. Na Figura 25 abaixo é possível observar os dados obtidos pela simulação e pelo metamodelo para a edificação caso base.

Figura 25 - Comparação resultados simulação computacional e metamodelo para o caso base



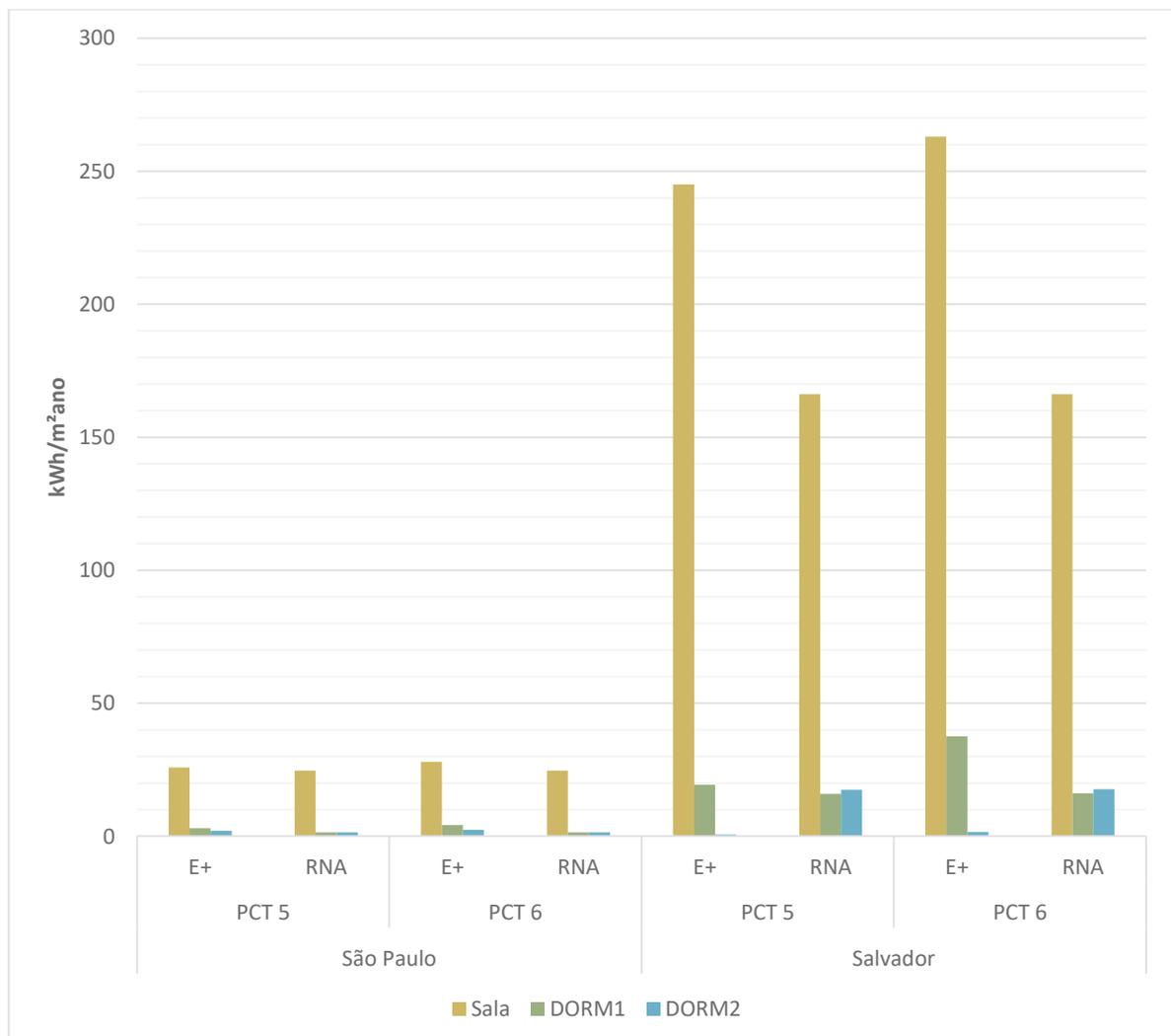
Com relação aos pacotes de medidas ideais para as edificações, foram utilizados para comparação os valores obtidos para os pacotes 5 e 6 sem a redução de absorvância para São Paulo. A simulação computacional e o metamodelo apresentaram diferenças em todos os ambientes de permanência prolongada, com destaque para o clima de Salvador, onde o metamodelo apresentou um resultado de CgT para refrigeração entre 79 e 97 kWh/m<sup>2</sup>ano maior, para o ambiente sala com cozinha conjugada, com relação a simulação. Na Figura 26 é possível visualizar os resultados obtidos por ambos os métodos para cada ambiente do apartamento. Alguns resultados obtidos pelo metamodelo para os dormitórios e pelo *EnergyPlus* para os dormitórios 2 em Salvador, ficaram tão próximos a zero que não foi possível visualizá-los no gráfico de barras da Figura 26.

Com base nos resultados obtidos pela simulação computacional, é possível verificar que o uso de venezianas nas aberturas dos dormitórios influencia significativamente no resultado de carga térmica necessária para resfriamento, em especial na cidade de Salvador, onde o pacote 5, que considera o uso da veneziana, obteve uma redução da carga térmica para resfriamento de 37 kWh/m<sup>2</sup>ano com relação ao pacote 6. Para São Paulo, por ser um clima mais ameno, essa redução foi menor, com pouco menos da metade com relação do pacote 5 ao 6. Outra diferença analisada é de que o metamodelo considera os valores de carga térmica iguais para as salas dos apartamentos onde os dormitórios possuem venezianas e onde este dispositivo

não foi considerado; já a simulação traz variação no resultado para estes ambientes, já que é considerada a ventilação natural de forma mais detalhada na simulação do que no metamodelo.

Outro resultado que chamou a atenção foi a diferença de carga térmica obtida pelo método de simulação para os dormitórios 1 e 2. Considerando que o dormitório 2 tem sua fachada de maior área voltada para o oeste, deveria se esperar que esse ambiente tivesse uma maior carga térmica para resfriamento, quando comparado com o dormitório 1, o que não está acontecendo, pois, o dormitório 2 apresenta valores muito inferiores ao 1. Este resultado está ligado ao uso incorreto da classe de objetos EMS dentro do *EnergyPlus*, uma vez que ele regula a ventilação natural dentro dos dormitórios e a ventilação interna dentro da edificação. A carga térmica para resfriamento muito superior no dormitório 1 é resultado da consideração da porta de acesso ao cômodo ser considerada constantemente fechada, não possibilitando a ventilação interna na edificação e tornando o dormitório um ambiente totalmente fechado.

Figura 26 - Comparação resultados da simulação computacional e metamodelo para os pacotes ideais



Em reais, os valores de consumo de energia em reais obtidos pelo método de simulação podem ser visualizados na Tabela 25, juntamente com os valores obtidos pelo metamodelo, considerando, em São Paulo, os pacotes sem melhoria da absorvância solar, e a diferença entre eles.

Tabela 25 – Consumo para resfriamento em reais com relação ao metamodelo e a simulação

<b>Cidade</b>	<b>São Paulo</b>			<b>Salvador</b>		
<b>Caso</b>	<b>Base</b>	<b>PCT 5</b>	<b>PCT 6</b>	<b>Base</b>	<b>PCT 5</b>	<b>PCT 6</b>
<b>Metamodelo (R\$)</b>	404,32	198,66	198,88	4.021,21	1.284,81	1.286,88
<b>Simulação (R\$)</b>	457,55	222,47	248,57	3.365,44	1.705,57	1.944,99
<b>Redução (R\$)</b>	-58,23	-23,80	-49,69	655,77	-420,76	-658,11

#### 4.6 LIMITAÇÕES DO METAMODELO

#### 4.7 QUANTO AO USO

A utilização do metamodelo, construído para avaliação da envoltória pelo método simplificado da nova proposta de regulamento técnico para etiquetagem de edificações residenciais, envolveu o uso de um *script* em linguagem computacional R. Este *script* continha as diretrizes para leitura das planilhas, em formato separado por vírgulas, com todas as variáveis necessárias para o cálculo da carga térmica para resfriamento pela rede neural artificial treinada.

O uso do metamodelo envolveu o aprendizado básico da linguagem R, além do uso de variáveis antes não estudadas. As variáveis que apresentaram maior dificuldade para cálculo foram: *geom\_wall* e *geom\_wwr*. A primeira é referente a geometria da fachada dos ambientes, ela considera a área de fachada do ambiente dividida pela área de piso, sendo esta divisão ponderada por orientação. A segunda é referente a geometria da área de abertura dos ambientes, considerando a área de abertura dividida pela área de piso, sendo também ponderada de acordo com a orientação.

Além das variáveis, outra dificuldade foi de entender os dados que estavam sendo inseridos no metamodelo. Como são anexados na planilha para cálculo somente dados numéricos, é difícil interpretar e analisar o comportamento da edificação frente à pequenas mudanças.

#### 4.8 QUANTO A ELABORAÇÃO DA FERRAMENTA

Metamodelos são ferramentas elaboradas a partir de uma vasta base de dados de simulações computacionais, onde, através de um método, como, por exemplo, Redes Neurais Artificiais, é possível treinar o metamodelo para entender que  $n$  combinações de dados de entrada, podem resultar em determinados resultados. O metamodelo desenvolvido para o método simplificado da nova proposta de regulamento brasileiro de edificações residenciais, utilizou como base milhares de simulações computacionais, realizadas no *EnergyPlus*. Essas simulações envolveram seis diferentes tipologias de edificações multifamiliares e unifamiliares, sendo realizadas algumas simplificações, como por exemplo: na geometria da edificação, percentual de abertura nas fachadas, considerações na forma de ocupação da edificação (CB3E, 2017a).

Além das simplificações, as simulações computacionais consideram a edificação híbrida, ou seja, com a possibilidade de utilizar ventilação natural e condicionamento de ar, de acordo com o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE 55 e de comportamento do usuário (SORGATO, 2016). Para estas condicionantes na edificação, as simulações consideradas para a elaboração do metamodelo utilizaram a classe *Energy Management System* (EMS) do *EnergyPlus*, como forma de tornar o uso da ventilação natural e do condicionamento de ar mais próximo da realidade de comportamento do usuário.

A consideração do EMS dentro da simulação, pode ter gerado incertezas nos resultados para ventilação natural ainda mesmo na simulação computacional e que foram replicados para o metamodelo, como foi possível visualizar na seção anterior, onde, pelos resultados obtidos na simulação, o dormitório 2 apresenta uma carga térmica para resfriamento consideravelmente inferior ao dormitório 1, refletindo no metamodelo, onde ambos os dormitórios obtiveram cargas térmicas semelhantes, mesmo tendo a fachada principal orientada para sentidos opostos.

Da mesma forma, os valores de carga térmica semelhantes na unidade habitacional com o pacote 5, com veneziana, e com o 6, sem veneziana, por parte dos resultados obtidos pelo metamodelo, é ligado a uma leitura incorreta dos dados de entrada e saída pelas redes neurais, uma vez que pelo *EnergyPlus* foi possível visualizar mudança no consumo das salas, ambientes que não possuem veneziana, mas que estão conectados por uma porta aos dormitórios, que possuem venezianas. A carga térmica do dormitório 1 também teve uma influência maior da aplicação das venezianas, aumentando o consumo quando o dispositivo não foi utilizado. Estes comportamentos estão associados também ao incorreto uso da classe EMS

dentro da simulação, uma vez que como foi possível observar nos resultados, o dormitório 1 está sendo considerado fechado, não permitindo ventilação entre os ambientes da edificação.

Os resultados obtidos para os pacotes ideais de medidas implantados na edificação em São Paulo, que reduziram a classe de eficiência energética dos pavimentos térreo e tipo, podem também estar relacionados a simplificações. Visto que a troca de uma parede com alta transmitância térmica, ou seja, maior transferência de calor entre o meio externo e interno, e alta capacidade térmica, torna o ambiente interno mais isolado, dificultando o resfriamento natural entre as superfícies, por uma parede com menor transmitância e menor capacidade térmica, não reduziu a necessidade de resfriamento, mas sim a elevou.

A diferença significativa no consumo das edificações em São Paulo e Salvador podem também estar ligadas as simplificações na simulação computacional, uma vez que diferenças como cobertura do caso base em São Paulo consumir onze vezes menos que em Salvador, devem ser analisadas com cuidado para poder trazer os resultados obtidos pelo metamodelo mais condizentes com a realidade de consumo da edificação.

Em ambos os climas o metamodelo previu cargas térmicas para resfriamento distintas da simulação, o que era previsto, considerando que o metamodelo é uma aproximação dos resultados obtidos pela simulação computacional, porém na maioria dos resultados, a diferença ultrapassa 10%, o que pode torna a predição pelo metamodelo fora do aceitável.

## 5 CONCLUSÕES

Para a realização deste trabalho foi utilizado como base um projeto representativo de edificação multifamiliar, de baixa renda (nível 1, renda familiar de até R\$ 1.600,00), levantado por Montes (2016). Foi calculada a carga térmica para resfriamento das unidades habitacionais por meio do metamodelo para avaliação da eficiência energética de edificações residenciais, com base na nova proposta do regulamento brasileiro, disponibilizado pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações em outubro de 2017.

O estudo analisou a aplicação de medidas de eficiência energética na edificação, avaliando o seu custo para implantação e a classificação obtida de acordo com as escalas propostas no novo método de etiquetagem de edificações residenciais, como forma de estipular um pacote de medidas ideal para a edificação em cada cidade avaliada.

Os resultados obtidos pelo metamodelo e pela análise financeira, indicaram como melhores medidas de eficiência energética para São Paulo, a redução da absorvância da cobertura e o uso de isolamento nas paredes e cobertura. Porém, devido ao custo elevado do tipo de cobertura com isolamento utilizado na análise, foi optado por substituí-la por telha de fibrocimento com laje pré-moldada com EPS, mais coerente com a realidade das edificações de baixa renda. Dessa forma, a classificação de eficiência energética, de acordo com as escalas de da nova proposta de regulamento brasileiro, juntamente com a análise financeira, indicaram os pacotes 5 e 6 como os mais viáveis para a edificação localizada em São Paulo. O investimento para implantação foi de R\$ 1.423,10 para o pacote 5; já o pacote 6 não apresentou custo para implantação, resultando em um lucro de R\$ 684,24, com relação aos componentes construtivos do caso base. A aplicação destes pacotes resultou na redução na conta de energia de R\$ 1.140,25 e R\$ 1.139,71, para o pacote 5 e 6, respectivamente.

Em Salvador, a cobertura com isolamento e a redução da absorvância da cobertura foram as medidas de eficiência energética que apresentaram os melhores resultados; porém, da mesma forma que São Paulo, o uso da telha metálica com isolamento não foi considerada nas combinações de pacotes, devido seu custo de implantação, e foi substituída também por telha de fibrocimento com laje de concreto com EPS. Para Salvador o pacote ideal considerou um aumento de 75% nas aberturas para ventilação e redução da absorvância solar das paredes de 0,50 para 0,30 e na cobertura de 0,80 para 0,40. Além dessas características, os componentes construtivos que obtiveram a melhor classificação de eficiência energética e a melhor análise financeira foram a parede sem isolamento, com bloco cerâmico e argamassa interna e externa, juntamente com a cobertura já citada, de telha de fibrocimento e laje pré-moldada com EPS,

chegando nos pacotes 5 e 6 deste trabalho considerados os ideais. Não houve investimento para implantação desses pacotes, visto que o seu custo foi menor do que o caso base, resultando em um lucro de R\$ 801,26 na implantação do pacote 5 e de R\$ 1.850,16 para o pacote 6. As reduções por ano na conta de energia elétrica ficaram com R\$ 14.747,50 para o pacote 5 e R\$ 14.737,11 para o 6.

Analisando a edificação como um todo, ambos os pacotes de medidas ideais aplicados na edificação multifamiliar nas duas cidades, apresentaram melhorias no consumo de energia elétrica para resfriamento das unidades habitacionais nos pavimentos térreo, tipo e cobertura. Porém quando analisada a classe de eficiência energética, calculada através da escala desenvolvida para o novo regulamento de etiquetagem de edificações residenciais, os resultados para São Paulo apresentaram baixa eficiência para os pavimentos térreo e tipo, chegando a piorar a classificação, já que o caso base a classificação era B e passou a ser C após a aplicação dos pacotes de medidas. Dessa forma, o estudo propôs redução da absorvância das paredes externas, de 0,50 para 0,30, o que resultou na classificação B de eficiência energética para os apartamentos dos pavimentos térreo e tipo.

Devido às simplificações adotadas no metamodelo disponibilizado para o estudo em outubro de 2017, foram encontradas discrepâncias entre os resultados obtidos através do metamodelo e do método de simulação, ambas formas de análise previstas no novo método de etiquetagem de edificações residenciais. Foram encontradas grandes variações entre os resultados de carga térmica para resfriamento em ambas as cidades. O ambiente de permanência prolongada sala com cozinha integrada, em Salvador, é um dos que apresenta maior diferença entre o valor predito pelo metamodelo e a simulação. Além disso, o metamodelo prediz uma carga térmica semelhante para a sala das unidades habitacionais em que é considerada a veneziana nos quartos e para as unidades sem veneziana. Já o método de simulação, por ser mais detalhado na forma de calcular a ventilação natural, considera valores diferentes e isso influencia diretamente na previsão da demanda de carga térmica para resfriamento do apartamento.

Dessa forma, todos os objetivos estipulados para este trabalho foram alcançados, com destaque para a análise dos resultados pelo método simplificado e de simulação computacional, da proposta de novo regulamento brasileiro de etiquetagem. Porém, conforme resultados e análises demonstradas, é necessária melhoria do metamodelo construído, analisando melhor a influência de cada parâmetro.

## 5.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

As limitações encontradas para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- Resultados válidos somente para a edificação e clima analisados;
- Metamodelo em fase de desenvolvimento;
- Inconsistência entre os valores preditos pelo metamodelo, utilizado no método simplificado, com os resultados obtidos pelo método de simulação computacional, ambos métodos do novo regulamento brasileiro de etiquetagem;
- Dificuldade de encontrar o custo dos materiais considerados nas medidas de eficiência energética na planilha disponibilizada pelo SINAPI, da Caixa Econômica Federal;
- Simplificações realizadas nos cálculos dos custos dos materiais, visto a dificuldade exemplificada acima.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Cálculo dos valores de carga térmica para resfriamento, obtidos para os casos avaliados neste trabalho, com o uso da próxima versão do metamodelo em desenvolvimento para o novo regulamento brasileiro de etiquetagem de edificações residenciais;
- Análise mais detalhada dos custos envolvendo as medidas de eficiência energética propostas;
- Consideração de novas medidas de eficiência energética, como por exemplo, telha de fibrocimento com isolante térmico;
- Avaliação de pacotes ideais de medidas de eficiência energética para edificações unifamiliares de baixa renda;
- Considerar a carga térmica para aquecimento na cidade de São Paulo e outras em que este parâmetro deve ser avaliado;
- Analisar pacotes ideais de medidas de eficiência energética para outros climas.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. **Panorama HVAC-R**: [s.i.]: ABRAVA, 2014. Color.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE 90.1-2016**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. SI ed. Atlanta: Ashrae, 2016.

ANEEL; Agência Nacional de Energia Elétrica. **Tarifa Social para Consumidor de Baixa Renda - Perguntas e Respostas**. 2007. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=2097&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=2097&id_area=90)>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BAHIA. SECRETARIA DA FAZENDA DO ESTADO DA BAHIA. **Área fiscal**. Disponível em: < <http://www.sefaz.ba.gov.br/default.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BRASIL; Governo Federal. **Com nova fase, Minha Casa Minha Vida vai alcançar 4,6 milhões de casas construídas**. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/03/minha-casa-minha-vida-chega-a-3a-fase-com-2-milhoes-de-novas-moradias-ate-2018>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BRASIL; Governo Federal. **Novas alíquotas de PIS e Cofins são oficializadas**. 2015. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2015/02/novas-aliquotas-de-pis-e-cofins-sao-oficializadas>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BRASIL; Governo Federal. **Minha Casa Minha Vida atinge 3,857 milhões de moradias**. 2015. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2015/05/minha-casa-minha-vida-atinge-3-857-milhoes-de-moradias>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BRASIL; Ministério das Cidades. **Especificações Técnicas**. 2016. Disponível em: < <http://www.cidades.gov.br/habitacao-cidades/programa-minha-casa-minha-vida-pmcmv/especificacoes-tecnicas>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA ELÉTRICA - CEPEL. **Guia para eficiência energética nas edificações públicas**. Rio de Janeiro: 2015.

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2016: ano base 2015**. Rio de Janeiro: 2016a. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2016.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf)>. Acesso em: 4 nov. 2017.

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Demanda de Energia 2050: Nota Técnica DEA 13/15**. Rio de Janeiro: 2016b. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA\\_13-15\\_Demanda\\_de\\_Energia\\_2050.pdf](http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA_13-15_Demanda_de_Energia_2050.pdf)>. Acesso em: 4 nov. 2017.

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PNE/20080111\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2017.

BRASIL; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2050: Cenário Econômico 2050**. Rio de Janeiro: 2015. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PNE2050\\_Premissas%20econ%C3%B4micas%20de%20longo%20prazo.pdf](http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PNE2050_Premissas%20econ%C3%B4micas%20de%20longo%20prazo.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2017.

BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001a. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia**. Brasília, DF, Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/LEIS\\_2001/L10295.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm)>. Acesso em: 21 nov. de 2017.

BRASIL. Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001b. **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**. Brasília, DF, Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2001/d4059.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/d4059.htm)>. Acesso em: 21 nov. 2017.

BRASIL. Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004. **Autoriza A Criação da Empresa de Pesquisa Energética - Epe e Dá Outras Providências**. Brasília, DF, Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.847.htm)>. Acesso em: 21 mar. 2017.

BRASIL. Portaria nº 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Residenciais** Brasília, DF, Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/residencial/downloads/RTQR.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

BRASIL. Portaria nº 50, de 2013. **Anexo Geral V - Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros.** Brasília, DF, Disponível em: <[http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/anexos\\_rac/AnexoV\\_CatalogoPropriedadesTermicas\\_v08JUN2015\\_.pdf](http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/anexos_rac/AnexoV_CatalogoPropriedadesTermicas_v08JUN2015_.pdf)>. Acesso em: 22 nov. 2017

BRASIL. Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas.** Brasília, DF, Disponível em: <[http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010\\_RTQ\\_Def\\_Edificacoes-C\\_rev01.pdf](http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf)>. Acesso em: 22 nov. 2017.

CAIXA - Caixa Econômica Federal. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI).** Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

CARLO, Joyce C.; LAMBERTS, R.. Elaboração de protótipos para simulação do desempenho termo-energético de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XI, 2006, Florianópolis. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 152 - 161.

CARLO, Joyce C.; LAMBERTS, Roberto. Development of envelope efficiency labels for commercial buildings: Effect of different variables on electricity consumption. **Energy And Buildings.** [s.i.], v. 40, p. 2002-2008. 11 mai. 2008.

CB3E - CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Atividades Gerais entre Núcleos.** Disponível em: <<http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>>. Acesso em: 22 nov. 2017. 2017a.

CB3E - CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética em Edificações.** Florianópolis: CB3E, 2017b. Disponível em:

<[http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatorio\\_GruposClimaticos.pdf](http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Relatorio_GruposClimaticos.pdf)>. Acesso em: 22 nov. 2017. 2017b.

CB3E - CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Proposta de métodos para avaliação da eficiência energética - edificações residenciais.** Florianópolis: CB3E, 2017. 12 slides. Disponível em: <[http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Método\\_residencial - CT Inmetro.pdf](http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/Método_residencial_-_CT_Inmetro.pdf)>. Acesso em: 4 nov. 2017. 2017c.

CBCS - CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (Brasil). **Mapeamento:** Mapeamento dos principais interessados e dos processos que afetam a seleção de soluções (tecnologias e materiais) para projetos de habitação social – São Paulo, Brasil. [s.i.]: CBCS, 2010a. Disponível em: <[http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final\\_Brazil\\_reports\\_160511/1\\_Mapeamento\\_090511.pdf](http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/1_Mapeamento_090511.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2017.

CBCS - CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (Brasil). **Lições Aprendidas:** Soluções para sustentabilidade em habitações de interesse social com a companhia de desenvolvimento habitacional e urbano do estado de são paulo (CDHU) [s.i.]: CBCS, 2010b. Disponível em: <[http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final\\_Brazil\\_reports\\_160511/2\\_Licoes\\_Aprendidas\\_100511.pdf](http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/2_Licoes_Aprendidas_100511.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2017.

CBCS - CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (Brasil). **Avaliação:** Avaliação das tecnologias existentes no mercado e soluções para melhorar a eficiência energética e o uso racional de água em Habitação de Interesse Social no Brasil. [s.i.]: CBCS, 2010c. Disponível em: <[http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final\\_Brazil\\_reports\\_160511/3\\_Avaliacao\\_120511.pdf](http://www.cbcs.org.br/sushi/images/relatorios/Final_Brazil_reports_160511/3_Avaliacao_120511.pdf)>. Acesso em: 21 nov. 2017.

CBCS - CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Projeto Sustainable Social Housing Initiative (SUSHI).** Disponível em: <<http://www.cbcs.org.br/sushi/index.html>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

CIB - INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION. **About CIB.** Disponível em: <[http://www.cibworld.nl/site/about\\_cib/index.html](http://www.cibworld.nl/site/about_cib/index.html)>. Acesso em: 22 nov. 2017.

DOE - U.S. DEPARTMENT OF ENERGY'S. **EnergyPlus**. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

EIA - U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (Estados Unidos). **Annual Energy Outlook 2017**: with projections to 2050. Washington, D.C: U. S. Department Of Energy Organization, 2017.

FERREIRA, M.; ALMEIDA, M.; RODRIGUES, A.. Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential building with a nearly-zero energy target. **Energy And Buildings**. [s.i.], v. 133, p. 724-737. 13 out. 2016.

FONSECA, Ligiana; SANTANA, Laila; CARLO, Joyce. Limitações do archsim para otimização baseada em simulação para etiquetagem residencial. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XVI, 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016. p. 921 - 930.

FOSSATI, Michele et al. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s.i.], p. 1216-1231. 1 ago. 2016.

HAMDY, M.; HASAN, A.; SIREN, K.. A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010. **Energy And Buildings**. [s.i.], v. 56, p. 189-203. 21 ago. 2012.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia. **Tabelas de consumo/eficiência energética de edificações**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/edificacoes.asp>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

INVIDIATA, Andrea; GHISI, Enedir. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. **Energy And Buildings**. [s.i.], p. 20-32. 29 jul. 2016.

INVIDIATA, Andrea et al. Análise do desempenho termo energético de habitações unifamiliares de interesse social através do método de simulação do regulamento brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XVI, 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016. p. 554 - 563.

KAPSALAKI, M.; LEAL, V.; SANTAMOURIS, M.. A methodology for economic efficient design of Net Zero Energy Buildings. **Energy And Buildings**. [s.i.], p. 765-778. 10 out. 2012.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Governo Federal, 2014.

LIU, Feng; MEYER, Anke S.; HOGAN, John F.. **Mainstreaming Building Energy Efficiency Codes Developing Countries**. Washington, D.C: The World Bank, 2010.

LOPES, Alice do Carmo Precci et al. Energy efficiency labeling program for buildings in Brazil compared to the United States' and Portugal's. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s.i.], p. 207-219. 6 ago. 2016.

MARINOSKI, A. K.; GHISI, E.. Aproveitamento de água pluvial para usos não potáveis em instituição de ensino: estudo de caso em Florianópolis – SC. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 67-84. 11 jun. 2008.

MATOS, Michele et al. Análise do desempenho térmico de edificações residenciais através de simulação computacional no ENERGYPLUS baseada nos requisitos da norma NBR 15220. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XI, 2006, Florianópolis. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 1065 - 1078.

MADERSPACHER, Johannes et al. Comparison of different meta model approaches with a detailed building model for long-term simulations. In: CONFERENCE OF INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION, 14., 2015, Hyderabad, India. **Proceedings...** [s.i.]: IBPSA, 2015. p. 106 - 113.

MELO, Ana Paula. **Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. 2012. 189 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MELO, Ana Paula. **Avaliação computacional de estratégia para a redução do consumo de energia elétrica em um hotel em Florianópolis**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MELO, A.P.; SORGATO, M.J.; LAMBERTS, R.. Building energy performance assessment: Comparison between ASHRAE standard 90.1 and Brazilian regulation. **Energy And Buildings**. [s.i.], v. 70, p. 372-383. 23 nov. 2013.

MELO, A.P. et al. Development and analysis of a metamodel to represent the thermal behavior of naturally ventilated and artificially air-conditioned residential buildings. **Energy And Buildings**. [s.i.], v. 112, p. 209-221. 15 jan. 2016.

MENDES, Nathan et al.. 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. 5 mai. 2005.

MI, Xuming et al. Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China. **Applied Energy**. [s.i.], v. 175, p. 324-336. 11 mai. 2016.

MONTES, Maria Andrea Triana. **Abordagem integrada no ciclo de vida de habitação de interesse social considerando mudanças climáticas**. 2016. 473 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

NASPOLINI, H. F.; RÜTHER, R.. Assessing the technical and economic viability of low-cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low-income residential dwellings in Brazil. **Renewable Energy**. [s.i.], v. 48, p. 92-99. 24 mai. 2012.

NETO, Alberto H.; FIORELLI, Flávio A. S.. Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption. **Energy And Buildings**. [s.i.], v. 40 p. 2169-2176. 17 jun. 2008.

O GLOBO. **Da falta de estrutura fez-se a 'crise do apagão' no Brasil do início do século XXI**. 2017. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/fatos-historicos/da-falta-de-estrutura-fez-se-cri-se-do-apagao-no-brasil-do-inicio-do-seculo-xxi-9396417>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

RACKES, Adams; MELO, Ana P.; LAMBERTS, Roberto. Naturally comfortable and sustainable: Informed design guidance and performance labeling for passive commercial buildings in hot climates. **Applied Energy**. [s.i.], v. 174, p. 256-274. 2 mai. 2016.

RAKHSHAN, Kambiz; FRIESS, Wilhelm A.. Effectiveness and viability of residential building energy retrofits in Dubai. **Journal of Building Engineering**. [s.i.], v. 13, p. 116-126. 26 jul. 2017.

SÃO PAULO. SÃO PAULO - SECRETARIA DA FAZENDA. **Sobre o ICMS**. Disponível em: <<https://portal.fazenda.sp.gov.br/servicos/isencao-icms-veiculos/Paginas/Sobre.aspx>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

SIGNOR, Régis. **Análise de regressão do consumo de energia elétrica frente a variáveis arquitetônicas para edifícios comerciais climatizados em 14 capitais brasileiras**. 199.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 199.

SILVA, Arthur Santos et al. Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p.103-117, 15 set. 2014.

SILVA, Arthur S.; ALMEIRA, Laiane S. S.; GHISI, Enedir. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p.289-303, 5 mai. 2016.

SORGATO, Marcio José. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. 2015. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SORGATO, Marcio José et al. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p.83-101, 29 ago. 2014.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R.. The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. **Energy And Buildings**. [s.i.], v. 133, p. 1-13. 1 dez. 2016.

UE - UNIÃO EUROPEIA. Directiva nº 2010/31, de 19 de maio de 2010. **Relativa Ao Desempenho Energético dos Edifícios**: (reformulação). Croácia, Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex:32010L0031>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

USGBC – U.S. Green Building Council . **About USGBC**. Disponível em: <<https://new.usgbc.org/about>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

VERSAGE, Rogério de Souza. **Metamodelo para estimar a carga térmica de edificações condicionadas artificialmente**. 2015. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

WESTPHAL, Fernando S. LAMBERTS, Roberto. Regression analysis of electric energy consumption of commercial buildings in Brazil. In: International IBPSA Building Simulation Conference. 2007. **Proceedings...**Beijing, China: BS 2007.

YOSHIDA, Rosana. **DAS NORMAS DE CONFORTO TÉRMICO AO PROJECTO DE ARQUITECTURA**: Estudo de Caso para Edifícios de Habitação – Zona Bioclimática

Brasileira Z3 – Brasil. 2006. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura Bioclimática, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa/Portugal, 2006.

ZHAO, Hai-Xiang; MAGOULÈS, Frédéric. A review on the prediction of building energy consumption. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s.i.], v. 16, p. 3586-3592. 27 abr. 2012.

## ANEXO A – COMPONENTES SINAPI

Edificação	Componente	Tipo	Código SINAP	Valor SP	Valor BA	Unidade
Caso Base - Parede	Concretagem de paredes em edificações multifamiliares	Composição Sintético	90857	R\$ 317.91	R\$ 420.90	m³
Caso Base - Parede MEE3	Emboço	Composição Sintético	90408	R\$ 26.97	R\$ 27.29	m²
Caso Base - Cobertura MEE4	Telhamento com telha de fibrocimento	Composição Sintético	94210	R\$ 37.15	R\$ 37.99	m²
Caso Base - Cobertura	Concretagem de lajes em edificações multifamiliares	Composição Sintético	90856	R\$ 329.92	R\$ 382.80	m³
MEE1	Alvenaria de blocos de concreto com 9x19x39cm. Argamassa de assentamento com preparo em betoneira.	Composição Sintético	87453	R\$ 45.39	R\$ 39.87	m²
MEE2	Alvenaria de blocos cerâmicos com 9x19x39cm. Argamassa de assentamento com preparo em betoneira.	Composição Sintético	87477	R\$ 34.05	R\$ 34.25	m²
MEE3	Concreto usinado, bombeável	Insumo	1524	R\$ 251.11	R\$ 300.00	m³
MEE3	Instalação lâ de rocha em drywall (e: 50mm)	Composição Sintético	96372	R\$ 43.83	R\$ 19.96	m²
MEE6	Concretagem de lajes maciças	Composição Sintético	92726	R\$ 301.90	R\$ 352.77	m³
MEE6	Telhamento com telha metálica termoacustica e: 30mm - telha galvalume com espuma rígida de poliuretano	Composição Sintético	94216	R\$ 100.17	R\$ 74.01	m²
MEE9	Pintura em telha metálica de alumínio - tinta esmalte automotiva	Composição Sintético	75889	R\$ 18.87	R\$ 17.75	m²
Caso Base - Esquadrias	Janela de Alumínio de correr 1,20x1,20m, com 2 folhas de vidro	Insumo	34362	R\$ 702.45	R\$ 349.63	unid
MEE11	Janela de Alumínio de correr 1,20x1,20m, com 3 folhas (2 venezianas e 1 vidro)	Insumo	34370	R\$ 1,053.67	R\$ 524.45	unid