

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E GESTÃO

LUCIANA BANDEIRA DE OLIVEIRA

**A INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE FACHADA VIVA EM MANTA NO CICLO DE VIDA  
ENERGÉTICO DE UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CLIMA TROPICAL**

CURITIBA  
2015

LUCIANA BANDEIRA DE OLIVEIRA

**A INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE FACHADA VIVA EM MANTA NO CICLO DE VIDA  
ENERGÉTICO DE UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CLIMA TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil – PPGECC – Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia da Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

CURITIBA

2015

---

O48i

Oliveira, Luciana Bandeira de

A influência do sistema de fachada viva em manta no ciclo de vida energético de uma residência unifamiliar em clima tropical/ Luciana Bandeira de Oliveira. – Curitiba, 2015.

95 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2015.

Orientador: Sérgio Fernando Tavares .

Bibliografia: p. 81-86.

1. Fachadas (Arquitetura). 2. Energia - Ciclos de vida. 3. Energia - Análise. 4. Energia - Eficiência. I. Universidade Federal do Paraná. II. Tavares, Sérgio Fernando. III. Título.

CDD: 721.80286

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

LUCIANA BANDEIRA DE OLIVEIRA

### A INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE FACHADA VIVA EM MANTA NO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DE UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR EM CLIMA TROPICAL

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Área de Concentração: Ambiente Construído e Gestão, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:  \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sergio Fernando Tavares

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil - UFPR

Examinador:  \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Aloisio Leoni Schmid

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil - UFPR

Examinador:  \_\_\_\_\_

Profª. Drª. Rosa Maria Sposto

Depart. de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília - UNB

Curitiba, 23 de Maio de 2015.

Aos meus pais, pelo enorme incentivo  
aos estudos, desde sempre.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Paraná, em especial ao PPGECC, pela oportunidade de aprofundar os estudos, e à CAPES, pelo financiamento do período de estudos no mestrado.

Ao orientador Sérgio Tavares, assim como ao professor Aloísio Schmid, pela disponibilidade de tempo, prestatividade e por aconselhar o encaminhamento deste trabalho, além da amizade compartilhada.

Aos professores do PPGECC, por compartilhar o conhecimento e pela gratificante troca de experiências, e aos professores Paulo Chiesa, Alessandro Filla e Roberto Sabatella, pelos ensinamentos durante o estágio em docência.

Aos amigos do mestrado, pela amizade e pelas experiências compartilhadas.

À Ziza, pela prestatividade e prontidão em ajudar os mestrandos.

Ao Alexandre, pela compreensão, pelo apoio e imensa ajuda, e por estar sempre presente.

Aos meus pais, pelo incentivo em todos os momentos, pela dedicação e confiança intermináveis.

A Deus, pela saúde e força na conquista de mais essa etapa.

A todos os amigos e pessoas que, de alguma forma, tornaram possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem como motivação a busca por soluções mais eficientes na arquitetura, que tragam conforto e eficiência energética às edificações. As fachadas vegetais, utilizadas há mais de 2.000 anos, têm sido atualmente objeto de estudo em diversos países, devido a suas propriedades benéficas ao edifício e ao meio urbano, tais como a redução do consumo energético com climatização, redução de ilhas de calor, mitigação dos gases do efeito estufa, retenção de partículas poluentes do ar, resgate da biodiversidade e bem estar psicológico dos usuários do edifício e de seu entorno. O clima brasileiro, com abundância de radiação solar, parece ideal para a implantação destes sistemas, sobretudo num momento em que há uma demanda crescente por energia elétrica e uma necessidade evidente de economia no consumo. Os sistemas de fachadas vivas, ou *living wall systems*, consistem em uma tecnologia de fachadas vegetais, de conjuntos de módulos ligados às paredes, onde o enraizamento das plantas se dá na própria estrutura e não no chão. A utilização desta estrutura de suporte permite a utilização de uma maior variedade de espécies vegetais, que sobrevivem com pouco ou nenhum solo, por meio de técnicas de hidroponia, e conferem um efeito estético inovador às fachadas vegetais. Além disso, pesquisas apontam que os sistemas de fachadas vivas possuem capacidade de isolamento térmico superior às fachadas verdes convencionais, compostas de plantas trepadeiras que se aderem à parede ou a estruturas auxiliares de suporte. No entanto, a estrutura necessária para suporte e manutenção dos sistemas de fachada viva, segundo estudos, apresenta altos impactos ambientais, devido aos materiais usados na estrutura e a exigência de manutenção e irrigação constantes, o que leva ao questionamento acerca da sustentabilidade dessa técnica. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a sustentabilidade energético-ambiental do sistema de fachada viva em manta, através da análise do ciclo de vida energético, um método que analisa o gasto energético e os impactos relacionados, de um produto ou edificação durante toda sua vida útil, desde a extração da matéria prima até o descarte do mesmo. Três etapas auxiliam a construção desta ACVE: na primeira busca-se, através da revisão bibliográfica, conhecer os sistemas de fachadas vivas e suas características, além de compreender o método das análises de ciclo de vida e bases de dados de materiais e energia relacionada. A segunda etapa consiste na simulação de um protótipo de fachadas vivas, a fim de extrair do mesmo as propriedades físicas relacionadas à capacidade de isolamento térmico do sistema. A terceira etapa é a simulação termoenergética do sistema de fachada viva em manta, aplicado a seis modelos de uma mesma edificação residencial em clima tropical, variando a instalação de fachadas vivas em diferentes orientações, com o objetivo de quantificar a economia com climatização proporcionada pela fachada viva em cada situação, além de verificar o gasto energético durante o ciclo como um todo. Os resultados apontaram para reduções no gasto com climatização de 2,36% a 23,8%, no entanto, o sistema não foi considerado sustentável energeticamente, uma vez que a redução obtida na energia operacional não compensa o investimento energético com a instalação e manutenção das fachadas vivas, e ao final do ciclo de vida de 50 anos, os modelos com fachadas vivas ainda apresentaram gasto energético superior ao caso base, sem fachadas vivas.

Palavras-chave: Sistemas de fachadas vivas; análises de ciclo de vida; análises energéticas; eficiência energética.

## ABSTRACT

*This research is motivated by the search for more efficient solutions in architecture, which give comfort and energetic efficiency to buildings. The green façades have been used for over 2.000 years, and lately have been a study subject in many countries, due to their beneficial properties to the building and the urban environment, such as reducing energy consumption with artificial air conditioning, reducing the heat island effect, mitigation of greenhouse gases, retention of particulate air pollutants, biodiversity rescue and psychological well being of building users and its surroundings. Brazilian climate, with high levels of solar radiation, presents favorable conditions on implementing and studying this technology, particularly at a time when there is a growing demand for electricity and a clear need for economy in consumption. Living wall systems are a green façades technology, which are sets of modules linked to the wall, in which the plants rooting occurs in the own structure and not in the ground. The use of such support structure allows the use of a greater variety of plant species which survive with little or no soil using hydroponic techniques, and it provides an innovative aesthetic to the building. In addition, studies point that living wall systems presents superior thermal insulation capacity than conventional green façade, which needs vines or auxiliary structures to support climbing plants. However the necessary infrastructure to support and maintenance living wall systems, according to studies, has a high environmental impact, due to structure materials and the requirement for maintenance and constant irrigation, which leads to questions about the sustainability of this technique. This study aims to assess the sustainability of living wall systems with felt layers, by analyzing its energy life cycle, a method that analyzes the energetic consumption and related impacts of a product or building throughout its life, from the extraction of raw materials to its disposal. Three steps can help build this LCEA: first, through literature review, study the living wall systems and its characteristics, and understand the method of life cycle analysis and materials and energy related databases. The second step was to simulate a living wall system prototype, in order to find its physical properties related to the thermal insulation capacity of the system. And the third step was the thermal and energetic simulation of the living wall system with felt layers, applied to six models of the same residential building in a tropical climate zone, by varying the installation of living walls in different orientations, in order to quantify the savings provided by the air conditioning use reduction in each situation, and verify the hole energetic expenditure during the life cycle. The results point to energy savings around 2,36% to 23,8% with artificial air conditioning, but the system studies was not considered sustainable, since the reduction achieved in operation is not worth the energy investment with the installation and maintenance of the living wall system and at the end of the 50-year life cycle, models with living walls still had energy expenditure above the model without living wall systems.*

*Keywords: Living wall systems; life cycle assessment; energy analysis, energy efficiency.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de fachadas verdes.....	23
Figura 2: Tipos de sistema de fachada viva .....	24
Figura 3: Fachadas vivas em manta de Patrick Blanc.....	25
Figura 4: Fases do ciclo de vida energético .....	33
Figura 5: Energia durante o ciclo de vida e custos .....	34
Figura 6: Mapa mental da pesquisa.....	40
Figura 7: Protótipo de Lima Jr. (2014) recém-executado (à esquerda) e após 3 meses (à direita) .....	44
Figura 8: Modelo real de fachada verde a ser simulado .....	45
Figura 9: Exemplo de residência no padrão R1-B da NBR 12721:2006 .....	46
Figura 10: Composição do sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira .....	49
Figura 11: Ciclo térmico diário da fachada viva norte em Curitiba .....	53
Figura 12: Ciclo térmico diário da fachada viva oeste em Curitiba.....	53
Figura 13: Ciclo térmico diário da fachada sul em Curitiba.....	54
Figura 14: Ciclo térmico diário da fachada viva leste em Curitiba .....	54
Figura 15: Temperaturas dos ambientes no dia mais quente do ano .....	62
Figura 16: Temperaturas nos cômodos da casa ocupada e sem climatização.....	62
Figura 17: % de EEi dos materiais da fachada viva em manta com estrutura em madeira .....	65
Figura 18: Energia Embutida inicial nos materiais da residência R1-B, sem o acréscimo das fachadas vivas.....	68
Figura 19: Energia Embutida final na residência R1-B sem aplicação de fachadas vivas .....	69
Figura 20: energia embutida nas fachadas vivas dos modelos simulados .....	70
Figura 21: Energia embutida total nos modelos estudados .....	71
Figura 22: Consumo com climatização por fachada .....	73
Figura 23: Todas as fachadas .....	75
Figura 24: Fachada Norte.....	75
Figura 25: Fachada Oeste.....	75
Figura 26: Fachada Sul.....	75
Figura 27: Fachada Leste.....	75
Figura 28: Energia embutida nas fachadas vivas e energia operacional dos modelos simulados.....	76
Figura 29: Ciclo de vida energético final dos modelos .....	77

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Consumo mensal de equipamentos da residência estudada.....	47
Tabela 2: Planilha de cálculo das propriedades térmicas da fachada leste.....	51
Tabela 3: Valores de temperatura interna conforme a NBR 15.575/2013 .....	55
Tabela 4: Carga térmica com ocupação e uso de equipamentos na residência R1-B.....	57
Tabela 5: Modelos simulados .....	58
Tabela 6: Configurações dos parâmetros das simulações no Mestre .....	59
Tabela 7: Energia embutida no substrato .....	64
Tabela 8: Cálculo da energia embutida dos componentes da fachada viva em manta .....	65
Tabela 9: Cálculo da energia embutida sobre o lote básico de insumos da R1-B, baseado em NBR – 12.721 (ABNT, 2006) e Tavares(2006) .....	67
Tabela 10: Energia Embutida dos modelos estudados .....	70
Tabela 11: Energia de climatização dos modelos simulados .....	73

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
<b>1.1. Problematização</b> .....	14
<b>1.2. Hipótese</b> .....	15
<b>1.3. Objetivo</b> .....	15
<b>1.4. Justificativas</b> .....	16
1.4.1. Aspectos ambientais .....	16
1.4.2. Aspectos socioeconômicos .....	17
1.4.3. Aspectos tecnológicos .....	18
<b>1.5. Contextualização no programa</b> .....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
<b>2.1. Fachadas Vegetais</b> .....	21
2.1.1. Características das fachadas vegetais.....	22
2.1.2. Classificação das fachadas vegetais.....	23
<b>2.2. Conforto térmico em edificações</b> .....	26
2.2.1. Influência das fachadas vegetais no desempenho térmico de edifícios .....	28
<b>2.3. Análise do ciclo de vida energético das edificações</b> .....	30
2.3.1. Análise de ciclo de vida e análise energética em edificações.....	30
2.3.2. Estrutura de uma ACVE.....	32
<b>2.4. Influência das fachadas vegetais no ciclo de vida dos edifícios</b> .....	35
<b>2.5. Características Climáticas da cidade de Vitória/ES</b> .....	37
3. MÉTODO .....	39
<b>3.1. Definição da estratégia de pesquisa</b> .....	39
3.1.1. Unidade de análise .....	40
3.1.2. Delimitação do trabalho .....	41
3.1.3. Justificativa da escolha a partir do objetivo .....	42
3.1.4. Testes de validade.....	43
3.1.5. Seleção de caso.....	43
<b>3.2. Protocolo de coleta de dados</b> .....	48
3.2.1. Cálculo da energia embutida na fachada viva .....	49
3.2.2. Cálculo da energia embutida na residência.....	50
3.2.3. Definição de propriedades térmicas da fachada viva .....	50
3.2.4. Definição da faixa de conforto térmico .....	54
3.2.5. Energia operacional nos modelos da residência .....	55

<b>3.3. Simulação no Mestre</b> .....	56
3.3.1. Configurações dos modelos para a simulação .....	56
3.3.2. Dados inseridos na simulação .....	59
3.3.3. Simulações do caso-base .....	61
3.3.4. Simulações da residência com fachadas vivas.....	63
<b>4. CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL COM SISTEMA DE FACHADAS VIVAS</b> .....	64
<b>4.1. Energia embutida</b> .....	64
4.1.1. Energia embutida nas fachadas vivas.....	64
4.1.2. Energia embutida na residência sem sistema de fachadas vivas.....	66
<b>4.2. Energia operacional</b> .....	71
4.2.1. Consumo de energia elétrica da residência .....	71
4.2.2. Simulação do consumo com climatização .....	71
<b>4.3. Ciclo de vida energético total dos modelos</b> .....	73
<b>4.4. Discussão dos resultados</b> .....	76
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	78
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	80
REFERÊNCIAS .....	81
APÊNDICES .....	87
APÊNDICE A – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Norte.....	88
APÊNDICE B – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Oeste.....	90
APÊNDICE C – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Sul .....	92
APÊNDICE D – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Leste .....	94
APÊNDICES E, F,G,H,I, J – EM CD.....	95

## 1. INTRODUÇÃO

A otimização do uso dos recursos naturais é uma necessidade do setor da construção civil, considerada uma das atividades menos sustentáveis do planeta por ser uma grande consumidora dos recursos naturais, sobretudo os não renováveis, além de se utilizar de técnicas destrutivas em seus processos produtivos, desde a extração de matéria-prima até os processos construtivos empregados nas obras e o desperdício de materiais.

O conceito de construção sustentável engloba a redução de atividades impactantes, como as que exigem grande consumo de energia e que envolvem processos poluentes e danosos ao meio ambiente, e o aproveitamento máximo dos recursos naturais renováveis. Nesse contexto nota-se o crescente uso de estratégias passivas e soluções mais eficientes na arquitetura, como o aproveitamento de águas pluviais e cinzas, a geração de energia através do sol, da geotermia, das marés e dos ventos, assim como aquecimento solar passivo, além do uso de elementos naturais nas construções, como coberturas e fachadas vegetais.

As fachadas vegetais há muito são usadas por seu efeito estético, no entanto, seu uso atualmente tem sido estimulado como um atributo de sustentabilidade, devido ao fato de a vegetação ser um recurso renovável, e também pelos benefícios conferidos ao edifício e ao meio ambiente em seu entorno. Alguns destes benefícios são a criação de abrigo para determinadas espécies de animais no meio urbano; retenção de poluentes do ar; proteção solar, redução das ilhas de calor urbanas, entre outros.

Para este trabalho tem especial relevância o isolamento térmico, e a conseqüente redução da carga térmica da edificação e da necessidade de climatização artificial, o que relaciona as fachadas vivas à eficiência energética. No entanto, apesar dos benefícios relacionados às fachadas vivas, estudos também apontam que as estruturas utilizadas para sustentar as fachadas vivas são constituídas por materiais de alto impacto no meio ambiente e inviabilizam a sustentabilidade ambiental deste sistema.

Este trabalho procura estudar o impacto dos sistemas de fachada viva em manta, através de uma análise de ciclo de vida energético, uma ferramenta que estuda o gasto energético envolvido na produção, utilização e descarte de um determinado produto. Para isto, recorre-se a pesquisas anteriores, bases de dados de energia embutida e simulações termoenergéticas, de modo a analisar os gastos energéticos antes e durante a vida útil de uma residência com fachadas vivas. Desse modo é possível avaliar a influência das

fachadas vivas no gasto energético da edificação, sua influência no desempenho térmico da mesma, e quanta energia é possível economizar com climatização, graças à instalação deste sistema.

A pesquisa contribui ao explorar propriedades ainda desconhecidas das fachadas vivas, elementos que têm sido bastante utilizados no mercado da construção civil, e buscar aprimorar a técnica tornando-a mais eficiente e energeticamente sustentável.

## 1.1. Problematização

Em busca da sustentabilidade na construção civil, os profissionais da área têm procurado uma relação mais harmônica entre arquitetura e natureza, como no uso das fachadas vegetais. Acredita-se que estes elementos naturais trazem diversos benefícios para o edifício e o meio ambiente ao seu redor e além de criar um microclima urbano mais ameno, possam melhorar o desempenho térmico da envoltória da edificação, aumentando a resistência térmica da parede e assim, alcançar uma economia de energia com climatização.

No entanto, essa economia é questionável, uma vez que a instalação e a manutenção geralmente necessária nas fachadas vivas representam um gasto extra de energia, além dos materiais mais utilizados apresentarem alto impacto ambiental. É preciso comparar esses gastos de instalação e manutenção com os benefícios e a economia de energia proporcionada pelas fachadas vegetais e avaliar a sustentabilidade energético-ambiental do sistema.

Uma forma de avaliar a sustentabilidade são as análises do ciclo de vida (ACV) que são estudos dos impactos gerados por produtos ou edificações, desde a extração da matéria prima até sua destinação final. Nas ACV relativas a edificações destacam-se as análises de ciclo de vida energético (ACVE), que analisam a energia gasta durante todo o ciclo de vida da edificação ou em fases específicas do mesmo. Com as ACVE é possível avaliar os gastos energéticos em todos os processos de produção e utilização do produto em questão, neste caso uma edificação, identificando as fases e os processos de maior gasto energético, bem como a fonte energética e os impactos da mesma.

No Brasil, a principal fonte primária para geração de energia elétrica é a hidráulica, de origem renovável e que apresenta impactos ambientais mais baixos que outras fontes. Ainda assim, 20,7% da oferta interna de energia do Brasil em 2013 tem origem em fontes não renováveis (BRASIL, 2014), de modo que se faz necessária a economia de energia, sobretudo em setores de alto consumo como a construção civil.

Dessa forma, para se obter uma economia efetiva de energia durante todo o ciclo de vida de uma edificação residencial brasileira, a energia embutida relativa à implantação e manutenção das fachadas vivas, não pode superar a redução obtida com a energia operacional, ou seja, a energia utilizada ao longo da vida útil do edifício. A presente pesquisa pretende, portanto, responder à seguinte questão: **O aumento da energia embutida do**

## **edifício através da implantação de fachadas vivas é compensado em menor energia de operação ao longo do ciclo de vida da edificação?**

### **1.2. Hipótese**

Devido ao fato de que grande parte dos materiais de uma fachada vegetal é utilizada em seu estado natural, supõe-se que a energia embutida inicial dos sistemas de fachada viva em manta acrescenta pouco à energia embutida inicial do edifício. No entanto, segundo Ottelé *et al.* (2011), a necessidade de manutenção constante e substituição de alguns materiais torna a energia embutida total significativa ao longo do ciclo de vida.

Quanto aos resultados acerca da energia operacional, espera-se obter uma considerável redução do uso de climatização artificial, uma vez que Alexandri e Jones (2008), com o auxílio de simulação, observaram uma redução de 100% da necessidade do uso de climatização artificial para a cidade de Brasília, que possui clima tropical de altitude, com a adição de fachadas e telhados verdes aos edifícios. Ottelé *et al.* (2011), também encontraram economia de 43% do uso de aparelhos de condicionamento de ar para o clima mediterrâneo, com a instalação de fachadas vivas.

Assim, espera-se que a redução da carga térmica alcançada com a aplicação do sistema de fachada viva em manta reduza a necessidade de climatização artificial em clima quente e úmido e leve a uma redução do gasto energético durante o ciclo de vida como um todo.

### **1.3. Objetivo**

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência dos sistemas de fachada viva em manta no ciclo de vida energético de uma edificação residencial em clima tropical, de forma que através do levantamento de dados e da simulação, quantificando o gasto energético da edificação com e sem fachadas vivas, em cada etapa do ciclo de vida, é verificado se o sistema pode reduzir os gastos de energia operacional e total ao longo da vida útil da edificação.

## 1.4. Justificativas

A importância do estudo do ciclo de vida energético das fachadas vegetais se justifica por aspectos ambientais, socioeconômicos e tecnológicos.

### 1.4.1. Aspectos ambientais

A humanidade enfrenta a ameaça de um futuro esgotamento dos recursos naturais, devido à exploração indiscriminada e ao desperdício. Diante deste quadro, diversos setores da sociedade buscam formas de reduzir o consumo, bem como de tornar a produção e o consumo de bens mais sustentável. Nesse contexto, a construção civil é uma das atividades com maior impacto ambiental, uma vez que tem um alto consumo energético, além do alto índice de emissões de CO<sub>2</sub>. Segundo Edwards (2008) as edificações consomem 50% dos recursos energéticos globais, além de estarem relacionadas a 50% das emissões dos gases que provocam o aquecimento global.

Segundo Tavares (2006), constata-se que seis dos setores industriais que mais consomem energia no Brasil: cimento, cerâmica, metais não ferrosos, aço, química e mineração, estão relacionados à Indústria da Construção Civil. Estes setores em conjunto usam 75% de fontes não renováveis de energia. Desse modo, a Construção Civil necessita de tecnologias mais sustentáveis em seus processos produtivos, o que leva à busca por elementos mais naturais na construção, sobretudo os renováveis, como é o caso dos telhados e fachadas vegetais.

As fachadas vegetais apresentam diversos benefícios ambientais como a fixação de carbono pelas plantas (SHEWEKA e MAGDY, 2011), a redução das ilhas de calor urbanas através da evapotranspiração (ALEXANDRI e JONES, 2008), a retenção de substâncias tóxicas do ar e da chuva (OTTELÉ *et al.*, 2010), além de promover o retorno de área verde ao ambiente urbano (FRANCIS e LORIMER, 2011).

Acredita-se que a incorporação das fachadas verdes às edificações pode reduzir os gastos com climatização, através do aumento do isolamento das fachadas. Segundo Ottelé *et al.* (2011), esta estratégia mostrou melhor resposta em climas mais quentes, como é o caso de grande parte do Brasil. Segundo a NBR 15220:3 (ABNT, 2005) o território brasileiro possui oito zonas bioclimáticas, dentre as quais seis apresentam temperaturas médias acima dos 20°C, e seis apresentam temperaturas médias máximas acima dos 30°C (INMET,

2013). Estes dados levam a crer que as fachadas vegetais podem ser uma boa estratégia de resfriamento passivo para as cidades brasileiras.

No entanto, devido à necessidade de manutenção e irrigação constantes, bem como aos materiais de alto impacto ambiental usualmente empregados na estrutura das fachadas vegetais (OTTELÉ *et al.*, 2011), as mesmas são apontadas por alguns profissionais como exemplo de “*green wash*”, ou seja, um recurso estético que remete à natureza e à sustentabilidade ambiental, mas que não apresenta benefícios reais ao edifício e ao meio ambiente.

Desse modo, se torna importante estudar as fachadas vegetais, sobretudo quanto aos aspectos relacionados aos benefícios e impactos ambientais. A análise do ciclo de vida é uma forma de avaliar os impactos dessa estrutura que estuda de forma completa os processos de produção e utilização da mesma, permitindo identificar quais os materiais, os processos construtivos de maior impacto.

#### 1.4.2. Aspectos socioeconômicos

O consumo de energia no Brasil tem aumentado, tanto em função do avanço tecnológico, quanto em função da distribuição de energia elétrica que atinge 97,8% dos domicílios brasileiros, segundo o Censo 2010 (IBGE, 2013). O aumento da renda e facilidades de crédito também contribuem para o aumento do consumo de energia, de modo que o desafio brasileiro é aumentar a eficiência da matriz energética, ou seja, continuar com o desenvolvimento tecnológico, que leva ao aumento do consumo final, sem que isso signifique aumento na oferta interna de energia, através da redução do desperdício.

Esta pesquisa procura analisar a viabilidade do investimento em fachadas vegetais, tentando contribuir para o estabelecimento de padrões e materiais de construção mais naturais e renováveis. O setor residencial consome quase o equivalente à soma dos setores comercial e público de energia elétrica, e mais do que a soma dos dois setores em todas as fontes de energia (BRASIL, 2013) e a economia energética pode justificar o investimento na qualidade da construção.

Visto que existe esta grande demanda energética para o setor residencial, a redução do consumo de energia elétrica com climatização pode ter um peso grande no balanço energético nacional, com uma significativa economia de energia. Calcula-se que quase

50% da energia elétrica produzida no país seja consumida na operação e manutenção das edificações, dentre as quais têm grande peso os sistemas artificiais, que proporcionam conforto ambiental para seus usuários, como iluminação, climatização e aquecimento de água (Eletrobrás, 2013).

Alexandri e Jones (2008) afirmam que o uso de vegetação no envelope dos edifícios reduz a necessidade de climatização artificial, e segundo o estudo, na cidade de Brasília chegou-se a 100% de economia de energia com climatização, tornando desnecessário o uso de 6 horas diárias de ar-condicionado através da implantação de coberturas e fachadas vegetais.

A adequação do edifício ao clima de forma passiva é importante na medida em que, além de reduzir o consumo energético com climatização, confere melhores condições térmicas às residências de famílias de baixa renda que, mesmo em situações de desconforto térmico, não adquirem aparelhos de condicionamento artificial do ar.

#### 1.4.3. Aspectos tecnológicos

A eficiência dos edifícios e do processo de construção é tema de grande interesse na construção civil, uma vez que a mesma está sempre em busca do desenvolvimento de tecnologias para atender à demanda do mercado. Atualmente essa demanda é por construções sustentáveis, que se tornaram um diferencial no mercado e, para os empreendedores, uma forma de agregar valor ao edifício. Há, ainda, a necessidade de atender às legislações e normas mais rigorosas quanto a aspectos ambientais e energéticos.

A eficiência energética nas edificações brasileiras é de interesse prioritário das empresas relacionadas à construção, uma vez que além dos selos reconhecidos internacionalmente como LEED e AQUA-HQE, entre outros, o selo Procel Edifica, instituído em 2003 pela Eletrobrás, pretende certificar os edifícios que utilizem os recursos naturais, assim como a energia elétrica, de maneira eficiente.

Apesar das diversas pesquisas sendo realizadas atualmente sobre a sustentabilidade e eficiência energética nas edificações, Köhler (2008) afirma que grande parte dos estudos conduzidos acerca das fachadas vegetais foi conduzida na Alemanha, e ressalta a importância de realizar esses estudos em outras partes do mundo. No Brasil, os estudos relativos às fachadas verdes existem em número bem menor do que aqueles relativos aos

telhados verdes, talvez por essa razão, o uso dessa estrutura nas fachadas ainda seja desconhecido pela maioria da população.

São diversas as estruturas e os materiais que podem compor uma fachada vegetal. Perini *et al.* (2011) destaca três tipos de fachadas verdes, onde o enraizamento das plantas se dá no chão ou em canteiros; e mais três tipos de sistemas de fachadas vivas, onde a própria estrutura abriga a planta e fornece os nutrientes. Além das possibilidades de variação dessa estrutura, diversos materiais e tipos de plantas podem ser utilizados nas fachadas vegetais. Pesquisas na área podem mostrar quais escolhas são mais eficientes e sustentáveis.

### **1.5. Contextualização no programa**

A pesquisa faz parte do Programa de Pós-graduação em engenharia de construção civil da Universidade Federal do Paraná, dentro da área de concentração Ambiente Construído e gestão, e está inserida na linha de pesquisa Sustentabilidade no ambiente Construído, cujo foco são as modificações que o ser humano causa no meio natural com a prática da construção. Algumas dissertações sobre a vegetação incorporada às edificações e sobre o ciclo de vida das edificações foram publicadas nos últimos anos, dentre as quais algumas são citadas a seguir.

Lobo (2010) desenvolveu uma metodologia de inventário de emissão equivalente de CO<sub>2</sub> por meio de uma análise energética dos serviços de uma planilha de composição de serviços de obras, elegendo como unidade de análise energia embutida e emissão de CO<sub>2eq</sub> de uma edificação do estado do Paraná.

Graf (2011) analisou a relação entre transmitância térmica e energia incorporada nas paredes do invólucro de uma residência unifamiliar, através da simulação, calculando os efeitos da variação da transmitância térmica sobre a temperatura interna da casa e a energia incorporada.

Monich (2012) realizou a avaliação do impacto ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em *woodframe* no estado do Paraná, através do levantamento de energia embutida e emissão de carbono, com o auxílio de simulação. Também através da simulação, Mazzarotto (2011) estudou as fachadas duplas ventiladas e sua influência no desempenho térmico e energético de edifícios de escritórios em Curitiba.

Ainda recentemente, Marchesini (2013) analisou a influência do mobiliário no ciclo de vida energético das edificações, Oba (2014) utilizou simulações termoenergéticas e análise de ciclo de vida para estudar o desempenho e a readequação de edifícios modernos, e Lima Junior (2014) avaliou, através de um experimento, a influência do sistema de fachadas vivas no desempenho térmico de paredes opacas na cidade de Curitiba.

Alguns artigos relacionados ao tema desta pesquisa também foram publicados, entre eles, Santos *et al.* (2013) analisaram o impacto ambiental gerado pelo descarte de uma lâmpada através da análise do ciclo de vida do produto; Schmid *et al.* (2012) realizaram uma modelagem do consumo de energia na cidade de Curitiba; Graf *et al.* (2012) realizaram um estudo de Viabilidade do uso de BIM para mensurar impactos ambientais de edificações; e Graf e Tavares (2012) determinaram uma faixa de temperaturas de conforto adaptativo para a cidade de Curitiba.

Nessa mesma linha, a pesquisa pretende contribuir com dados a respeito da análise do ciclo de vida energético dos sistemas de fachadas vivas em edificações residenciais, comparando a energia consumida durante as fases do ciclo de vida, no contexto da construção civil brasileira.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como embasamento para a produção deste trabalho, a revisão bibliográfica se estrutura em cinco principais pontos. No primeiro item são descritas as características, tipos, funções e estudos sobre as fachadas vegetais; no segundo é debatido o entendimento sobre conforto térmico em diversos autores, como forma de definir este parâmetro como etapa da pesquisa; o terceiro item, “Análise do ciclo de vida energético nas edificações” define os parâmetros e métodos utilizados em outras pesquisas similares e normatizados pela ISO 14040 (ABNT, 2001); O quarto item aborda como outros pesquisadores trataram o retorno energético das fachadas vegetais em suas pesquisas, e relata resultados relevantes em que esta pesquisa se baseia; E por último é apresentado o perfil climático da cidade escolhida para a simulação deste trabalho, Vitória – ES.

### 2.1. Fachadas Vegetais

Há 2.000 anos, no Mediterrâneo, videiras já eram usadas como jardins verticais. Na Europa Central, há 500 anos, as trepadeiras eram populares em castelos e vilas, bem como espaldeiras com frutíferas e plantas ornamentais (KÖHLER, 2008). Com os estudos acerca da sustentabilidade nas construções, no final do século XX, foram retomados os estudos sobre as fachadas vegetais, incentivando seu uso, como nas décadas de 1980 e 1990, em Berlim, quando um programa do governo incentivou a instalação de 245.584 m<sup>2</sup> de fachadas vegetais (KÖHLER, 2008).

Atualmente, o uso das fachadas vegetais, nas paredes externas ou internas das edificações, está ligado a benefícios reconhecidos pelos seus usuários, como a proteção contra pichações nas paredes externas das edificações, principalmente nos centros urbanos, além da estética que remete ao contato com a natureza. Valesan *et.al* (2010) realizaram entrevistas com os moradores de residências com fachadas verdes e os mesmos apontaram como vantagens relacionadas às fachadas verdes o embelezamento da residência e da paisagem urbana, os efeitos positivos para o bem-estar psicológico do homem e a melhoria da temperatura interna das edificações, sendo que 80% declararam satisfação com a fachada instalada.

### 2.1.1. Características das fachadas vegetais

Segundo Köhler (2008), os sistemas de fachadas vivas protegem as fachadas e oferecem benefícios similares aos ganhos com os telhados verdes. O uso da vegetação na arquitetura tem sido estudado devido aos seus efeitos também no meio ambiente, tais como a preservação de determinadas espécies no meio urbano, uma vez que servem de habitat, ajudando a preservá-las (FRANCIS E LORIMER, 2011).

Segundo Papadakis *et al.* (2001), o plantio de vegetação funciona como um método de controle solar passivo, sendo capaz de reduzir a temperatura de fachadas de edifícios, uma vez que as folhas bloqueiam a radiação direta na fachada e, diferentemente do que acontece com protetores solares artificiais como *brises-soleil*, não há aumento da temperatura radiante, além disso, a evapotranspiração das plantas tem efeito de resfriamento ao redor das mesmas.

Segundo Köhler (2008) uma camada adicional de vegetação na parede traz benefícios ao edifício como isolamento térmico. O processo de fotossíntese das plantas é relacionado à redução da temperatura interna e externa de edifícios, criando também um microclima urbano mais ameno (ALEXANDRI e JONES, 2008). Outro importante benefício atribuído às fachadas vegetais é a fixação ou captura de carbono e outros gases do efeito estufa, além da melhora na qualidade do ar, uma vez que removem poluentes do mesmo, como poeira e metais (KÖHLER, 2008; OTTELÉ *et al.* ,2010).

Ottelé *et al.* (2010) provou que as fachadas vegetais absorvem partículas poluentes do ar ao analisar as partículas, finas e ultrafinas, existentes em folhas de trepadeiras próximas a uma estrada intensamente utilizada na Holanda e comparar com a quantidade de partículas encontradas nas folhas de plantas da mesma espécie (*Herdera helix*), porém localizadas em uma floresta, sem emissão direta de poluentes ao redor. Após análise, as folhas coletadas próximas à estrada apresentaram uma quantidade maior de partículas que as folhas coletadas na floresta. Os elementos particulados encontrados nas folhas de origens diferentes também eram distintos, partículas de aço inoxidável, por exemplo, foram encontradas somente nas folhas próximas à estrada.

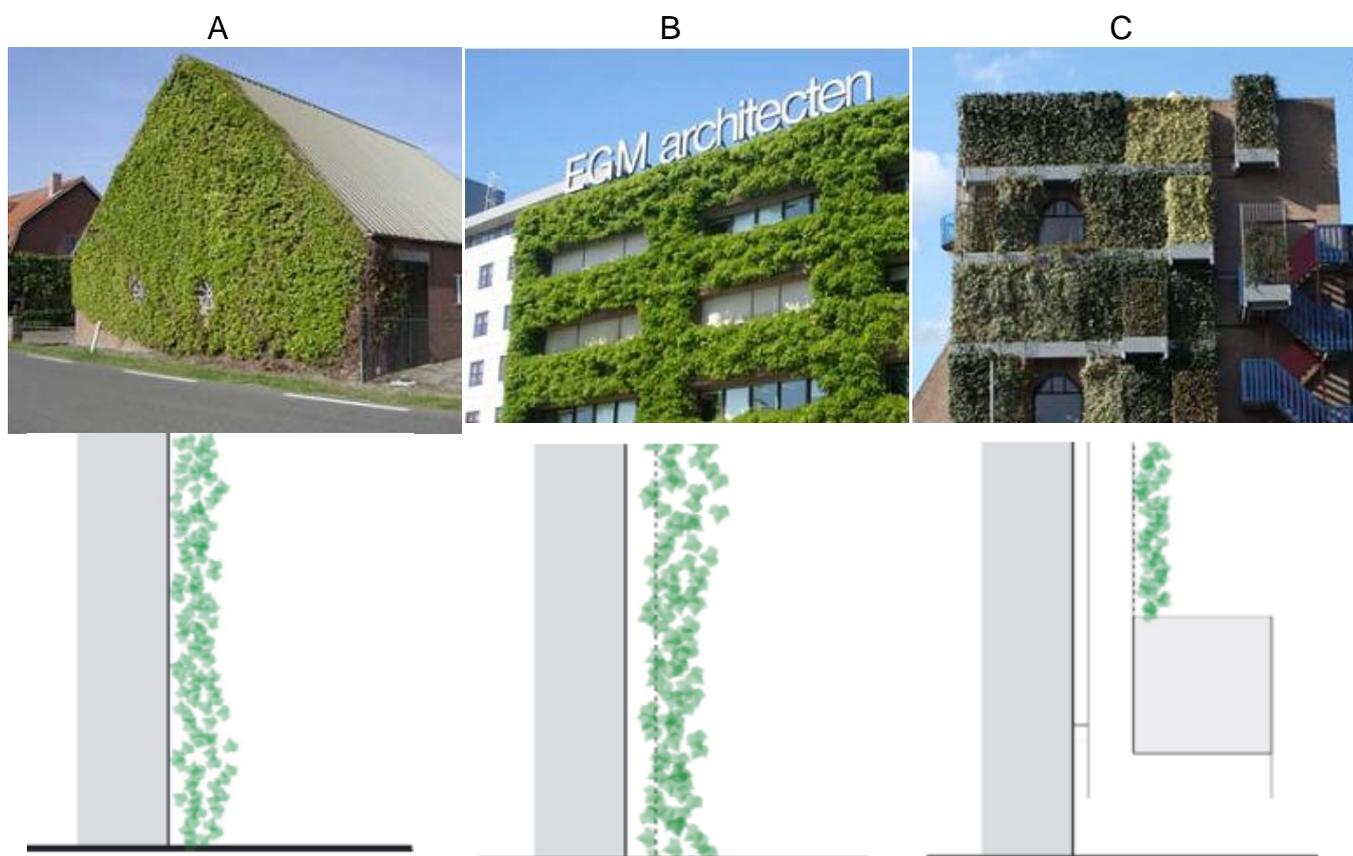
Valesan (2009) realizou uma pesquisa com usuários de residências com fachadas verdes em Porto Alegre, quanto à satisfação com as mesmas. As principais vantagens relacionadas às fachadas verdes por seus usuários foram o embelezamento do edifício e da paisagem urbana, a integração entre o meio urbano e a natureza e efeitos psicológicos

positivos. Entre as desvantagens citadas, a mais comum foi a necessidade de manutenção constante, seguida por danos provocados à edificação – os quais Valesan (2010) ressalta que podem ter ocorrido em função de má execução das paredes ou revestimentos – e proliferação de fauna indesejada.

### 2.1.2. Classificação das fachadas vegetais

Podem ser consideradas paredes ou fachadas vegetais quaisquer técnicas que utilizem plantas para cobertura de paredes, internas ou externas, de um ambiente construído. Classificam-se em dois grupos principais: fachadas verdes (*green walls*) e sistemas de fachadas vivas (*living wall systems*), as primeiras caracterizam-se pelo enraizamento no solo, próximo à parede, e seu crescimento se dá apoiado na própria parede do edifício ou em uma estrutura auxiliar de suporte. Já as fachadas vivas abrigam as raízes das plantas em sua estrutura com pouco ou nenhum solo (KÖHLER, 2008; LOH, 2008; PERINI, 2011; FRANCIS E LORIMER, 2011).

**Figura 1:** Tipos de fachadas verdes

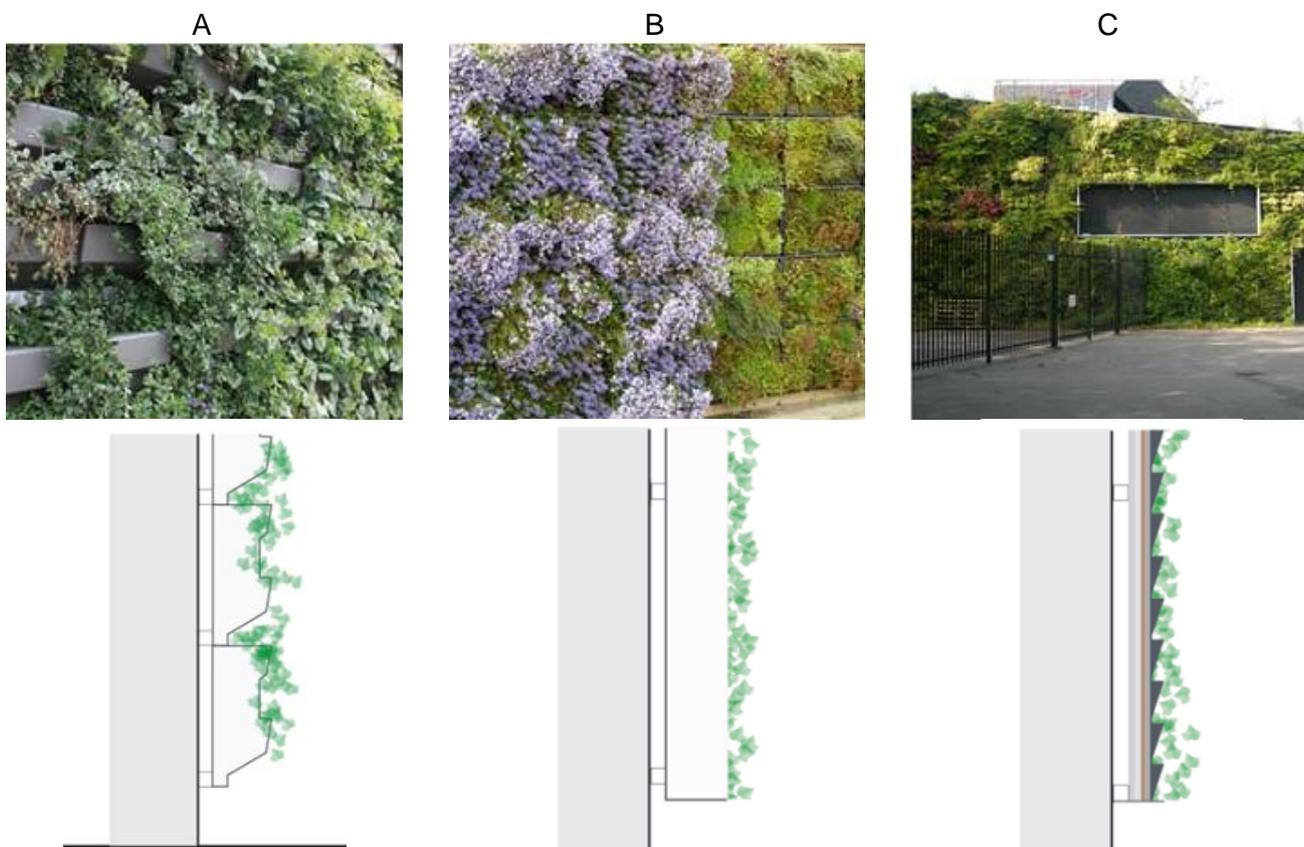


A: Fachada verde direta. B: Fachada verde indireta. C: Fachada verde em canteiros. Fonte: Perini et al. (2011)

No caso das fachadas verdes, são chamadas de diretas, quando são plantadas no solo e aderem-se à parede do edifício; indiretas quando necessitam de uma estrutura de apoio como grades, espaldeiras ou cabos; e um terceiro tipo é plantado em canteiros suspensos na fachada, aderindo à parede ou a estruturas auxiliares, sendo intermediário entre as fachadas verdes e vivas, caso este sistema necessite de algum sistema de irrigação ou nutrição, pode ser classificado como um sistema de fachada viva (PERINI *et al.*, 2011). As fachadas verdes geralmente não precisam de um sistema especial de irrigação ou nutrição, e pela simplicidade da estrutura têm custo mais baixo e impactos menores que os sistemas de fachadas vivas. Na figura 1 são demonstrados três tipos de fachadas verdes.

As fachadas vivas, também conhecidas como paredes vivas ou “*living wall systems*”, se diferenciam das fachadas verdes pelo enraizamento das plantas, que se dá em estruturas geralmente modulares com pouco ou nenhum solo, por isso seu cultivo é baseado em técnicas de hidroponia, fornecendo água e nutrientes de forma constante. A existência de uma estrutura para o crescimento da planta e as técnicas de hidroponia aplicadas ao sistema expandem a gama de espécies utilizadas nesse tipo de fachada, não mais se limitando às trepadeiras (KÖHLER, 2008).

**Figura 2:** Tipos de sistema de fachada viva



A: Sistema de fachada viva em módulos; B: sistema de fachada viva em painéis modulares; C: sistema de fachada viva em camadas de feltro. Fonte: Perini *et al.* (2011)

São inúmeras as estruturas existentes para os sistemas de fachadas vivas, ilustradas na figura 2, dentre elas destacam-se as estruturas em módulos de plástico, cerâmica, entre outros materiais, que consistem em caixas pré-fabricadas onde são acomodadas as plantas em vasos com substrato, e esses módulos são fixados à parede ou a uma estrutura auxiliar. Trata-se de um modelo de fácil montagem, manutenção e reposição quando necessária, facilmente encontrado no mercado brasileiro.

Outro sistema de fachada viva que merece destaque é o sistema em manta, ilustrado na figura 3. Desenvolvido e patenteado pelo botânico Patrick Blanc nos anos 1980 como uma forma de cultivar plantas em superfícies verticais, o sistema foi difundido na Europa e no mundo ao ser adotado em projetos de arquitetos internacionalmente reconhecidos como Jean Nouvel e Herzog e De Meuron (BLANC, 2014). A fachada viva em manta é composta de três principais camadas: estrutura metálica, PVC e camadas de feltro.

**Figura 3:** Fachadas vivas em manta de Patrick Blanc



A: Musée du Quai Branly, Paris; B: Museu Caixa Forum, Madrid.  
Fonte: <http://www.verticalgardenpatrickblanc.com>

A estrutura metálica pode ser afixada na parede ou autoportante, e gera a cavidade entre a vegetação e a parede que confere ao sistema a capacidade de isolamento térmico e acústico; em seguida, uma chapa de PVC confere rigidez ao sistema, serve de apoio para o feltro e isola a umidade da parede; por fim, uma camada dupla de feltro é grampeada à chapa de PVC e são feitos cortes na última camada de feltro, formando os bolsos que acomodarão as plantas. A irrigação é feita no topo da parede, e à água devem ser adicionados os nutrientes necessários. Segundo Blanc (2014), o peso total do sistema, incluindo as plantas e a estrutura metálica é menor do que 30 kg por metro quadrado.

Lima Junior (2014), baseando-se nos sistemas de Blanc, propôs materiais alternativos na construção de fachadas vivas de pequena e média proporções, com a estrutura em madeira ao invés de metálica e lona plástica no lugar da chapa de PVC. Sendo assim, aproveitou a própria estrutura de madeira para a fixação dos grampos e criação dos bolsos de feltro e, durante o período de estudo, o sistema se mostrou resistente às intempéries, ao peso das plantas e à umidade da cavidade. Ottelé *et al.* (2011) afirma que substituições como essa podem reduzir consideravelmente o impacto ambiental dos sistemas de fachada viva.

Há diversos outros tipos de fachadas vegetais além dos apresentados aqui, com diferentes sistemas de irrigação, drenagem e acomodação das plantas. Segundo Ottelé *et al.* (2011) as fachadas verdes apresentam impactos ambientais menores que os sistemas de fachadas vivas. No entanto, estas proporcionam economia de energia com climatização três vezes maior que as primeiras.

## **2.2. Conforto térmico em edificações**

Segundo a ASHRAE (1993 *apud* LAMBERTS,1997), o conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve o indivíduo. É um conceito que varia para cada pessoa, o que torna difícil o estabelecimento de parâmetros e métodos para sua obtenção. Ainda assim, alguns pesquisadores buscaram estabelecer padrões de conforto térmico nas edificações, a fim de nortear os projetos e estudos sobre desempenho térmico.

Fanger (1972) estudou as variáveis físicas que mais interessam para o conforto térmico humano. Segundo ele, são elas: a temperatura do ar e das superfícies que rodeiam as pessoas; a umidade relativa do ar; o nível de atividade; a resistência térmica da roupa; a radiação solar e infravermelha; e a velocidade e direção do vento. O autor afirma que a primeira condição necessária para o conforto térmico para uma pessoa exposta a determinado ambiente por um longo tempo é a existência de um balanço de calor.

Corbella e Yannas (2003) apresentam uma equação de balanço de calor, que pode ser utilizada para avaliar se um indivíduo encontra-se em conforto num determinado ambiente. A equação é baseada nas variáveis apresentadas e na equação de balanço de calor determinada por Fanger:

$$(M+W) - (Cd + Cv + Cr + E) = D$$

(1)

Onde:

$M$  = metabolismo (calor produzido pelo corpo);

$W$  = energia usada para realizar trabalho mecânico;

$Cd$  = energia dissipada por condução;

$Cv$  = energia dissipada por convecção;

$Cr$  = energia dissipada por radiação;

$E$  = energia dissipada por evaporação de água sobre a superfície da pele;

$D$  = Termo de balanço ou acumulação.

Assim, se  $D$  for negativo, sente-se frio, se for positivo, sente-se calor, e se for zero e a temperatura da pele estiver em torno dos 35°C, a pessoa sentirá uma sensação de bem-estar, definida como conforto térmico, estado neutro no qual não se sente frio nem calor.

Fanger (1972) apresentou o PMV (*Predicted mean vote* ou voto médio estimado) e o %PPD (*Predicted percentage of dissatisfied* ou porcentagem de insatisfação estimada) com análises feitas em laboratório (câmara climática) em grupos de pessoas, definindo através dos parâmetros apresentados anteriormente uma porcentagem média de pessoas que estão ou não em conforto térmico dentro de condições diversas.

Humphreys (1978) examinou resultados de questionários aplicados em sessenta regiões do planeta e verificou que as temperaturas consideradas confortáveis pelas pessoas, nos ambientes internos, em todo o mundo, apresentavam uma relação com as temperaturas médias mensais do ar exterior. Seu método consiste no equacionamento matemático desta relação. Dando continuidade aos estudos de Humphreys, o qual afirma que o conforto térmico é adaptativo e influenciado pela temperatura do ar externo, Nicol e Humphreys (2002) apresentam as diferenças entre o conforto térmico adaptativo e o "racional" (GRAF, 2012).

Segundo Nicol e Humphreys (2002), a temperatura de conforto, sendo adaptativa, varia conforme a temperatura externa, sobretudo em ambientes climatizados. Essa variação foi matematicamente exemplificada a partir de uma regressão estatística dos resultados de sua pesquisa, e segue a fórmula:

$$T_c = 13,5 + 0,54T_e$$

(2)

Onde:

$T_c$  = temperatura de conforto

$T_e$  = temperatura externa

Segundo Orosa e Oliveira (2011), em edifícios com sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (HVAC), o índice de voto médio previsto (PMV) foi bem sucedido em prever as condições de conforto, enquanto que, em edifícios ventilados naturalmente, só modelos adaptativos fornecem previsões precisas. Uma possível explicação para esta diferença clara poderia ser o contexto, porque os indivíduos que vivem em espaços HVAC esperam temperaturas homogêneas e frescas, enquanto que os indivíduos que vivem em condições de ventilação natural tem uma amplitude maior de conforto térmico do que o mostrado nas últimas normas.

Graf e Tavares (2012) determinaram uma faixa de conforto adaptativo para a cidade de Curitiba, que compreende as temperaturas máxima e mínima de conforto, conforme os estudos de Nicol (2004), a qual serve de base para análises térmicas de projetos e estudos científicos.

### 2.2.1. Influência das fachadas vegetais no desempenho térmico de edifícios

Grande parte das pesquisas acerca das fachadas vegetais trata da influência das mesmas no desempenho térmico das edificações, devido ao seu notório efeito de isolamento adicional à fachada e resfriamento do interior da edificação, bem como de seu entorno imediato (KÖHLER, 2008; ALEXANDRI e JONES, 2008; OTTELÉ *et al.*, 2011; WONG *et al.*, 2010; PERINI *et al.*, 2011; EUMORFOPOULOU e KONTOLEON, 2009; CHEN *et al.*, 2013).

Alexandri e Jones (2008) analisaram o comportamento de edifícios cobertos com fachadas e telhados vegetais e seu poder de mitigação do efeito das ilhas de calor urbanas em nove cidades diferentes no mundo, cada uma representante de um clima. Alguns dos resultados foram obtidos através de simulação. Uma determinada geometria de cânion urbano foi modelada no *software* ECOTECT e variadas as latitudes para obter o padrão de

sombreamento. As variáveis da simulação foram quatro tipos de envelope: envelope sem vegetação, telhado verde, parede verde, e cobertura verde total em três tipos de cânion, variando a altura e largura do mesmo. Outras variáveis foram a orientação dos cânions e a direção do vento.

Foram analisadas as temperaturas nos cânions urbanos como uma forma de avaliar o efeito das superfícies vegetadas das construções no microclima urbano. Os autores concluíram que a temperatura do cânion reduz muito mais quando todas as superfícies são cobertas com plantas, pois a temperatura do ar que entra no cânion já é reduzida. Além disso, as temperaturas do ar e da superfície caíram significativamente em todos os climas quando paredes e telhados foram cobertos com vegetação e segundo os autores, quanto mais quente e mais seco é um clima, mais importante é o efeito de telhados e fachadas verdes para a mitigação das temperaturas urbanas.

Dentre as cidades analisadas, Hong Kong e Brasília chegaram a uma economia de energia com climatização 100%, visto que o uso de condicionamento artificial de ar tornou-se desnecessário com a implantação de telhados e fachadas vegetais. Brasília obteve a maior economia, com a redução de 6h de funcionamento do ar-condicionado. As paredes verdes tiveram maiores resultados na redução da temperatura dos cânions, enquanto os telhados apresentaram melhores resultados numa escala urbana. Os autores concluem que a combinação de ambos apresenta o melhor resultado.

Chen *et al.* (2013) realizaram um experimento na cidade de Wuhan, na China, de clima quente e úmido, com o objetivo de estudar o microclima do espaçamento entre a parede de alvenaria e a parede verde e a maneira como este espaçamento afeta a performance da fachada viva. No experimento, a superfície externa da parede teve redução de até 20,8°C e a superfície interna da parede teve redução de até 7,7°C e a redução da temperatura interior foi de 1,1°C, em comparação com uma parede nua. Foi concluído que a temperatura do ar na cavidade entre a parede e a fachada verde é mais baixa que a do ar ambiente, além do que a fachada verde com menor espaço de cavidade tem melhor desempenho no resfriamento, mas também possui mais umidade na cavidade.

Morelli e Labaki (2009) realizaram um experimento comparando uma parede pintada e uma parede revestida com hera japonesa na cidade de Campinas, estado de São Paulo. O estudo mostrou que quando a temperatura externa máxima chegou a 26,3°C, a temperatura interna do edifício sem hera era de 25,8°C e no apartamento com a trepadeira e temperatura era de 24,5°C. Já a temperatura da superfície interna da parede sem hera foi de 27°C e

25°C na parede com hera, no entanto, no fim do dia (às 18:00) a temperatura da superfície da parede do edifício sem hera foi 21,6°C enquanto a parede com hera apresentava temperatura de superfície de 22,1°C. A umidade relativa também se mostrou maior no entorno da parede com a trepadeira, 75% contra 43,8% da parede pintada.

Os estudos de Wong *et al.* (2009) determinam a transmitância térmica de uma fachada de concreto com cobertura vegetal como 0,365 W/m<sup>2</sup>K, enquanto a transmitância encontrada para a mesma fachada de concreto e vidro, sem a fachada viva foi de 3,344 W/m<sup>2</sup>K.

## **2.3. Análise do ciclo de vida energético das edificações**

### 2.3.1. Análise de ciclo de vida e análise energética em edificações

A análise do ciclo de vida (ACV), segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), é uma técnica que estuda os aspectos ambientais e impactos potenciais ao longo da vida de um produto, desde a extração de matéria-prima até o descarte final, passando por produção, uso e disposição, processo que pode também ser chamado de “do berço ao túmulo”.

Os primeiros estudos que deram origem à ACV como é conhecida hoje tiveram início com a primeira crise do petróleo, que desencadeou uma preocupação global com a utilização dos recursos naturais. Em 1965, a empresa Coca-Cola custeou um estudo de diferentes embalagens de refrigerantes, com o objetivo de determinar qual delas apresentava melhor desempenho com relação à preservação dos recursos naturais e os menores índices de emissões para o meio ambiente. Este estudo é conhecido como um marco para o surgimento do que hoje conhecemos como análise do ciclo de vida (CHEHEBE, 1997).

O interesse nessa ferramenta cresceu, motivada pela preocupação com os impactos ambientais gerados pelos processos produtivos de uma maneira geral, e a ACV foi adotada por diversas empresas e instituições, na tomada de decisões, seleções de produtos e até mesmo como estratégia de *marketing*, utilizando diversas metodologias para o estudo. Porém, devido à complexidade desta ferramenta, começaram a ser observadas frequentes discrepâncias de resultados, um sintoma da necessidade de padronização dos termos e critérios utilizados (CHEHEBE, 1997).

A série de normas ISO 14040 (ABNT, 2001), de gestão ambiental, procura definir requisitos gerais para a condução das análises de ciclo de vida. A NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), primeira da série, divide a estrutura de uma ACV em quatro partes: definição de objetivo e escopo; análise do inventário; avaliação do impacto e interpretação.

- **definição de objetivo e escopo:** A NBR ISO 14040 (ABNT, 2001) estabelece que nesta fase devem ser claramente definidos a aplicação pretendida da ACV, as razões para conduzir o estudo, o público alvo, sua abrangência e limites, a unidade funcional, a metodologia e os procedimentos adotados.
- **análise de inventário:** É a fase de coleta dos dados e quantificação das entradas e saídas do sistema analisado.
- **avaliação de impacto:** É a fase dirigida à avaliação da significância dos impactos potenciais, usando os resultados na análise de inventário. Nessa fase são convertidos os dados de consumo de materiais, de energia e as emissões em categorias de impacto.
- **interpretação:** Consiste na identificação e análise das informações encontradas na análise de inventário e na avaliação de impacto.

Diversos *softwares* foram desenvolvidos para ajudar na realização das ACVs, principalmente na análise de inventário. São algumas dessas ferramentas o SimaPro, Umberto, GaBi, LCA it, eVerdEE, Idemat, Eco-Indicator. (RODRIGUES *et al.*, 2008) entre outros. Alguns softwares desenvolvidos especialmente para a construção civil, como o BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*).

Ottelé *et al.* (2011) realizam uma ACV das fachadas vegetais, em que comparam diversos tipos de fachadas vivas quanto a diversas categorias de impactos ambientais, tais como esgotamento abiótico; aquecimento global; destruição da camada de ozônio; toxicidade humana; ecotoxicidade da água fresca; ecotoxicidade terrestre; oxidação fotoquímica; acidificação; e eutrofização. Crawford e Pullen (2011) analisam o consumo de água de um edifício residencial convencional na Austrália, durante o ciclo de vida de 50 anos, incluindo o consumo de água embutido nos materiais.

A análise do ciclo de vida é uma importante ferramenta de análise de impactos ambientais, porém muito complexa, pois exige muitos dados, tornando muito complexa a realização de uma ACV para os edifícios que contém muitos materiais. No entanto, segundo Paulsen e Sposto (2013), estudos têm mostrado que o estudo do ciclo de vida energético

(ACVE) é um avaliador de impacto eficaz, uma vez que a produção de energia gera a maior parte das emissões, e também o uso da maioria dos recursos não renováveis.

### 2.3.2. Estrutura de uma ACVE

Segundo Tavares (2006) a análise de energia engloba não somente um inventário dos insumos energéticos consumidos, mas também examina a natureza dos resultados enquanto subsídio para outras formas de análise.

A existência de diversos métodos de análises energéticas levou à necessidade de normatização, de forma que a IFIAS (International Federation of Institutes for Advanced Studies) organizou um workshop em 1974 com recomendações processuais para a execução de uma análise energética, incluindo uma divisão de níveis dos requisitos totais de energia (RTE) levantados (Tavares, 2006). Os níveis de energia considerados pela IFIAS (1974 *apud* TRELOAR, 1998) são:

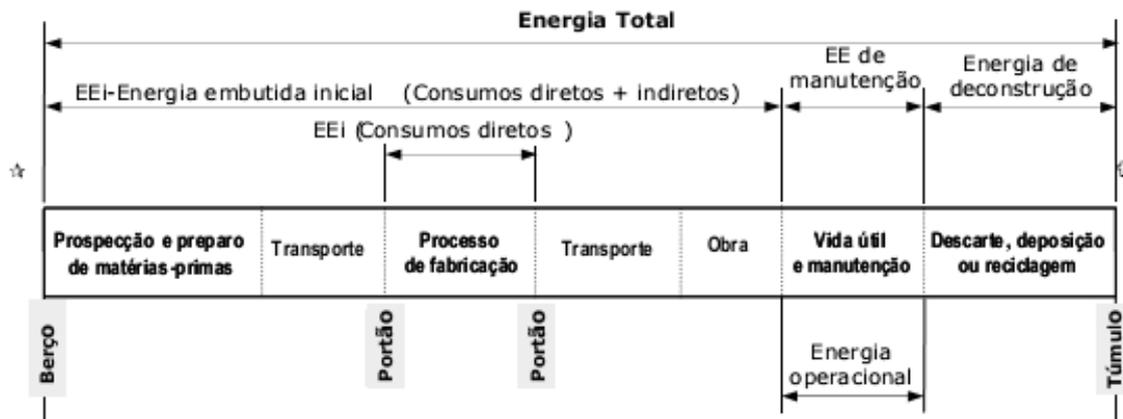
- **Nível 1:** Mede a energia dos processos de fabricação do produto, neste caso, uma edificação. Estes dados geralmente são informados como energia secundária e representam menos que 50% dos RTE;
- **Nível 2:** Referente à energia indireta, referente à manufatura dos materiais utilizados na construção, representa aproximadamente 40% dos RTE;
- **Nível 3:** Energia indireta, referente aos requisitos energéticos para produção dos bens de capital, como o maquinário que produz os produtos do nível 2, representa aproximadamente 9% dos RTE;
- **Nível 4:** Energia indireta, referente à fabricação do maquinário que produz os bens de capital do nível 3, pouco representativa no processo.

Adalberth (1997) apresenta um método para calcular a energia usada durante o ciclo de vida da edificação. Adota um ciclo de vida de 50 anos para a edificação e o divide em três fases, sendo oito etapas: produção de material, transporte e levantamento compõem a fase da produção do edifício; ocupação, renovação e ocupação compõem a fase de manutenção; e demolição e retirada compõem a última fase, chamada de desconstrução.

Tavares (2006) divide o ciclo de vida energético da edificação em sete etapas e três fases, como na figura 4. A primeira fase, da energia embutida inicial, abrange as etapas de: prospecção e preparo de matérias-primas; transporte de materiais; processo de fabricação; transporte de materiais da construção; e obra. A segunda fase, chamada de energia

embutida de manutenção, consiste na energia gasta durante a vida útil da edificação. A terceira e última fase é chamada de energia de desconstrução, uma vez que se trata da energia utilizada nos processos de demolição, reciclagem e descarte de materiais.

**Figura 4:** Fases do ciclo de vida energético



Fonte: Tavares, 2006

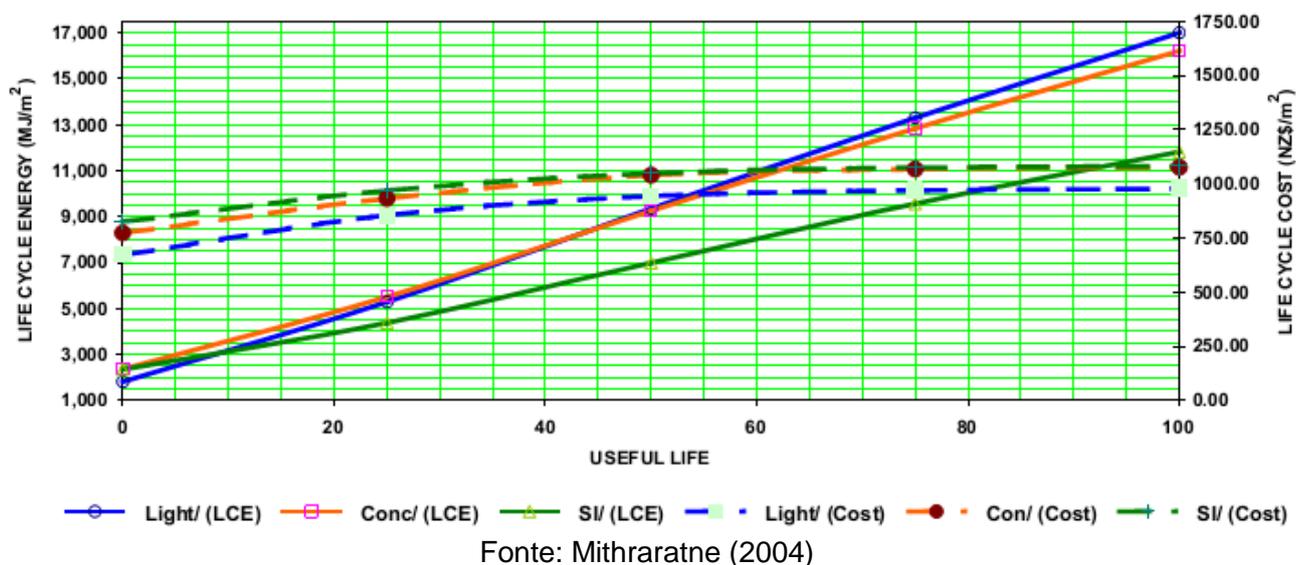
Mithraratne (2004) estudou a relação entre energia incorporada, energia operacional e os custos de produção em um ciclo de vida de 100 anos para habitações situadas em região de clima frio. Comparou três tipos de edifícios residenciais da Nova Zelândia, tomando como modelo uma residência padrão do BIAC – Conselho da Indústria da Construção – também conhecido como casa modelo da Nova Zelândia, que consiste em uma casa de um pavimento, com área de 94m<sup>2</sup>.

O primeiro modelo analisado é chamado de *light construction*, consiste em piso de madeira, paredes em *woodframe*, com isolamento de fibra de vidro, revestimento externo de fibra de cimento e interno de gesso, telhado metálico com tesoura de madeira, forro de gesso e isolamento em fibra de vidro entre o forro e o teto e janelas de vidro com esquadria de alumínio. O segundo modelo, chamado de *concrete construction*, é como o primeiro, porém com piso de 15 cm de concreto e 25 mm de poliestireno expandido.

A terceira casa, *superinsulated construction*, tem os mesmos elementos construtivos, porém com isolamento adicional, piso de madeira com 20 cm de fibra de vidro para isolamento, paredes em *woodframe*, com isolamento de 20 cm de fibra de vidro e telhado metálico com tesoura de madeira, forro de gesso e isolamento de 20 cm de fibra de vidro entre o forro e o teto e janelas de vidro duplo com esquadria de alumínio.

Conforme os resultados demonstrados na figura 5, o modelo chamado “construção super isolada”, com maior investimento em materiais de isolamento térmico, teve a maior energia embutida inicial e o maior custo de produção durante todo o ciclo de vida, porém, teve o menor gasto energético operacional e total durante o ciclo, além do impacto ambiental calculado, o qual foi 31% menor que o modelo simples, sem os materiais de isolamento.

**Figura 5:** Energia durante o ciclo de vida e custos



O ciclo de vida energético das edificações do programa brasileiro de habitação “Minha casa, minha vida” foi estudado por Paulsen e Sposto (2013). O estudo mostrou que, no ciclo de vida de 50 anos do projeto, a energia incorporada é de 7,2 GJ/m<sup>2</sup> ou 30% do total do ciclo, e a energia operacional é de 17,5 GJ/m<sup>2</sup>. Segundo Paulsen e Sposto (2013), a energia incorporada de 7,2 GJ/m<sup>2</sup> é relativamente alta em comparação à média internacional encontrada por Ramesh (2010) de 5,8 GJ/m<sup>2</sup>, enquanto a energia operacional é mais baixa (17,5 GJ/m<sup>2</sup> em comparação a 36 GJ/m<sup>2</sup>). Os autores ainda indicam que o maior potencial de redução da energia embutida está nas paredes, na possibilidade de escolher materiais com menor energia incorporada e maior durabilidade, de modo a reduzir a energia de manutenção e substituição de materiais. Segundo Treloar et al. (2001) a seleção de materiais influencia tanto na energia embutida das construções quanto na energia de operação.

Diversos softwares também foram desenvolvidos, destinados a análise do desempenho térmico e energético, como EnergyPlus, Design Builder, Autodesk Green Building Studio, VE, Ecotect, Mestre, entre outros. Graf, Marcos, Tavares e Scheer (2012) realizam um estudo de viabilidade do uso da ferramenta BIM para mensurar os impactos de

uma edificação, criando um modelo tridimensional no software *Revit Architecture 2012* e incorporando os dados de energia embutida e CO<sub>2</sub> incorporado para cada elemento construtivo. O potencial do programa para análise dos impactos ambientais foi confirmado, porém o processo de análise precisa ser desenvolvido, uma vez que é necessário o auxílio de uma planilha e de cálculos auxiliares para obter os resultados.

#### **2.4. Influência das fachadas vegetais no ciclo de vida dos edifícios**

Ottelé *et al.* (2011) analisam o ciclo de vida das fachadas comparando uma fachada europeia tradicional de tijolos, uma fachada verde com vegetação direta, fachada verde com vegetação indireta (suporte de aço), sistema de fachada viva em boxes e sistema de fachada viva em camadas de feltro.

A pesquisa mede os impactos ambientais de acordo com a base de dados ambientais da Alemanha, que divide os impactos analisados nas seguintes categorias: esgotamento abiótico; aquecimento global; destruição da camada de ozônio; toxicidade humana; ecotoxicidade da água fresca; ecotoxicidade da água marinha; ecotoxicidade terrestre; oxidação fotoquímica; acidificação; e eutrofização, dos quais a ecotoxicidade marinha não foi medida.

Para o ciclo de vida adotado de 50 anos, a necessidade de reposição das plantas dos sistemas de fachadas vivas estudados é a cada 10 anos para os sistemas em boxes e 3,5 anos para as camadas de feltro. O tempo de vida útil adotado para o sistema de feltro é de 10 anos, devido à necessidade de reposição do PVC e das camadas de feltro, e o sistema de irrigação precisa ser trocado a cada 7,5 anos, devido à cristalização dos minerais. A alta necessidade de reposição dos materiais durante o ciclo de vida dos sistemas de fachadas vivas aumenta consideravelmente o impacto das mesmas, se comparadas com as fachadas verdes. Os autores afirmam que existem diversas possibilidades de materiais para os sistemas de suporte que reduziriam o impacto ambiental dos sistemas de fachadas vegetais em até 10 vezes menos que o aço inoxidável, como madeira, plástico reciclado, e aço revestido.

Os benefícios relacionados à economia de energia com climatização também foram medidos para cada sistema de fachada. Modelos de prédios similares, com 100 m<sup>2</sup> de fachadas em todas as orientações, foram utilizados para simular a influência dos tipos de fachadas vegetais em dois climas diferentes: clima temperado (Holanda) e clima

mediterrâneo (Itália). Os benefícios dos sistemas de fachadas vivas se mostraram até três vezes maior que as fachadas verdes. Além disso, os benefícios para o clima mediterrâneo foram duas vezes maior que para o clima temperado, de forma que os autores concluem que para o clima temperado, os impactos relacionados aos sistemas de fachadas vivas são muito elevados em comparação aos benefícios, enquanto no clima mediterrâneo, graças aos benefícios, o sistema de fachada viva em boxes é quase considerado sustentável (quando os benefícios são maiores que os impactos).

Em ambos a fachada verde direta é considerada sustentável devido ao seu baixo impacto, porém apresenta benefícios menores também. Ottelé *et al.* (2011) citam ainda alguns benefícios não quantificáveis, como o aumento da biodiversidade, a saúde humana, melhora na qualidade do ar, pela filtragem de partículas, redução das ilhas de calor.

Wong *et al.* (2009) por sua vez, analisam os efeitos dos sistemas de fachadas vegetais na temperatura e no consumo energético de edifícios através de simulação. Foi definido um modelo-base para a simulação, um edifício de 10 pavimentos, de 30 m x 30 m, e utilizando o *software* de simulação TAS, é realizado um estudo comparativo de diferentes cenários: edifícios de paredes opacas, sem fachadas vivas e com 100% de cobertura vegetal; edifícios de paredes opacas, com 7 janelas em cada nível e fachada, cada uma com 2 m x 2 m; e edifícios com pele de vidro, sem fachada viva, com 50% de cobertura vegetal e com 100% de cobertura vegetal nas paredes.

Os autores concluíram que a presença da vegetação é capaz de aumentar a resistência térmica das paredes, reduzir a temperatura radiante, e é capaz de reduzir o uso de energia com condicionamento artificial em até 74%, variando conforme a densidade da folhagem da planta e o espaçamento da cavidade entre a parede e a fachada, entre outros fatores.

Feng e Hewage (2014) conduzem um estudo do ciclo de vida das fachadas vivas, com o objetivo de comparar emissões químicas e gastos energéticos das mesmas com os benefícios de purificação do ar e economia de energia, como uma forma de discutir a sustentabilidade ambiental das fachadas vivas.

Os resultados apontam para o sistema de fachadas vivas em manta como o menos sustentável dos três tipos analisados, uma vez que para neutralizar a poluição emitida a fachada viva em manta precisaria de 23 anos, porém a vida útil do sistema é de 10 anos (camadas de feltro). Já os sistemas de treliça e painel modular alcançariam o equilíbrio do

sistema facilmente. Também em termos de economia de energia, o sistema com camadas de feltro consome 11 e 4 vezes mais que os sistemas de treliça e painel modular, respectivamente. Além disso, o tempo de retorno energético seria de aproximadamente 10 anos para o clima mediterrâneo, o mesmo período que a vida útil do sistema, já para o clima temperado o tempo de retorno é 3,6 vezes maior que a vida útil do sistema.

Dessa forma, o sistema de fachada viva em mantas de feltro foi considerado ambientalmente insustentável. Porém os autores afirmam que a substituição dos materiais mais poluentes como o PVC pode mudar esse balanço significativamente. Os outros dois sistemas são considerados relativamente sustentáveis, a treliça utiliza apenas a estrutura metálica como suporte, porém o aço inoxidável adotado tem altas taxas de impacto ambiental, ainda assim, o tempo necessário para atingir o equilíbrio entre os poluentes emitidos e os benefícios alcançados é três vezes maior no painel modular. Por esses motivos, Feng e Hewage (2014) consideram a fachada verde com suporte de treliça metálica o mais sustentável dos três sistemas analisados.

Outro fator que gera discussão entre os pesquisadores é o substrato. Myrans (2009) encontrou valores de energia embutida do substrato de 26,01MJ/Kg, enquanto Getter *et al.* (2009) chegaram ao valor de 0,005MJ/Kg. Autores como Pulselli *et al.* (2014) consideram o sistema de fachadas vivas sem qualquer substrato, de modo que as camadas de feltro ou manta geotérmica funcionam como suporte das raízes e veículo dos nutrientes através da fertirrigação.

## **2.5. Características Climáticas da cidade de Vitória/ES**

O local escolhido para o estudo deste trabalho foi o município de Vitória, capital do estado do Espírito Santo. A localização foi escolhida pelo clima quente, onde, segundo Ottelé *et al.* (2011) e Alexandri e Jones (2008), as fachadas vegetais apresentam um grande potencial de redução da temperatura. Vitória é uma cidade litorânea com área de 98km<sup>2</sup>, localizada na região sudeste do Brasil, no estado do Espírito Santo, com população estimada de 348.268 habitantes segundo o IBGE (IBGE, 2014).

O clima em Vitória é tropical úmido, caracteriza-se por apresentar temperaturas médias sempre superiores a 18°C apresentando uma estação seca de pequena duração, em agosto, e maior precipitação de outubro a janeiro. As médias de temperatura máxima variam

entre 26°C e 32°C e as médias de temperatura mínima variam entre 18°C a 24°C, a umidade média varia em torno de 76% (INMET, 2014).

De acordo com a norma NBR 15220 classifica-se na zona bioclimática 8. Segundo Goulart *et al.* (1998) em 17,8% das horas do ano ocorre conforto térmico, nas demais horas, as estratégias de projeto mais adequadas para o clima, segundo a carta bioclimática são ventilação, resfriamento evaporativo, massa térmica para resfriamento e para aquecimento, e ar-condicionado. Os ventos predominantes o ano todo são na direção nordeste e leste, sendo que no outono e inverno há também a presença do vento sul.

### **3. MÉTODO**

Neste capítulo o método será apresentado de forma descritiva, em etapas a serem concluídas, mostrando a evolução dos passos para chegar aos resultados do trabalho e também qualitativa, em relação às classificações de Robson (2002), Gil (2002) e Yin (2001) quanto à estratégia de pesquisa, testes de validade e delimitação do trabalho.

#### **3.1. Definição da estratégia de pesquisa**

O objetivo da pesquisa é analisar a influência dos sistemas de fachadas vivas no ciclo de vida energético de uma edificação residencial em clima tropical, comparando os dados de consumo energético da mesma com e sem a fachada viva. Conforme Robson (2002) pode ser considerada uma pesquisa descritiva, na medida em que pretende demonstrar dados quantitativos acerca do consumo de energia ao longo do ciclo de vida de uma edificação.

A estratégia da pesquisa se baseia em três pontos principais: primeiramente a revisão bibliográfica, servindo como base para o entendimento dos fenômenos envolvidos nos sistemas de fachadas vivas e para a pesquisa documental, como técnica de coleta de dados, que forneceu subsídios para a realização da etapa de simulação, de modo que foram buscados dados sobre o tipo escolhido de fachadas vivas, os materiais e espécies vegetais empregados e energia incorporada, bem como informações sobre o ciclo de vida e impacto ambiental dos mesmos.

O segundo ponto da estratégia foi atestar a conformidade do modelo de fachada viva. Nesta etapa, o modelo foi desenvolvido em uma planilha de cálculo, elaborada sobre os dados do protótipo construído no experimento de Lima Junior (2014), e a mesma foi utilizada para a determinação de propriedades térmicas da fachada estudada como condutividade térmica, massa específica e calor específico, dados necessários para realizar a simulação termoenergética na próxima fase da pesquisa.

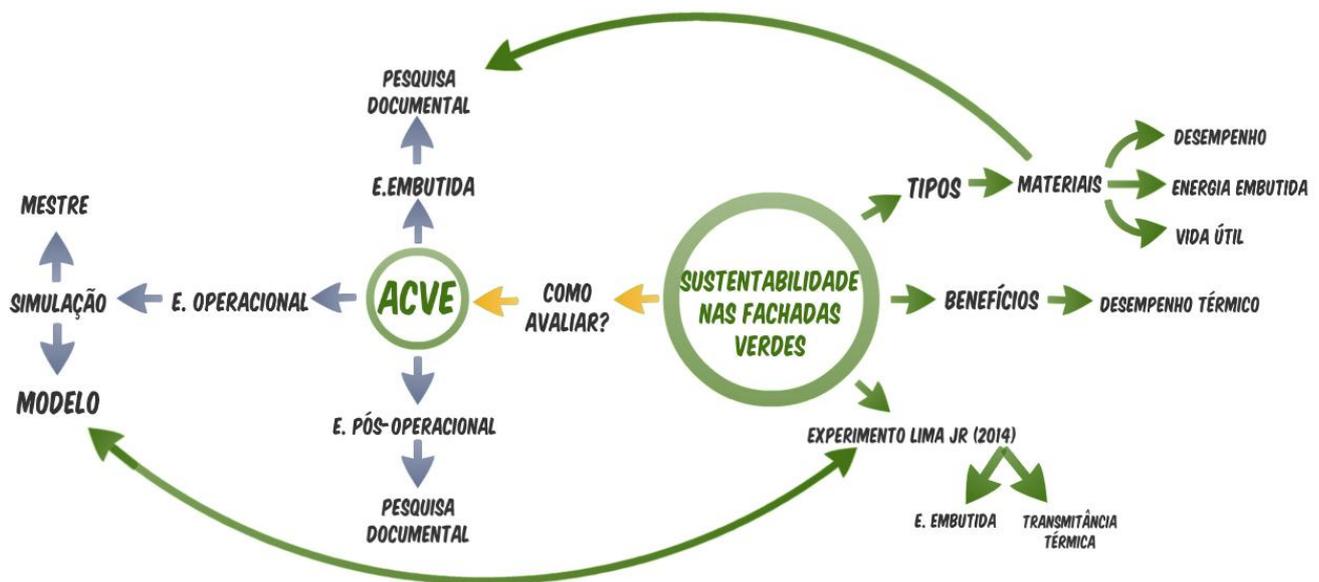
Para obter os dados para a análise final, foi realizada a simulação do consumo energético, que conta com o perfil de consumo a partir de eletrodomésticos de uso diário, definido a partir de uma família média brasileira e com o perfil de consumo com ar condicionado, conforme orientação do edifício, propriedades físicas da envoltória, uso e ocupação dos cômodos, que foi desenvolvido através do software de simulação termoenergética Mestre (Schmid, 2014), dada como a etapa experimental da pesquisa. Segundo Gil (2002) a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo,

selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

A fachada viva foi aplicada à residência escolhida através da simulação, que teve como variáveis o tratamento das fachadas, comparando modelos da edificação que possuíam ou não fachadas vivas. Os dados coletados são referentes ao seu desempenho térmico e gasto energético. Ainda segundo Robson (2002), trata-se de uma pesquisa quantitativa, pois é mensurável. Assim, é importante a confiabilidade e a validade das medições, e em sua totalidade, pode ser considerada uma estratégia fixa de projeto.

O mapa mental da pesquisa (figura 6) contribui para a compreensão da pesquisa em sua totalidade. Os títulos em verde são relativos aos temas mais importantes da pesquisa, as setas em azul indicam as etapas da análise de ciclo de vida energético e as setas em verde indicam os tópicos levantados na revisão bibliográfica sobre as fachadas vegetais.

**Figura 6:** Mapa mental da pesquisa



### 3.1.1. Unidade de análise

Nesta pesquisa, a unidade de análise é o sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira aplicado à edificação residencial em clima tropical.

### 3.1.2. Delimitação do trabalho

O objeto de estudo desta pesquisa é a análise do ciclo de vida energético das fachadas vivas de uma edificação residencial, com enfoque no desempenho térmico e energético, de modo que não são levadas em conta, neste trabalho, questões estéticas, de desempenho estrutural, acústico, ou lumínico. Da mesma forma, não é levada em conta a diferença entre as espécies vegetais e sua influência no comportamento térmico das fachadas.

Os dados sobre energia embutida serão obtidos através de pesquisa documental e alguns foram baseados em fontes estrangeiras como, por exemplo, Hammond e Jones (2008), cuja pesquisa foi desenvolvida na Universidade de Bath, no Reino Unido. Dados locais conferem maior confiabilidade à análise de ciclo de vida, porém devido à falta de informações sobre determinados materiais no contexto brasileiro, foi necessário recorrer a fontes estrangeiras.

A definição das propriedades térmicas da fachada e as simulações foram realizadas sobre um objeto existente: o experimento executado na pesquisa de Lima Junior (2014), portanto trata-se de um caso específico, e baseia-se nos resultados encontrados pelo mesmo.

Com base nos resultados de Lima Junior (2014), acredita-se que a umidade existente na cavidade entre a parede e a estrutura da fachada viva tenha considerável influência no seu desempenho térmico, no entanto, não foi possível incluir essa influência da umidade nos cálculos de definição das propriedades da fachada viva em manta.

O consumo energético de uma residência varia em função do seu perfil de uso, ou seja, do número de habitantes, faixa de renda dos mesmos, entre outros fatores, culturais inclusive. Na simulação, não foi levada em conta a renda da família para estipular a posse de equipamentos, e o consumo dos equipamentos básicos será computado igualmente para todos os modelos, variando apenas o consumo de condicionadores de ar<sup>1</sup>, os valores de consumo dos demais equipamentos serão pré-determinados e podem variar numa situação real, em outro contexto.

O formato e a orientação do edifício também podem influenciar na variação da temperatura interna da casa, assim como estratégias de climatização passiva podem ampliar

---

<sup>1</sup> Neste trabalho foi utilizado nos ar condicionados COP (Coeficiente de performance - relação entre energia produzida e energia gasta) de 3,5 para aquecimento e 3 para resfriamento.

a faixa de temperaturas de conforto. No entanto, a intenção é estabelecer como variável apenas a instalação das fachadas vivas.

O sistema de irrigação das fachadas vivas pode ser automatizado, o que gera gastos de energia de operação, ou por gotejamento constante. A energia embutida na construção dos diferentes tipos de sistemas de irrigação não foi calculada, assim como a energia de operação necessária caso o sistema de irrigação tivesse algum equipamento eletrônico, como bomba de água ou central de comando do sistema de automatização da irrigação.

Por fim, a simulação foi realizada para a cidade de Vitória, Espírito Santo e, portanto, os dados a serem obtidos na simulação são referentes às condições climáticas desta cidade, podendo não ser adaptáveis a outras cidades.

### 3.1.3. Justificativa da escolha a partir do objetivo

Busca-se relacionar o consumo energético das edificações em diferentes fases do ciclo de vida com as fachadas vivas. O método escolhido para conduzir a pesquisa é composto de duas etapas de coleta de dados: o levantamento baseado na pesquisa documental e a simulação por meio de modelos gráficos. Deste modo, procede-se aos testes propostos por Yin (2001), de modo a se definir a estratégia:

- Qual a forma da questão da pesquisa: como?, por que?
- Exige controle sobre as variáveis: sim
- Focaliza acontecimentos contemporâneos: sim

Assim sendo, a estratégia pode ser considerada do tipo fixa, experimental. A pesquisa documental foi escolhida como primeiro método de coleta de dados devido às pesquisas já realizadas que apresentam dados significativos sobre a energia incorporada de diversos materiais componentes das fachadas vivas, além dos dados climáticos necessários para a realização da simulação. Em um segundo momento, a simulação faz-se necessária como estratégia de coleta por se tratar de informações específicas ainda não relatadas, além da possibilidade de manipulação dos dados de entrada e comparação entre diferentes exemplos.

#### 3.1.4. Testes de validade

Atesta-se a validade do constructo desta pesquisa através do embasamento na revisão bibliográfica, tanto da pesquisa documental, uma vez que trabalha com dados de artigos científicos, pesquisas acadêmicas e organizações reconhecidas no meio científico, quanto da simulação, cujo procedimento de análise deverá ser embasado em pesquisas semelhantes realizadas, além da normatização das análises do ciclo de vida consultada (ISO 14040).

A validade interna pode ser verificada através da própria estrutura das etapas. A revisão bibliográfica embasa teoricamente a pesquisa, o experimento realizado por Lima Jr (2014) embasa a definição dos valores das propriedades térmicas do sistema de fachada viva, condicionante fundamental para validar o efeito térmico desta na residência, e a ACVE da residência resultará em validar o objetivo desta pesquisa.

Já a validade externa da pesquisa atesta-se por meio dos parâmetros e normatização já estabelecidos para realização da análise do ciclo de vida, além de consulta realizada previamente a estudos semelhantes. Além disso, o procedimento da simulação pode ser repetido em qualquer laboratório, utilizando-se do mesmo *software* e dos mesmos dados de entrada, obtendo-se os mesmos resultados, assim como pode ser realizado para outras localidades, variando os dados de entrada e obtendo, assim, resultados distintos.

Assim sendo, verifica-se a rastreabilidade pela descrição do método no protocolo de dados, pelo fornecimento de detalhes referentes ao modelo da residência e aos parâmetros definidos para a simulação, além disso, os dados obtidos da pesquisa documental serão referenciados, de modo que o experimento possa ser repetido posteriormente.

#### 3.1.5. Seleção de caso

Para a condução das etapas da estratégia de pesquisa foram selecionados dois casos: o primeiro, que serviu de base para o cálculo da energia embutida do sistema de fachada viva e para definição das propriedades térmicas, foi a fachada viva em manta do experimento de Lima Junior (2014); o segundo caso consiste no modelo de residência unifamiliar, base para o cálculo da energia embutida e para a simulação da energia operacional com e sem os efeitos da fachada viva, na cidade de Vitória - ES.

A fachada viva em manta foi construída como parte de um experimento executado por Lima Junior (2014) para a pesquisa desenvolvida na dissertação de mestrado no programa de pós-graduação em engenharia de construção civil da Universidade Federal do Paraná. A pesquisa de Lima Jr.(2014) faz parte da mesma linha de pesquisa que o presente trabalho, que estuda as fachadas e os telhados verdes.

O módulo executado no horto municipal de Curitiba (figura 7), no bairro Guabirota, foi utilizado como base para a construção de uma planilha de cálculo que tem por objetivo obter os valores relacionados às propriedades térmicas da fachada. O objetivo foi simular o desempenho das fachadas a diferentes orientações, com os resultados obtidos *in loco*. Assim, obteve-se os valores de condutividade térmica, calor específico e massa específica, necessários para a simulação do sistema no software Mestre.

**Figura 7:** Protótipo de Lima Jr. (2014) recém-executado (à esquerda) e após 3 meses (à direita)

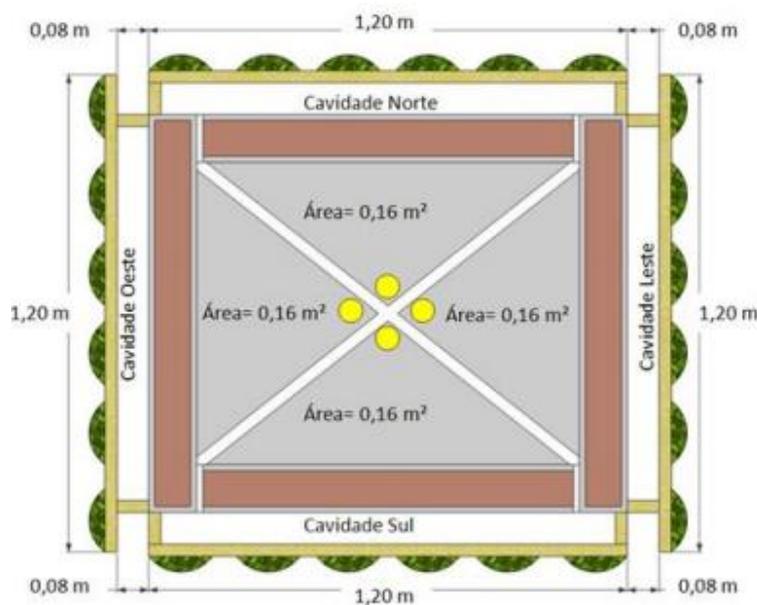


Fonte: Lima Jr. (2014)

Como dito na revisão bibliográfica, trata-se de um sistema de fachadas vivas em manta de feltro com estrutura de madeira, uma adaptação das fachadas desenvolvidas pelo botânico Patrick Blanc, a qual reduz os custos e os impactos ambientais da mesma. Este sistema apresenta a estrutura em madeira no lugar da estrutura metálica utilizada nas fachadas de Blanc e uma lona plástica entre a estrutura e as camadas de feltro confere o isolamento da umidade, substituindo a placa de PVC utilizada na técnica similar. Em seguida as duas camadas de feltro são fixadas na estrutura com grampos metálicos e são feitos os cortes para dar origem aos bolsos que acomodam as plantas.

O experimento de Lima Jr. (2014) teve o objetivo de analisar o efeito térmico das fachadas vivas em cada face do módulo, dessa forma, as paredes foram construídas de forma a ficarem isoladas do solo, da cobertura e entre si por placas de isopor de 2cm de espessura, para evitar o fluxo térmico entre as superfícies e perda de calor interno, na tentativa de reproduzir um sistema adiabático. No interior do protótipo há duas placas de isopor conectadas formando um “X” simulando quatro ambientes internos isolados, cada um com uma lâmpada incandescente de 40 watts. Externamente, foram aplicadas as fachadas vivas, com cavidade entre a base e a parede de 9cm. Na figura 8 é ilustrado o projeto do protótipo estudado.

**Figura 8:** Modelo real de fachada verde a ser simulado



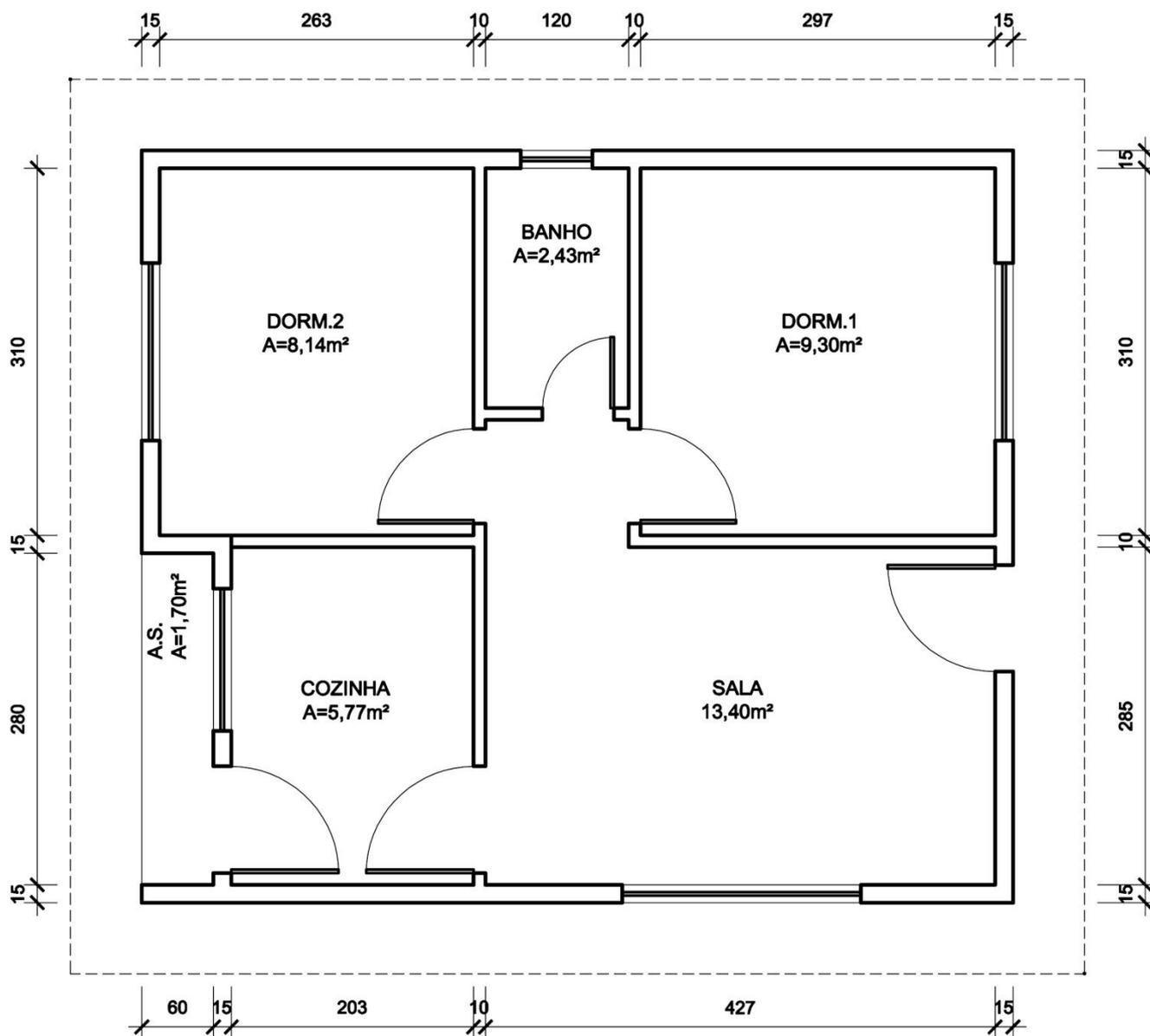
Fonte: Lima Jr. (2014)

Posteriormente, para a etapa seguinte, o modelo de referência para a simulação da residência que servirá de caso-base segue os padrões de construção e acabamentos do projeto-padrão residencial R1-B, descrito na NBR 12721:2006 (ABNT, 2006), a qual descreve os modelos de construção que servem de base para o cálculo do custo unitário básico da construção (CUB).

Os materiais utilizados na construção da residência estão discriminados na NBR 12721:2006 (ABNT, 2006) e seguem a descrição do lote básico de insumos, que consta na tabela 9. Os principais materiais são os blocos cerâmicos de 8 furos, das paredes externas, concreto armado da estrutura, vidros das janelas, madeira das portas e do forro, gesso das paredes internas e telhas. Estes foram os materiais carregados na simulação.

Na referida norma, o modelo de residência R1-B é definido como uma residência unifamiliar com padrão baixo de construção, de pavimento único, possui 2 dormitórios, banheiro, sala, cozinha e área de serviço, com área total de 46,35m<sup>2</sup>. Na figura 9 é apresentada a planta da residência no padrão R1-B utilizada como caso-base na simulação.

**Figura 9:** Exemplo de residência no padrão R1-B da NBR 12721:2006



Fonte: da autora, adaptado de SINDUSCON – MG (2007)

O perfil de ocupação da residência também influencia o seu gasto energético. Para a ocupação dessa residência foi escolhida uma família de 3 pessoas, sendo um casal e um filho, próximo a média nacional de 3,3 pessoas, conforme a Síntese de indicadores sociais, do IBGE (IBGE, 2009).

Tavares (2006), em seu estudo acerca da análise do ciclo de vida energético das edificações brasileiras, apresenta as características físicas e ocupacionais de uma residência no mesmo padrão da R1-B apresentada, como número de habitantes, renda, consumo e posse de equipamentos básicos. Porém, tais indicadores de renda, consumo e posses de equipamentos já não representam o perfil da população em função da própria mudança de economia e distribuição de renda do país.

A última pesquisa nacional de posse de equipamentos e hábitos de consumo de energia foi realizada de 2004 a 2006 (PROCEL, 2014). No entanto, percebe-se que a popularização da tecnologia e de aparelhos como computadores pessoais, entre outros, além da redução de impostos sobre eletrodomésticos nos últimos anos aumentou a posse de equipamentos e a média de consumo per capita de energia elétrica aumentou 36% desde 2006 (BEN, 2014).

Para contabilizar o consumo de energia elétrica com equipamentos durante a fase operacional, foram considerados apenas os equipamentos básicos, considerando aqueles que possuem uso rotineiro. A quantidade de horas em uso de cada equipamento foi estabelecida de acordo com a rotina de uso e ocupação da residência, a potência e o consumo de energia elétrica de cada equipamento durante o mês foram obtidos no simulador de consumo de energia elétrica *online* COPEL (COPEL, 2015).

**Tabela 1:** Consumo mensal de equipamentos da residência estudada

Consumo mensal da residência				
Cômodo	Equipamento	Potência (watts)	Uso(h/dia)	kwh/mês
Cozinha	lâmpada	9	3	0,81
	geladeira	130	24	93,60
Quarto2	lâmpada	9	7	1,89
	computador	300	4	36
Quarto1	lâmpada	9	1	0,27
Banheiro	lâmpada	9	2	0,57
	chuveiro	3500	1	105
Sala	lâmpada	9	4	1,08
	televisão	100	4	12
Total				251,22

Dessa forma, o consumo mensal de energia com equipamentos elétricos para o caso base e os demais modelos simulados é de 251,22kWh. A esse valor de consumo deverá se somar o valor relacionado ao uso de equipamentos de climatização.

### 3.2. Protocolo de coleta de dados

Conforme apresentado anteriormente, a estratégia adotada para conduzir a pesquisa é composta de três etapas principais de coleta de dados: o levantamento baseado na pesquisa documental, a calibração do sistema de fachada viva e a simulação no *software* Mestre. Do mesmo modo, a NBR 14040 (ABNT, 2001) recomenda que se defina previamente o escopo e os limites de uma ACV.

Sendo assim, primeiramente foi definido o escopo da ACVE que engloba a estrutura, o envelope, fechamentos e acabamentos de uma residência unifamiliar que segue um padrão baixo de construção. Contabilizou-se a energia embutida da edificação na fase pré-operacional (EEinicial); a energia embutida de manutenção e substituição de materiais na fase operacional (EEmanutenção); e a energia operacional, de consumo de equipamentos, estimada para os 50 anos do ciclo de vida. O desperdício, a energia gasta com transporte de materiais e funcionários e a mão de obra dos operários, bem como a energia de demolição pós-operacional não entram no escopo desse trabalho. Para que a coleta de dados se desse de forma planejada e eficiente, foram consideradas as seguintes etapas, em ordem cronológica:

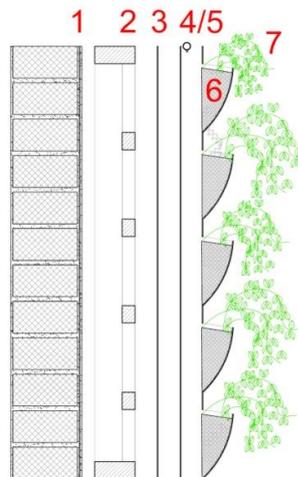
- Revisão bibliográfica: busca a fundamentação teórica do trabalho, os conceitos necessários para se compreender o processo de análise do ciclo de vida energético e a composição das fachadas verdes, bem como os dados sobre energia dos materiais;
- Cálculo da energia embutida na residência e no sistema de fachada viva, baseado em pesquisa documental;
- Definição das propriedades térmicas do sistema de fachada viva: simulação comparativa em planilha eletrônica com dados reais obtidos em medições do experimento de Lima Jr. (2014);
- Definição da faixa de conforto;
- Simulação do consumo de energia elétrica com climatização, na residência com e sem as fachadas vivas: no *software* Mestre;
- Cálculo da energia operacional dos modelos ao longo do ciclo de vida de 50 anos.

### 3.2.1. Cálculo da energia embutida na fachada viva

Nesta etapa do protocolo de coleta foi calculada a energia embutida no sistema de fachada viva em manta. Os cálculos partiram de Oliveira *et al.*(2014), que quantificaram, além deste sistema, a fachada viva em módulos de PEAD e a fachada viva em manta com estrutura metálica. Como parte desta pesquisa, os resultados atribuem ao sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira a menor energia embutida inicial e em 50 anos com reposição. Dessa forma este sistema foi utilizado para este trabalho, e na figura 10 é ilustrada a composição do sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira analisado.

**Figura 10:** Composição do sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| 1. Parede com reboco e impermeabilização | 4. Tubo de irrigação              |
| 2. Estrutura em madeira                  | 5. Manta Geotêxtil 100% poliéster |
| 3. Lona plástica impermeabilizante       | 6. Substrato                      |
|  | 7. Plantas                        |



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2014)

Assim, foram identificados e quantificados os materiais que compõem um metro quadrado da fachada apresentada, e com o auxílio de planilha eletrônica, foi calculada a energia embutida deste sistema de fachada viva. Em Oliveira *et al.* (2014) o substrato foi o elemento de maior impacto na composição e reposição da fachada da viva, sendo que o valor foi retirado de Myrans (2009), uma pesquisadora canadense. Neste trabalho, portanto, a energia embutida do substrato foi recalculada sobre a composição de substrato utilizada por Lima Junior (2014) e os dados de energia embutida dos materiais foram obtidos partindo da pesquisa documental baseada em Tavares (2006) e Hammond e Jones (2008).

Além do cálculo da energia embutida inicial, é preciso levar em conta as reposições necessárias durante o ciclo de vida de 50 anos, dessa forma, recorreu-se a Ottelé *et al.* (2011) e Nahuz (2013) para saber a vida útil de cada componente e o número de reposições necessárias ao longo de 50 anos.

### 3.2.2. Cálculo da energia embutida na residência

Assim como no cálculo das fachadas vegetais, tem-se o auxílio de planilhas eletrônicas para calcular a energia embutida inicial e a energia embutida de reposição dos materiais no modelo de residência com os materiais tradicionais de construção, para posteriormente, adicionar o valor da energia embutida referente à fachada viva. Os dados sobre a energia incorporada dos materiais, bem como a necessidade de reposição destes durante a vida útil da edificação, também foram consultados em Tavares (2006) e Hammond e Jones (2008).

O cálculo da energia embutida inicial e da energia embutida de manutenção na residência unifamiliar R1-B foi realizado com base na metodologia desenvolvida por Tavares (2006). Para realizar a análise de forma sucinta, a mesma foi realizada somente sobre o lote básico de insumos fornecido pela norma NBR 12721 (ABNT, 2006). A planilha com o cálculo da energia embutida se encontra na tabela 9.

### 3.2.3. Definição de propriedades térmicas da fachada viva

Requisito importante para a simulação final, esta etapa consistiu na simulação do protótipo da fachada viva em manta com estrutura de madeira do experimento de Lima Jr. (2014), a fim de obter do mesmo, as propriedades térmicas da fachada viva para atribuir ao modelo simulado através do *software Mestre*. As propriedades necessárias para a simulação, buscadas na planilha foram a condutividade térmica equivalente, o calor específico e a massa do conjunto da fachada com a alvenaria.

No modelo de Lima Jr. (2014) cada face estava orientada a uma direção cardinal. Dessa forma, foram desenvolvidas 4 planilhas de cálculo, uma para cada face do protótipo e área interna respectiva, considerando que estas áreas não trocam calor entre si. Cada planilha continha as propriedades de cada camada do sistema de fachada viva em manta, conforme ilustrado na figura 10: a alvenaria de tijolos da parede externa da residência; uma

camada de reboco de cimento sobre os tijolos; uma camada de ar entre a parede de alvenaria e a estrutura da fachada; a estrutura de madeira; lona impermeabilizante; uma camada dupla de manta, que forma os bolsos; o substrato que preenche os bolsos; e por fim as plantas.

Para cada camada da fachada, que corresponde a um material, foram informados a área, espessura, condutividade térmica, calor específico e massa específica do material. Utilizando-se desses dados foram obtidos a resistência térmica, o calor específico, a difusividade térmica e a espessura de propagação de calor. Dessa forma, através de cálculos foram encontrados os valores de condutividade térmica equivalente, calor específico equivalente e massa equivalente da fachada viva analisada, necessários para a simulação no Mestre. O valor encontrado de transmitância térmica ou condutividade térmica equivalente do conjunto foi de  $U = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Na tabela 2 é demonstrado esse processo na fachada leste. As planilhas de simulação para todas as fachadas se encontram nos apêndices A, B,C, e D.

**Tabela 2:** Planilha de cálculo das propriedades térmicas da fachada leste

Materiais	Alvenaria	Reboco	Ar	Madeira	Lona	Manta	Substrato	Plantas	Total
Área de superfície (m <sup>2</sup> )	0,8	0,8	0,8	0,1	0,8	0,8	0,24	0,8	0,8
Espessura (m)	0,09	0,01	0,09	0,02	0,001	0,004	0,05	0,05	0,315
Condutividade térmica (W/mK)	0,72	0,72	0,02	0,15	0,03	0,19	0,5	-	
Calor específico (J/KgK)	837	837	1000	2100	1380	837	3650	-	
Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	1922	1858	1,2	500	25	960	1100	-	
Difusividade térmica (m <sup>2</sup> /s)	$4,47 \times 10^{-7}$	$4,63 \times 10^{-7}$	$1,66 \times 10^{-5}$	$1,43 \times 10^{-7}$	$8,69 \times 10^{-7}$	$2,36 \times 10^{-7}$	$1,24 \times 10^{-7}$	-	
Propriedades da FV									
Massa (kg)	172,98	18,58	0,108	1,25	0,025	3,84	16,5	-	213,28
Resistência térmica (°C/W)	0,123	0,173	0,208	-	0,041	0,026	0,028	0,054	0,655
Calor específico (J/°C)	75,33	8,37	90	5,25	1,38	3,348	54,75	-	756,91
Massa específica equivalente									677,09
Condutividade térmica equivalente									0,60

Com base nos valores encontrados, as temperaturas no experimento (temperatura interna do protótipo e temperatura da cavidade) foram simuladas, tendo como temperatura

externa valores reais medidos por Lima Jr (2014) e os valores encontrados foram comparados com os valores de temperaturas do experimento reais, também medidos por Lima Jr (2014), como uma forma de atestar a conformidade desse modelo de fachada com dados reais.

O cálculo das temperaturas internas simuladas foi baseado em cálculo de zona única, já que considerou-se o módulo do experimento de Lima Jr. (2014), que é dividido em quatro partes, adiabático entre as mesmas, assim como a cobertura e piso em isopor. Dessa forma a temperatura no interior do ambiente sofre com a influência da troca de calor entre a parede vertical com o sistema de fachada viva aplicado e o meio externo, da radiação solar e da geração de calor interno pela presença da lâmpada.

Além dos parâmetros apresentados, foi também considerada uma taxa de infiltração de ar externo, referente às condições de área aberta e exposta a fortes ventos a que o experimento se encontrava, além de a vedação superior se apresentar pouco eficiente. Dessa forma o cálculo da temperatura interna se dá pela equação 3:

$$T_i(t) = \frac{(q_{interno} + q_{sol} + \frac{T_e(t)}{R_{edificio}} + C_{inf}.T_e/3600 + C_{edificio}T_e(t - 1)/3600)}{1/R_{edificio} + \frac{C_{inf.}}{3600} + C_{edificio}/3600} \quad (3)$$

Onde:

$T_i(t)$  = temperatura interna em função do tempo, dado em horas

$T_e(t)$  = temperatura do ar externo em função do tempo, dado em horas

$T_d(t)$  = temperatura do ar proveniente do duto em função do tempo, dado em horas

$q_{interno}$  = produção de calor interno por ocupação e iluminação, em W

$q_{sol}$  = produção de calor por radiação solar, em W

$R_{edificio}$  = resistência térmica das paredes, piso e cobertura, em W/K

$C_{inf.}$  = capacidade térmica do ar infiltrado em J/K

$C_{edificio}$  = capacidade térmica do edifício em J/K

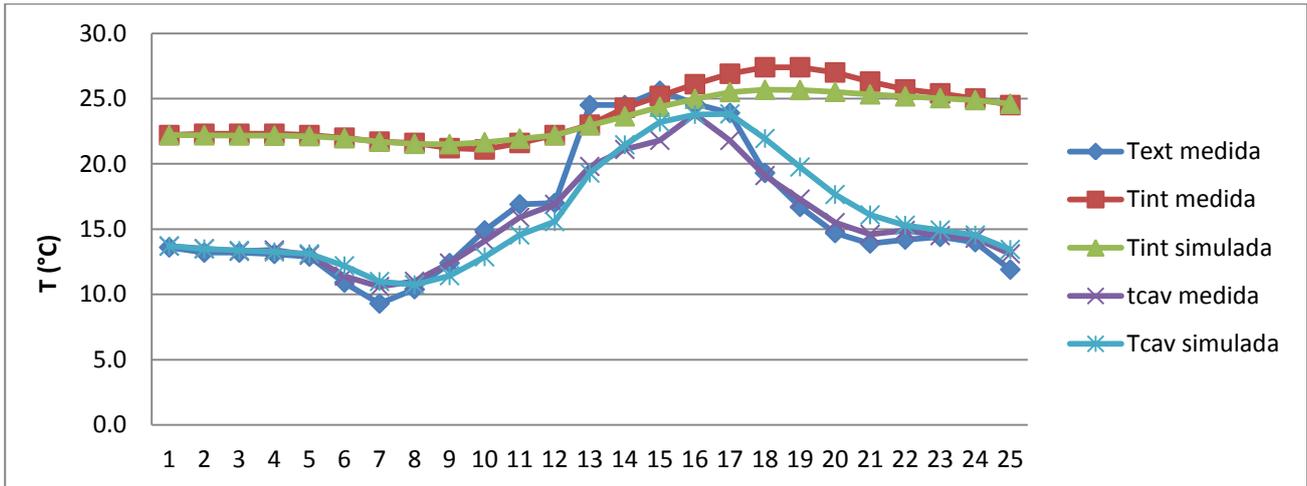
$R_{ventilação}$  = resistência térmica pela via da ventilação por duto, em W/K

O valor de radiação solar neste caso foi considerado zero, já que as plantas e todo o sistema da fachada viva sombreiam a parede. A geração interna de calor fica por conta da

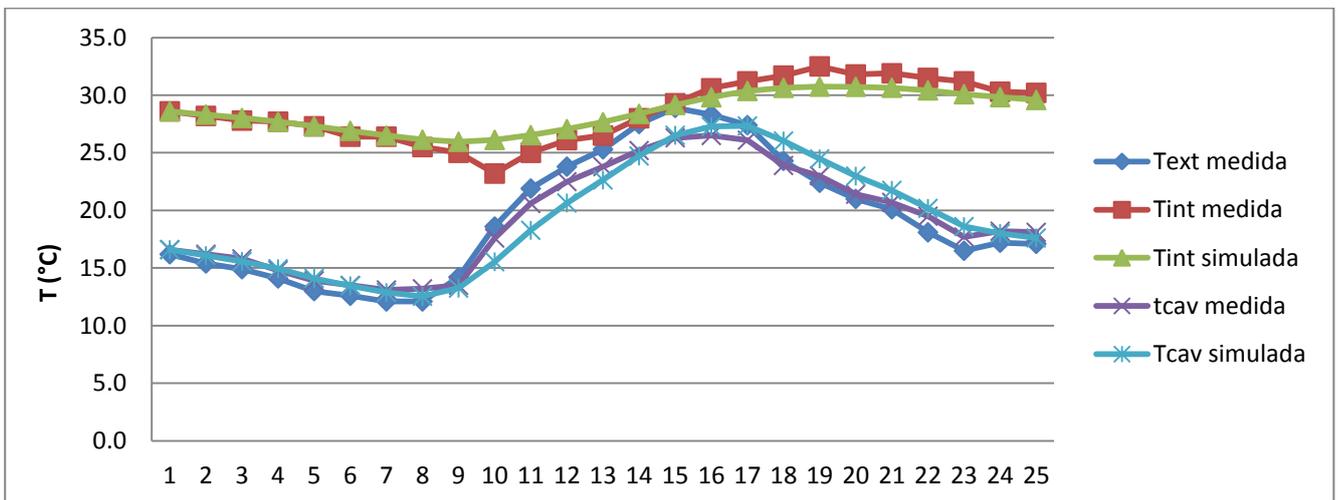
lâmpada de 40W e taxa de infiltração de ar foi calculada como 1/11 do volume total de ar interno (0,0022m<sup>3</sup>/s).

Se, como propriedades térmicas da fachada viva temos os valores da tabela 2, como simulação os gráficos das figuras 11, 12, 13 e 14 representam os valores de temperatura interna simulada e medida, assim como a temperatura na cavidade entre o conjunto da fachada viva e a alvenaria.

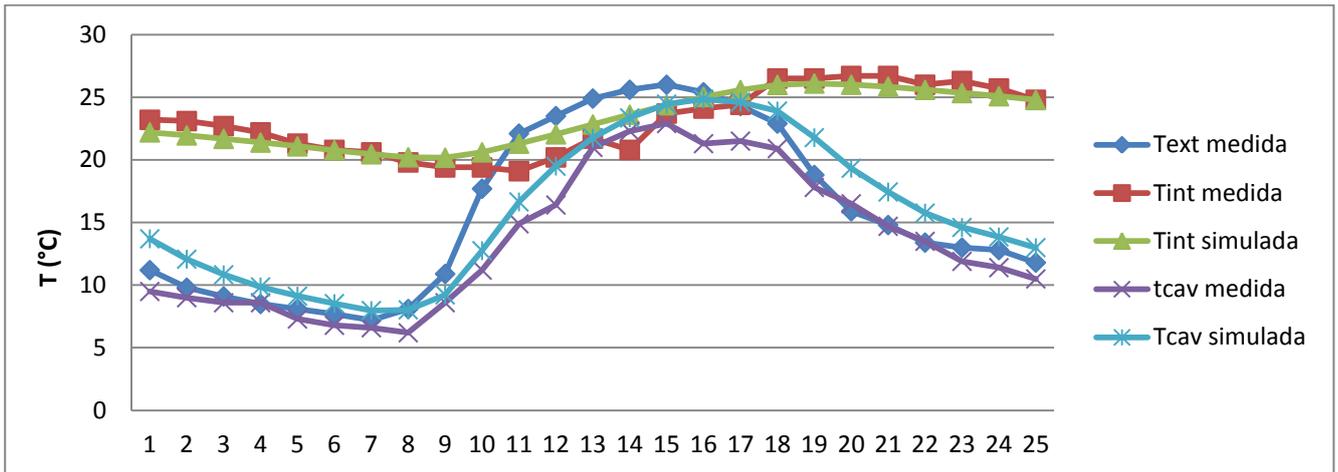
**Figura 11:** Ciclo térmico diário da fachada viva norte em Curitiba



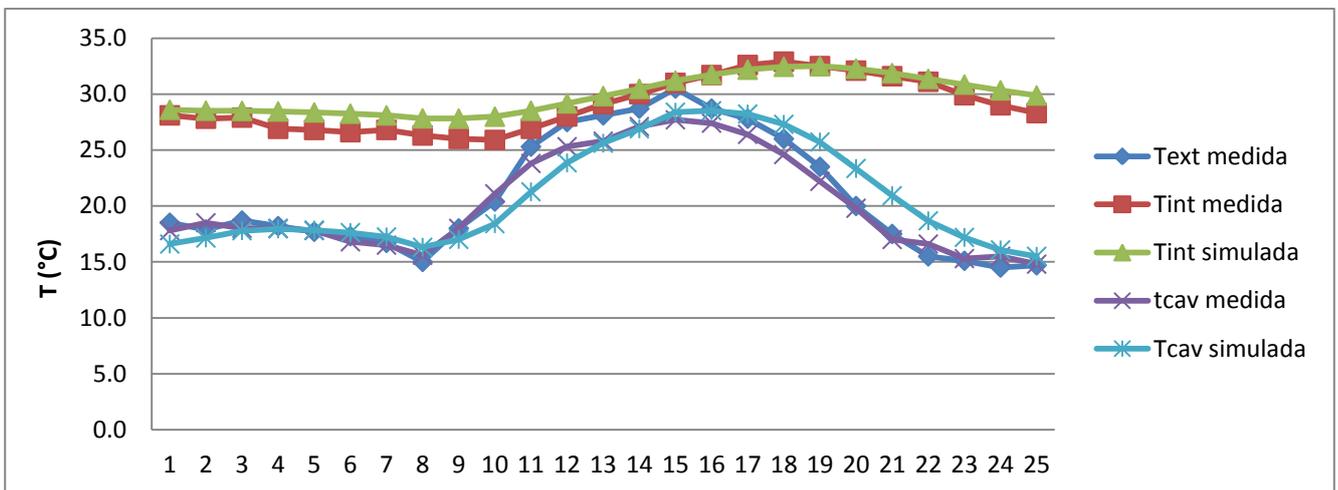
**Figura 12:** Ciclo térmico diário da fachada viva oeste em Curitiba



**Figura 13:** Ciclo térmico diário da fachada sul em Curitiba



**Figura 14:** Ciclo térmico diário da fachada viva leste em Curitiba



Nos gráficos é demonstrado que os resultados da simulação de temperatura interna do protótipo estão próximos dos valores reais encontrados, validando os valores encontrados para massa = 677 Kg/m<sup>2</sup>; condutividade térmica equivalente = 0,60 W/m<sup>2</sup>K; e calor específico = 757 J/KgK, confirmando que estes serão os valores carregados nas simulações com o Mestre.

### 3.2.4. Definição da faixa de conforto térmico

O consumo de aparelhos de ar-condicionado, quantificado neste trabalho, está condicionado à temperatura interna resultante da simulação e à faixa de conforto estabelecida para a cidade de Vitória com base na revisão bibliográfica.

O conforto térmico, segundo Fanger (1972), pode ser entendido como o resultado da interação entre variáveis ambientais, tais como temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e campo radiante; e variáveis pessoais, como roupas e taxa metabólica. É importante salientar que ao estabelecer uma faixa de conforto com base apenas na temperatura, assume-se a hipótese de que as outras variáveis encontrem-se constantes.

A NBR 15.575/2013 (ABNT, 2013), que normatiza o desempenho das edificações residenciais brasileiras, determina valores máximos e mínimos de temperatura interna, para verão e inverno. Os valores de temperatura interna variam em função da temperatura externa e permitem classificar o desempenho térmico das edificações em 3 níveis: mínimo, intermediário ou superior, conforme demonstrado na tabela 3.

**Tabela 3:** Valores de temperatura interna conforme a NBR 15.575/2013

Nível	Inverno(zonas 1 a 5)	Inverno(zonas 6 a 8)	Verão(zonas 1 a 7)	Verão (zona 8)
Mínimo	$T_{i_{min}} \geq T_{e_{min}} + 3^{\circ}\text{C}$	Não verificar	$T_{i_{Max}} \leq T_{e_{max}}$	$T_{i_{Max}} \leq T_{e_{Max}}$
Intermediário	$T_{i_{min}} \geq T_{e_{min}} + 5^{\circ}\text{C}$		$T_{i_{Max}} \leq T_{e_{Max}} - 2^{\circ}\text{C}$	$T_{i_{Max}} \leq T_{e_{Max}} - 2^{\circ}\text{C}$
Superior	$T_{i_{min}} \geq T_{e_{min}} + 7^{\circ}\text{C}$		$T_{i_{Max}} \leq T_{e_{Max}} - 4^{\circ}\text{C}$	$T_{i_{Max}} \leq T_{e_{Max}} - 4^{\circ}\text{C}$

Givoni (1992) sugere faixas de temperatura entre 18°C a 25°C no inverno e entre 20°C a 28°C no verão, para lugares de clima quente. Dessa forma, neste estudo, visando quantificar a energia gasta com climatização, são adotados para definição da faixa de conforto o valor mínimo de temperatura 18 °C e máximo 28°C, conforme estabelecido por Givoni. Em temperaturas internas menores de 18°C considera-se o uso de aquecimento artificial e em temperaturas maiores de 28°C é contabilizado o uso de equipamentos de resfriamento artificial.

### 3.2.5. Energia operacional nos modelos da residência

O uso de equipamentos eletrônicos é responsável pelo maior gasto energético durante a fase operacional do ciclo de vida energético da residência. Conforme demonstrado na seleção de caso, o gasto mensal de energia elétrica com equipamentos é 251,22 kWh, e deve-se considerar o gasto energético durante os 50 anos estabelecidos para a duração do ciclo de vida neste estudo, chegando a um total de 150,73 MWh, ou 542,63 GJ neste período.

No entanto, a variável nesta etapa do trabalho é a energia consumida com climatização durante a fase operacional do ciclo de vida com e sem a fachada viva, pois é no consumo com climatização que a presença da fachada deve apresentar diferença no valor final. A estratégia adotada para chegar aos efeitos da fachada viva na energia operacional da residência foi a simulação, que consiste em um experimento virtual da realidade, onde procura-se recriar um fenômeno real em um ambiente relativamente controlado (ROBSON, 2002). Este controle permite analisar o efeito das alterações de determinadas variáveis. Para este trabalho as variáveis são o posicionamento da fachada viva na fachada norte, na sul, na leste, na oeste e nas quatro fachadas.

Dessa forma, o consumo de energia elétrica com climatização é simulado para os diferentes modelos de aplicação da fachada viva, e é somado ao consumo com equipamentos eletrônicos.

### **3.3. Simulação no Mestre**

O software escolhido para realizar a simulação foi o MESTRE, versão 2012. O programa foi desenvolvido pelo professor Aloísio Schmid, na Universidade Federal do Paraná e simula o desempenho térmico, acústico e lumínico das edificações, utilizando a linguagem Java.

O software de simulação Mestre exige como dados de entrada (*inputs*) a localização geográfica da edificação (latitude e longitude), a sua geometria e orientação, os materiais utilizados na construção e suas propriedades, os dados climáticos do local onde se insere, a faixa de conforto e a rotina de uso e ocupação do edifício. Os dados de saída (*outputs*) fornecidos pelo Mestre utilizados nesta simulação são as temperaturas das zonas térmicas e a energia de climatização, de onde se pode extrair quantas horas estão dentro ou fora da faixa de conforto e o consumo energético com climatização de cada modelo simulado.

#### **3.3.1. Configurações dos modelos para a simulação**

Para esta simulação, os parâmetros determinados como constantes foram: a localização geográfica e orientação da edificação, a geometria da casa, a faixa de conforto estabelecida, a rotina de uso e os materiais de piso, cobertura, aberturas e paredes internas.

Como variáveis tem-se apenas o tratamento das paredes externas, sendo estas apenas em alvenaria ou com a aplicação das fachadas vivas.

Tratam-se de 6 modelos analisados, um caso base, que consiste na residência unifamiliar R1-B apresentada anteriormente, 4 modelos da mesma residência com a aplicação das fachadas vivas em orientações diferentes, e 1 modelo com a fachada viva em todas as paredes externas.

Uma rotina de uso e ocupação da residência foi estabelecida, tanto para o cálculo do consumo de energia elétrica da residência, quanto para o cálculo da carga térmica dos ambientes, o qual segue na tabela 4.

**Tabela 4:** Carga térmica com ocupação e uso de equipamentos na residência R1-B

Horário	Quarto 2	Banheiro	Quarto 1	Cozinha	Sala	Carga Térmica (W)
0h-06h	1 pessoa	-	2 pessoas	Geladeira	-	420
	40 W	0	80 W	300 W	0	
06h-07h	-	1 pessoa + Iluminação + Chuveiro	-	Geladeira + 3 pessoas + Iluminação + Fogão	-	6315
	0	75+100+3000 W	0	300+240+100+2500 W	0	
07h-12h	-	-	-	Geladeira	-	300
	0	0	0	300 W	0	
12h-13h	-	-	-	Geladeira + 1 pessoa + Iluminação + Fogão	-	2980
	0	0	0	300+80+100+2500 W	0	
13h-15h	1 pessoa + Iluminação	-	-	Geladeira	-	475
	75+100 W	0	0	300 W	0	
15h-18h	1 pessoa + Iluminação + Computador	-	-	Geladeira	-	655
	75+100+180 W	0	0	300 W	0	
18h-19h	1 pessoa + Iluminação + Computador	1 pessoa + Iluminação + Chuveiro	Iluminação	Geladeira	2 pessoas + Iluminação + Televisão	4260
	75+100+180 W	75+100+3000 W	100 W	300 W	130+100+100 W	
19h-20h	-	-	-	Geladeira + 3 pessoas + Iluminação + Fogão	Iluminação + Televisão	3340
	0	0	0	300+240+100+2500 W	100+100 W	
20h-22h	-	-	-	Geladeira	3 pessoas + Iluminação + Televisão	690
	0	0	0	300 W	190+100+100 W	
22h-23h	1 pessoa + Iluminação	-	2 pessoas + Iluminação	Geladeira	-	725
	75+100 W	0	150+100 W	300 W	0	
23h-24h	1 pessoa	-	2 pessoas	Geladeira	-	420
	40	0	80 W	300 W	0	

Os parâmetros físicos e construtivos da residência R1-B já foram descritos na apresentação do caso selecionado, bem como as características ocupacionais e o consumo de energia elétrica com equipamentos.

As características de ocupação da casa, que interferem na simulação dos ganhos de calor interno, foram definidas previamente, com base em estatísticas sobre a população brasileira e o consumo de energia. Foram considerados 3 ocupantes para a casa, sendo um casal e um filho. Os equipamentos contabilizados foram: geladeira, fogão, chuveiro, TV, computador e iluminação, além do consumo do aparelho de ar-condicionado que é o dado buscado na simulação. A rotina de uso dos equipamentos e a carga térmica dos cômodos foi estipulada conforme a tabela 4.

Estabelecidas as características do modelo, foram feitos dois testes para analisar o comportamento do edifício, antes de analisar o comportamento das fachadas vivas. A primeira simulação teste considerou a residência R1-B sem fachadas vivas, sem ocupação e sem climatização, com a intenção de analisar os ganhos térmicos pela radiação solar na casa.

O segundo teste consiste na simulação da residência sem fachadas vivas, ocupada e sem climatização, e esta analisa a influência dos equipamentos na temperatura interna dos ambientes. Em seguida, foram modelados o caso-base e os modelos da residência com fachadas vivas, conforme a tabela 5.

**Tabela 5:** Modelos simulados

Simulação	Descrição
Modelo 1	Caso base. Casa sem fachadas vivas, ocupada e climatizada
Modelo 2	Casa com fachada viva na face norte, ocupada e climatizada
Modelo 3	Casa com fachada viva na face oeste, ocupada e climatizada
Modelo 4	Casa com fachada viva na face sul, ocupada e climatizada
Modelo 5	Casa com fachada viva na face leste, ocupada e climatizada
Modelo 6	Casa com fachada viva em todas as faces, ocupada e climatizada

### 3.3.2. Dados inseridos na simulação

Na tabela 6 são demonstrados os parâmetros da configuração dos modelos para a simulação no Mestre. Os arquivos das simulações encontram-se nos apêndices de E a J.

**Tabela 6:** Configurações dos parâmetros das simulações no Mestre

<b>Parâmetros</b>	<b>Configuração</b>
Contexto da simulação	
Dia	0 a 31
Mês	-1 a 12 (-1 considera o ano inteiro)
Hora inicial (hi) e hora final (hf)	0 e 24
Intervalo de tempo (deltat)	3600
Latitude (lat) e longitude (long)	-20 e -40 (localização de Vitória/ES)
Gráficos de temperatura	
Temperatura inicial (Ti) e temperatura final (Tf)	0 e 40
Taxa de geração de calor inicial (qi) e final (qf)	-5000 e 5000
Temperatura de conforto inicial (Tconfl) e final (TconfF)	18 e 28
Configurações do modelo	
Ângulo horário de rotação do modelo (rot)	0 a 360
Fator de nebulosidade	0,20
Resolução da grade de raios solares (resSol x;y)	0,3; 0,3
Critério de convergência de cálculos quando em dia único (erroConv)	0,1
Geometria do modelo	conforme planta projeto padrão R1-B (Figura 9)
Zonas térmicas	Zona térmica 0 – exterior Zona térmica 1 – piso Zona térmica 2 – quarto 2 Zona térmica 3 – banheiro Zona térmica 4 – quarto 1

	Zona térmica 5 – cozinha Zona térmica 6 – sala Zona térmica 7 - cobertura
Descrição das propriedades dos materiais	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condutividade térmica (condT);</li> <li>• Calor específico (calEsp);</li> <li>• Massa específica (mEsp);</li> <li>• Absortividade (externa e interna);</li> <li>• Transmissividade (taus);</li> <li>• Espessura padrão (espPadr);</li> </ul>
Descrição das zonas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidade térmica de tudo o que houver dentro da zona (capTerm);</li> <li>• Taxa de geração interna de calor (gerInt) – horária;</li> <li>• Coeficiente de filme na convecção (coefFilme) – valor padrão de 8 para materiais e 1000 para o solo;</li> <li>• Taxa de ventilação (vent) – média para as 0h-6h, 6h-12h, 12h-18h, 18h-24h;</li> <li>• Taxa de geração de calor constante (gerAux) – média para as 0h-6h, 6h-12h, 12h-18h, 8h-24h;</li> <li>• Aquecimento artificial (Aq) – ligado;</li> <li>• Temperaturas máximas para aquecimento ligar – 18;</li> <li>• Refrigeração artificial (Re) – ligado;</li> <li>• Temperatura mínima para resfriamento ligar – 28;</li> <li>• Temperatura inicial para cada zona (Ti) – 21</li> </ul>
Dados Climáticos	
Temperatura horária do solo (ts)	entre 23,2 e 25,6
Clima sintético mensal (tm)	temperaturas máximas e mínimas diárias de cada mês do ano analisado
Clima analítico anual, hora a hora (tm2) - dados climáticos de Vitória, constando as 8.760 horas do ano de 2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mês – 1 a 12;</li> <li>• Dia – 1 a 31;</li> <li>• Hora – 1 a 24;</li> <li>• Radiação direta (2/3 da radiação global) – 0,000 a 874,667;</li> <li>• Radiação difusa (1/3 da radiação global) – 0,000 a 447,000.</li> </ul>

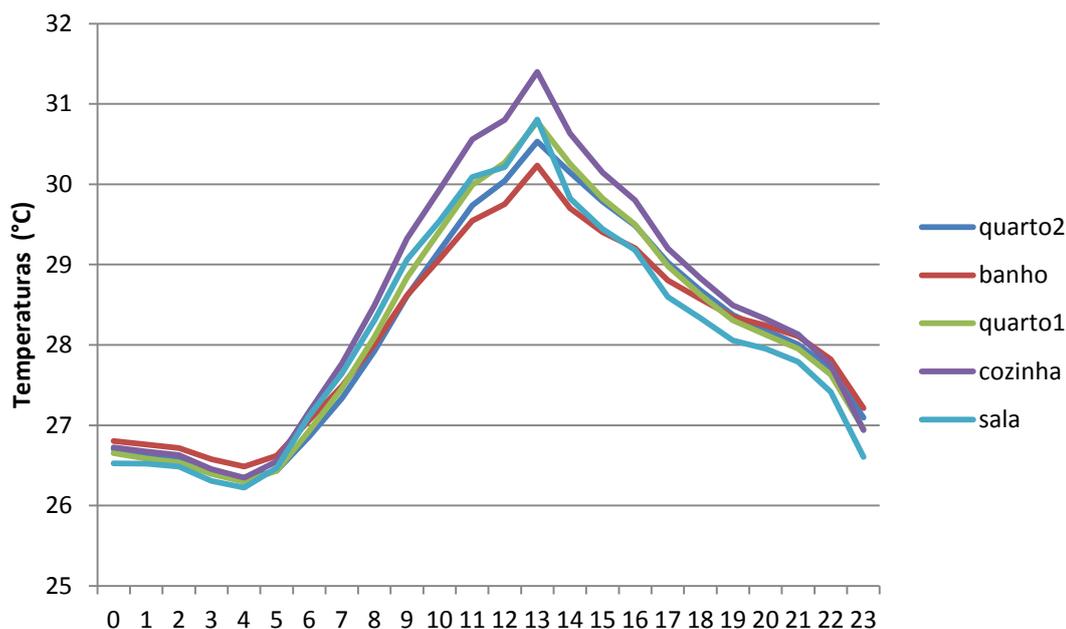
### 3.3.3. Simulações do caso-base

O caso base consiste em uma residência unifamiliar de pavimento único, com dois quartos, banheiro, sala, cozinha e área de serviço externa, totalizando 46,35m<sup>2</sup>. As paredes externas e internas são de alvenaria de tijolos cerâmicos e a cobertura de telhas cerâmicas. A simulação deste modelo ocorreu para 3 situações, de modo a observar quais os ambientes são mais afetados pela radiação solar e pelos ganhos e calor internos provenientes da ocupação.

Primeiramente o modelo foi simulado sem ocupação, ou seja, sem ganhos internos de calor e sem climatização; uma segunda simulação teve a mesma casa ocupada, onde foram analisados os efeitos da ocupação na temperatura dos ambientes e sem climatização; a terceira simulação teve o modelo de residência ocupado e com o termostato ligado, ativando a climatização para resfriamento ou aquecimento a cada momento que a temperatura estivesse fora da faixa de conforto.

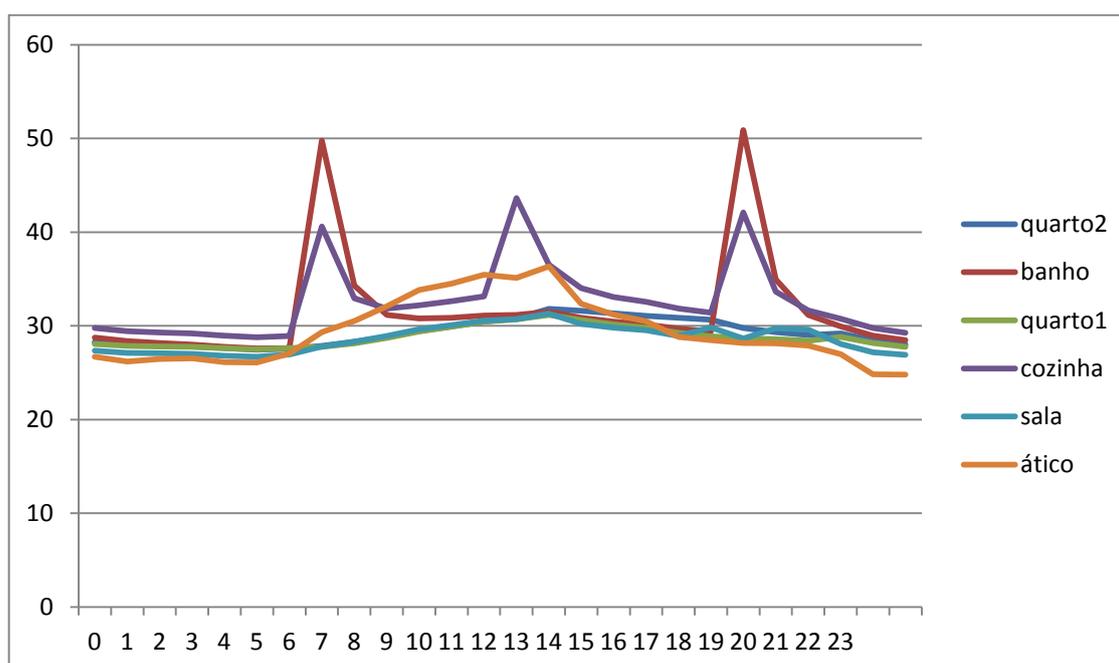
O primeiro modelo do caso-base simulado, sem ganhos de calor interno devido à ocupação e sem climatização, apresentou as menores temperaturas, variando de 15,9°C na sala, no inverno, a 31,4°C na cozinha, no verão. O ambiente que apresentou as temperaturas mais altas foi a cozinha, seguida do quarto 1, sala, quarto 2 e banho, do mesmo modo, estes foram os ambientes que apresentaram maior desconforto por calor, sendo que a casa apresentou 558 horas de desconforto, 452 horas com a temperatura acima dos 28°C e 106 horas com temperaturas abaixo dos 18°C, temperaturas estipuladas para a faixa de conforto. No gráfico da figura 15 são ilustrados os resultados de temperatura interna dos cômodos, no dia mais quente do ano usado como referência.

**Figura 15:** Temperaturas dos ambientes no dia mais quente do ano



O segundo modelo, com ganhos de calor interno e sem climatização, mostra quais ambientes apresentaram maior mudança de temperatura com a ocupação e o uso dos equipamentos, o banheiro passou do ambiente com a menor temperatura, na simulação anterior, para o ambiente com o valor mais alto de temperatura máxima, 51°C. Conforme observa-se no gráfico da figura 16, no dia mais quente do ano, a cozinha apresentou a média de temperaturas mais alta que os demais ambientes, porém o banheiro apresentou picos de calor nos horários de utilização.

**Figura 16:** Temperaturas nos cômodos da casa ocupada e sem climatização



A terceira simulação do modelo de referência foi realizada para a casa ocupada e com climatização. Trata-se do caso base utilizado para comparação do consumo energético com os modelos que possuem fachada viva e climatização reduzida.

#### 3.3.4. Simulações da residência com fachadas vivas

As simulações da residência com o acréscimo das fachadas vivas foram realizadas com o objetivo de avaliar a influência das fachadas vivas sobre a energia de operação do edifício, em especial, com climatização artificial. Além do caso-base, foram simulados mais 5 modelos de fachadas vivas: com a implantação da fachada viva na face norte, na oeste, na sul, na leste e o quinto modelo com fachadas vivas em todas as paredes externas, nas quatro orientações.

A casa simulada contou com um termostato para ativar a climatização artificial em três cômodos selecionados – dois quartos e sala – toda vez que a temperatura estivesse fora da faixa de conforto estabelecida. Tendo em vista os limites estabelecidos anteriormente para climatização, valores abaixo de 18°C necessitarão de aquecimento, com COP do aparelho condicionador de 3,5, e valores acima de 28°C necessitarão de resfriamento, com COP do aparelho de 3,0.

Os resultados da simulação são as horas necessárias de climatização artificial e a energia necessária para manter as temperaturas internas dentro da faixa de conforto. Essa energia, em calor, foi transformada para energia elétrica, considerando o COP já informado dos equipamentos. A energia de climatização foi acrescentada à energia de consumo de equipamentos para chegar-se ao total de energia operacional durante os 50 anos do ciclo de vida da residência.

## 4. CICLO DE VIDA ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL COM SISTEMA DE FACHADAS VIVAS

Nesta análise comparativa são apresentados os resultados obtidos acerca da energia no ciclo de vida de uma edificação residencial unifamiliar com aplicação de um sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira em diferentes orientações de fachada, nas fases pré-operacional e operacional do ciclo de vida energético.

### 4.1. Energia embutida

#### 4.1.1. Energia embutida nas fachadas vivas

Conforme já foi dito no protocolo de coleta de dados, o levantamento da energia embutida na fachada viva em manta parte de Oliveira *et al.* (2014), que analisaram a energia embutida em materiais de diferentes sistemas de fachada viva. No estudo, no que diz respeito à energia embutida inicial, a fachada em manta com estrutura de madeira apresentou melhores resultados que os sistemas com estrutura metálica e de plástico, mostrando-se mais econômica e menos impactante.

A energia do substrato foi calculada com base na composição de substrato usada no experimento de Lima Jr (2014). Os dados de energia embutida foram extraídos de Hammond e Jones (2008), sendo que a alguns elementos para os quais não foram encontrados os dados relativos à energia incorporada, foi atribuída a energia de materiais similares. É o caso da turfa, para a qual foi atribuída a mesma energia embutida da terra; da cinza de casca de arroz, que possui a mesma energia embutida da cinza de carvão vegetal; e a casca de pinus leva a mesma energia embutida que a madeira em geral. Na tabela 7 são demonstrados os valores de energia embutida nessa composição de substrato.

**Tabela 7:** Energia embutida no substrato

Material	Quantidade (kg)	EE(MJ/Kg)	EEi(MJ)
Terra	0,4	0,45	0,18
Turfa	0,25	0,45	0,1125
Cinza de casca de arroz	0,20	0,1	0,02
Casca de pinus	0,10	8,5	0,85
Vermiculita expandida	0,05	7,2	0,36
Total Substrato	1Kg		1,5225

Na tabela 8 observa-se o cálculo completo da energia embutida nos materiais do sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira, considerando a energia embutida inicial e as reposições de cada material durante o período estipulado para o ciclo de vida.

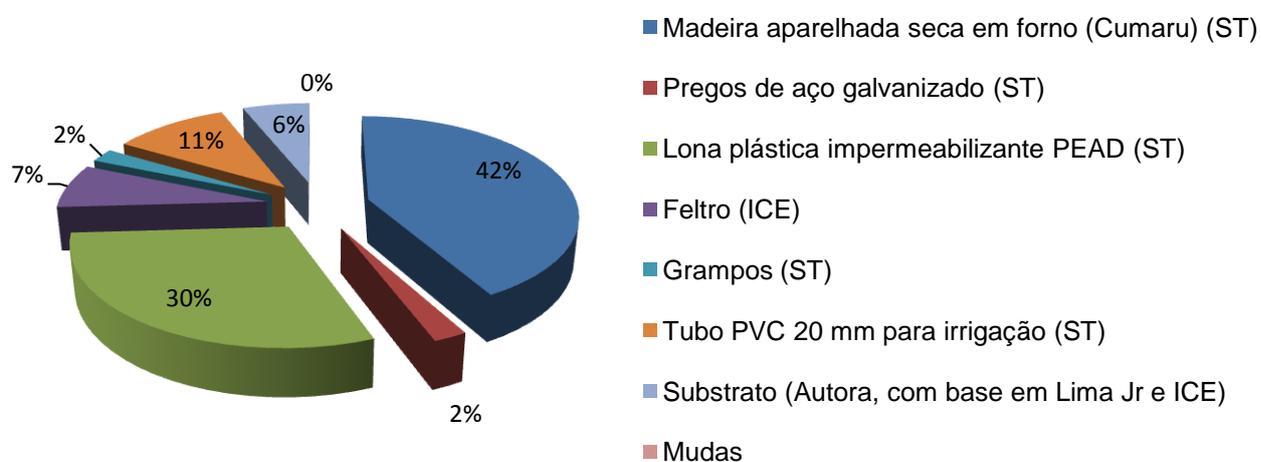
**Tabela 8:** Cálculo da energia embutida dos componentes da fachada viva em manta

Sistema Manta + Estrutura Madeira	quant. (Kg/m <sup>2</sup> )	EE (MJ/kg)	EEi (MJ/m <sup>2</sup> )	vida útil(a)	EEr (MJ/m <sup>2</sup> )
Madeira aparelhada seca em forno	17,99 <sup>(5)</sup>	3,5 <sup>(1)</sup>	62,9	12 <sup>(3)</sup>	262,3
Pregos de aço galvanizado	0,10 <sup>(5)</sup>	33,8 <sup>(1)</sup>	3,3	12 <sup>(4)</sup>	13,9
Lona plástica impermeabilizante PEAD	0,47 <sup>(5)</sup>	95,0 <sup>(1)</sup>	44,9	-	0,0
Feltro	0,30 <sup>(5)</sup>	36,0 <sup>(2)</sup>	10,8	10 <sup>(4)</sup>	142,5
Grampos	0,10 <sup>(5)</sup>	33,8 <sup>(1)</sup>	3,3	10 <sup>(4)</sup>	16,7
Tubo PVC 20 mm para irrigação	0,19 <sup>(5)</sup>	83,8 <sup>(1)</sup>	15,6	7,5 <sup>(4)</sup>	104,3
Substrato	5,99 <sup>(5)</sup>	1,5 <sup>(6)</sup>	9,1	10 <sup>(4)</sup>	778,7
Mudas	-	-	-	3,5 <sup>(4)</sup>	-
<b>TOTAL</b>	<b>25,13</b>		<b>150,12</b>		<b>496,7</b>

Fonte: 1 – Tavares (2006); 2 – Hammond e Jones (2008); 3 – Nahuz (2013); 4 – Ottele (2011); 5 – Oliveira *et al.* (2014); 6 – da autora, com base em Lima Jr. (2014) e Hammond e Jones (2008).

Conforme a tabela 8, o sistema de fachada viva em manta com estrutura em madeira pesa 25,13Kg/m<sup>2</sup> e possui energia embutida inicial de 150,12 MJ/m<sup>2</sup>. No gráfico da figura 17 é mostrada a contribuição com o consumo de energia de cada material deste sistema, onde a estrutura é responsável por 42% do total de energia embutida inicial, e a lona impermeabilizante responde por 30% dos gastos energéticos.

**Figura 17:** % de EEi dos materiais da fachada viva em manta com estrutura em madeira



Fonte: Oliveira et al. (2014)

No entanto, é necessário considerar o ciclo de vida de 50 anos e as reposições de material que se fazem necessárias nesse período, elevando consideravelmente a energia embutida no sistema. Considerando o tempo de vida útil adotado para os materiais da fachada viva, o sistema em manta com estrutura de madeira teve 496,7MJ/m<sup>2</sup> de energia embutida, um aumento de 230%.

Assim, a fachada viva em manta com estrutura de madeira estudada possui energia embutida inicial de 150,12MJ/m<sup>2</sup> e energia embutida de reposição de 496,7MJ/m<sup>2</sup>, totalizando uma energia incorporada de 646,82MJ/m<sup>2</sup> ao longo do ciclo de vida de 50 anos.

#### 4.1.2. Energia embutida na residência sem sistema de fachadas vivas

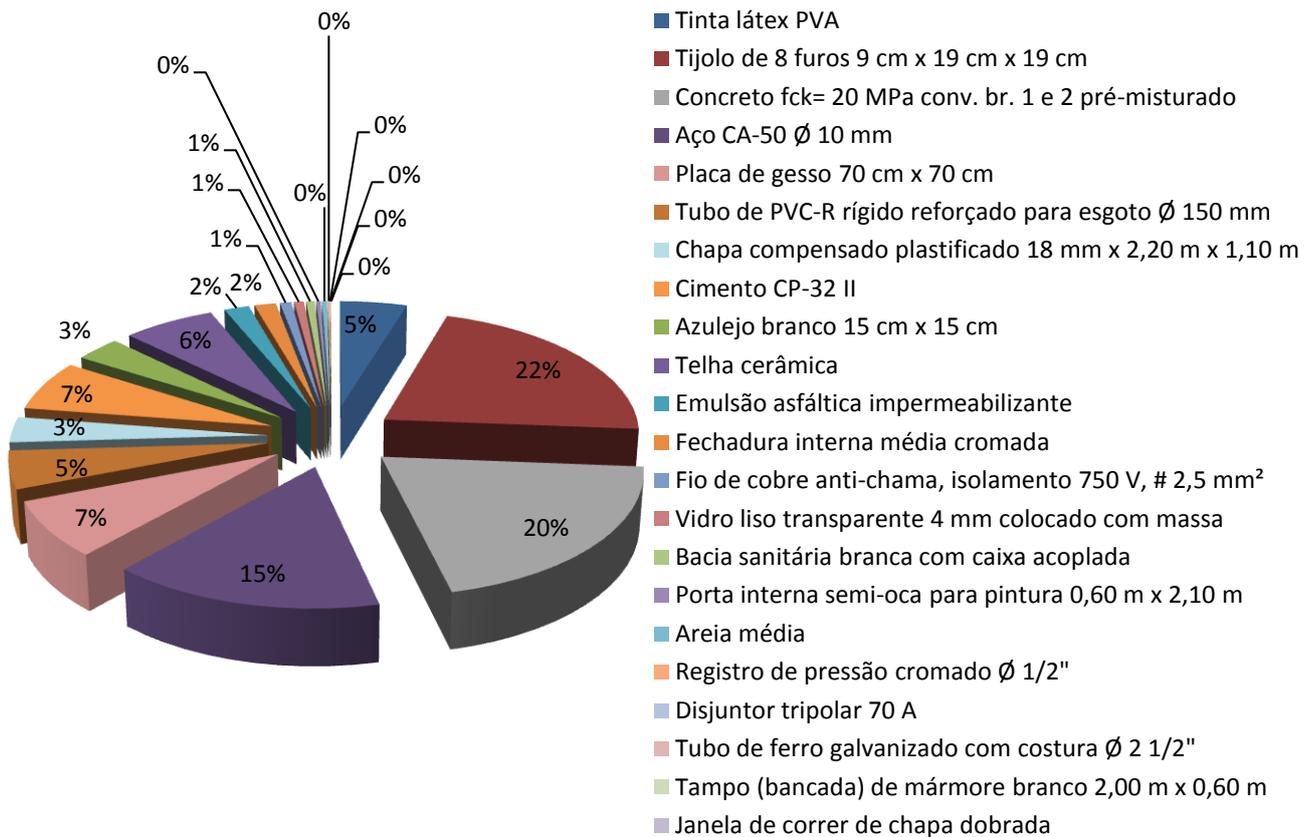
Com base no lote básico de insumos da residência unifamiliar de padrão baixo – R1B – da norma NBR 12721 (ABNT, 2006), foi encontrado o valor de energia embutida inicial de 171,21GJ para a residência, ou **3,69GJ/m<sup>2</sup>**, considerando apenas as etapas de prospecção fabricação e transporte de insumos e fabricação dos materiais de construção. Não foram consideradas nesse cálculo as demais etapas da energia embutida inicial da metodologia de Tavares (2006) de transporte dos materiais de construção, desperdício e transporte do desperdício. Na tabela 9 é demonstrado o cálculo da energia embutida na residência, de acordo com o lote básico de insumos da NBR 12721(ABNT,2006).

No gráfico da Figura 18 observa-se a contribuição de cada material na energia embutida inicial da residência, é possível observar que apenas 3 materiais são responsáveis por 57% da energia embutida inicial da residência: tijolo cerâmico, concreto e aço. Nota-se também que a energia embutida da tinta látex é responsável por apenas 5% da energia embutida inicial.

**Tabela 9:** Cálculo da energia embutida sobre o lote básico de insumos da R1-B, baseado em NBR – 12.721 (ABNT, 2006) e Tavares(2006)

<b>Lote Básico - Projeto-padrão Residencial - BAIXO</b>										
LOTE BÁSICO (por m2 de construção)	u. n.	Quantidade de material/ m <sup>2</sup>	Volume de material (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de casa)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	kg material kg/m <sup>2</sup>	EE MJ/kg (Tavares)	EEi MJ/m <sup>2</sup>	Fator de reposição	EEreposição MJ/m <sup>2</sup>	EEtotal MJ/m <sup>2</sup>
Chapa compensado plastificado 18 mm x 2,20 m x 1,10 m	m <sup>2</sup>	1,52	0,02743	550	15,085	8,00	120,68	0	0,00	120,68
Aço CA-50 Ø 10 mm	kg	18,28	-	-	18,276	30,00	548,27	0	0,00	548,27
Concreto fck= 20 MPa conv. br. 1 e 2 pré-misturado	m <sup>3</sup>	0,26	0,26159	2300	601,657	1,20	721,99	0	0,00	721,99
Cimento CP-32 II	kg	56,40	-		56,399	4,20	236,87	0	0,00	236,87
Areia média	m <sup>3</sup>	0,17	0,17263	1515	261,534	0,05	13,08	0	0,00	13,08
Tijolo de 8 furos 9 cm x 19 cm x 19 cm	un	58,58	0,19032	1400	266,451	2,90	772,71	0	0,00	772,71
Telha cerâmica	un	23,18	-	1900	62,586	5,40	337,97	0	0,00	337,97
Porta interna semi-oca para pintura 0,60 m x 2,10 m	un	0,11	0,00498	650	3,235	3,50	11,32	1	11,32	22,65
Janela de correr de chapa dobrada	m <sup>2</sup>	0,24			0,001	30,00	0,03	1	0,03	0,06
Fechadura interna média cromada	un	0,12			0,990	55,00	54,45	1	54,45	108,89
Azulejo branco 15 cm x 15 cm	m <sup>2</sup>	1,89	0,00943	2000	18,863	6,20	116,95	1	116,95	233,90
Tampo (bancada) de mármore branco 2,00 m x 0,60 m	un	0,01	0,00025	2680	0,681	1,00	0,68	1	0,68	1,36
Placa de gesso 70 cm x 70 cm	un	2,47	0,07418	800	59,347	4,50	267,06	1	267,06	534,12
Vidro liso transparente 4 mm colocado com massa	m <sup>2</sup>	0,13	0,00053	2500	1,320	18,50	24,42	1	24,42	48,84
Tinta látex PVA	l	2,00			2,599	65,00	168,94	4	675,76	844,70
Emulsão asfáltica impermeabilizante	kg	1,23			1,234	51,00	62,95	1	62,95	125,90
Fio de cobre anti-chama, isolamento 750 V, # 2,5 mm <sup>2</sup>	m	15,59	0,00004	8933	0,348	83,00	28,90	1	28,90	57,79
Disjuntor tripolar 70 A	un	0,08			0,013	85,00	1,08	1	1,08	2,15
Bacia sanitária branca com caixa acoplada	un	0,06			0,852	25,00	21,30	1	21,30	42,60
Registro de pressão cromado Ø 1/2"	un	0,19			0,046	95,00	4,41	1	4,41	8,82
Tubo de ferro galvanizado com costura Ø 2 1/2"	m	0,01	0,00000	7500	0,024	33,80	0,82	1	0,82	1,64
Tubo de PVC-R rígido reforçado para esgoto Ø 150 mm	m	0,52	0,00172	1300	2,237	80,00	178,97	1	178,97	357,94
<b>TOTAL</b>							<b>3693,84</b>		<b>1449,10</b>	<b>5142,94</b>

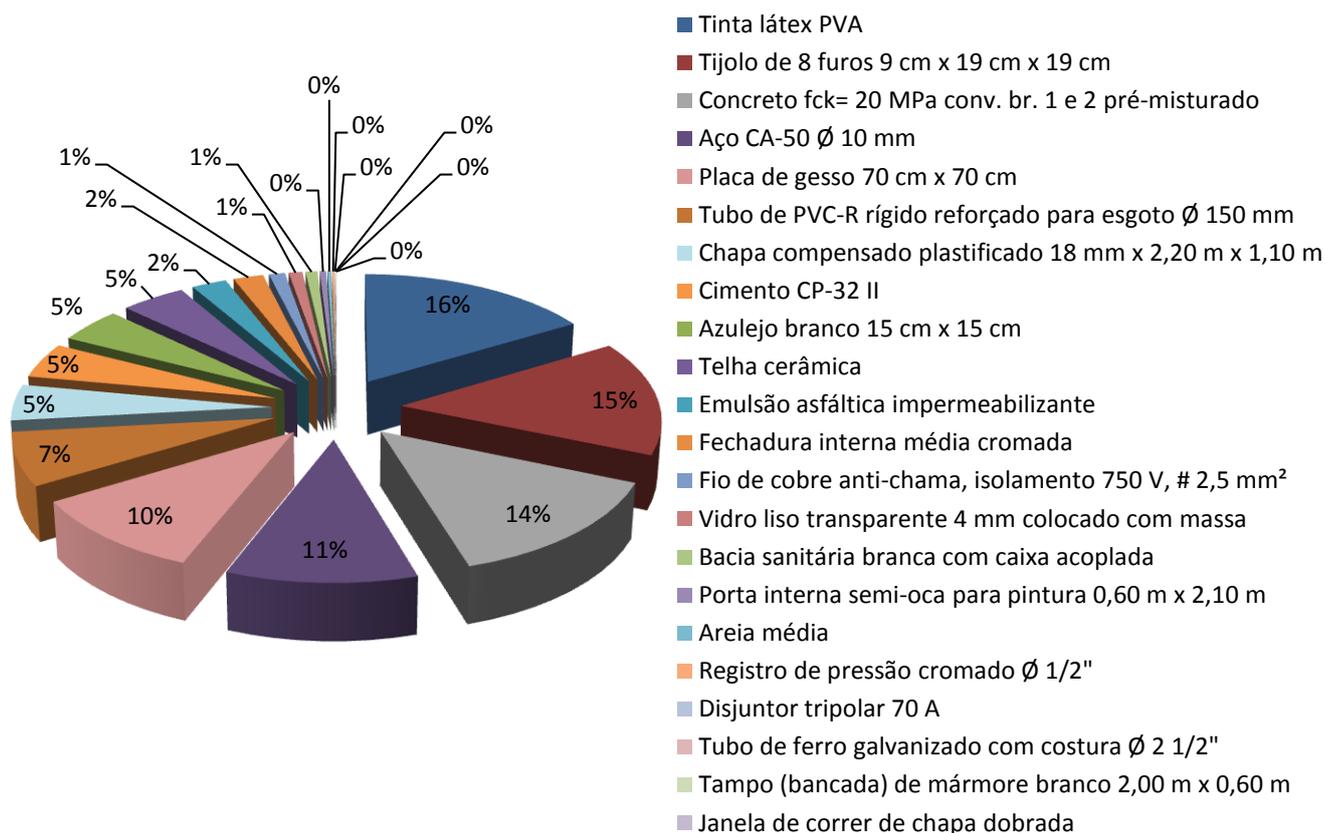
**Figura 18:** Energia Embutida inicial nos materiais da residência R1-B, sem o acréscimo das fachadas vivas.



Considerando-se a necessidade de manutenção ou reposição dos materiais ao longo dos 50 anos de análise da etapa operacional, o acréscimo de energia embutida segue o fator de reposição determinado por Tavares (2006), baseado na durabilidade dos materiais. Dessa forma, a energia embutida calculada para a manutenção e reposição dos materiais de construção foi de 67,20GJ para a residência de 46,35m<sup>2</sup>, ou **1,45GJ/m<sup>2</sup>**. No gráfico da figura 19 é apresentado o total da energia embutida em cada material, considerando a energia inicial e a manutenção ou reposição, quando necessárias, ao longo dos 50 anos de vida útil da residência.

Observa-se que, com a reposição dos materiais, a maior energia incorporada, que era do tijolo cerâmico, passa a ser da tinta látex PVA, uma vez que a mesma demanda reposição 4 vezes ao longo do ciclo de vida, segundo Tavares (2006).

**Figura 19:** Energia Embutida final na residência R1-B sem aplicação de fachadas vivas



Resumindo, a energia embutida inicial da residência, sem a aplicação de fachadas vivas, é 171,21GJ, e a energia embutida de reposição dos materiais é 67,16GJ, somando um total de 238,37GJ de energia incorporada durante os 50 anos do ciclo de vida da residência.

#### 4.1.3. Energia embutida na residência com fachadas vivas

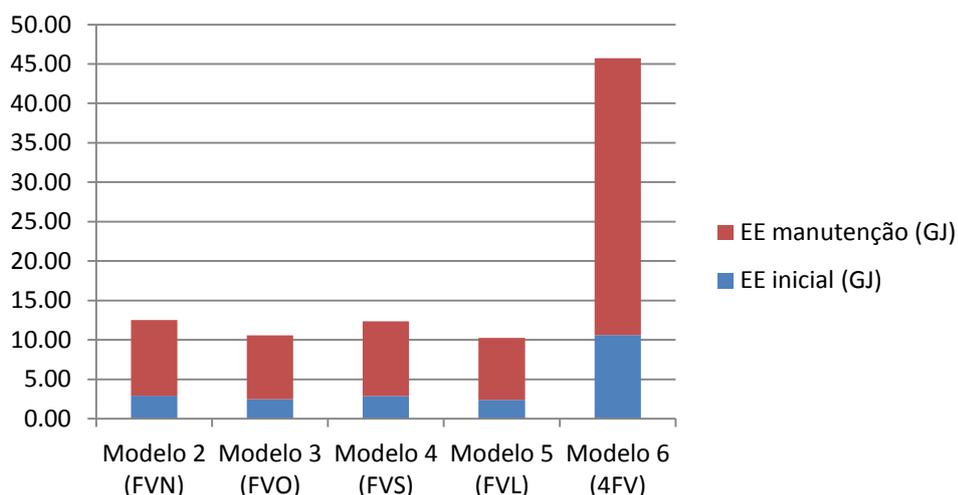
Dados os valores de energia embutida encontrados para o sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira, é possível encontrar o valor de energia incorporada acrescentado o valor correspondente à área de fachada de cada um dos modelos de 2 a 6 simulados.

O modelo 2, com a aplicação da fachada viva na face norte, possui 19,35m<sup>2</sup> de fachadas vivas, responsáveis pelo acréscimo de 2,90GJ de energia embutida inicial e 9,61GJ de energia embutida de manutenção. Já o modelo 3, referente à residência com a aplicação do sistema de fachada viva na fachada oeste, possui 16,34m<sup>2</sup> de fachadas vivas, que possuem energia embutida inicial de 2,45GJ e energia embutida de manutenção de 8,12GJ.

Quanto ao modelo 4, que possui fachadas vivas aplicadas na fachada sul, a energia embutida inicial encontrada para os 19,13m<sup>2</sup> de fachada foi 2,87GJ, e 9,50GJ correspondem à energia de manutenção. O modelo 5 possui fachadas vivas na parede voltada para o leste, com um total de 15,86m<sup>2</sup>, a menor área de fachada, cuja energia embutida inicial corresponde a 2,38GJ e a energia embutida de manutenção 7,88GJ.

Por fim, o modelo 6 representa a residência R1-B com aplicação das fachadas vivas em todas as paredes externas, o equivalente a 70,68m<sup>2</sup> de fachadas, de modo que o acréscimo de energia embutida inicial na residência proveniente das fachadas vivas é de 10,61GJ, e a energia de manutenção equivale a 35,11GJ, durante os 50 anos do ciclo de vida. No gráfico da figura 20 são comparadas a energia embutida inicial e final de todos dos modelos de fachada viva estudados.

**Figura 20:** energia embutida nas fachadas vivas dos modelos simulados



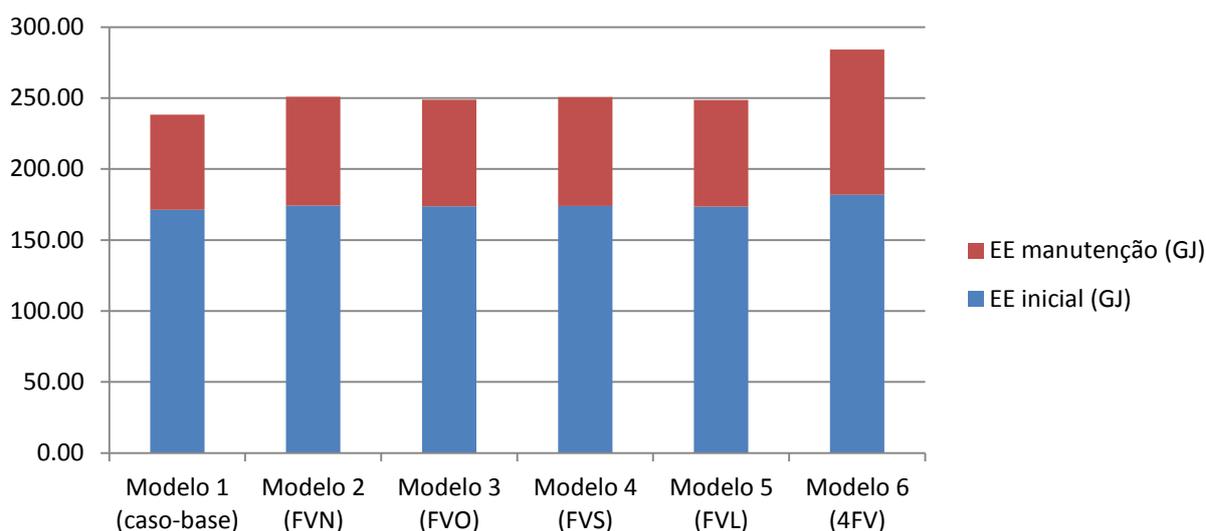
Na tabela 10 são apresentados os resultados de energia embutida das fachadas vivas somados à energia embutida encontrada para a casa.

**Tabela 10:** Energia Embutida dos modelos estudados

	En. Embutida Inicial (GJ)	En. Embutida de reposição (GJ)	Total (GJ)
Modelo 1 (Caso-base)	171,21	67,16	238,37
Modelo 2 (FVN)	174,11	76,77	250,89
Modelo 3 (FVO)	173,66	75,28	248,94
Modelo 4 (FVS)	174,08	76,66	250,74
Modelo 5 (FVL)	173,59	75,04	248,63
Modelo 6 (FV4)	181,82	102,27	284,09

A aplicação da fachada viva na face leste representou o menor acréscimo: 4,30% de energia em todo o ciclo de vida, resultado próximos dos outros modelos com acréscimo da fachada viva em uma única orientação, enquanto a energia embutida final da residência sofreu um aumento de 19,18% com a instalação das fachadas vivas em todas as paredes externas, conforme ilustrado na figura 21.

**Figura 21:** Energia embutida total nos modelos estudados



## 4.2. Energia operacional

### 4.2.1. Consumo de energia elétrica da residência

O consumo mensal de energia elétrica da residência foi de 251,22 kWh por mês, definido com base na rotina de uso dos equipamentos (tabela 1). Ao longo do ciclo de vida de 50 anos estipulado para a análise, o total de energia elétrica consumida será de 150,73 MWh, ou 542,63 GJ. Este é o gasto energético básico com equipamentos, válido para todos os modelos simulados. O que difere os modelos analisados a seguir é o consumo energético com climatização de cada um, o qual varia em função da implantação das fachadas vivas.

### 4.2.2. Simulação do consumo com climatização

Conforme descrito, foram simulados no *software* Mestre, 5 modelos da residência com aplicação do sistema de fachada viva, além do caso base. Uma vez que o objetivo da pesquisa é avaliar a influência dos sistemas de fachadas vivas no ciclo de vida energético da

residência, as variáveis de resposta foram as temperaturas internas das 8760 horas do ano e a climatização necessária para manter dentro da faixa de conforto os ambientes determinados: quartos 1 e 2, e sala.

No primeiro modelo simulado, que consiste no caso base, a residência R1-B sem fachadas vivas, ocupada e climatizada. As temperaturas internas variam de 17,4°C no inverno, a 50,3°C no verão, ambos no banheiro. Considerando que os ambientes que apresentam as maiores temperaturas – banheiro e cozinha – não constituem áreas de permanência e não são climatizados, o ambiente que apresenta maior necessidade de resfriamento é o quarto 2, seguido da sala e do quarto 1. O modelo 1 necessita de 159,99 kWh de energia elétrica para resfriamento, e 5,37 kWh para aquecimento de eletricidade no ano.

No modelo 2 o sistema de fachada viva foi aplicado na fachada norte da residência. O consumo de energia elétrica para resfriamento caiu para 150,65 kWh de energia elétrica durante o ano, ou seja, houve uma redução de 6%. Quanto à energia elétrica para aquecimento, o consumo passou para 5,10 kWh.

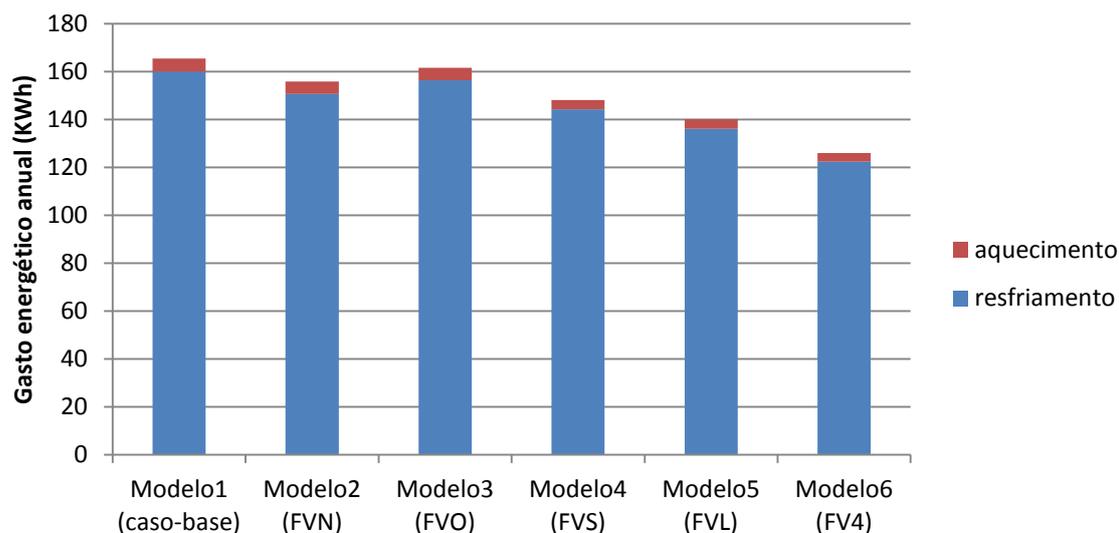
A simulação da residência com a aplicação da fachada viva na face oeste mostrou que quanto ao consumo de energia com climatização, seriam necessários 156,36 kWh de energia elétrica para resfriamento ao longo do ano, e 5,20 kWh de energia elétrica para aquecimento, somando 161,57 kWh de energia, 2,3% de economia.

O modelo 3 representa a residência com aplicação da fachada viva na face sul. A demanda de energia elétrica para resfriamento neste modelo é de 144,19 kWh, enquanto para aquecimento são necessários 3,91 kWh. No total, houve economia de 10,5% com o sistema de fachada viva nessa orientação.

Já na orientação leste, a aplicação da fachada viva trouxe a maior economia de energia por fachada. O consumo de energia elétrica para resfriamento caiu para 136,10 kWh, enquanto a energia consumida para aquecimento foi de 4,01 kWh, totalizando uma redução de 15,3% de energia consumida.

O último modelo simulado possui fachadas vivas em todas as paredes externas e apresenta uma economia de 23,9% de energia com climatização. A energia consumida para resfriamento foi de 122,41 kWh e para aquecimento 3,53 kWh. No gráfico da figura 22 são comparadas as demandas de climatização nos modelos simulados.

**Figura 22:** Consumo com climatização por fachada



O modelo 6, com a fachada viva em manta aplicada à todas as paredes externas apresentou o a menor demanda por climatização, enquanto o modelo 1, sem fachadas vivas, apresentou o maior gasto energético com esse fim. Na tabela 11 estão resumidos os resultados encontrados.

**Tabela 11:** Energia de climatização dos modelos simulados

Energia de climatização	Modelo1	Modelo2	Modelo3	Modelo4	Modelo5	Modelo6
Gasto anual (kWh/ano)	165,36	155,76	161,58	148,11	140,12	125,95
Gasto anual (GJ/ano)	0,59	0,56	0,58	0,53	0,50	0,45
Gasto em 50 anos(GJ)	29,75	28,00	29,05	26,65	25,22	22,67

### 4.3. Ciclo de vida energético total dos modelos

A energia embutida inicial encontrada para o modelo1, ou caso base, foi 171,21GJ, enquanto considerando os 50 anos de vida útil da residência e a energia embutida de manutenção durante esse período (67,16GJ), a energia embutida total da residência sem fachadas vivas foi de 238,37GJ. Quanto à energia operacional, o consumo de energia com equipamentos elétricos foi de 542,63GJ durante o ciclo de vida, sendo o mesmo para todos os modelos, uma vez que a diferença na energia operacional foi apenas o consumo relativo à climatização. O consumo de energia elétrica para climatização no caso base foi 29,75GJ, e o gasto total energético, nas fases pré-operacional e operacional do ciclo de vida da edificação foi 810,75GJ.

O modelo 2 representa a casa com a aplicação do sistema de fachada viva na face norte. Para esta residência com acréscimo da fachada viva em manta, a energia embutida inicial foi 174,11GJ. Considerando o acréscimo de 76,77GJ de energia de manutenção da casa e da fachada viva durante os 50 anos de vida útil, a energia embutida total do modelo 2 foi de 250,89GJ. Quanto à energia operacional, além dos 542,63GJ comum aos 6 modelos, o consumo de energia elétrica com climatização desse modelo foi de 28GJ, durante o período de 50 anos analisado. A energia total desse modelo foi 821,51GJ.

O modelo 3 consiste na residência modelo com a fachada viva na face oeste. Este modelo apresentou energia embutida inicial de 173,66GJ, e energia de manutenção de 75,28GJ ao longo do ciclo de vida, totalizando 248,94GJ de energia embutida. Na fase operacional, o gasto energético com climatização do modelo 3 foi de 29,05GJ, que somados aos 542,63GJ gastos com equipamentos elétricos, resultam em uma energia operacional de 571,68GJ. Dessa forma, a energia total do modelo 3 durante o ciclo de vida foi 820,62GJ.

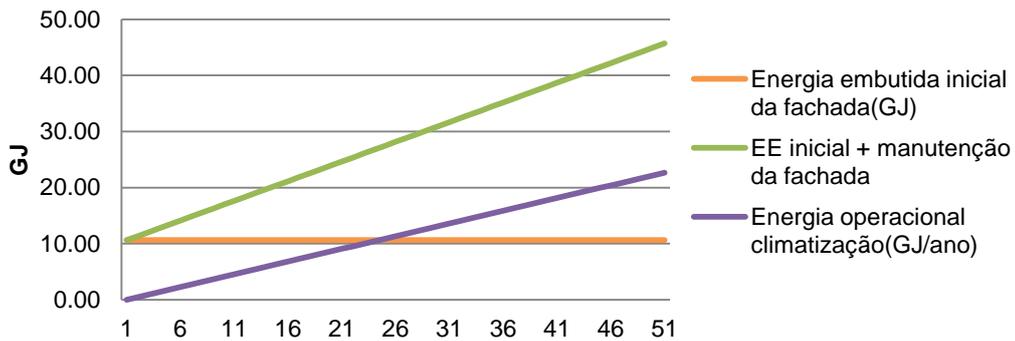
No modelo 4 a fachada viva aparece aplicada na fachada sul. A energia embutida inicial deste modelo foi de 174,08GJ e a energia embutida na reposição durante os 50 anos do ciclo de vida foi 76,66GJ, de modo que energia embutida final da residência com esta fachada foi 250,74GJ. O gasto energético com climatização, durante a fase operacional, foi 26,65GJ e o gasto total, somado ao consumo de equipamentos elétricos, foi 569,28GJ de energia na fase operacional. O consumo de energia total desse modelo foi 820,02GJ.

O modelo 5 possui fachada viva aplicada na face leste, apresentando a menor área de fachada e menor energia embutida inicial dentre os modelos com fachada, 173,59GJ. Com o acréscimo de 75,04GJ de energia embutida de manutenção, durante a vida útil da residência, a energia embutida total da residência com fachada leste passa a ser 248,63GJ. Quanto à energia operacional, aos 542,63GJ do consumo de equipamentos, se somam 25,22GJ do consumo de energia para climatização, resultando em 567,85GJ de energia na fase operacional e 816,48GJ de energia durante todo o ciclo de vida analisado.

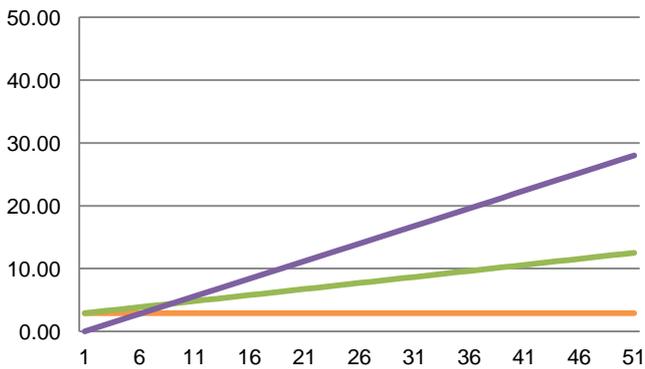
O modelo 6 é o último caso analisado e possui aplicação da fachada viva em manta em todas as paredes externas da residência, um total de 70,68m<sup>2</sup> de fachadas vivas. A energia embutida inicial desse modelo foi a maior encontrada: 181,82GJ, somada com a energia embutida de manutenção, responsável pelo acréscimo de 102,27GJ, resulta em uma energia embutida nos materiais de 284,09GJ. Já o consumo com climatização foi o menor encontrado, de 22,67GJ, que somados ao consumo de equipamentos, resultam em uma energia gasta de 565,30GJ durante a fase operacional e 849,39GJ durante o ciclo de vida.

Isolando a energia embutida inicial e de manutenção das fachadas, bem como o gasto com climatização durante a fase operacional, como nas figuras 23 a 27, percebe-se que o gasto energético do modelo com todas as fachadas é muito maior, embora o gasto com climatização seja também menor. A figura 23 evidencia a grande influência da energia de reposição no ciclo de vida da fachada e a necessidade de se utilizar materiais mais duráveis nos sistemas, a fim de reduzir a necessidade de manutenção.

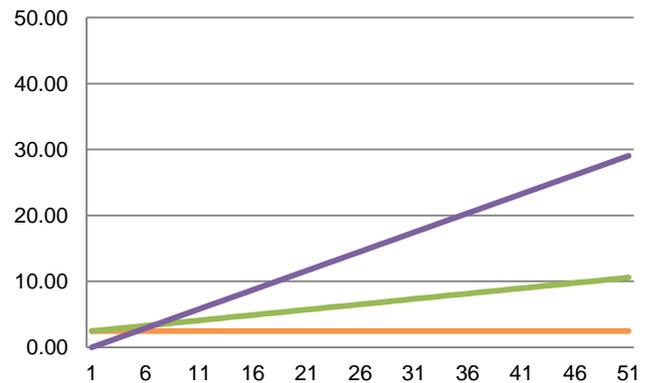
**Figura 23:** Todas as fachadas



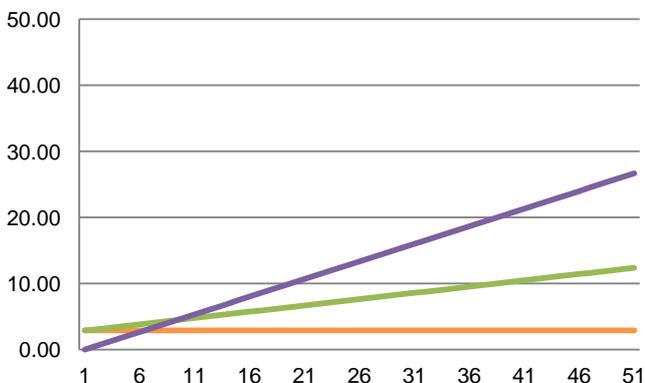
**Figura 24:** Fachada Norte



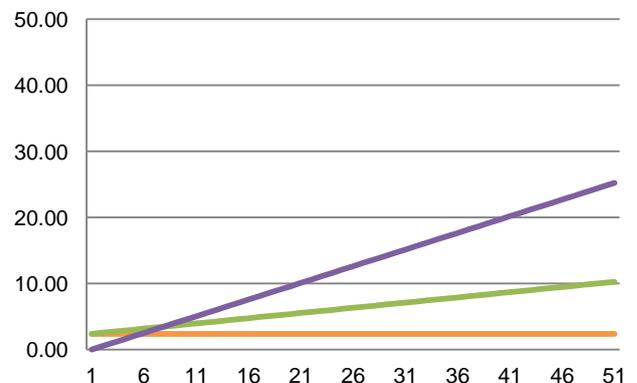
**Figura 25:** Fachada Oeste



**Figura 26:** Fachada Sul



**Figura 27:** Fachada Leste

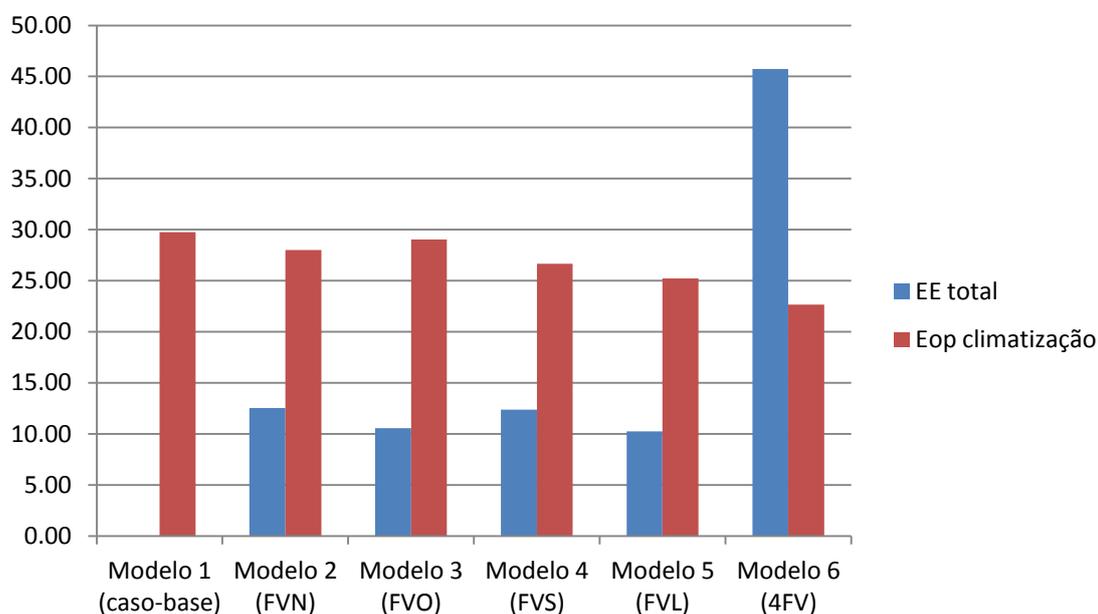


#### 4.4. Discussão dos resultados

Para responder à pergunta da pesquisa é preciso comparar o ciclo de vida energético total dos seis modelos. Os resultados apresentados mostram que a aplicação dos sistemas de fachadas vivas em manta em uma ou mais fachadas externas da edificação, e o consequente aumento na energia embutida da mesma, levam à redução da energia gasta com climatização. No entanto, não houve nos modelos estudados redução do gasto energético no ciclo de vida como um todo.

Na figura 28 é comparada a energia embutida total nos sistemas de fachadas vivas e a energia operacional nos modelos simulados. É possível observar que o modelo 1 sem as fachadas vivas possui o maior gasto energético com climatização e a residência com fachadas vivas em todas as orientações possui o menor gasto com climatização, porém, a maior energia embutida inicial. Dentre os modelos com as fachadas vivas, o modelo 5, com a fachada vegetal na parede leste, foi o mais eficiente, com menor energia embutida inicial e baixa energia de operação, representando o modelo mais econômico ao fim do ciclo de vida.

**Figura 28:** Energia embutida nas fachadas vivas e energia operacional dos modelos simulados

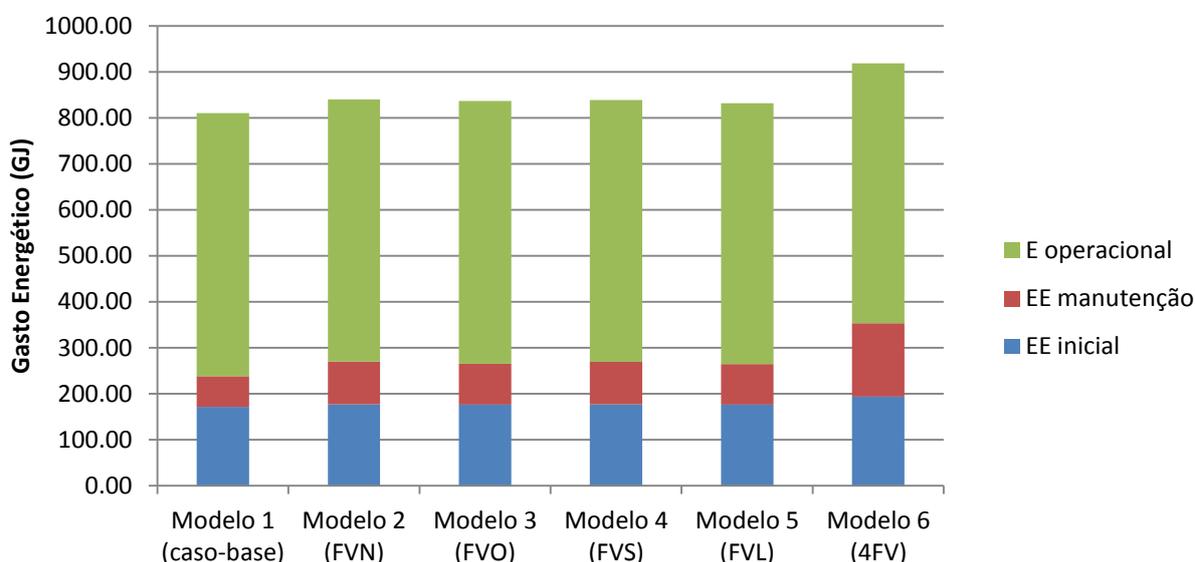


Na figura 29 é demonstrado o comparativo do ciclo de vida final de todos os modelos. Observa-se que mesmo com a redução da energia gasta com a climatização, os modelos que possuem as fachadas vivas apresentam um ciclo de vida com maiores gastos energéticos que o modelo1, que possui maior energia de operação.

Por outro lado, o modelo 6 da casa com fachadas vivas em todas as paredes externas apresentou a maior energia embutida inicial e de manutenção, e o menor gasto energético na fase operacional. Este modelo apresentou o maior gasto energético durante o ciclo de vida de todos os modelos estudados, demonstrando o peso da energia embutida, principalmente a de manutenção, no ciclo de vida da edificação.

Já entre os modelos com a fachada viva em apenas uma parede em diferentes orientações os resultados obtidos foram muito próximos. Dentre eles, o modelo 5 com acréscimo da fachada viva na fachada leste, merece destaque por apresentar a menor energia embutida inicial e a menor demanda por climatização, demonstrando melhor desempenho.

**Figura 29:** Ciclo de vida energético final dos modelos



A implantação das fachadas vivas na fachada leste gerou um acréscimo de 1,40% de energia embutida inicial e 4,30% de energia embutida total, enquanto a aplicação das fachadas vivas a todas as paredes externas levou a um acréscimo de 19,20% de energia embutida total.

Já com relação à energia de climatização, a aplicação da fachada viva na orientação leste gerou uma economia de 15,22%, enquanto na residência com todas as fachadas a economia com energia de climatização foi de 23,8%. No entanto, a climatização representou apenas 4% da energia operacional na residência com as 4 fachadas vivas, enquanto outros equipamentos, como o chuveiro elétrico, por exemplo, responsável por 40% da energia elétrica consumida nesse estudo, evidenciando que a estratégia mais eficaz é o investimento em tecnologias mais eficientes para diversos usos combinados.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência dos sistemas de fachadas vivas em manta no ciclo de vida energético de uma edificação residencial unifamiliar em clima tropical, como forma de aperfeiçoar e incentivar o uso de elementos naturais na arquitetura, bem como uma abordagem mais sustentável da construção civil.

A análise de ciclo de vida energético foi o método de análise de impacto escolhido para avaliar a sustentabilidade energética e ambiental do sistema de fachada viva em manta com estrutura de madeira, aplicado a uma residência unifamiliar de 46,35m<sup>2</sup>, submetida às condições climáticas da cidade de Vitória, Espírito Santo, que possui clima tropical. A energia embutida inicial e de manutenção foi calculada através de planilhas, sobre bases de dados reconhecidas nacional e internacionalmente, e o método adotado para quantificar os efeitos da fachada viva sobre a energia de operação foi a simulação termoenergética no *software* Mestre.

A hipótese inicial era de que o acréscimo das fachadas vivas consumisse uma energia extra na instalação que seria compensada pela economia de energia para climatização. No entanto, não houve essa compensação, em muito devido à alta energia de manutenção do sistema de fachada viva em manta.

No caso da residência de pavimento único, cobrir todas as paredes externas resultou em maior economia de energia com climatização, no entanto, gerou um gasto energético inicial e com manutenção muito grande, sendo que estudar as condições de orientação do edifício e escolher uma fachada se mostrou a solução mais adequada. Em outras tipologias construtivas, como prédios, por exemplo, as paredes externas recebem maior influência do ambiente externo, e o uso de fachadas vivas pode vir a ser mais viável.

Pode-se concluir que a fachada viva em manta com estrutura de madeira, aplicada a uma residência nas condições estudadas (localização, orientação, dimensões, materiais de vedação e aberturas), não configurou um sistema energeticamente sustentável. No entanto, há outras questões de sustentabilidade a serem consideradas com relação aos sistemas de fachadas vivas, tais como fixação de CO<sub>2</sub>, manutenção da biodiversidade no ambiente urbano, retenção de partículas poluentes do ar, entre outros.

O desenvolvimento deste trabalho levou ao entendimento de algumas variáveis que interferem no desempenho térmico e no gasto energético dos sistemas de fachada vivas, há outras variáveis que ainda necessitam de estudo mais aprofundados, como a umidade e a

convecção do ar na cavidade entre a parede externa da residência e a estrutura da fachada viva. A compreensão das propriedades do sistema de fachada viva permite analisar a aplicabilidade do mesmo em diferentes regiões e condições climáticas do Brasil.

Por fim, o estudo mostra que, embora não tenha se mostrado energeticamente eficiente nas condições estudadas, os sistemas de fachada viva têm um potencial de isolamento térmico e podem ser combinadas com outras estratégias de climatização passiva e arquitetura bioclimática, estudadas em cada caso, resultando em construções mais eficientes.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do trabalho e a discussão dos resultados nesta pesquisa, foram levantadas diversas questões acerca dos sistemas de fachadas vivas, as quais podem ser abordadas em trabalhos futuros.

Estudos a respeito do desempenho e impacto ambiental de outros sistemas de fachada viva, como por exemplo o sistema de fachada viva em módulos de plástico, são pertinentes, assim como o estudo de outros impactos ambientais, positivos e negativos, do próprio sistema de fachada viva em manta. Uma questão relativa aos impactos ambientais do sistema que pode ser aprofundada é a relação entre as emissões de carbono deste sistema e a capacidade de fixação de CO<sub>2</sub> do mesmo.

Maneiras de reduzir os impactos deste sistema também são necessárias, como a busca por materiais de maior durabilidade, que possam reduzir a necessidade de manutenção, ou mesmo se a redução ou supressão de um material comprometem o desempenho de fachadas, como é o caso de alguns sistemas de fachada viva em manta que não possuem substrato.

É necessário também aprofundar os estudos relativos aos fenômenos físicos que interferem no desempenho das fachadas vivas, como a evapotranspiração e convecção na cavidade entre parede e estrutura da fachada viva, ou a influência da umidade da cavidade nas propriedades de isolamento térmico da fachada.

Com relação ao desempenho das fachadas vivas, é possível ainda estudar a adaptabilidade desse sistema às diferentes regiões brasileiras e suas condições climáticas, bem como a adaptação de diferentes espécies vegetais ao sistema e sua influência no desempenho térmico do mesmo.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 15220:3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 12721**: Avaliação de custos unitários e preparo de orçamento de construção para incorporação de edifício em condomínio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.

ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of buildings: a method. **Building and Environment**, v. 32, ed. 4, p. 317-320, Elsevier Science Ltd. 1997 (a).

ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: examples. **Building and Environment**, v. 32, ed. 4, p. 321-329. Elsevier Science Ltd. 1997 (b).

ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 480-493, 2008.

ASHRAE HANDBOOK. **Fundamentals**. 1993. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 1993.

BLANC, P. **The vertical Garden: A scientific and Artistic approach**. Disponível em: <<http://www.verticalgardenpatrickblanc.com/documents> > Acesso em 03/04/2014.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2013**: Ano base 2012. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2014**: Ano base 2013. Rio de Janeiro, 2014.

CHEHEBE, J. R. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Qualitymark Editora Ltda, 1997.

CHEN, Q; LI, B; LIU, X. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. **Energy and Buildings**, v. 61, p. 298-307, 2013.

COPEL. **Simulador de consumo de energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/simulador/>>. Acesso em 10/02/2015.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos**: conforto ambiental. Editorial Revan, 2003.

CRAWFORD, R. H.; PULLEN, S. Life cycle water analysis of a residential building and its occupants. **Building Research & Information**, v. 39, n. 6, p. 589-602, 2011.

EDWARDS, B. **O Guia Básico para a Sustentabilidade**. 2ª edição. Barcelona: Gustavo Gili, 2008.

ELETROBRÁS, PROCEL – **Programa nacional de conservação de energia elétrica: Edificações**. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/elb/main.asp?TeamID={1EB2AF5C-923A-46B5-A4AE-AAF4565A316C}>> Acesso em 28 abr. 2013.

EUMORFOPOULOU, E. A.; KONTOLEON, K. J. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 1024-1038, 2009.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1982.

FENG, H; HEWAGE, K. Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 69, p. 91-99, 2014.

FRANCIS, R. A.; LORIMER, J. Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 6, p. 1429-1437, 2011.

GETTER, K. L., ROWE, D. B., ROBERTSON, G. P., CREGG, B. M., & ANDRESEN, J. A. Sequestration potential of extensive green roofs. **Environmental science & technology**, v. 43, n. 19, p. 7564-7570, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, v. 5, p. 61, 2002.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GOULART, S.V.G; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Universidade Federal de Santa Catarina, Núcleo de Pesquisa em Construção, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 1998.

GRAF, H. F. **Transmitância térmica & energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721**. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba, 2011.

GRAF, H. F.; MARCOS, M. H. C.; TAVARES, S. F.; SCHEER, S. **Estudo de Viabilidade do uso de BIM para mensurar impactos ambientais de edificações por energia incorporada e CO2 incorporado**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XIV, 2012 Juiz de Fora, Anais, Juiz de Fora, 2012.

GRAF, H. F.; TAVARES, S. F. **Conforto térmico para a cidade de Curitiba: Faixa de temperaturas de conforto adaptativo**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XIV, 2012 Juiz de Fora, Anais, Juiz de Fora, 2012.

HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of carbon & energy: ICE**. Bath, UK: Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, 2008

HUMPHREYS, M. Outdoor temperatures and comfort indoors. **Batiment International, Building Research and Practice**, v. 6, n. 2, p. 92-92, 1978.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Cidades. **Infográficos: evolução populacional e pirâmide etária**. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/populacao.php?lang=&codmun=320520&search=espírito-santo|vila-velha|infogr%20ficos:-evolu%27%2E3o-populacional-e-pir%20mide-et%20ria>> Acesso em 18/07/2014.

IFIAS, International Federation of Institutes for Advanced Study. **Energy Analysis Workshop on Methodology and Convention**. Workshop Report N° 6. Stockholm, Sweden. 1974.

KÖHLER, M. Green facades—a view back and some visions. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p. 423-436, 2008.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética**. São Paulo: PW Editores, 1997.

LIMA JUNIOR, J. E. **Avaliação da influência dos sistemas de fachadas vivas no desempenho térmico de paredes opacas em Curitiba**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba, 2014.

LOBO, F.H.R. **Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná**. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba, 2010.

LOH, S; STAV, Y. Green a city grow a wall. In: **Proceedings of the Subtropical Cities 2008 Conference: From Fault-lines to Sight-lines: Subtropical Urbanism in 20-20**. Centre for Subtropical Design, Queensland University of Technology, 2008. p. 1-9.

MARCHESINI, I. A. **Análise da influência do mobiliário em MDF no ciclo de vida energético da edificação: um estudo sobre a energia embutida no mobiliário de escritórios comerciais**. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba, 2013.

MAZZAROTTO, A. C. E. K. **Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba: verificação computacional de desempenho comparativo com soluções convencionais**. Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba, 2011.

MITHRARATNE, N; VALE, B. Life cycle analysis model for New Zealand houses. **Building and Environment** 39 (2004) 483 – 492. 2004.

MONICH, C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema Wood frame do estado do Paraná**. Dissertação – Universidade Federal Dio Paraná, Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba, 2012.

MORELLI, D.D.O; LABAKI, L.C. Green Walls: Environmental Quality in Buildings. **XXVI Conference in Passive and Low Energy Architecture**. Quebec. 2009

MYRANS, K. **Comparative energy and carbon assessment of three green technologies for a Toronto Roof**. Dissertação de Mestrado. University of Toronto, 2009.

NAHUZ, M. A. R. (Coord.), Vários autores. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2013.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and buildings**, v. 34, n. 6, p. 563-572, 2002.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot–humid tropics. **Energy and Buildings**, v. 36, n. 7, p. 628-637, 2004.

OBA, M.M. **O projeto de readequação visando a construção mais sustentável no edifício moderno**: Estudo de caso sobre o Centro Politécnico da UFPR. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Programa de pós-graduação em engenharia de construção civil. Curitiba, 2014.

OLIVEIRA, L. B; ALVES, A. B. M; LIMA JUNIOR, J. E; TAVARES, S.F; **Comparativo de energia embutida em diferentes composições de fachadas vivas**. Artigo aceito para publicação no XV Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído - ENTAC. Maceió, 2014

OROSA, J. A.; OLIVEIRA, A. C. A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models. **Renewable Energy**, v. 36, n. 3, p. 951-956, 2011.

OTTELÉ, M; PERINI, K; FRAAIJ, A.L.A.; HAAS, E.M; RAITERI, R. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3419-3429, 2011.

OTTELÉ, M; VAN BOHEMEN, H. D; FRAAIJ, A. L. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 2, p. 154-162, 2010.

PAPADAKIS, G.; TSAMIS, P.; KYRITSIS, S. An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 8, p. 831-836, 2001.

PAULSEN, J. S; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”, **Energy and buildings** 57(2013) 95-102. 2013.

PERINI, K; OTTELÉ, M; HAAS, E.M; RAITERI, R. Greening the building envelope, façade greening and living wall systems. **Open Journal of Ecology**, v. 1, n. 01, p. 1, 2011.

PROCEL. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia. Disponível em: < <http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS05070313PTBRIE.htm>>. Acesso em 29/03/2015.

PULSELLI, R. M. et al. Energy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems. **Energy and Buildings**, v. 73, p. 200-211, 2014.

RAMESH, T.; PRAKASH, R; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592-1600, 2010.

ROBSON, C. **Real world research: a resource for social scientists and practitioner-researchers**. 2.ed. Oxford, Blackwell: 2002.

RODRIGUES, C. R. B. et al. Sistemas Computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do Produto (ACV). **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Rio de Janeiro, 2008.

SANTOS, A. P. L.; MATKOVSKI, A.; VAZ, S. A comparison of the environmental impact generated by the disposal of a light bulb through the life cycle analysis of the product. **International Journal of Civil Engineering and Building Materials (IJCEBM)**, 2013.

SCHMID, A. L.; TAVARES, S. F.; ERRERA, M. R.; PAES, N. C.; LIMA, C. A. **Modelagem do consumo de energia na cidade de Curitiba**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, XIV, 2012 Juiz de Fora, Anais, Juiz de Fora, 2012.

SCHMID, A. L; GRAF, H. F. Validation of Mestre Building Simulation System according to Best-test Multi-Zone, Non-Airflow, in Delphth diagnostic cases. **Anais do Building Simulation**. Sydney, 2011.

SHEWEKA, S.; MAGDY, A. N. The living walls as an approach for a healthy urban environment. **Energy Procedia**, v. 6, p. 592-599, 2011.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Custo Unitário Básico (CUB/m<sup>2</sup>): principais aspectos**. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2007.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Florianópolis. 2006.

TRELOAR, G. J. **Comprehensive embodied energy analysis framework**. Deakin University, 1998.

TRELOAR, G. J. et al. An analysis of the embodied energy of office buildings by height. **Facilities**, v. 19, n. 5/6, p. 204-214, 2001.

VALESAN, M. **Percepção ambiental de moradores de edificações residenciais com Pele-Verde em Porto Alegre**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre. 2009.

VALESAN, M; FEDRIZZI, B; SATTLER, M.A. Vantagens e desvantagens da utilização de peles-verdes em edificações residenciais em Porto Alegre segundo seus moradores. **Ambiente Construído**, v. 90035, p. 190, 2010.

WONG, Nyuk Hien et al. Energy simulation of vertical greenery systems. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 12, p. 1401-1408, 2009.

WONG, Nyuk Hien et al. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. **Building and environment**, v. 45, n. 3, p. 663-672, 2010.

YIN, R. **Estudo de caso - planejamento e métodos**. 2ª ed. Porto Alegre, Bookman: 2001.



## APÊNDICE A – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Norte

Dados da zona FV Norte										
Medidas										
Comprimento	1									
Largura	0,16									
Altura	1									
Área	0,16									
Materiais		alvenaria	ar	madeira	lona	feltro	substrato	plantas	reboco	total
Área de superfície	m <sup>2</sup>	1,00	1	0,1	1	1	0,3	1	1	
Espessura	m	0,09	0,09	0,02	0,001	0,004	0,05	0,05	0,01	0,3150
Condutividade térmica	W/m°C	0,72	0,02	0,15	0,03	0,19	0,5		0,72	
Calor específico	J/Kg°C	837,00	1000	2100	1380	837	3650		837	
Massa específica	Kg/m <sup>3</sup>	1922,00	1,2	500	25	960	1100		1858	
Difusividade térmica	m <sup>2</sup> /s	4,47562 x10 <sup>-7</sup>	1,7 x10 <sup>-7</sup>	1,43 x10 <sup>-7</sup>	8,7 x10 <sup>-7</sup>	2,3646 x10 <sup>-7</sup>	1,24533 x10 <sup>-7</sup>		4,62979 x10 <sup>-7</sup>	
Espessura de propagação (t=1h)	m	0,07	0,09	0,02	0,001	0,004	0,037529123	-	0,01	
Propriedades da FV										
Massa	Kg	172,98	0,108	1	0,025	3,84	16,5	0	18,58	676,2952
Resistência térmica	°C/W	0,10	0,16667		0,03333	0,02105263	0,022517474	0,04348	0,138888889	0,5248
Calor específico	kg/kg.K	75,33	90	4,2	1,38	3,348	54,75	0	8,37	753,5810
Capacidade térmica	J/°C	144784,26	108	2100	34,5	3214,08	60225		15551,46	226017,3
			192							
Condutividade térmica equivalente									0,6002839	
Características da ocupação										
Temp. externa média	°C	16,00	12	17,25	22,5					
Ampl, Térmica diária	°C	16,30								
Iluminação	W	40,00								
Infiltração de ar	m <sup>3</sup> /s	0,00								

## Características do ciclo diário

	t (h)	Tf (°C)	V (m <sup>3</sup> /s)	q <sub>interno</sub> (W)	q <sub>sol</sub> (W)	Td (°C) sim.	Tcavidade(°C) sim.	Tf med.	Tcavidade med.	Td med.
	0	11,9	0,0022	40	0	22,2	13,7	13,6	13,7	22,2
	1	10,2	0,0022	40	0	22,2	13,5	13,2	13,5	22,3
	2	8,9	0,0022	40	0	22,2	13,4	13,2	13,3	22,3
	3	8,1	0,0022	40	0	22,2	13,3	13,1	13,4	22,3
	4	7,9	0,0022	40	0	22,1	13,1	12,9	13,0	22,2
	5	8,1	0,0022	40	0	22,0	12,2	10,9	11,4	22,0
	6	8,9	0,0022	40	0	21,7	11,0	9,3	10,6	21,7
	7	10,2	0,0022	40	0	21,5	10,7	10,4	11,0	21,6
	8	11,9	0,0022	40	0	21,5	11,4	12,4	12,4	21,2
	9	13,9	0,0022	40	0	21,7	12,9	14,9	14,1	21,1
	10	16,0	0,0022	40	0	21,9	14,6	16,9	15,9	21,6
	11	18,1	0,0022	40	0	22,2	15,6	17,0	16,9	22,2
	12	20,1	0,0022	40	0	22,9	19,3	24,5	19,8	23,0
	13	21,7	0,0022	40	0	23,6	21,5	24,5	21,1	24,3
	14	23,0	0,0022	40	0	24,4	23,2	25,6	21,8	25,2
	15	23,9	0,0022	40	0	25,0	23,8	24,6	23,8	26,1
	16	24,1	0,0022	40	0	25,5	23,8	23,9	21,8	26,9
	17	23,9	0,0022	40	0	25,7	21,9	19,3	19,1	27,4
	18	23,1	0,0022	40	0	25,7	19,8	16,7	17,3	27,4
	19	21,8	0,0022	40	0	25,5	17,7	14,7	15,5	27,0
	20	20,1	0,0022	40	0	25,3	16,1	13,9	14,6	26,3
	21	18,1	0,0022	40	0	25,2	15,3	14,2	14,9	25,7
	22	16,0	0,0022	40	0	25,0	14,9	14,4	14,5	25,4
	23	13,9	0,0022	40	0	24,9	14,5	14,0	14,3	25,0
	24	12,0	0,0022	40	0	24,6	13,4	11,9	13,1	24,5

## APÊNDICE B – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Oeste

Dados da zona FV Oeste										
Medidas										
Comprimento		0,8								
Largura		0,4								
Altura		1								
Área		0,16								
Materiais		alvenaria	ar	madeira	lona	feltro	substrato	plantas	reboco	total
Área de superfície	m <sup>2</sup>	0,8	0,8	0,1	0,8	0,8	0,24	0,8	0,8	
Espessura	m	0,09	0,09	0,02	0,001	0,004	0,05	0,05	0,01	0,3150
Condutividade térmica	W/m°C	0,72	0,02	0,15	0,03	0,19	0,5		0,72	
Calor específico	J/Kg°C	837	1000	2100	1380	837	3650		837	
Massa específica	Kg/m <sup>3</sup>	1922	1,2	500	25	960	1100		1858	
Difusividade térmica	m <sup>2</sup> /s	4,48 x10 <sup>-7</sup>	1,667 x10 <sup>-7</sup>	1,4286 x10 <sup>-7</sup>	8,7 x10 <sup>-7</sup>	2,3646 x10 <sup>-7</sup>	1,24533 x10 <sup>-7</sup>		4,62979 x10 <sup>-7</sup>	
Espessura de propagação (t=1h)	m	0,071146	0,09	0,02	0,001	0,004	0,037529123	-	0,01	
Propriedades da FV										
Massa	Kg	172,98	0,108	1,25	0,025	3,84	16,5	0	18,58	677,0889
Resistência térmica	°C/W	0,123518	0,2083333		0,041667	0,02631579	0,022517474	0,054348	0,173611111	0,6503
Calor específico	kg/kg.K	75,33	90	5,25	1,38	3,348	54,75	0	8,37	756,9143
Capacidade térmica	J/°C	115827,4	86,4	2100	27,6	2571,264	48180		12441,168	181233,84
			192							
Condutividade térmica equivalente										0,6054802
Características da ocupação										
Temp. externa média	°C	16	12	17,25	22,5					
Ampl. Térmica diária	°C	16,3								
Iluminação	W	40								
Infiltração de ar	m <sup>3</sup> /s	0,0022								

## Características do ciclo diário

	t (h)	Tf (°C)	V (m³/s)	q <sub>interno</sub> (W)	q <sub>sol</sub> (W)	Td (°C) sim.	Tcavidade(°C) sim.	Tf med.	Tcavidade med.	Td med.
	0	11,9	0,0022	40	0	28,6	16,6	16,2	16,6	28,6
	1	10,2	0,0022	40	0	28,3	16,1	15,4	16,2	28,2
	2	8,9	0,0022	40	0	28,0	15,6	14,9	15,8	27,8
	3	8,1	0,0022	40	0	27,7	14,9	14,1	14,8	27,7
	4	7,9	0,0022	40	0	27,3	14,1	13,0	13,9	27,3
	5	8,1	0,0022	40	0	26,9	13,5	12,6	13,5	26,4
	6	8,9	0,0022	40	0	26,5	12,9	12,1	13,1	26,4
	7	10,2	0,0022	40	0	26,1	12,5	12,1	13,2	25,5
	8	11,9	0,0022	40	0	26,0	13,3	14,2	13,5	25
	9	13,9	0,0022	40	0	26,1	15,5	18,6	17,6	23,2
	10	16,0	0,0022	40	0	26,5	18,3	21,9	20,6	25
	11	18,1	0,0022	40	0	27,1	20,6	23,8	22,5	26,1
	12	20,1	0,0022	40	0	27,7	22,6	25,3	23,8	26,5
	13	21,7	0,0022	40	0	28,4	24,7	27,5	25,2	28
	14	23,0	0,0022	40	0	29,2	26,5	28,9	26,3	29,3
	15	23,9	0,0022	40	0	29,8	27,3	28,3	26,5	30,6
	16	24,1	0,0022	40	0	30,4	27,3	27,4	26,1	31,2
	17	23,9	0,0022	40	0	30,6	26,0	24,3	23,9	31,7
	18	23,1	0,0022	40	0	30,7	24,5	22,4	23	32,5
	19	21,8	0,0022	40	0	30,7	23,0	21,0	21,4	31,8
	20	20,1	0,0022	40	0	30,6	21,7	20,1	20,7	31,9
	21	18,1	0,0022	40	0	30,4	20,2	18,1	19,5	31,5
	22	16,0	0,0022	40	0	30,1	18,6	16,5	17,7	31,2
	23	13,9	0,0022	40	0	29,8	18,0	17,2	18,2	30,3
	24	12,0	0,0022	40	0	29,6	17,6	17,1	18,1	30,2

## APÊNDICE C – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Sul

Dados da zona FV Sul										
Medidas										
Comprimento		1								
Largura		0,16								
Altura		1								
Área		0,16								
Materiais		alvenaria	ar	madeira	lona	feltro	substrato	plantas	reboco	total
Área de superfície	m <sup>2</sup>	1	1	0,1	1	1	0,3	1	1	
Espessura	m	0,09	0,09	0,02	0,001	0,004	0,05	0,05	0,01	0,3150
Condutividade térmica	W/m°C	0,72	0,02	0,15	0,03	0,19	0,5		0,72	
Calor específico	J/Kg°C	837	1000	2100	1380	837	3650		837	
Massa específica	Kg/m <sup>3</sup>	1922	1,2	500	25	960	1100		1858	
Difusividade térmica	m <sup>2</sup> /s	4,4756 x10 <sup>-7</sup>	1,6667 x10 <sup>-7</sup>	1,4286 x10 <sup>-7</sup>	8,6956 x10 <sup>-7</sup>	2,364 x10 <sup>-7</sup>	1,24533 x10 <sup>-7</sup>		4,62979 x10 <sup>-7</sup>	
Espessura de propagação (t=1h)	m	0,071146414	0,09	0,02	0,001	0,004	0,037529123		0,01	
Propriedades da FV										
Massa	Kg	172,98	0,108	1	0,025	3,84	16,5	0	18,58	676,2952
Resistência térmica	°C/W	0,098814464	0,16666667		0,033333333	0,02105263	0,022517474	0,04347826	0,138888889	0,5248
Calor específico	kg/kg.K	75,33	90	4,2	1,38	3,348	54,75	0	8,37	753,5810
Capacidade térmica	J/°C	144784,26	108	2100	34,5	3214,08	60225		15551,46	226017,3
			192							
Condutividade térmica equivalente										0,60028388
Características da ocupação										
Temp. externa média	°C	16	12	17,25	22,5					
Ampl. Térmica diária	°C	16,3								
Iluminação	W	40								

Infiltração de ar	m³/s	0,0022								
Características do ciclo diário										
	t (h)	Tf (°C)	V (m³/s)	q <sub>interno</sub> (W)	q <sub>sol</sub> (W)	Td (°C) sim.	Tcavidade(°C) sim.	Tf med.	Tcavidade med.	Td med.
	0	11,9	0,0022	40	0	22,2	13,7	11,2	9,5	23,2
	1	10,2	0,0022	40	0	22,0	12,1	9,8	9	23,1
	2	8,9	0,0022	40	0	21,7	10,8	9,1	8,6	22,7
	3	8,1	0,0022	40	0	21,4	9,9	8,5	8,6	22,2
	4	7,9	0,0022	40	0	21,1	9,1	8,1	7,3	21,3
	5	8,1	0,0022	40	0	20,8	8,5	7,7	6,8	20,8
	6	8,9	0,0022	40	0	20,5	8,0	7,2	6,6	20,6
	7	10,2	0,0022	40	0	20,2	8,0	8,1	6,2	19,8
	8	11,9	0,0022	40	0	20,2	9,2	10,9	8,6	19,4
	9	13,9	0,0022	40	0	20,6	12,8	17,7	11,2	19,4
	10	16,0	0,0022	40	0	21,3	16,6	22,1	14,9	19,1
	11	18,1	0,0022	40	0	22,0	19,5	23,5	16,4	20,2
	12	20,1	0,0022	40	0	22,8	21,8	24,9	21	21,7
	13	21,7	0,0022	40	0	23,6	23,4	25,6	22,3	20,8
	14	23,0	0,0022	40	0	24,4	24,5	26	22,9	23,7
	15	23,9	0,0022	40	0	25,0	24,8	25,4	21,3	24,1
	16	24,1	0,0022	40	0	25,6	24,6	24,3	21,5	24,4
	17	23,9	0,0022	40	0	26,0	23,9	22,9	20,9	26,5
	18	23,1	0,0022	40	0	26,1	21,8	18,8	17,8	26,5
	19	21,8	0,0022	40	0	26,0	19,3	15,9	16,5	26,7
	20	20,1	0,0022	40	0	25,8	17,4	14,8	14,7	26,7
	21	18,1	0,0022	40	0	25,6	15,8	13,4	13,5	26
	22	16,0	0,0022	40	0	25,3	14,6	13	11,9	26,3
	23	13,9	0,0022	40	0	25,1	13,9	12,8	11,4	25,7
	24	12,0	0,0022	40	0	24,8	13,0	11,8	10,5	24,8

## APÊNDICE D – Simulação do experimento de Lima Jr.(2014) em Curitiba – Fachada Leste

Dados da zona FV Leste										
Medidas										
Comprimento		0,8								
Largura		0,4								
Altura		1								
Área		0,16								
Materiais		alvenaria	ar	madeira	lona	feltro	substrato	plantas	reboco	total
Área de superfície	m <sup>2</sup>	0,8	0,8	0,1	0,8	0,8	0,24	0,8	0,8	0,8
Espessura	m	0,09	0,09	0,02	0,001	0,004	0,05	0,05	0,01	0,3150
Condutividade térmica	W/m°C	0,72	0,02	0,15	0,03	0,19	0,5		0,72	
Calor específico	J/Kg°C	837	1000	2100	1380	837	3650		837	
Massa específica	Kg/m <sup>3</sup>	1922	1,2	500	25	960	1100		1858	
Difusividade térmica	m <sup>2</sup> /s	4,4756 x10 <sup>-7</sup>	1,67 x10 <sup>-7</sup>	1,4286 x10 <sup>-7</sup>	8,6957 x10 <sup>-7</sup>	2,3646 x10 <sup>-7</sup>	1,24533 x10 <sup>-7</sup>		4,62979 x10 <sup>-7</sup>	
Espessura de propagação(t=1h)	m	0,071146414	0,09	0,02	0,001	0,004	0,037529123	#N/D	0,01	
Propriedades da FV										
Massa	Kg	172,98	0,108	1,25	0,025	3,84	16,5	0	18,58	677,0889
Resistência térmica	°C/W	0,12351808	0,208333		0,0416667	0,026315789	0,028146842	0,054348	0,173611111	0,6559
Calor específico	kg/kg.K	75,33	90	5,25	1,38	3,348	54,75	0	8,37	756,9143
Capacidade térmica	J/°C	115827,408	86,4	2100	27,6	2571,264	48180		12441,168	181233,84
			192							
Condutividade térmica equivalente										0,60028388
Características da ocupação										
Temp. externa média	°C	16	12	17,25	22,5					
Ampl. Térmica diária	°C	16,3								
Iluminação	W	40								
Infiltração de ar	m <sup>3</sup> /s	0,0022								

Características do ciclo diário										
	t (h)	Tf (°C)	V (m <sup>3</sup> /s)	q <sub>interno</sub> (W)	q <sub>sol</sub> (W)	Td (°C) sim.	Tcavidade(°C) sim.	Tf med.	Tcavidade med.	Td med.
	0	11,9	0,0022	40	0	28,6	16,6	18,5	17,8	28,1
	1	10,2	0,0022	40	0	28,5	17,1	17,9	18,5	27,8
	2	8,9	0,0022	40	0	28,5	17,8	18,7	18,0	27,9
	3	8,1	0,0022	40	0	28,4	18,0	18,2	18,0	26,9
	4	7,9	0,0022	40	0	28,4	17,9	17,7	17,8	26,8
	5	8,1	0,0022	40	0	28,2	17,6	17,3	16,8	26,6
	6	8,9	0,0022	40	0	28,1	17,2	16,7	16,5	26,8
	7	10,2	0,0022	40	0	27,8	16,3	15,0	15,6	26,3
	8	11,9	0,0022	40	0	27,8	17,0	18,0	18,0	26,0
	9	13,9	0,0022	40	0	28,0	18,4	20,4	21,1	25,9
	10	16,0	0,0022	40	0	28,5	21,3	25,3	23,8	26,9
	11	18,1	0,0022	40	0	29,2	23,9	27,5	25,3	28,0
	12	20,1	0,0022	40	0	29,8	25,6	28,1	25,8	29,1
	13	21,7	0,0022	40	0	30,5	26,9	28,7	27,1	30,0
	14	23,0	0,0022	40	0	31,2	28,4	30,5	27,7	31,0
	15	23,9	0,0022	40	0	31,7	28,5	28,7	27,4	31,7
	16	24,1	0,0022	40	0	32,2	28,2	27,8	26,4	32,6
	17	23,9	0,0022	40	0	32,4	27,3	26,0	24,6	32,9
	18	23,1	0,0022	40	0	32,5	25,7	23,5	22,2	32,5
	19	21,8	0,0022	40	0	32,3	23,4	20,0	19,8	32,1
	20	20,1	0,0022	40	0	31,9	20,9	17,5	17,0	31,6
	21	18,1	0,0022	40	0	31,4	18,7	15,5	16,6	31,1
	22	16,0	0,0022	40	0	30,9	17,2	15,1	15,3	29,9
	23	13,9	0,0022	40	0	30,3	16,1	14,5	15,5	29,0
	24	12,0	0,0022	40	0	29,9	15,5	14,7	14,8	28,3

## APÊNDICES E, F,G,H,I, J – EM CD