

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

HELENA FERNANDA GRAF

**TRANSMITÂNCIA TÉRMICA & ENERGIA INCORPORADA NA ARQUITETURA:  
sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721**

CURITIBA

2011

---

HELENA FERNANDA GRAF

**TRANSMITÂNCIA TÉRMICA & ENERGIA INCORPORADA NA ARQUITETURA:  
sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - PPGCC, Área de Concentração: Ambiente Construído, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor Dr. Sérgio Fernando Tavares

CURITIBA

2011

---

Graf, Helena Fernanda

Transmitância térmica & energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721 / Helena Fernanda Graf. – Curitiba, 2011.

160 f.: il., grafs., tabs.

Impresso.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil.

Orientador: Sérgio Fernando Tavares

1. Arquitetura e clima. 2. Conforto térmico. 3. Arquitetura e conservação de energia. I. Tavares, Sérgio Fernando. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD: 720.472

.....

**TERMO DE APROVAÇÃO**

HELENA FERNANDA GRAF

**TRANSMITÂNCIA TÉRMICA & ENERGIA INCORPORADA NA ARQUITETURA:  
sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - PPGCC, Área de Concentração: Ambiente Construído, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, em 13 de maio de 2011, na cidade de Curitiba, para a seguinte banca examinadora:

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Lucila Chebel Labaki, Universidade Estadual de Campinas

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Aloísio Leoni Schmid, Universidade Federal do Paraná

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares, Universidade Federal do Paraná

\_\_\_\_\_

Orientador

Aprovação: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

.....

---

# **AGRADECIMENTO**

---

---

## RESUMO

Eficiência energética nas edificações é um assunto de relevância mundial. Quanto mais eficiente for uma edificação, menos energia deverá consumir e menos impacto para a produção dessa energia irá ser causado. Com o aumento da população, mais espaços urbanos foram surgindo e o meio ambiente foi cada vez mais sendo impactado para atender a demanda por edificações. Tornar o ambiente construído mais eficiente depende do adequado desenvolvimento dos projetos arquitetônicos, assim como de suas especificações, conforme as condições climáticas locais. Os ambientes precisam atingir condições de conforto para a atividade que pretendem abrigar, sendo que a baixa eficiência energética das edificações é agravada devido ao uso desnecessário da climatização artificial para atingir uma condição confortável. Uma boa forma de melhorar o desempenho de uma edificação é através do invólucro e seu isolamento térmico correto conforme o clima estudado. Quanto mais isolado o invólucro, uma quantidade maior de materiais será utilizada e, conseqüentemente, mais energia será incorporada à edificação, porém menor será a transmitância térmica. O valor de transmitância térmica das superfícies que compõem o invólucro é importante para manter a edificação na faixa de conforto térmico com a menor quantidade possível de energia para climatização dos ambientes. Partindo desses parâmetros, a pesquisa visa buscar saber se existe uma relação de equilíbrio, ou seja, um ponto ótimo entre transmitância térmica e energia incorporada para edificações residenciais usualmente construídas no Brasil, locadas em Curitiba e verificar se a tecnologia construtiva (materiais e sistemas construtivos) usada em todo o país de forma padrão atende às condições locais dessa cidade, a partir de uma faixa de conforto determinada para Curitiba. O objeto de estudo (amostra) para desenvolvimento da pesquisa é o projeto-padrão Residência Padrão Normal - R1-N da Norma Brasileira NBR 12721, a qual representa a realidade do mercado imobiliário nacional. A partir da composição de materiais dos elementos das superfícies da edificação, são calculadas a energia incorporada e a transmitância térmica por área de superfície (paredes, janela, porta, lajes, cobertura). A pesquisa trata de um experimento e manipula as espessuras das superfícies que compõem o invólucro ao multiplicá-las por 2, 3, 4 e 5, criando variações de projeto. A partir das cinco variações, são mensurados os efeitos sobre a temperatura interna da edificação (através de simulação computacional) e sobre a energia incorporada (através de cálculos). Ainda, são obtidos dados da energia de climatização necessária para adaptar o ambiente interno à faixa de conforto térmico. Como resultado, a edificação mostrou-se desfavorável ao clima de Curitiba (se sem climatização), mesmo depois de encontrado o ponto de equilíbrio, dentre as situações estudadas. Por necessitar de relevante quantidade de energia de climatização, a edificação mostrou-se inviável ambientalmente e financeiramente de ser implantada em Curitiba. Através da pesquisa, conclui-se que o uso da mesma tecnologia construtiva em um país de diversos climas não é recomendável em função do desconforto térmico ou do excessivo uso de climatização para tornar os ambientes habitáveis.

Palavras-chave: Transmitância térmica; Energia incorporada; Conforto térmico; Simulação; Arquitetura; Tecnologia construtiva; Curitiba.

---

---

## ABSTRACT

Energy efficiency in buildings is an issue of global significance. How much more efficient is a building, it will consume less energy and less impact of energy production will be caused. With increasing population, more urban areas had been appearing and the environment has been ever more being impacted to attend demand for buildings. Making the built environment more efficient depends on adequate development of architectural designs, as well as their specifications, as the local weather conditions. Indoor environments needs to achieve comfortable conditions for activity they intend to have, being that the low energy efficiency of buildings is enhanced by the unnecessary use of artificial acclimatization to achieve a comfortable condition. A good way to improve the performance of a building is through the insulation envelope as the climate studied. How much more isolated the envelope, a larger amount of material will be used and, consequently, more energy will be incorporated into the building, however, the lower the transmittance. Thermal transmittance value is important for maintaining the building in the range of thermal comfort using less amount of energy for climate control. From these parameters, the study searched know if there is an equilibrium relationship between embodied energy and thermal transmittance in a range of comfort, determined for residential buildings usually built in Brazil, in Curitiba. It verifies if the construction technology used around the country respond to local conditions in the city. Design standard Normal Residence Standard - R1-N of the Brazilian Standard NBR 12721 is used to sample. It can represent the reality of the situation nationally. The research is an experiment, manipulating the thickness of the areas that compose the envelope of the building. It measures the effects on the indoor temperature of the building through computer simulation. This study also analyzes their effects on the embodied energy. From the material composition of the elements of the surfaces of the building and changes in design, embodied energy and thermal transmittance are calculated for the original project and four other variations. Energy data are obtained from acclimatization necessary to adapt to indoor comfort range. As a simulation results the building proved to be unfavourable to the climate of Curitiba, requiring all lot of energy of acclimatization, and this, resulting in a higher average monthly expense, even in the best situation studied. The research concludes that using the same construction technology in a country of many climates is not recommended due to the thermal discomfort or excessive use of acclimatization to become the habitable environments.

Keywords: Thermal transmittance; Embodied energy; Thermal indoor comfort; Simulation; Architecture; Building technology; Curitiba.

---

---

# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>4</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>1 PROJETO DA PESQUISA.....</b>	<b>10</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
1.1.1 HIPÓTESES .....	13
1.1.2 OBJETIVO .....	14
1.1.3 JUSTIFICATIVAS .....	15
1.1.3.1 Ambiental.....	15
1.1.3.2 Social .....	16
1.1.3.3 Econômica.....	17
1.1.4 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA (MÉTODO) DE PESQUISA .....	19
1.1.4.1 Unidade de análise (escopo conceitual).....	19
1.1.4.2 Delimitação do trabalho (escopo físico) .....	20
1.1.4.3 Justificativa da escolha do objeto .....	23
1.1.4.4 Justificativa da escolha do <i>software</i> .....	25
1.1.4.5 Testes de validade.....	26
1.2 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO .....	27
1.2.1 CRONOLOGIA DA PESQUISA .....	28

---



---

<b>2</b>	<b>REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>29</b>
2.1	ENERGIA INCORPORADA.....	29
2.2	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA.....	38
2.3	CONFORTO TÉRMICO.....	39
2.3.1	MÉTODOS PARA OBTER CONFORTO TÉRMICO.....	40
2.3.2	CONFORTO TÉRMICO NA PRÁTICA.....	44
2.3.3	ZONA DE CONFORTO ≠ FAIXA DE CONFORTO.....	45
2.4	SIMULAÇÃO.....	46
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>49</b>
3.1	COMPOSIÇÃO DO INVÓLUCRO.....	51
3.1.1	CÁLCULOS PRELIMINARES.....	51
3.1.2	COMPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DA EDIFICAÇÃO.....	53
3.1.3	QUANTITATIVO DAS SUPERFÍCIES.....	57
3.2	VARIAÇÕES DE PROJETO.....	58
3.3	ENERGIA INCORPORADA.....	64
3.4	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA.....	66
3.5	FAIXA DE CONFORTO TÉRMICO.....	69
3.6	SIMULAÇÃO.....	70
3.6.1	VALIDAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> .....	70
3.6.2	CONSTRUÇÃO DO .obj.....	71
3.6.2.1	Dados iniciais.....	76
3.6.2.2	Dados de geometria.....	76
3.6.2.3	Dados de materiais.....	79
3.6.2.4	Dados de zonas térmicas.....	81
3.6.2.5	Dados climáticos.....	83

---

---

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E RELAÇÕES.....</b>	<b>86</b>
4.1	RESULTADOS DE ENERGIA INCORPORADA .....	86
4.2	RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA E ENERGIA INCORPORADA .....	89
4.3	RESULTADOS DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA.....	90
4.4	RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA.....	94
4.5	RELAÇÃO ENTRE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA E ENERGIA INCORPORADA.....	95
4.6	FAIXA DE CONFORTO TÉRMICO .....	97
4.7	RESULTADOS DE CONFORTO TÉRMICO .....	99
4.7.1	PORCENTAGEM DE HORAS EM CONFORTO E DESCONFORTO TÉRMICO.....	101
4.8	RELAÇÃO ENTRE HORAS DENTRO DA FAIXA DE CONFORTO TÉRMICO E ENERGIA INCORPORADA .....	102
4.9	RESULTADOS DA ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO .....	103
4.10	RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA E ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO.....	105
4.11	RELAÇÃO ENTRE ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO E ENERGIA INCORPORADA .....	106
4.12	RELAÇÃO ENTRE ENERGIAS E ESPESSURA – PONTO DE EQUILÍBRIO .....	109
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>116</b>
6.1	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA .....	123
<b>7</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>124</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>158</b>

---

## INTRODUÇÃO

Todas as atividades antrópicas estão ligadas às edificações e todas estas, por sua vez, também se ligam às outras, o que gera um círculo vicioso no qual quanto mais se tem, mais se precisa para manter o que se tem. A demanda energética tem aumentado e, com isso, há a necessidade de aumentar a produção de energia. Conforme o Balanço Energético Nacional 2009 (ano base 2008), o Brasil gerou 463,1 TWh de energia elétrica em 2008, resultado 4,2% superior ao do ano anterior (MME, 2009). As atividades desenvolvidas pelos usuários das edificações e das cidades necessitam de energia para poderem construir e manter estes espaços funcionando indiferentemente da fonte energética utilizada [petróleo, gás natural, energia elétrica, carvão mineral, lenha ou produtos da cana – principais fontes de energia em 2008 (MME, 2009)] e do setor [setor energético, setor comercial, setor público, setor residencial, setor agropecuário, setores de transporte e setores industriais – setores discriminados pelo Balanço Energético Nacional (2009)]. Essa é a razão pela qual a eficiência energética é um assunto de relevância. Quanto mais eficiente for um equipamento ou uma edificação, menos energia deverá consumir e menos impacto para a produção dessa energia irá ser causado, independente da matriz energética utilizada.

A preocupação mundial em fazer construções ambientalmente conscientes com a sua inserção no espaço vem do fato de que os edifícios consomem mais da metade de toda a energia usada nos países desenvolvidos e que produzem mais da metade dos gases poluentes ao meio ambiente (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006). Para que uma edificação qualquer possa ser mais eficiente utilizando menos energia, há diretrizes que determinam aspectos de sua execução.

A ação de construir faz parte das atividades antrópicas; construir até mesmo para tornar possíveis tais atividades. O ser humano vivencia o espaço construído desde seus primórdios, quando se tornou necessária sua proteção contra outros homens, animais e intempéries. E, com o passar do tempo, suas atividades foram sendo progressivamente realizadas dentro dos ambientes, fazendo crescer a necessidade de construir. Com o aumento da população, mais espaços urbanos foram surgindo e o meio ambiente foi cada vez mais sendo impactado para atender a demanda por edificações. Os espaços edificados são construídos conforme a percepção humana e segundo as necessidades dos usuários. Hoje, mais do que nunca, as pessoas procuram se agrupar em áreas urbanas pelas vantagens proporcionadas pelas cidades em termos de acesso a serviços e modos de vida. As cidades atingiram cerca de seis bilhões de habitantes em 2000, superando a população rural pela urbana em todo o mundo. Dessa forma, as atividades humanas estão cada vez mais desconectadas do local onde acontecem, especialmente nas construções. Este distanciamento do território por parte dos usuários das edificações os faz perder o contato com o meio ambiente natural e os vínculos com os materiais locais e tradições vernáculas, inclusive por não dependerem da produção própria para seu abastecimento, este garantido pelo transporte de recursos de outros locais (EDWARDS, 2008).

# 1 PROJETO DA PESQUISA

A preocupação com o descaso dos impactos causados pelas edificações e pelas cidades sobre a natureza deveria ser mais relevante. Bilhões de pessoas no mundo precisam de edificações para morar, trabalhar e sociabilizar-se. As construções disto decorrentes precisam ser acessadas através de vias e dispostas de modo organizado formando grandes áreas impermeabilizadas, que constituem os espaços urbanos. Para construir e constituir esses espaços, é necessário extrair materiais como pedras, madeiras, areia, petróleo e tantos outros que serão a matéria-prima de muitos componentes para a construção. Além do impacto causado pela extração desses materiais necessários à atividade de edificar, há a devastação no local da implantação das obras com a retirada de florestas e destruição do ambiente original. Também há a poluição pelo setor de transportes que está diretamente ligado às atividades antrópicas e seus ambientes construídos, pois para viabilizar a construção de cidades, edifícios, pontes e estradas é fundamental o transporte de materiais do local de extração ao sítio de construção e uso.

Os ambientes precisam atingir condições de conforto para a atividade que pretendem abrigar, considerando os aspectos térmico, lumínico e acústico. Para atingir esses parâmetros, projeta-se usando materiais e formas adequadas para cada caso, além do adequado uso dos sistemas que demandam energia. Tornar o ambiente construído mais eficiente depende do desenvolvimento dos projetos arquitetônico e complementares, assim como de suas especificações, conforme as condições climáticas locais e a correta observação da orientação solar, escolha dos materiais e espessura das paredes e superfícies do invólucro edificado, respeitando volumetria e características da obra. Também se faz necessário conscientizar os usuários para que utilizem o edifício da forma mais eficiente possível, de acordo com as condições do clima ao longo das

estações do ano. Ao tratar especificamente de conforto térmico, a baixa eficiência energética das edificações é agravada devido ao uso, se fossem bem projetadas, desnecessário da climatização artificial para atingir uma condição confortável. Há ainda situações de conforto que poderiam ser atingidas com mais eficiência pelo correto dimensionamento dos sistemas artificiais. Para isto, bastaria planejar a edificação com a perspectiva energética desde o início da sua concepção (GRAF, 2008).

Planejar uma construção eficiente – e inclusive uma cidade energeticamente eficiente – não se resume ao consumo de energia, mas também à quantidade desta que é gasta para tornar possível a existência desses ambientes artificiais. Este estudo relaciona-se ao chamado ciclo de vida da edificação, o qual inclui toda a energia gasta pelo edifício ao longo de sua vida útil, incluindo a energia incorporada pelos materiais utilizados.

A marca de uma sociedade bem sucedida é encontrar metas sociais com o mínimo de recursos e de poluição. As edificações já estão sendo projetadas em vista a suportar as catástrofes que vêm ocorrendo devido às mudanças climáticas, tais como intensos vendavais e furações. Essa atitude está contribuindo para que as edificações totalmente climatizadas sejam substituídas por aquelas dotadas de sistemas naturais e passivos de ventilação. Isto porque, além do alto custo energético para manter as construções climatizadas, há a liberação de calor que acaba por alterar o clima das cidades. As habitações hoje construídas devem ser concebidas para terem vida útil operacional de várias décadas, considerando os impactos das mudanças climáticas na concepção do projeto (HALLIDAY, 1997; ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006; HACKER, 2007).

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A melhor forma de melhorar o desempenho de uma edificação é através de seu invólucro (SZOKOLAY, 2010). Para tornar uma edificação mais eficiente energeticamente, há a necessidade de ajustar o nível de isolamento térmico do invólucro conforme o clima do local do estudo. O invólucro compreende as superfícies que fecham a construção e dividem os ambientes, estando em contato com o ambiente externo ou ambiente(s) vizinho(s). Quanto mais isolado o invólucro, uma quantidade maior de materiais será utilizada e, conseqüentemente, mais energia será incorporada à edificação. O nível de isolamento pode ser verificado pela transmitância térmica dos materiais que compõem as superfícies do invólucro: quanto menor a transmitância térmica, mais isolada é a superfície.

O valor de transmitância térmica correto é importante para manter a edificação na faixa de conforto térmico adotada para o objeto de estudo - edificação escolhida conforme o uso e o local - usando a menor (ou nenhuma) quantidade de energia para climatização dos ambientes. Fechamentos com diversas composições (material ou combinações de materiais em camadas) podem atingir valores iguais (ou próximos) de transmitância térmica, porém, com valores diferentes de energia incorporada. Já o mesmo material com diferentes espessuras terá mais energia incorporada para espessuras maiores e, conseqüentemente, transmitâncias térmicas menores. Mas essa relação entre energia incorporada e transmitância térmica não é necessariamente uma relação linear, pois a transmitância térmica é o inverso da composição de resistências térmicas, da qual faz parte, a resistência do ar nas superfícies (coeficiente de filme), além das resistências dos materiais.

Partindo desses parâmetros, a pesquisa visa buscar saber se existe uma relação de equilíbrio, ou seja, um ponto ótimo entre transmitância térmica e energia incorporada para edificações residenciais usualmente construídas no Brasil, localizadas em Curitiba e verificar se a tecnologia construtiva (materiais e sistemas construtivos) usada em todo o país de forma padrão atende às condições locais dessa cidade, a partir de uma faixa de conforto determinada para Curitiba.

### 1.1.1 HIPÓTESES

Um estudo em residências britânicas afirma que existe uma inversa relação não linear entre a espessura do isolamento e o total de energia usada, e uma direta relação linear entre a espessura e a energia incorporada (HARRIS, 1998). Essas informações embasam as hipóteses do presente trabalho.

Pela busca da relação existente entre a transmitância térmica e a energia incorporada do invólucro da edificação, considerando uma faixa de temperaturas de conforto para a cidade de Curitiba, tem-se como a primeira hipótese a existência de um ponto de equilíbrio entre esses fatores para a edificação padrão brasileira e sua tecnologia construtiva ao ser manipulada a espessura das superfícies e, com isso, alterada a transmitância térmica e a quantidade de energia incorporada.

Não havendo (ou não podendo ser encontrado) um ponto de equilíbrio entre transmitância térmica e energia incorporada para a situação acima citada (dentro da faixa de conforto térmico sem usar climatização artificial), define-se a segunda hipótese. Essa estabelece que usar a mesma tecnologia construtiva através de um projeto padrão nacional é inviável, ao menos, para a cidade de Curitiba – limite do estudo.



### 1.1.2 OBJETIVO

O trabalho tem por objetivo determinar as condições de equilíbrio entre transmitância térmica e energia incorporada do invólucro da edificação padrão brasileira para a cidade – e o clima – de Curitiba, tomando por amostra um projeto padrão normal, conforme a Norma NBR 12721 (Critérios para avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios) (ABNT, 2006). Entende-se por condições de equilíbrio, entre essas variáveis, quando o ponto ótimo é encontrado, obtendo-se uma relação gráfica ao final do trabalho. Entende-se por normal o projeto padrão da Norma NBR 12721 por esta assim denominado dentre os projetos padrões alto, normal e baixo residenciais existentes no país. A busca por essa condição de equilíbrio faz-se sem alteração das tecnologias construtivas nacionais e sem a introdução de novos elementos que não condizem com a realidade brasileira, porém manipulando seus componentes dentro das possibilidades existentes. Dessa forma, visa-se obter a relação entre um indicador de sustentabilidade (energia incorporada) e um possível indicador de conforto térmico (transmitância térmica), através do desempenho térmico e energético obtido com o intuito de atingir as condições de conforto, estudando, dessa forma, eficiência térmica e energética na arquitetura.

### 1.1.3 JUSTIFICATIVAS

#### 1.1.3.1 Ambiental

As edificações, com considerável destaque para o setor residencial, assim como os demais espaços construídos para abrigar as atividades antrópicas, constituem-se em um dos maiores responsáveis pelos impactos ambientais. Estes acontecem pelo mau uso dos recursos energéticos, que é feito de forma não eficiente e gerando grande emissão de gases poluentes na atmosfera. Alternativas devem ser procuradas para minimizar tais problemas, o que incide diretamente no modo de projetar e construir os ambientes artificiais. A produção e uso da maior parte dos tipos de energia necessários para a vivência nas edificações são responsáveis por grande parte da emissão dos gases poluentes na atmosfera. Da energia utilizada nas edificações, cerca de metade é consumida por residências e para estabilizar as alterações climáticas que vem ocorrendo, há a necessidade de uma redução de 60% nas emissões globais de gás carbônico nas edificações residenciais conforme um estudo feito pela Comissão sobre Poluição Ambiental no Reino Unido (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

A matriz de geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente renovável, sendo 70% de sua oferta interna gerada por hidroelétricas e, considerando as importações, aproximadamente 80% da eletricidade é originada de fontes renováveis. Esse valor nacional contrasta com a média mundial de 15.6% de geração de eletricidade por fontes renováveis. Apesar do consumo brasileiro de energia elétrica ser renovável se comparado ao padrão do consumo mundial, para atender à demanda de energia devido ao aumento de renda e ao maior número de edificações ligadas à rede elétrica, o setor residencial apresentou crescimento de 5.2% em 2008. Foram acrescentados aproximadamente 4GW à capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica no Brasil, o que resultou em 104GW. Desse acréscimo, 24% corresponderam às centrais hidráulicas e 71%

às centrais térmicas de geração de energia elétrica. Desta forma, a maior parte do acréscimo na capacidade instalada de geração de energia refere-se às centrais térmicas, as quais utilizam fontes não renováveis, sugerindo uma tendência para uso dessas fontes, o que enfatiza a importância da eficiência. No Brasil, o setor residencial representa 10% do consumo final e 22,3% do consumo de eletricidade do país (dentro setores energético, comercial, público, agropecuário, transportes e industrial) (MME, 2009), evidenciando que para a redução do consumo energético se faz necessário tornar as edificações mais eficientes atentando ao correto desenvolvimento dos projetos arquitetônicos e de suas especificações. Estes deverão estar de acordo com as condições climáticas do local a ser implantada, a começar pelo correto desenvolvimento do projeto, considerando a orientação solar, materiais e espessura das paredes e superfícies do invólucro da edificação conforme o clima do local. Os impactos causados tornam a questão da eficiência energética nos ambientes construídos – sejam eles edificações, espaços públicos ou cidades – um tema de prioritária relevância para que haja salubridade atmosférica, qualidade de vida e condições para a sobrevivência humana.

### 1.1.3.2 Social

A maior parte das atividades antrópicas é realizada em espaços construídos – edificações e cidades – de forma que 80% da vida das pessoas é passada no interior das edificações (HALLIDAY, 1997; EDWARDS, 2008). A representação das edificações na qualidade de vida é significativa, assim como nos impactos ambientais, já que estas têm grande responsabilidade na obtenção de um habitat mais sustentável. As construções fazem parte das necessidades básicas dos indivíduos e devem demonstrar uma preocupação com a saúde e bem-estar dos seus usuários, o que muitas vezes não acontece, contribuindo para a baixa qualidade da edificação. Para ter um ambiente saudável é preciso determinar as direções para a evolução do espaço construído, pois o principal objetivo deste ambiente artificial é proporcionar conforto e qualidade de vida às pessoas. Estes devem ter boa qualidade de ar interno, condições confortáveis referentes à temperatura, aeração, umidade e

despejo de efluentes e resíduos, além de água potável, transporte, comunicação, estabilidade e segurança. Igualmente, a melhoria do ambiente externo à edificação também é responsabilidade do projetista, que divide com os usuários as preocupações em relação à ineficiência, o desperdício e a poluição gerada. Junto ao cuidado com a qualidade de vida dos usuários e suas necessidades, deve haver o respeito para com o ambiente natural e a comunidade local, reduzindo os impactos causados através de um projeto ecologicamente consciente e do gerenciamento da demanda de energia, de águas e descargas, além de emissões, barulho, desperdício e impacto visual (HALLIDAY, 1997). Em um ambiente confortável, em edificações adaptadas às pessoas e às suas atividades, há uma contribuição para a sociedade de forma a apropriar a arquitetura à necessidade humana e à melhoria da qualidade de vida.

### 1.1.3.3 Econômica

Os maiores consumidores mundiais da história da energia são os 30 países desenvolvidos que compõem a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), porém, sua participação no total mundial tem diminuído ao longo do tempo. Já os países em desenvolvimento tiveram em sua participação relativa um aumento acumulado superior a 100% nas últimas décadas. Isso acontece, pois os primeiros têm uma economia relativamente estável, sem aumentos acentuados na produção industrial ou no consumo de bens que pressionam a absorção de energia, como automóveis, eletrodomésticos e eletroeletrônicos. Esses países deixam para os países em desenvolvimento as atividades que consomem muita energia como siderurgia e produção de alumínio, sem terem motivos para variações bruscas no consumo de energia. Os segundos, em desenvolvimento, estão mais sujeitos a bruscas reversões de tendências na economia, por causa da política econômica interna restritiva ou pela grande dependência do capital internacional, devido ao pequeno volume de poupança interna. A partir dos anos 90 houve vários ciclos de expansão em função do elevado volume recebido de investimentos externos das nações desenvolvidas. Na América

Latina, esse movimento foi muito perceptível no Brasil. Os países em desenvolvimento costumam apresentar variações do consumo de energia bem mais acentuadas que o crescimento do PIB em função de fatores como a existência de grande número de indústrias energointensivas, a demanda reprimida por bens, e existência de uma forte economia informal (com atividades sem registro e sem arrecadação de impostos e tributos). Como exemplos dos impactos dos ciclos de expansão econômica sobre o consumo de energia, há a contenção da inflação em 1994 pelo plano Real, permitindo o aumento abrupto de renda da população ao estabilizar a moeda. O consumo de energia expandiu 4.55% em 1994 e 6.41% em 1995 em função do aumento de vendas de eletrodomésticos e eletroeletrônicos. Em 2006 e 2007 o setor automobilístico registrou recordes de vendas de automóveis, aumentando o consumo de combustíveis, devido ao aquecimento econômico e consequente geração de empregos (ANEEL, 2009).

O uso adequado da arquitetura está ligado diretamente à racionalização de energia. Isso se faz através de um projeto arquitetônico que considera o clima para ser concebido, diminuindo o uso de sistemas artificiais de climatização para aquecer ou resfriar os espaços. Ao tornar o projeto de uma edificação mais confortável termicamente, o custo de utilização e manutenção é reduzido (FROTA; SCHIFFER, 1999). Com uma economia suscetível a momentos de instabilidade, característica de países em desenvolvimento, faz-se necessário tornar as edificações mais eficientes, sendo uma forma pela redução do consumo de energia para climatização. Uma residência que consuma muita energia em função de seu invólucro inadequado está sujeita aos altos e baixos da energia do país, estando economicamente desfavorecida.

#### 1.1.4 DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA (MÉTODO) DE PESQUISA

Esta pesquisa trata de um experimento para levantar dados quantitativos, conceituando um projeto de pesquisa fixo, conforme Robson (2006). É utilizado um projeto-padrão residencial brasileiro como modelo para o experimento, onde são manipuladas as variáveis de dimensão, mantidas as propriedades físicas dos materiais, do invólucro ligadas à transmitância térmica, ou seja, as espessuras das superfícies que compõem o invólucro da edificação – variáveis independentes – e são mensurados os efeitos sobre a variável temperatura interna da edificação – variável dependente – assim como, controlada a variável energia incorporada com o intuito de atingir um ponto de equilíbrio entre essa última e a transmitância térmica oriunda das alterações da variável independente de dimensão. Ainda, são obtidos dados quantitativos de energia de climatização, variável dependente da temperatura. Para produzir as evidências para a pesquisa durante o processo, um modelo de edificação – objeto de estudo – é utilizado para a realização do experimento através de simulação computacional pelo *software* MESTRE (2011) e é feita a análise dos dados obtidos.

##### 1.1.4.1 Unidade de análise (escopo conceitual)

A unidade de análise ou escopo conceitual do trabalho é a relação entre transmitância térmica e energia incorporada dos materiais que compõem as superfícies do invólucro da edificação em estudo e suas variações para estar dentro da faixa de conforto térmico e, nos casos em que haja a necessidade de climatização, a relação entre a energia usada para esse fim e as variáveis anteriores. A necessidade de climatização é dada pela

existência de horas fora da faixa de temperaturas de conforto, a qual é estabelecida por valores mínimos e máximos para cada mês do ano através de método definido. A energia incorporada dos materiais do invólucro da edificação é dividida entre energia incorporada obtida de fontes renováveis e energia incorporada obtida de fontes não renováveis.

#### 1.1.4.2 Delimitação do trabalho (escopo físico)

A edificação escolhida para representar a edificação residencial brasileira em Curitiba neste experimento compreende o projeto-padrão Residência Padrão Normal - R1-N da Norma Brasileira NBR 12721 (ABNT, 2006), sendo o objeto de estudo para desenvolvimento da pesquisa um dos projetos dessa norma em caráter de amostragem. A planta do projeto arquitetônico da residência é apresentada (Figura 1). Faz parte do projeto-padrão escolhido para ser o modelo de análise: três dormitórios, sendo um suíte com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda (abrigo para automóvel). A residência tem área real de 106.44 metros quadrados.

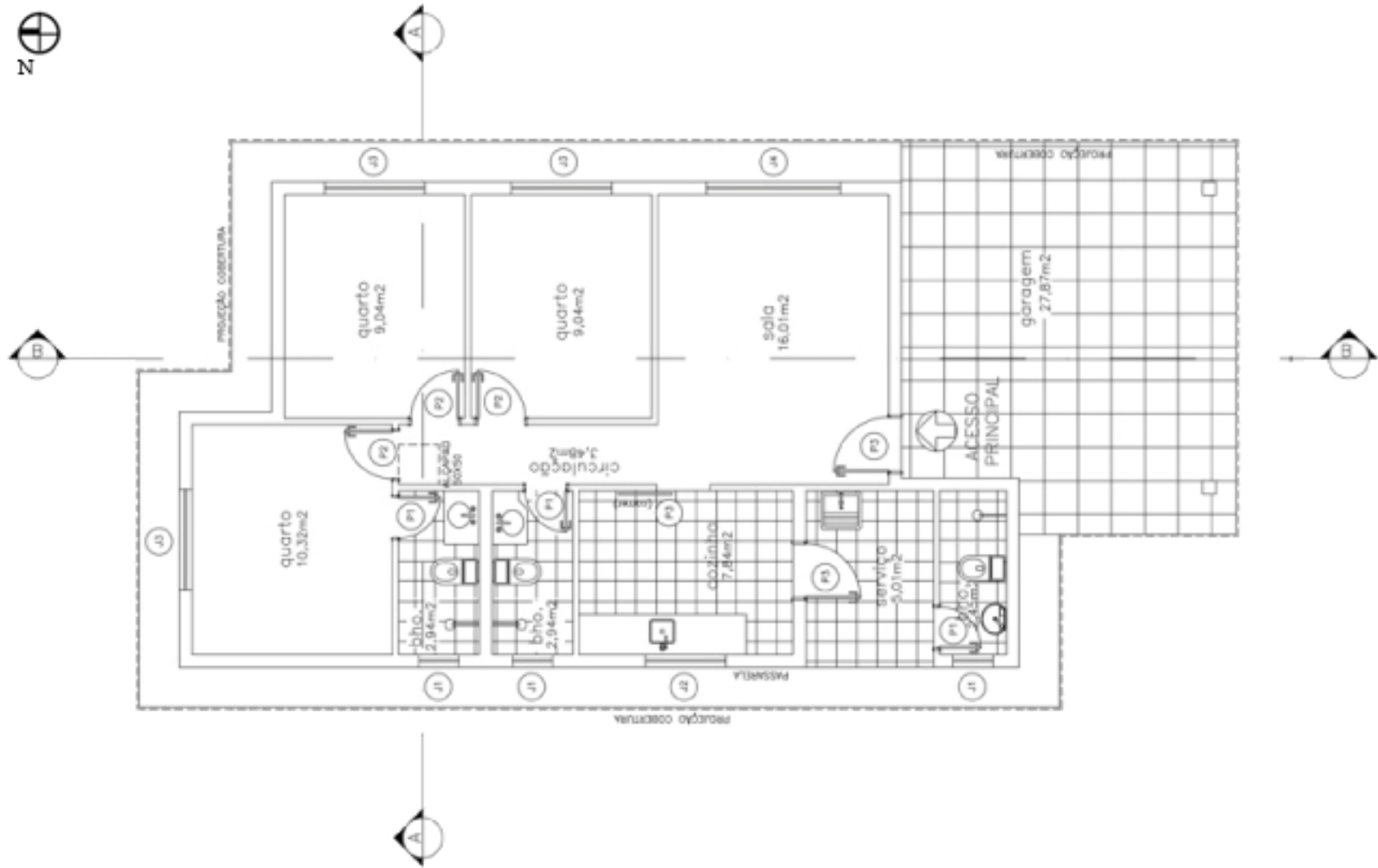


Figura 1 - Projeto da edificação padrão R1-N (modelo de estudo).  
Fonte: SINDUSCON-MG (2007).



O escopo físico é delimitado pelo invólucro da edificação, o qual é composto pelas superfícies que envolvem as zonas térmicas, as quais são formadas pelos ambientes. Fazem parte do invólucro as superfícies externas (em contato com ar) e internas, sendo laterais, superiores ou inferiores (Quadro 1). As superfícies laterais compreendem as paredes que contornam o perímetro do projeto (de uma vez), as paredes que dividem os espaços internamente (de meia vez) e as aberturas preenchidas por janelas e por portas. As superfícies superiores compreendem as lajes de forro que separam os ambientes do sótão e a cobertura que separa o sótão do ar externo. As superfícies inferiores compreendem as lajes de piso que separam os ambientes do solo.

Quadro 1 - Elementos construtivos que compõem as superfícies do invólucro da edificação R1N

Superfícies	Código do material	Elementos construtivos	Descrição
Laterais	(1)	Parede de meia-vez	Paredes menos espessas usadas para divisões internas da edificação
	(2)	Parede de uma vez	Paredes mais espessas usadas no perímetro da edificação (invólucro)
	(3)	Janela	Vidro e alumínio em aberturas acima do peitoril
	(4)	Porta	Madeira em aberturas de passagem (sem peitoril)
Superiores	(5)	Laje de forro	Laje superior entre o sótão e os cômodos
	(6)	Cobertura	Telhas e estrutura acima da laje de forro que define o sótão
Inferiores	(7)	Laje de piso	Laje entre os cômodos e o solo

Fonte: A autora, 2011.

Para fins de cálculos da energia incorporada (a qual inclui transporte e precisa de distâncias para ser calculada), a residência localiza-se na cidade de Curitiba, no estado do Paraná, o qual faz parte da região Sul do Brasil (Figura 2). Para fins de simulação térmica e energética, a localização da residência também se faz necessária ao considerar o clima para esse fim. Curitiba encontra-se na latitude 25°31' e longitude 49°11', a 910 metros de altitude (GOULART, LAMBERTS E FIRMINO, 1998).



Figura 2 - Localização da edificação R1-N  
Fonte: A autora (2010), a partir de IBGE (2011a).

#### 1.1.4.3 Justificativa da escolha do objeto

A Norma brasileira NBR 12721 (Critérios para avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios) ilustra a real situação do país quanto às práticas do mercado imobiliário – as quais são padronizadas em todo o país. Determina os custos para as edificações por metro quadrado (custo unitário básico – CUB), estabelece projetos padrões de residências brasileiras

baseados nos padrões arquitetônicos praticados atualmente no mercado imobiliário que são usados como base para o cálculo do CUB regional pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil. Os projetos-padrão são projetos selecionados para representar os diferentes tipos de edificações existentes definidas por suas características principais: mínimo de pavimentos, número de dependências por unidades, áreas equivalentes à área de custo padrão privativas das unidades autônomas, padrão de acabamento da construção, e número total de unidades. A partir dessas características, a Norma apresenta, para as residências existentes no país, três tipos de projetos-padrão: R1-A (padrão alto), R1-N (padrão normal) e R1-B (padrão baixo) (ABNT, 2006). Foi escolhido o padrão normal (anteriormente descrito no item 1.1.4.2) como amostra para o experimento por apresentar características intermediárias entre as três opções residenciais (um tipo de média entre os projetos) em relação aos: área real, quantidade de cômodos, quantidade de materiais e elementos utilizados, tamanho; além de ter uma disposição de ambientes apropriada para comportar uma família de quatro pessoas, pois, segundo o IBGE (2011b), a família brasileira média em 1999 era composta de 3.6 pessoas.

A Norma brasileira NBR 12721 (ABNT, 2006) determina que os custos sejam levantados pelos sindicatos usando os projetos-padrão selecionados e, a partir desta determinação, entende-se que em todo o país há uma padronização no modo de construção que desconsidera o clima e as particularidades regionais de cada local, uma vez que esses padrões foram definidos a partir do mercado imobiliário.

A eficiência energética e o conforto ambiental da edificação estão intimamente relacionados com o local onde será implantada a edificação. O Brasil é um país que tem uma grande área territorial, 8 514 877 quilômetros quadrados (IBGE, 2010) e, devido à sua extensão, apresenta vários climas ao longo de seu território. Tem clima predominantemente quente, com regiões de clima equatorial, tropical, semiárido, tropical atlântico, tropical de altitude; e uma pequena parcela de clima subtropical (NIMER, 1989; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004). Dentro da pequena área de clima subtropical que existe no sul do Brasil, há cidades com diferentes relevos e características próprias como altitude que determinam climas específicos. A padronização das edificações em um país com climas tão variados ao longo do seu território deixa dúvidas sobre o correto uso de técnicas construtivas regionalizadas ao clima. Diferente do resto do país, de clima predominantemente quente, e localizada na pequena

porção subtropical do Brasil, Curitiba é uma cidade de relevante interesse para estudo climático por ser a capital do Estado do Paraná e a sétima cidade mais populosa do Brasil, com 1 828 092 habitantes em 2008 (IPPUC, 2010); e por apresentar características climáticas incomuns no país: clima superúmido e temperado (IBGE, 1997). E como pode ser visto pela padronização das edificações no território nacional, não há preocupação com o isolamento adequado do envelope das edificações em Curitiba e em todo o país, as quais, apesar das diferenças climáticas, são feitas do mesmo modo.

#### 1.1.4.4 Justificativa da escolha do *software*

O Departamento de Energia dos EUA – Estados Unidos da América – apresenta em seu diretório vários *softwares* com fins de simulação energética (gratuitos ou não), de diversos países, sendo apenas um deles brasileiro, o UMIDUS, desenvolvido pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná em seu Laboratório de Sistemas Térmicos (U.S., 2011). Partindo disso, o uso de um *software* nacional, MESTRE (2011), se faz pelo incentivo às pesquisas brasileiras. Além de ser gratuito e nacional, a escolha foi feita pela disponibilidade e facilidade de aprendizado da ferramenta; e também por usar valores de radiação direta e difusa como dados de entrada para obter o desempenho térmico do modelo. Como observação, em paralelo a essa pesquisa, foi necessária a validação do *software* MESTRE, até então não submetido a testes de validação. Para poder ser aprovado nos testes e atender às demandas dessa pesquisa, uma nova versão foi finalizada em 2011 pelo desenvolvedor do *software* (no Laboratório de Ambiente Construído da Universidade Federal do Paraná, mesmo local do desenvolvimento da presente pesquisa).

#### 1.1.4.5 Testes de validade

Verifica-se a validade conforme Robson (2006). Para a validade interna, o desenvolvimento da pesquisa está de acordo com o objetivo a ser atingido – encontrar a relação entre transmitância térmica e energia incorporada. O método utilizado visa manipular dados existentes de variáveis, valores de espessura e valores de temperatura a ser atingida, combinando-os para obter a relação entre energia incorporada e transmitância térmica, assim como a comparação entre esses dados. Os dados utilizados de propriedades físicas dos materiais são oriundos de mais de uma fonte, dando credibilidade à pesquisa e ao cálculo da transmitância térmica e da energia incorporada das superfícies. Para a validade externa/confiabilidade, o experimento da pesquisa pode ser aplicado fora da situação específica estudada. O método utilizado pode ser aplicado para outras edificações, assim como, em outras localidades – generalização dos conhecimentos. Esta pesquisa pode ser repetida para a situação de objeto aqui apresentada obtendo os mesmos resultados, se necessário for sua confirmação. Para a validade do constructo, o projeto da pesquisa, seu desenvolvimento e sua proposta são atividades de domínio público e estão disponíveis para inspeção e comentários por colegas, professores e pesquisadores, tendo sido apresentados em banca - para aprovação de outros quanto aos métodos que são usados para a implementação do planejado – e abertos ao público interessado. Relaciona-se com outras pesquisas feitas anteriormente dentro do programa a qual faz parte, dando continuidade às pesquisas relacionadas. A proposta de trabalho foi feita de forma direta e simples com objetivos claros e explícitos, comunicando as intenções do trabalho e deixando os processos que foram usados para realizá-lo acessíveis. A estratégia da pesquisa foi cumprida pelo uso do *software* estipulado e pelo método de cálculos das variáveis, os quais atendem aos requisitos do experimento proposto. Utiliza-se um *software* validado segundo critérios internacionalmente aceitos.

## 1.2 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO TRABALHO

O conteúdo do presente trabalho divide-se em cinco capítulos. O primeiro, introdução, situa o leitor quanto ao assunto e contextualiza a situação energética no país e aborda o tema de eficiência energética em edificações. Também faz menção ao projeto da pesquisa. A revisão bibliográfica necessária para a compreensão dos assuntos abordados é apresentada no Capítulo 2, de forma a situar brevemente o leitor sobre os assuntos tratados no trabalho. A metodologia (Capítulo 3) e os resultados (Capítulo 4) são apresentados na ordem em que foram desenvolvidos, atendendo a um protocolo de coleta de dados pré-estabelecido. O Capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa. As referências bibliográficas são dispostas ao final do trabalho. Anexos e apêndices encontram-se ao final do documento. Tabelas e elementos extensos são apresentados em sua totalidade ou complementação em documento digital, sendo este disponibilizado mediante acesso ao *site* do Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Universidade Federal do Paraná ou solicitação direta à autora.

### 1.2.1 CRONOLOGIA DA PESQUISA

Após o ingresso à primeira fase do processo de seleção no programa de pós-graduação, este trabalho começou a ser desenvolvido na forma de Projeto de pesquisa, em agosto de 2008, junto ao curso da disciplina classificatória Métodos de Pesquisa. Em dezembro do mesmo ano, o Projeto de pesquisa do presente trabalho foi aprovado perante banca classificatória para o ingresso ao mestrado na turma de 2009. Em junho de 2010, o trabalho, ainda em fase de desenvolvimento, foi qualificado perante banca de qualificação. Em 13 de maio de 2011, a pesquisa finalizada foi apresentada e aprovada perante banca final. O curso de mestrado foi realizado com bolsa oferecida pela agência de fomento CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

## 2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

### 2.1 ENERGIA INCORPORADA

A energia incorporada é uma forma de mensurar o impacto ambiental das construções. É um fator importante para a tomada de decisões quanto à escolha de materiais (ABEYSUNDARA; BABEL; GHEEWALA, 2008), sendo um aspecto de grande relevância para atingir eficiência energética. Essa energia é considerada como toda aquela usada para a fabricação dos materiais usados na construção de um espaço, o que inclui desde a extração até seu destino final no sítio da obra. Inclui a energia usada para extrair a matéria-prima, para o processo de fabricação; e para o transporte da matéria-prima para a fábrica e o produto final para o consumidor (MENZIES, 2000 citado por ABEYSUNDARA; BABEL; GHEEWALA, 2008; TAVARES, 2006).

O tempo de vida energético da edificação é dividido em produção – incluindo todos os processos desde a extração de matéria-prima até o fim da produção na fábrica, construção, operação, manutenção e demolição (THORMARK, 2001), sendo que a energia incorporada pode chegar a 40% de toda aquela que é consumida durante a vida da edificação (tomando por base um ciclo de vida de 50 anos). Como exemplos, a fabricação de cimento gera grandes quantidades de dióxido de carbono; o alumínio consome grandes quantidades de energia elétrica em sua produção; as



cerâmicas vermelhas utilizam madeira; e aços e ferros fundidos consomem carvão mineral e também emitem gás carbônico. A energia incorporada é usada como um indicador de sustentabilidade das edificações, já que a fabricação de materiais de construção é frequentemente a principal fonte de emissões de gases poluentes (TAVARES, 2006).

Todos os materiais são processados de alguma maneira, o que impacta o meio ambiente. Uma cabana tradicional feita com materiais encontrados na região, com mínimo processamento, requer menos energia do que uma construção pré-fabricada e gera menos resíduo para ser feita. No Reino Unido, a produção de materiais de construção consome um décimo de toda a energia consumida no país. Roaf; Fuentes; Thomas (2006) fazem um estudo detalhado da Oxford *Ecohouse* quanto ao impacto de seus materiais e referem-se a outras pesquisas semelhantes, chegando a conclusões práticas para construir ou reformar. Não existem regras absolutas para a escolha dos materiais e de como o impacto ambiental deve ser avaliado, porém alguns fatores podem ser determinados: a energia necessária para produzir o material, a emissão de CO<sub>2</sub> resultante da fabricação, o impacto local de extrações (pedra, madeira, petróleo), a toxicidade, o transporte do material durante a fabricação e entrega ao sítio, o grau de poluição resultante no final de sua vida útil. São fatores influenciados por essa escolha e por decisões de projeto: localização e detalhamento dos elementos de arquitetura, manutenção, contribuição do material para reduzir o impacto da edificação como pela insolação, flexibilidade de projeto para acomodar diferentes usos ao longo do tempo, vida útil do material e possibilidade de reutilização na demolição (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

O conceito de energia incorporada pode ser a forma mais importante de avaliar o impacto ambiental de um objeto, pois descreve a quantidade de energia utilizada para produzi-lo, desde um tijolo, uma janela ou uma casa inteira, sendo essa energia oriunda de fontes não renováveis a principal razão para a degradação ambiental. Existem diversos métodos para o cálculo da energia incorporada e com diferentes valores obtidos. A energia é mensurada como energia fornecida ou primária. A fornecida se refere à quantidade que realmente foi utilizada (como a registrada em uma conta de energia elétrica). A primária é a energia usada para produzir a energia fornecida, como a combustão do gás usado para produzir eletricidade em uma usina de energia elétrica. Como os geradores não são 100% eficientes e nem as estações de transmissão da energia elétrica,

para obter cada unidade de energia fornecida, uma quantidade maior de energia primária foi consumida. No Reino Unido, essa proporção é maior para a energia elétrica, onde três unidades de energia primária são utilizadas para obter uma de fornecida. Para petróleo e gás doméstico a proporção é próxima de um. É importante também estabelecer o limite de cálculos, pois há diferença, por exemplo, em calcular a energia incorporada de uma janela de aço considerando a energia usada apenas na linha de montagem ou em calcular também a energia usada na usinagem do aço e extração do minério de ferro. Para um cálculo preciso, todos os estágios devem ser considerados, incluindo a extração de materiais brutos, transporte, processamento, energia usada na fabricação, transporte ao sítio e energia usada *in loco* para instalação. Quanto maior o número de processos pelos quais um material ou componente passar, maior sua energia incorporada e resíduos associados, sendo preferível a escolha por materiais que estejam mais perto de seu estado natural, como uma janela de madeira a uma janela de alumínio, como ceras e tintas orgânicas ou a base d'água à tintas sintéticas. O transporte, a distância percorrida, é um fator que influencia nos cálculos, pois quanto mais longe a viagem do material, mais energia de transporte será incorporada. Um granito, mesmo que natural, pode ter percorrido países, mas essas informações não estão sempre disponíveis. Mas, às vezes, um material ou equipamento mais durável é preferível, mesmo que tenha vindo de lugares longínquos, fazendo a escolha ao pesar energia de transporte e a vida útil do objeto (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Na Nova Zelândia, a energia usada em uma edificação típica ao longo de 50 anos é igual a quatro vezes a energia incorporada à sua estrutura. Essa comparação direta entre energia em uso e energia incorporada não é muito útil, a menos que a vida útil da casa seja conhecida, assim como a necessidade de manutenção e o estado da edificação ao final da vida. Essa abordagem é chamada de análise de ciclo de vida e é usada para avaliar o impacto total da edificação e mostrar a importância da vida útil, pois quanto mais tempo a casa durar, menor será o impacto por seus materiais. De forma simples, divide-se a energia incorporada inicial de toda a casa por sua vida útil, considerando as manutenções. Para a maioria das edificações, os materiais que contribuem de forma significativa para a incorporação de energia são: aço, concreto, madeira, tijolos, cimento, agregados, vidro e argamassa, as quais representam grande parte da massa ou volume da edificação e podem ser determinados os valores a partir das especificações. Materiais de fontes locais reduzem a energia incorporada e as emissões pelo transporte. Em uma casa típica de paredes de

tijolo, bloco de concreto e piso de madeira, esses representam 50% e só o concreto e tijolo, 30% da energia incorporada total. Materiais em placas também têm contribuição significativa. Alguns valores do *Building Research Establishment* de 1994 são apresentados a seguir (onde, 1GJ = 278 kWh) (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Agregados naturais (1500 Kg/m <sup>3</sup> ):	0,03 a 0,12 GJ/t	ou	0,05 a 0,93 GJ/m <sup>3</sup> .
Cimento (1500 Kg/m <sup>3</sup> ):	4,3 a 7,8 GJ/t	ou	6,5 a 11,7 GJ/m <sup>3</sup> .
Tijolos (~1700 Kg/m <sup>3</sup> ):	1 a 9,4 GJ/t	ou	1,7 a 16 GJ/m <sup>3</sup> .
Madeira (pinho tratado) (~500 Kg/m <sup>3</sup> ):	0,52 a 7,1 GJ/t	ou	0,26 a 3,6 GJ/m <sup>3</sup> .
Vidro (2600 Kg/m <sup>3</sup> ):	13 a 31 GJ/t	ou	34 a 81 GJ/m <sup>3</sup> .
Aço (seções de aço) (7800 Kg/m <sup>3</sup> ):	24 a 59 GJ/t	ou	190 a 460 GJ/m <sup>3</sup> .
Argamassa (~1200 Kg/m <sup>3</sup> ):	1,1 a 6,7 GJ/t	ou	1,3 a 8 GJ/m <sup>3</sup> .

Os diversos valores para madeira mostram o impacto ambiental pelo transporte. Esses números são usados para tomar decisões estratégicas quanto à estrutura e como a casa deve ser construída. Às vezes compensa utilizar um material com mais energia incorporada em pequena quantidade se ele trazer benefícios como vencer um vão ou aumentar a vida útil de um elemento. A energia incorporada de plásticos é extremamente alta, entretanto, por estes serem resíduos da produção de petróleo, seu uso ajuda a dar um destino apropriado para esses resíduos, apesar do inconveniente de incentivar essa indústria. Os plásticos são grandes responsáveis pela emissão de toxinas e CO<sub>2</sub> na atmosfera. São usados para carpetes e tintas. O cloreto de polivinil (PVC) deve ser evitado por ter difícil descarte, mas pode ser reciclado e transformado em produtos de baixa qualidade. Os metais têm alta energia incorporada e seus processos de fabricação degradam o ambiente local com os resíduos. A maior parte descartada é reciclada pelo seu alto preço, porém, a reciclagem não é livre de impactos ao meio ambiente, pois a fundição requer muita energia e gera altas emissões de dióxido altamente tóxico pelo cloreto dos metais. Dessa forma, é melhor minimizar o uso de metais usando-os apenas em junções e fixações ou outros propósitos específicos. O aço inoxidável e o alumínio podem ser reciclados, mas impactam muito devido à sua fabricação inicial, não sendo seu uso extensivo ecológico. O chumbo também deve ser evitado por ser tóxico e pela poluição do processo de fabricação. É usado em chapas protetoras nos telhados, das quais não deve ser utilizada a água que por elas passam para os vegetais de consumo na alimentação. Antigas tintas o usavam como agente secante e deve-se ter cuidado para não inalar o seu pó ou fumaça. Já a madeira, tem excelentes credenciais ambientais: é uma fonte renovável, tem a capacidade de reduzir a quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera até a sua queima ou decomposição, e pela facilidade de trabalho. Porém, ela pode ter alta energia de transporte incorporada, podendo ser levada do Canadá ao Reino Unido, por exemplo. Outro problema em potencial é o modo de produção da madeira, se há o replantio após o corte das maduras, se as plantações comerciais têm pouca variedade de espécies não promovendo a biodiversidade. As madeiras de lei importadas para o Reino Unido, não europeias, têm grande possibilidade de serem de florestas tropicais que não sejam replantadas. As madeiras oriundas de florestas consideradas sustentáveis são certificadas pelo *Forestry Stewardship Council*, sendo apenas um pequeno percentual das disponíveis comercialmente, e difíceis de obter, sendo uma alternativa a busca por madeiras localmente produzidas ou de lugares próximos (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006).

Tavares (2006) descreve os procedimentos metodológicos para realizar a análise energética do ciclo de vida de edificações residenciais e os aplica em modelos desenvolvidos com características de edificações residenciais típicas brasileiras. A análise é dividida em três fases: energia incorporada (ou “embutida – EE”, nomenclatura usada pelo autor) inicial e energia incorporada de manutenção - chamada de fase pré-operacional - caracterizada pelo “erguimento” (termo do autor) da edificação; energia incorporada operacional de equipamentos e manutenção - chamada de fase operacional - caracterizada pelo uso e presença dos habitantes; e energia incorporada de desconstrução da edificação e transporte dos resíduos – chamada de fase pós-operacional – caracterizada pela possibilidade de reaproveitamento ou reciclagem dos materiais. A fase pré-operacional divide-se nas etapas de: energia incorporada dos materiais (prospecção, fabricação e transporte de insumos e fabricação dos materiais de construção); transporte dos materiais de construção; energia consumida por equipamentos na obra; transporte de trabalhadores até a obra; desperdício de materiais; transporte de desperdício. Os métodos de análise de energia incorporada são: análise de processo, análise estatística, análise por matrizes (insumo *versus* produto) e análise híbrida. O cálculo da energia incorporada na edificação é realizado por análise de processo, o método de matrizes para edificações brasileiras carece de referências precisas. O consumo energético no transporte de materiais (do local de disponibilidade do insumo à obra) considerou distâncias médias, as distâncias dos centros de transformação até o sítio não foram levantadas. Os materiais mais significativos são: cimento, cerâmica vermelha, aço e cerâmica de revestimento, os quais representam 80% do conteúdo energético da edificação. Dessa forma, o autor apresenta os valores desses materiais e do alumínio, por este ter alto índice de energia incorporada e por estar sendo usado cada vez mais frequentemente. Para outros materiais da construção civil, o autor procurou consolidar dados nacionais existentes e para os demais, uma média de valores internacionais é apresentada (Tabela 1). Os dados compreendem a energia incorporada dos materiais (prospecção, fabricação e transporte de insumos e fabricação dos materiais de construção).

Tabela 1- Energia embutida\*\* em materiais de construção brasileiros

Materiais	EE (MJ/kg)	EE (MJ/m <sup>3</sup> )	Materiais	EE (MJ/kg)	EE (MJ/m <sup>3</sup> )
Aço - laminado CA 50A *	30.00	235500.00	Granito - aparelhada	2.00	5400.00
Alumínio lingote *	98.20	265140.00	Lã mineral	19.00	2090.00
Alumínio anodizado	210.00	567000.00	Latão	80.00	682400.00
Alumínio reciclado - extrudado	17.30	46710.00	Madeira - aparelhada seca forno	3.50	2100.00
Areia	0.05	80.00	Madeira - aparelhada seca ar livre	0.50	300.00
Argamassa - mistura	2.10	3906.00	Madeira - laminada colada	7.50	4875.00
Borracha natural - latex	69.00	63480.00	Madeira - MDF	9.00	5850.00
Borracha sintética	135.00	160650.00	Mármore	1.00	2550.00
Brita	0.15	247.50	Placa de gesso	4.50	4500.00
Cal virgem	3.00	4500.00	Poliamida - nylon	125.00	143750.00
Cerâmica - bloco de 8 furos *	2.90	4060.00	Poliestireno expandido	112.00	4480.00
Cerâmica - branca	25.00	52075.00	Polietileno de alta densidade	95.00	90250.00
Cerâmica - revest, monoqueima *	5.10	10456.66	Polipropileno	83.80	92180.00
Cerâmica porcelanato	13.00	27300.00	Poliuretano	74.00	44400.00
Cerâmica - telha	5.40	10260.00	Solo-cimento - bloco	0.60	1020.00
Cimento Portland *	4.20	8190.00	Solvente - tolueno	67.90	74690.00
Cobre	75.00	669975.00	Telha de vidro	23.13	55512.00
Concreto - bloco de vedação	1.00	2300.00	Tinta acrílica	61.00	79300.00
Concreto simples	1.20	2760.00	Tinta óleo	98.10	127530.00
Fibra de vidro	24.00	768.00	Tinta PVA latex	65.00	84500.00
Fibrocimento - telha	6.00	9600.00	Tube - PVC	80.00	104000.00
Fio termoplástico	83.00	201690.00	Vermiculita	1.37	167.14
Gesso	4.00	5720.00	Vidro plano	18.50	46250.00

\*Pesquisa própria do autor

\*\*Nomenclatura usada pelo autor com o mesmo significado de energia incorporada

Fonte: Tavares (2006), a partir de dados de pesquisa própria, BRASIL (1982); IPT (1982); GUIMARÃES (1985); BOUSTEAD & HANCOCK (1979); ANDERSEN (1993); LAWSON (1996); BAIRD; ALCORN (1997); BLANCHARD (1998); SCHEUER; REPPE (2003).

Para a energia incorporada dos transportes dos materiais de construção civil, o autor obteve uma relação de 1.62 MJ/t/Km a partir de dados nacionais considerando o consumo energético em caminhões. As demais fases e etapas – necessárias à análise do ciclo de vida - não são revisadas, pois não cabem ao escopo deste trabalho, porém podem ser vistas no trabalho do autor (TAVARES, 2006).

Exemplos podem ser vistos nos trabalhos de Adalberth (1997a; 1997b) e de Mithraratne; Vale (2004). Ao estudar residências suecas, Adalberth (1997a; 1997b), considera a energia incorporada dos materiais de reposição alegando que a maioria das pesquisas considera a energia incorporada dos materiais para a construção das edificações e/ou a energia durante o período de uso (aquecimento de ambiente, água quente e eletricidade), desconsiderando os materiais que são repostos ao longo da vida útil da edificação. Também é considerada a energia usada no transporte para os processos de construção e demolição. Mithraratne; Vale (2004) também consideram, em seus cálculos, os equipamentos e mobiliários da edificação.

Outras pesquisas semelhantes ou relacionadas ao tema podem ser vistas nos trabalhos de Huberman; Pearlmutter (2008), Abeysundara; Babel; Gheewala (2008), Zhang *et al* (2005), Thormark (2001), Harris (1998), Fay; Treloar; Iyer-Raniga (2000), Reddy; Jagadish (2003), Alcorn; Baird (1996), Baird; Alcorn; Haslam (1997).

O aumento da energia incorporada total de uma edificação em função do acréscimo de materiais para um maior isolamento da edificação pode contribuir para um menor gasto energético ao longo da sua vida útil em sistemas de climatização. Já um aumento da energia incorporada devido ao acréscimo de materiais para o aumento das dimensões da edificação não interfere na eficiência de forma positiva, pois não estará vedando mais para economizar em climatização, mas pelo contrário, estará aumentando a área e o volume da edificação, aumentando a demanda de climatização e a energia gasta em uso. Devido a isso, é necessário um correto dimensionamento dos espaços conforme as suas atividades, sem excessos e espaços ociosos que demandam energia e não serão usados.

Um aspecto ambiental importante na edificação é o uso de materiais e o reaproveitamento destes, quando demolida a edificação. A parte reaproveitável varia para cada material da construção, sendo 90% - metal, 50% - tijolo, 20% - madeira e 10% - cimento, 0% - outros (ZHANG *et al*, 2005). Essa prática permite a redução da energia incorporada pelo uso de materiais reciclados e reutilizados, onde esse potencial de reciclagem pode ficar entre 35% e 40% da energia incorporada da edificação (THORMARK, 2001).

A origem e o tipo de energia usada para cada atividade é importante para entender os impactos causados ao meio ambiente (ABEYSUNDARA; BABEL; GHEEWALA, 2008). No Brasil, a energia incorporada pode ser de origem renovável ou não renovável (fóssil). Predomina a renovável – eletricidade oriunda de usinas hidroelétricas (80%), carvão vegetal – mas também é de grande importância a parcela de não renováveis – carvão mineral, óleo combustível, eletricidade oriunda de usinas térmicas e nucleares (20%), coque de petróleo, gás natural, outras (MME, 2009).



## 2.2 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

Transmitância térmica ou Coeficiente global de transferência de calor – símbolo:  $U$ , unidade:  $W/(m^2K)$  – é definida como o inverso da resistência térmica total. Resistência térmica total – símbolo:  $R_T$ , unidade:  $(m^2K)/W$  – é o somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa. Devem ser usados – sempre que possível – os valores obtidos por medições feitas através de ensaios normalizados para os valores de resistência, mas os valores também podem ser calculados por fórmula para cada fração homogênea de material. Para o cálculo da resistência são necessários os valores de espessura – símbolo:  $e$ , unidade:  $m$  – e condutividade térmica. Condutividade térmica – símbolo:  $\lambda$ , unidade:  $W/(mK)$  – é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de  $1 W/m^2$ , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro. Quando existe transferência de calor por condução, convecção e radiação em materiais porosos, é recomendado o uso do termo “condutividade térmica aparente”. Para a obtenção de resistências de câmaras de ar são apresentados valores específicos (ABNT, 2005).

Métodos de cálculos para a obtenção dos valores de transmitância térmica são apresentados pela norma ASHRAE SPC 142P (ASHRAE, 1998), usada na América do Norte; pela norma ISO 10077-2 (ISO, 2003), usada na Europa; por Szokolay (2010); pela norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005).

Um estudo comparativo entre os métodos de cálculos da transmitância térmica (também chamada de valor  $U$  ou fator  $U$ ) das normas ISO e ASHRAE mostrou que há pequenas discrepâncias entre os cálculos para vidros, sendo a diferença máxima encontrada pelos pesquisadores de 3%, a qual diminui a medida que a área de superfície estudada aumenta, sendo essa diferença insignificante para áreas maiores. Dessa forma, Blanusá *et al* (2007) recomendam que o método ASHRAE adote os mesmos critérios do método ISO com relação à parcela de vidros das superfícies menores.

### 2.3 CONFORTO TÉRMICO

Os ambientes construídos são feitos para abrigar as pessoas, visando serem lugares mais protegidos e confortáveis, se comparados ao ambiente externo. Ao estar protegido das condições climáticas, no espaço interno, busca-se conforto ambiental, e mais precisamente, conforto térmico. O conforto térmico pode ser caracterizado não por uma única temperatura, mas por uma faixa de temperaturas onde as pessoas possam estar confortáveis. Essa faixa encontra-se dentro de uma zona de conforto que engloba as demais variáveis que influenciam na sensação térmica. Para determinar essas temperaturas e, conseqüentemente, a faixa de conforto, diversos métodos foram estudados e aplicados ao longo dos anos para diferentes locais e condições climáticas. Conotações fisiológicas e psicológicas foram abordadas, assim como variáveis que influenciam a troca de calor entre as pessoas e o ambiente. As pesquisas para determinar as temperaturas de conforto – e estabelecer escalas – compreendem as feitas em câmaras climáticas e as feitas por aplicação de questionários a grupos de pessoas. Fanger (1972) afirmava que o mesmo estudo térmico poderia ser aplicado a qualquer lugar, pois as pessoas têm características fisiológicas iguais. Atualmente, sabe-se que existe uma diferença devido a hábitos culturais e pela aclimação. Se for perguntado a um soteropolitano, por exemplo, se ele está com frio (a 20°C, independente de outras variáveis), a resposta pode ser positiva, mas, para a mesma situação, um curitibano negaria. Essa situação ocorre devido à aclimação das pessoas aos seus locais de origem, aos quais estão adaptadas, mas também ao conforto adaptativo, o qual varia conforme o clima do local e o momento do ano (quando as temperaturas oscilam com o passar dos meses), ou seja, as pessoas tendem a se acostumar com a temperatura, variando sua faixa de conforto térmico.

### 2.3.1 MÉTODOS PARA OBTER CONFORTO TÉRMICO

Tentativas de criação de um único índice de conforto têm sido apresentadas desde o início dos anos 1900. Houghten e Yagloglou (1927) são autores da primeira proposta denominada *effective temperature*, a qual considerava os efeitos da umidade na sensação térmica. Pela história dos índices de conforto térmico, passou Bedford (1936) com a observação das condições reais (não em laboratório/câmara) e análise estatística dessas observações. Mas a preocupação com conforto térmico teve início na década de 1950 pela iniciativa dos irmãos Olgyay que realizaram estudos que consideravam dados climáticos para elaborar projetos, introduzindo o conceito de projeto bioclimático. Uma das mais importantes técnicas introduzidas pelos irmãos foi a proposta da carta bioclimática, em 1953, com a intenção de mapear a temperatura e a umidade do ambiente com respeito ao conforto térmico humano. Foram os primeiros autores a estudar zona de conforto térmico, a qual incluía isolamento térmico das roupas, radiação térmica, umidade do ar e velocidade do ar. Algumas questões de seus trabalhos foram criticadas mais tarde por Izard e Guyot (1980). A partir dessa iniciativa de Olgyay e Olgyay, autores passaram a aprimorar os conceitos de conforto ambiental. Givoni (1976) propôs sua carta bioclimática para edificações, a qual prevê as condições internas do edifício de acordo com as condições climáticas externas. A carta bioclimática de Givoni teve seu estudo baseado em uma relação linear entre amplitude térmica e pressão do ar externo de diferentes regiões. Essa carta – apresentada em 1969 – atende a mais condições climáticas quando comparada à carta bioclimática original proposta em 1953 pelos irmãos Olgyay.

Em apoio aos estudos da sensação térmica do corpo humano e das condições de conforto e desconforto, escalas foram apresentadas de forma a mensurar a sensação térmica atribuindo-as a um índice. Mahoney *et al.* (1971) desenvolveram um método de planilhas para análise climática para aplicação nos projetos de edificações, onde são registrados os dados do clima local e são fornecidos resultados para a adequação das edificações. Os parâmetros analisados compreendem uma relação entre a temperatura média anual, a média mensal de umidade relativa e os

limites confortáveis de temperatura (para dia e para noite). Se por um lado é um método simples de se aprender e utilizar, por outro apresenta limitações por adotar faixas demasiadamente largas para o conforto. Fanger (1970) apresentou o PMV (*Predicted mean vote* ou voto médio estimado) e %PPD (*Predicted percentage of dissatisfied* ou porcentagem de insatisfação estimada) com análises feitas em laboratório (câmara climática) com grupos de pessoas. Autor de diversos estudos, destacou-se por sua equação, apresentada em 1972, a qual relaciona doze variáveis com ligações ao ambiente, à pessoa e à vestimenta. Considerou fatores como a roupa e a atividade humana (1982). Mais tarde, seu método foi adaptado para a norma ISO 7730 – *Moderate thermal environments* (1994). Para determinar uma faixa de temperaturas onde se esteja em conforto térmico – temperaturas mínima e máxima para estar confortável – a norma ISO 7730 (1994) faz uso do índice PMV – *Predicted mean vote* – para determinar a sensação térmica. Esse índice foi estabelecido a partir do valor médio dos votos de mais de 1300 pessoas numa escala de sensação térmica, onde 0 é neutro, +1 é levemente quente, +2 é quente, +3 é muito quente, -1 é levemente frio, -2 é frio, -3 é muito frio. Para calcular o PMV são necessários dados relativos a roupas (clo), metabolismo/atividades (W/m<sup>2</sup>), temperatura do ar (°C), velocidade do ar (m/s), temperatura radiante (°C) e umidade relativa do ar (%).

Semelhante ao PMV, Gagge *et al.* (1972) apresentaram a DISC (*Discomfort scale* ou escala de desconforto) e a SET (*Standard effective temperature* ou temperatura efetiva padrão) e, logo em seguida, Gagge *et al.* e ASHRAE (1974) apresentaram a ET (*New effective temperature* ou nova temperatura padrão). Lotersztain e Murature (1974) consideraram as diferenças como idade, sexo, tipo de roupa, peso e comportamento metabólico.

Apesar da complexidade e relevância dos estudos feitos em câmaras, estudos externos foram necessários, pois aqueles não consideravam a adaptação ou aclimação das pessoas, afirmando que todas são fisiologicamente iguais. As pessoas se adaptam termicamente ao local onde estão (conforto adaptativo) e, ao serem feitas experiências em laboratórios para estudar e mensurar a sensação térmica, esses resultados podem ser tendenciosos, uma vez que a pessoa está condicionada à situação adaptativa de sua cidade e época (mês ou estação do ano).

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. O autor ainda apresenta diferentes equações para ambientes climatizados artificialmente e para ambientes naturais, obtendo relações curvilíneas ou lineares, conforme o caso, respectivamente. Humphreys (1978) e Auliciemes (1981; 1982) investigaram a neutralidade térmica do corpo humano e Szokolay (1987) estabeleceu o conceito de *Neutrality temperature* ( $T_n$ ) ou temperatura de neutralidade, a qual é a média entre as temperaturas do ar sob as quais as pessoas não sentem frio ou calor. A temperatura de neutralidade está intimamente ligada com hábitos culturais e aclimação, variando conforme o local e o clima e, conseqüentemente, estando relacionada com a temperatura média do ar externo. Szokolay definiu uma zona de conforto combinando efeitos de temperatura e umidade do ar. O conceito desse autor complementa os estudos de Humphreys (1978) e as equações apresentadas pelos dois autores foram muito próximas (ambas foram revisadas posteriormente). Szokolay (1986; 1990) combinou os conhecimentos anteriores de cartas bioclimáticas e propôs uma metodologia que considera a análise do clima, a reação da edificação e a reação dos ocupantes.

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". A abordagem de adaptação para o conforto térmico é baseada nos resultados das pesquisas realizadas em campo através de questionários, ou seja, utilizando as respostas obtidas pelo método *Survey*, onde as pessoas entrevistadas, em suas rotinas diárias, votam em uma escala *Comfort vote* como as usadas por ASHRAE (1992) ou por Bedford (1936). Métodos estatísticos são usados para analisar os dados. As pessoas têm uma tendência natural para adaptar-se às mudanças das condições do meio ambiente. Essa tendência natural é expressa em uma abordagem adaptativa para o conforto térmico. Baseados em evidências de diversos trabalhos, os pesquisadores afirmam que o conforto térmico em edificações naturalmente climatizadas depende da temperatura externa, e apresentaram a sua equação matemática para obter as temperaturas de conforto a partir da temperatura do ar externo. Visa obter a temperatura, ou a combinação de variáveis térmicas, as quais incluem temperaturas, umidade e velocidade do ar, mas não necessariamente adquirindo esses dados que as compõem. Essa análise é usada para prever temperaturas de conforto ou condições de conforto.

Entende-se que a pessoa esteja adaptada às condições locais e, apenas fornecendo informações de temperatura, é possível obter parâmetros que incluam as demais variáveis de forma oculta, adotando uma escala mais prática e usual. A temperatura de conforto é claramente uma função de mais do que apenas a temperatura exterior, mas, por exemplo, o isolamento do vestuário das pessoas também depende da temperatura exterior, assim como as atividades e, conseqüentemente, a taxa metabólica. O gráfico originário das temperaturas de conforto definidas pela equação de Nicol e Humphreys foi denominado como Gráfico Nicol. As temperaturas de conforto variam linearmente com respeito às temperaturas externas, podendo ser calculadas para cada mês do ano pela fórmula  $T_c = 13,5 + 0,54T_e$ , onde  $T_c$  é a temperatura de conforto e  $T_e$  é a temperatura externa calculada. A amplitude da zona de conforto, considerando que as pessoas usuárias do ambiente não podem alterar a vestimenta ou a atividade (por exemplo, em ambientes de trabalho que exigem determinado traje), nem o movimento do ar, se restringe a 4°C, sendo 2°C para baixo e 2°C para cima da linha de temperaturas obtida.

Para mais exemplos, também podem ser observadas as pesquisas de Vogt e Miller-Chagas (1970), Evans (1980), Rivero (1985). Detalhes das pesquisas realizadas, ao longo dos anos, podem ser vistas em suas fontes originais e/ou na bibliografia consultada (SZOKOLAY, 2010; ZUHAIRY; SAYIGH, 1993; GIVONI, 1969; RORIZ; BASSO, 1991; FANGER, 1972; ISO, 1994, ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006; NICOL; HUMPHREYS, 2002).

### 2.3.2 CONFORTO TÉRMICO NA PRÁTICA

Apesar do conhecimento de diversas variáveis que influenciam no conforto térmico determinando uma zona de conforto, além da temperatura do ar do ambiente, em termos práticos, uma faixa de conforto térmico – temperaturas – precisa ser estabelecida previamente a qualquer estudo que envolva desempenho térmico ou energético, sendo este último influenciado pela climatização, mesmo que de forma complementar, dos ambientes (aquecimento ou resfriamento necessários para atingir uma dada temperatura). Em muitas pesquisas, valores de temperaturas são atribuídos a *softwares* e planilhas eletrônicas com o intuito de servir de parâmetros para simulações ou cálculos, embasando trabalhos e influenciando resultados. No entanto, estas temperaturas *de conforto* têm sido adotadas, muitas vezes, de forma estimada ou intuitiva, apesar dos diversos estudos existentes desde início dos anos 1900. Muitas pesquisas apresentam cartas complexas e de enorme precisão, porém, de complicado uso quando apenas precisa-se de um parâmetro de conforto térmico a ser atingido, ou seja, um dado valor mínimo e outro máximo. Pode-se atribuir à complexidade do uso das cartas que estabelecem zonas de conforto térmico com várias variáveis o uso de valores de referência adotados aleatoriamente em projetos de edificações e pesquisas acadêmicas.

### 2.3.3 ZONA DE CONFORTO $\neq$ FAIXA DE CONFORTO

Diferente da zona de conforto térmico, a faixa de conforto térmico compreende apenas temperaturas, mesmo que não sendo uma faixa constante ao longo de um ano, mas podendo dar valores mensais ou semanais, conforme a precisão devida. Também é possível alimentar planilhas e *softwares* com temperaturas em faixa de conforto, desde que estes aceitem a entrada por mês, por exemplo, ou pelo período que for necessário, conforme a precisão desejada. A partir do desconhecimento de quais eram as temperaturas de conforto para a cidade de Curitiba, esta parte da pesquisa se fez necessária previamente às outras para a continuidade do trabalho, de forma a garantir a confiabilidade do mesmo.



## 2.4 SIMULAÇÃO

Nos anos 70, tiveram início as simulações de desempenho térmico das edificações com o uso de ferramentas computacionais. Algumas delas são os *softwares*: Blast, LESO, ESP, TRNSYS, FSEC, VisualDOE (SCHMID, 2001). Conforme Szokolay (2010), a simulação para o desempenho térmico dos edifícios tornou-se uma ferramenta para a concepção de projetos com o rápido desenvolvimento dos computadores, desde 1970. Atualmente os computadores, PCs, são mais poderosos que os primeiros *mainframes* e podem rodar sofisticados programas de simulação. Programas relativamente simples têm sido produzidos, os quais usam basicamente os cálculos do tipo estado estacionário adicionando alguns fatores de correção para aproximar o comportamento dinâmico. Como exemplo, há o QUICK e o BREDEM. Vários programas são baseados em intervalos de tempo e usam o procedimento de admitância, como o ADMIT e o ARCHIPAK. Estes analisam o desempenho térmico dinâmico, mas não simulam os diferentes fluxos de calor. Ainda, segundo o mesmo autor, alguma matemática complexa é envolvida para encontrar o atraso térmico e outras propriedades térmicas dinâmicas dos elementos do invólucro, mas, quando conhecidos, são apenas processamentos de números simples. Existem inúmeros programas que traçam o fluxo de calor hora a hora através de todos os componentes do edifício usando uma base de dados climáticos anual horária. Estes podem prever as temperaturas horárias nos interiores das edificações ou a carga de aquecimento/resfriamento necessária para manter as condições internas. Alguns vão além e simulam sistemas mecânicos, prevendo o consumo de energia para a hora, o dia, o mês, ou o ano. CHEETAH (CSIRO) tornou-se a base para o NatHERS na Austrália (*National House Energy Rating Scheme* ou Programa de Classificação Nacional de Energia) e para o AccuRate. O ENERGY10 do ENREL (*National Renewable Energy Laboratory* ou Laboratorio Nacional de Energia Renovável, no Colorado) é uma ferramenta de desenho especialmente para a energia solar passiva, mas geralmente para edifícios de baixo consumo de energia. O mais sofisticado é o ESPr da Universidade de *Strathclyde*, o qual resolve simultaneamente até 10000 equações diferentes, e é atualmente a referência europeia em programas de simulação. O mais amplamente usado é o americano DoE-2, o qual está disponível para rodar dentro do Windows, enquanto ESPr pode ser agora executado em PCs dentro do sistema

operacional LINUX. O pacote TAS da EDSL (*Environmental Design Solutions Ltd* ou Soluções de Projetos Ambientais) tem um módulo 3D de CAD completamente desenvolvido, como uma frente final para a simulação, incluindo um módulo para estudos de fluxo de ar ou CFD (*Computerrized fluid dynamics* ou dinâmica dos fluídos computadorizada). COMBINE, do programa *EU Joule*, integra um conjunto de programas CAD e de simulação, incluindo ESPr, SUPERLITE e VENT. De modo similar, o EnergyPlus americano combina DOE2, BLAST (*Buildings Load and System Thermodynamics* ou Carga de edifícios e Sistema Termodinâmico) e COMIS, um programa de fluxo de ar em múltiplas zonas (SZOKOLAY, 2010). Essas ferramentas necessitam de validação para garantir a confiabilidade da simulação, como a realizada pelo procedimento para sistemas em múltiplas zonas sem fluxo de ar do *Building Energy Simulation Tool Bestest and Diagnostic Method* da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*), pelo qual foram validados os *softwares* EnergyPlus, ESP-r, HTB2, VA114, TRNSYS-TUD, TRNSYS-16, CODYRUN, COMFIE (NEYMARK, J. & JUDKOFF, 2008). Outros exemplos de ferramentas de validação são o BuildingAdvice e o METRIX4, porém não gratuitos como o BESTEST (U.S., 2011).

No âmbito nacional, pesquisas relacionadas à área de simulação do desempenho térmico e energético de edificações tiveram início da utilização de ferramentas computacionais na década de 80, quando alguns grupos de pesquisa de universidades e institutos de pesquisa brasileiros começaram a se destacar em atividades voltadas para a melhoria da eficiência energética em edificações, por meio de simulação computacional, porém, com algumas exceções, utilizando *softwares* importados (MENDES *et al*, 2005). O programa MESTRE é um sistema brasileiro em linguagem Java para simulação do desempenho térmico de edificações em múltiplas zonas e regime transiente. O *software*, que teve sua primeira versão concluída em 2001, tem as características de trabalhar com a geometria real dos edifícios, considerando cada parede ou laje como nó de temperatura; e realizando aproximação numérica da trajetória da radiação solar (SCHMID, 2001). Faz simulação térmica ao fornecer dados de temperatura e, a partir da versão 2011, faz simulação energética ao fornecer dados para energia de climatização (aquecimento e resfriamento). Além do estudo de desempenho térmico, o *software* permite o estudo de iluminação (SCHMID, 2004) e de acústica (SCHMID, 2006) do edifício. Apresenta uma interface gráfica simples, porém funcional (Figura 3).

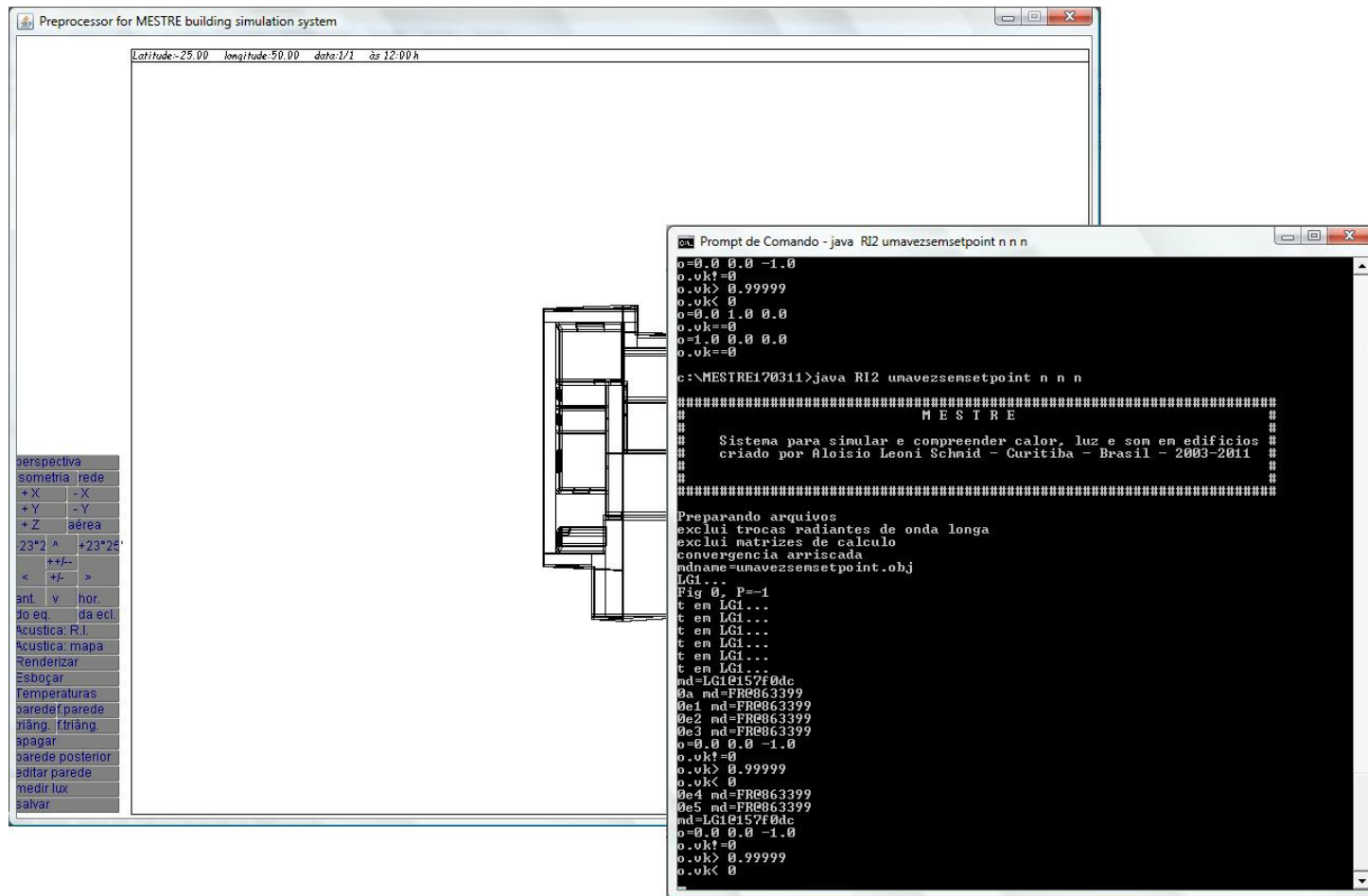


Figura 3 - Interface do *software* MESTRE 2011.  
 Fonte: A autora (2011), a partir de MESTRE (2011).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos adotados para obter os resultados. Primeiramente, é determinada a composição do invólucro da edificação projeto-padrão Residência Padrão Normal - R1-N e são apresentadas as variações de projeto (em espessura de superfícies) para a obtenção de dados comparativos. Depois são explicados os métodos de cálculos da energia incorporada das superfícies e, na sequência, da transmitância térmica. Então, é dada a metodologia para obter a faixa de temperaturas de conforto para a cidade de Curitiba e são criados os modelos de simulação. Posteriormente a isso, são explicados os procedimentos para a realização das simulações de desempenho térmico e energético para a obtenção dos resultados. O protocolo de coleta de dados é apresentado a seguir, anteriormente às explicações:

- 1) Determinação (por cálculos) da **composição** (das superfícies/ elementos) do invólucro da R1-N;
- 2) **Alterações de projeto** (em espessuras de superfícies, mantendo a tecnologia construtiva);
- 3) Proposta das **variações (R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x, R1-N-5x)**;
- 4) Cálculos e resultados de **energia incorporada** das cinco edificações (superfícies);
- 5) Cálculos e resultados de **transmitância térmica** para as cinco edificações (superfícies);
- 6) **Relação** entre **espessura** e **energia incorporada (e x EI)**;
- 7) **Relação** entre **espessura** e **transmitância térmica (e x U)**;

- 8) **Relação** entre **energia incorporada** e **transmitância térmica** ( $EI \times U$ );
- 9) Obtenção de **dados climáticos** de Curitiba;
- 10) Determinação das **temperaturas de conforto** para Curitiba;
- 11) Construção dos **modelos** de simulação térmica das cinco edificações;
- 12) Cálculos para determinação dos **materiais** para simulação;
- 13) Cálculos para determinação das **zonas térmicas** para simulação;
- 14) Montagem dos **arquivos de dados** (.obj) para **simulação térmica** das cinco edificações;
- 15) **Simulações** de desempenho **térmico** (sem climatização) para cada uma das cinco edificações;
- 16) Extração e tratamento dos **dados** das simulações de desempenho **térmico**;
- 17) Obtenção dos **resultados** da porcentagem de **horas dentro e fora da faixa de conforto térmico** para cada edificação;
- 18) **Relação** entre **horas dentro da faixa de conforto térmico** e **espessura** ( $h \times e$ );
- 19) **Relação** entre **horas dentro da faixa de conforto térmico** e **energia incorporada** ( $h \times EI$ );
- 20) Alteração dos **arquivos de dados** (.obj) para **simulação energética** (de climatização) das cinco edificações;
- 21) **Simulações** de desempenho **energético** (com climatização) para cada uma das cinco edificações;
- 22) Extração e tratamento dos **dados** das simulações de desempenho **energético**;
- 23) Obtenção dos **resultados** da **energia necessária para climatização** de cada uma das cinco edificações;
- 24) **Relação** entre **energia necessária para a climatização** e **espessura** ( $Q \times e$ );
- 25) **Relação** entre **energia necessária para a climatização** e **energia incorporada** ( $Q \times EI$ );
- 26) Obtenção do **ponto de equilíbrio** entre **U** e **EI** (confirmação da **primeira hipótese**) ou **inviabilidade** do uso da **tecnologia construtiva** para o local (confirmação da **segunda hipótese**).

### 3.1 COMPOSIÇÃO DO INVÓLUCRO

A Norma Brasileira NBR 12721 (ABNT, 2006) especifica para o projeto-padrão Residência Padrão Normal - R1-N, modelo escolhido como objeto de estudo, os materiais utilizados na edificação como um todo (fechamento de superfícies, estrutura, acabamentos e demais itens que a compõem). Dentre estes, os utilizados para elementos construtivos do invólucro da edificação (superfícies/fechamentos) foram especificados quanto à composição de materiais que os formam. A quantidade de material consumido para cada metro quadrado de superfície e valores de espessura dos elementos e suas camadas foram calculados conforme referencial bibliográfico específico para cada item apresentado nas Tabelas 3, 4 e 5.

#### 3.1.1 CÁLCULOS PRELIMINARES

Para a obtenção dos resultados das composições, foram necessários, anteriormente, cálculos complementares dos quantitativos de alguns materiais: telha de fibrocimento, chapa de aço e alumínio das janelas, vidro (Tabelas 2, 3 e 4).

Em função da ondulação da **telha de fibrocimento**, há um aumento da quantidade de material por área de superfície, não sendo possível utilizar apenas a quantidade em função da espessura de 0.0060 m como se a mesma fosse uma superfície plana. Essa compensação é feita pela quantidade de material por área, obtendo uma espessura para cálculos de 0.0073 m, a qual representa em uma superfície plana, a mesma quantidade de material de uma superfície ondulada de espessura 0.0060 m por área de cobertura. Essa compensação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Cálculo do acréscimo da quantidade de material da telha de fibrocimento em função da ondulação (porcentagem de aumento)

	Dimensão (m)	Porcentagem (%)
Comprimento linear (em projeção) da onda	0.177	100.00%
Comprimento real da onda	0.213898	120.85%
Quantidade de aumento de material da telha		20.85%
Espessura real da telha (m)		0.0060
Espessura de compensação - pela quantidade de material (m)		0.0073

Fonte: A autora, 2011.

A norma apresenta, em sua especificação, quantitativos de **esquadrias** de correr de alumínio anodizado natural e janelas de correr de chapa dobrada. Para facilitar os cálculos, as janelas de chapa dobrada, as quais representam apenas 11.02% do total de janelas serão desconsideradas e todas serão tidas como de alumínio anodizado natural (Tabela 3).

Tabela 3 - Cálculo da porcentagem de janelas de chapa e de alumínio

	Quantidade (m <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
Esquadrias de correr de alumínio anodizado natural*	0.09457	88.98%
Janela de correr de chapa dobrada*	0.01171	11.02%
Total de janelas (por m <sup>2</sup> da edificação)	0.10628	100.00%

\* Quantidade apresentada por ABNT (2006).

Fonte: A autora, 2011.

A partir da quantidade de janelas por m<sup>2</sup> da edificação (0.10628 m<sup>2</sup>, conforme a Tabela 3) e da quantidade de vidro dada pela norma (0.09062 m<sup>2</sup>), é possível obter a porcentagem de esquadria e de vidro, sendo que a área de janela da edificação é constituída por 85.27% de vidro liso transparente com espessura de 4 mm e por 14.73% de esquadria de alumínio anodizado natural de perfil de 25 mm (Tabela 4).

Tabela 4 - Cálculo da porcentagem de esquadria em relação ao vidro nas janelas

	Quantidade (m <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
Janelas**	0.10628	100.00%
Vidro liso transparente 4 mm colocado com massa*	0.09062	85.27%
Esquadrias (área da janela menos área do vidro)	0.01566	14.73%

\* Quantidade apresentada por ABNT (2006).

\*\*Quantidade calculada na Tabela 3.

Fonte: A autora, 2011.

### 3.1.2 COMPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DA EDIFICAÇÃO

Após os cálculos preliminares, foi possível montar a composição dos elementos construtivos da edificação. A composição é apresentada por elemento construtivo, ao qual é atribuído um código do material, mesmo usado em todo o trabalho para diferenciar uma superfície da outra. É chamado de código do material e não código do elemento, pois assim pode ser usado também para a simulação que necessita da entrada de dados com essa denominação. Para cada elemento são apresentadas as camadas que o compõem, tendo os componentes especificados. O detalhamento desses componentes é apresentado à parte, em tabela complementar a essa no Apêndice A. Para cada componente, é apresentada a quantidade de material consumido para cada metro quadrado da superfície do elemento. Isso é feito em função dos valores de quantitativos obtidos na norma e bibliografias específicas e das conversões feitas utilizando valores de massa específica dos materiais (aqui considerada como sinônimo de densidade devido aos seus valores praticamente idênticos). A porcentagem dos componentes e materiais nos elementos construtivos também é apresentada, assim como as espessuras, por camada e do elemento todo (Tabela 5).



Tabela 5 - Composição dos elementos construtivos da edificação (R1N)

Código do material	Elementos construtivos	Composição de materiais (camadas)	Componentes*****	Densidade (Kg/m³)****	Quantidade de consumo por m² de superfície					Espessura (m)		
					em un.	em l	em m³	em Kg	em %	Camadas	Total	
(1)	Parede de meia-vez*	Alvenaria de meia-vez (espessura = 0,09m)	Bloco cerâmico (0,09x0,19x0,19m)	1300	25.70	-	0.08	108.55	73.18	0.10587		
			Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:2:8	1900	-	-	0.0135	25.7	11.8			
		Chapisco (espessura = 0,005m)**	Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	2100	-	-	0.0050	10.5	4.7			0.00500
		Massa única (espessura = 0,01m)**	Massa única impermeável para parede externa com argamassa pré-fabricada	1900	-	-	0.0089	17.0	9.4			0.01000
		Emassamento**	Massa corrida à base de PVA	1000	-	-	0.0007	0.7	0.7			0.00070
		Pintura**	Tinta látex PVA	1300	-	0.17	0.0002	0.2	0.2			0.00017
(2)	Parede de uma vez*	Alvenaria de uma-vez (espessura = 0,19m)	Bloco cerâmico (0,09x0,19x0,19m)	1300	51.0	-	0.1657	215.4	73.6	0.20587		
			Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:2:8	1900	-	-	0.0420	79.8	18.7			0.19000
		Chapisco (espessura = 0,005m)**	Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	2100	-	-	0.0050	10.5	2.4			0.00500
		Massa única (espessura = 0,01m)**	Massa única impermeável para parede externa com argamassa pré-fabricada	1900	-	-	0.0089	17.0	4.9			0.01000
		Emassamento**	Massa corrida à base de PVA	1000	-	-	0.0007	0.7	0.3			0.00070
		Pintura**	Tinta látex PVA	1300	-	0.17	0.0002	0.2	0.1			0.00017

Continua (1)

Tabela 5 - Composição dos elementos construtivos da edificação (R1N)

Continuação (1)

Código do material	Elementos construtivos	Composição de materiais (camadas)	Componentes*****	Densidade (Kg/m³) ****	Quantidade de consumo por m² de superfície					Espessura (m)	
					em un.	em l	em m³	em Kg	em %	Camadas	Total
(3)	Janela*****	Esquadria	Alumínio anodizado natural	2700	-	-	0.0037	9.9	51.9	-	0.00400
		Vidro	Vidro 4mm	2500	-	-	0.0034	8.5	48.1	0.00400	
(4)	Porta	Pintura	Pintura esmalte acetinado fosco	1300	-	0.16	0.0002	0.2	0.5	0.00016	0.03516
		Madeira (espessura = 0,035)	Madeira compensada lisa	650	-	-	0.0350	22.8	99.5	0.03500	
(5)	Laje de forro	Argamassa cimento e areia (espessura = 0,005)	Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	2100	-	-	0.0050	10.5	4.1	0.00500	0.12187
		Impermeabilizante asfáltico	Impermeabilização de piso com três demãos de emulsão asfáltica	2300	-	-	0.0010	2.3	0.8	0.00100	
		Laje pré-fabricada comum para forro, intereixo 0,38 m, capeamento 0,02m e elemento de enchimento cerâmico 0,08m (espessura = 0,10m)	Elemento de enchimento cerâmico	1300	-	-	0.0589	76.6	65.6	0.08000	
			Intereixo	2500	-	-	0.0211	52.6			
			Capeamento	2400	-	-	0.0200	48.0			
		Chapisco (espessura = 0,005m)	Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	2100	-	-	0.0050	10.5	4.1	0.00500	
		Massa única (espessura = 0,01m)	Massa única impermeável para parede externa com argamassa pré-fabricada	1900	-	-	0.0089	17.0	8.2	0.01000	
		Emassamento	Massa corrida à base de PVA	1000	-	-	0.0007	0.7	0.6	0.00070	
Pintura	Tinta látex PVA	1300	-	0.17	0.0002	0.2	0.1	0.00017			
(6)	Cobertura***	Telha de fibrocimento ondulada	Telha de fibrocimento ondulada	1500	-	-	0.0083	12.5	45.0	0.00834	0.00834
		Estrutura de madeira	Estrutura de madeira para telha ondulada de fibrocimento, ancorada em laje ou parede	790	-	-	0.0102	8.1	55.0	-	

Continua (2)

Tabela 5 - Composição dos elementos construtivos da edificação (RIN)

Continuação (2)

Código do material	Elementos construtivos	Composição de materiais (camadas)	Componentes*****	Densidade (Kg/m³) ****	Quantidade de consumo por m² de superfície					Espessura (m)	
					em un.	em l	em m³	em Kg	em %	Camadas	Total
(7)	Laje de piso	Piso cerâmico (espessura = 0,025m)	Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:0,5:5	1900	-	-	0.0250	47.5	9.2	0.02500	0.20100
			Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa)	1500	-	-	0.0009	1.3	0.3		
			Piso cerâmico esmaltado liso brilhante	1800	11.1	-	0.0080	14.4	2.9		
		Argamassa cimento e areia (espessura = 0,005)	Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	2100	-	-	0.0050	10.5	2.5	0.00500	
		Contrapiso	Contrapiso em concreto com seixo (espessura = 0,05)	2400	-	-	0.0500	120.0	24.9	0.05000	
					-	-					
		Impermeabilizante asfáltico	Impermeabilização de piso com três demãos de emulsão asfáltica	2300	-	-	0.0010	2.3	0.5	0.00100	
		Laje pré-fabricada comum para piso ou cobertura, intereixo 0,38m, capeamento 0,04m (espessura = 0,12m)	Elemento de enchimento cerâmico	1300	-	-	0.0589	76.6	39.8	0.08000	
Intereixo	2500		-	-	0.0211	52.6					
Capeamento	2400		-	-	0.0400	96.0	19.9	0.04000			

\*As superfícies das paredes do envólucro de acabamento cerâmico (as quais representam 18% do mesmo) foram desconsideradas

\*\*Nas duas faces

\*\*\*Critério de medição pela área em projeção horizontal (PINI, 2008). Foi considerada a sobreposição de telhas (15%, segundo PINI, 2008). Não foi considerado acréscimo de 3,58% por inclinação. Foi considerado acréscimo de material pela ondulação (cálculo complementar - Tabela 1). A estrutura de madeira foi planificada.

\*\*\*\*Valores de ABNT (1980), FROTA; SCHIFFER (1999), TAVARES (2006), ABNT (2005), HOLMAN (1983), SZOKOLAY (2010), IPT (2011).

\*\*\*\*\*Não foi considerada a perda do piso por quebra (19%, segundo PINI, 2008)

\*\*\*\*\*A norma NBR 12721 (2006) apresenta em seu projeto RIN esquadrias de correr de alumínio anodizado natural (88,98% das janelas) e janelas de correr de chapa do brada (11,02% das janelas), sendo aqui consideradas todas as janelas como de alumínio anodizado natural para fins de cálculos.

\*\*\*\*\*O detalhamento dos componentes pode ser visto na tabela complementar a essa no Apêndice A.

Fonte: A autora (2011), a partir de dados de ABNT (2006), PINI (2008), ABNT (1980), GUEDES (2005), YAZIGI (2006), ABNT (2002), ABNT (1980), FROTA; SCHIFFER (1999), TAVARES (2006), ABNT (2005), HOLMAN (1983), SZOKOLAY (2010), IPT (2011).

### 3.1.3 QUANTITATIVO DAS SUPERFÍCIES

Após compostos os elementos que formam as superfícies, um quantitativo é apresentado, da onde as paredes externas, as lajes de forro e a cobertura representam a maior parte da área superficial da residência, respectivamente, 21.36%, 23.62% e 24.46%. Considerando a espessura dos elementos, as paredes externas, a lajes de forro e as lajes de piso representam a maior quantidade em volume da edificação (Tabela 6).

Tabela 6 - Quantitativo das superfícies da edificação R1-N

Código do material	Elementos construtivos	Quantidade de área de superfície (m <sup>2</sup> )*	Porcentagem por área de superfície	Espessura (m)**	Quantidade em volume (m <sup>3</sup> )	Porcentagem por volume
(1)	Parede de meia-vez	69.92	12.89%	0.10587	7.40	11.84%
(2)	Parede de uma vez	115.85	21.36%	0.20587	23.85	38.14%
(3)	Janela	11.40	2.10%	0.00400	0.05	0.07%
(4)	Porta	14.74	2.72%	0.03516	0.52	0.83%
(5)	Laje de forro	128.11	23.62%	0.12187	15.61	24.97%
(6)	Cobertura	132.63	24.46%	0.00834	1.11	1.77%
(7)	Laje de piso	69.64	12.84%	0.20100	14.00	22.38%
Total		542.28	100.00%	-	62.53	100.00%

Fonte: A autora (2011), a partir do \*projeto arquitetônico da R1-N e da \*\*Tabela 4.

Os dados de superfícies (Tabela 6) são comparados com a área real do projeto (área de piso, projeção da edificação no solo), obtido na norma NBR 12721 (ABNT, 2006) e, a partir disso, é possível obter uma relação entre a área de superfície e a área de piso da edificação, obtendo-se 5.09 m<sup>2</sup> de área de superfície para cada 1 m<sup>2</sup> de área de piso (Tabela 7).

Tabela 7 - Relação entre área de superfície e área de piso

Totais (m <sup>2</sup> )	Área de superfície/Área de piso
Área de piso*	106.44
Área de superfície**	542.28
	5,09

Fonte: A autora (2011), a partir de \*ABNT (2006) e \*\* Tabela 5.

### 3.2 VARIAÇÕES DE PROJETO

Como a edificação pode não atender às exigências térmicas para uso dos ambientes em parte ou em todo o tempo (considerando desconforto por frio e calor), são feitas alterações de projeto para estudar o comportamento térmico, através de variações no projeto original da R1-N. As alterações no projeto foram feitas na dimensão da espessura das superfícies, as quais foram, mantendo-se as mesmas composições de materiais e com isso as mesmas propriedades térmicas, duplicadas, triplicadas, quadruplicadas e quintuplicadas em espessura, sendo propostos quatro novos projetos, os quais são nomeados como: R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x e R1-N-5x, respectivamente (Figuras 4 a 7).

A partir das variações na espessura das superfícies da edificação R1-N como alternativas ao possível mau desempenho térmico e/ou energético, obteve-se os projetos. Nessas situações, principalmente nas opções de espessura de superfícies quadruplicadas e quintuplicadas, o uso dos ambientes foi inviabilizado devido à redução dos espaços pelo aumento das espessuras dos elementos. Porém, para efeitos da simulação, que visa estudar a tecnologia construtiva em questão, esse parâmetro não é condicionante. A Figura 1 é repetida anteriormente às Figuras 4 a 7 para permitir comparação com os novos projetos.

Os projetos criados a partir da alteração do projeto R1-N permitem estudar o comportamento térmico e energético na cidade de Curitiba para a edificação padrão brasileira – objeto de estudo – caso fossem apenas alteradas as espessuras das superfícies do invólucro da edificação, mantendo as técnicas construtivas nacionais, usando os mesmo materiais. Nesse estudo não são feitas substituições de materiais, pois isso descaracterizaria a tipologia construtiva do país.

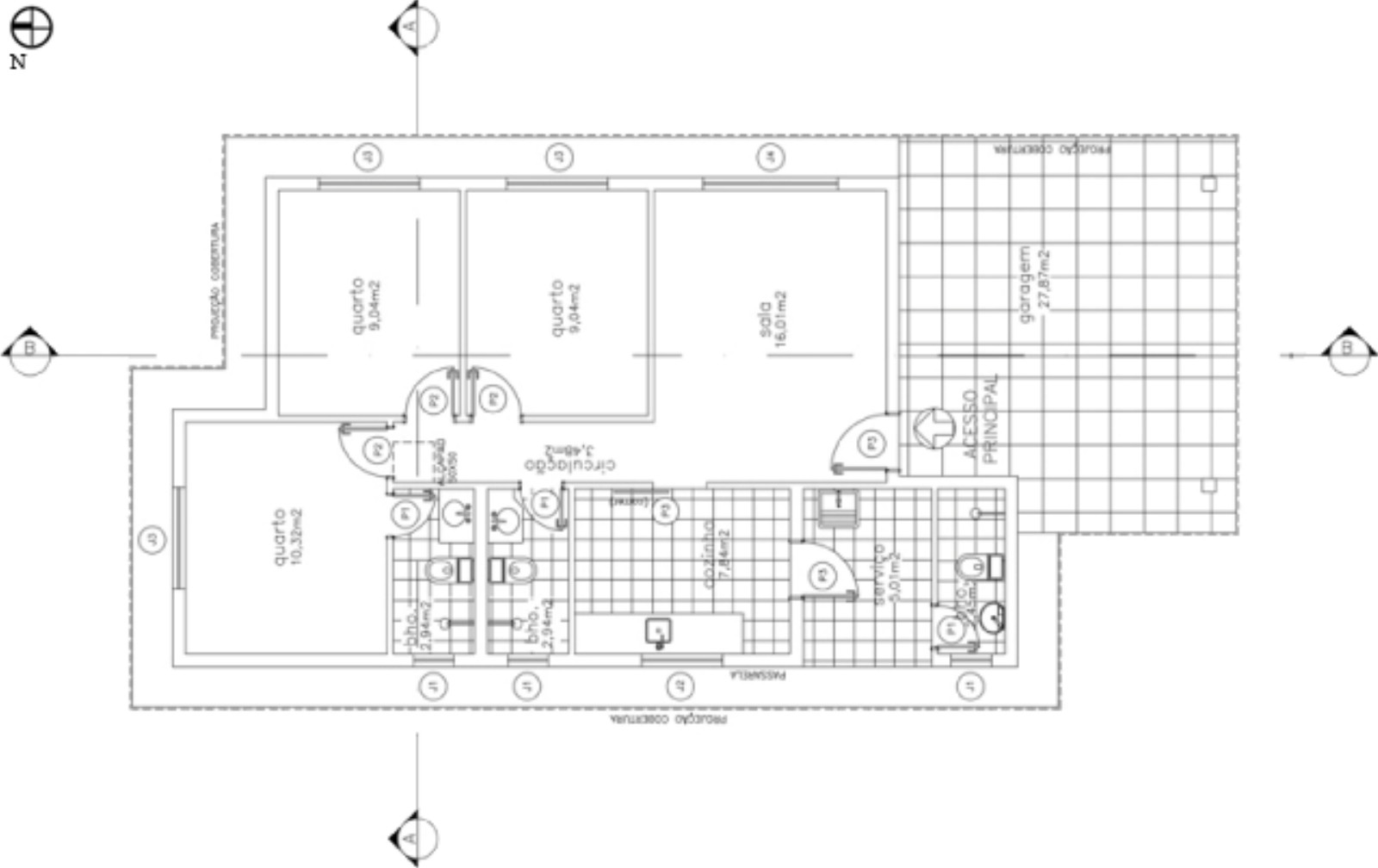


Figura 1 - Projeto da edificação padrão R1-N (modelo de estudo).  
Fonte: SINDUSCON-MG (2007).

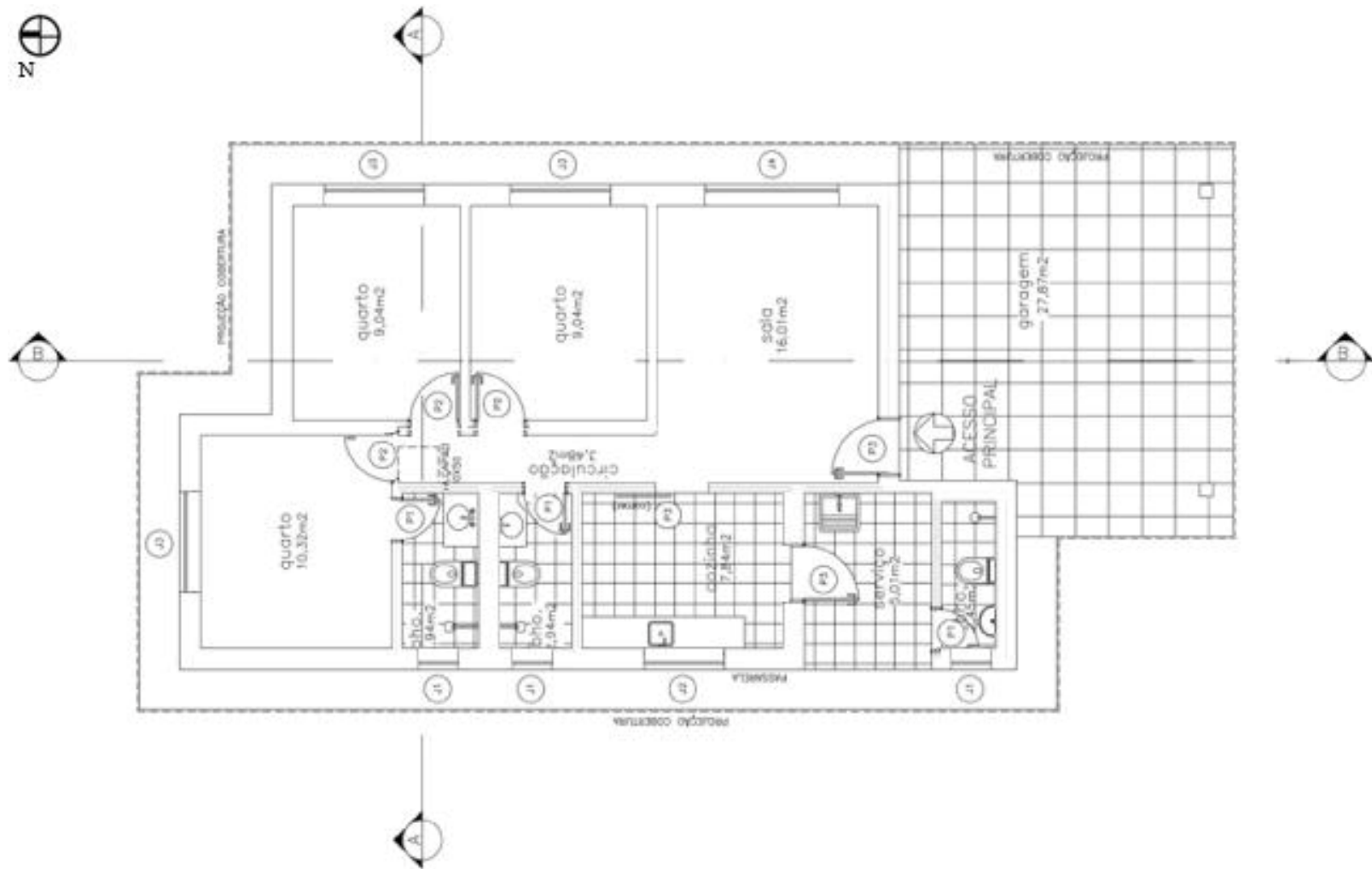


Figura 4 - Projeto R1-N -2x

Fonte: A autora (2011), adaptado de SINDUSCON-MG (2007).

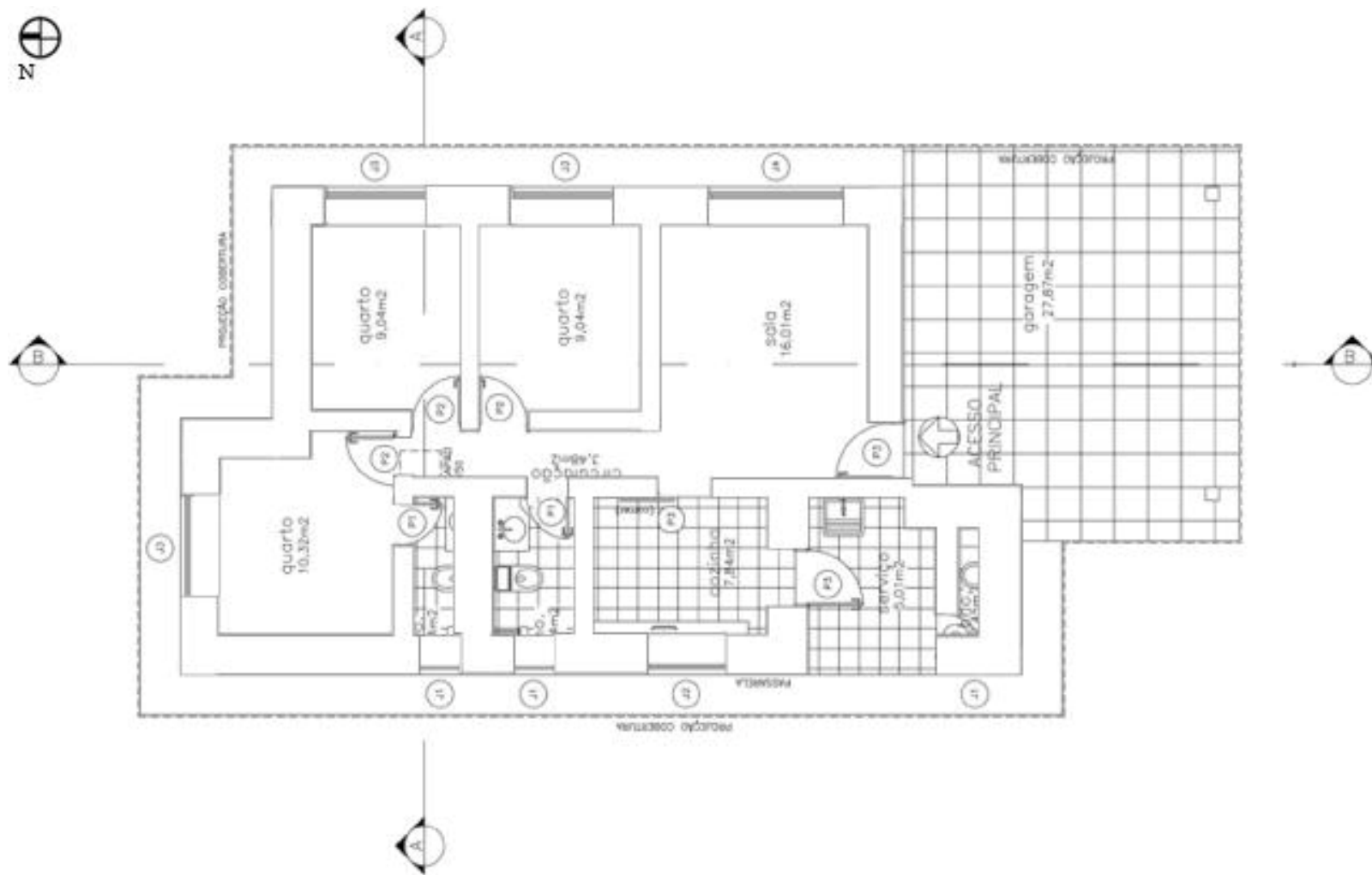


Figura 5 - Projeto R1-N -3x

Fonte: A autora (2011), adaptado de SINDUSCON-MG (2007).



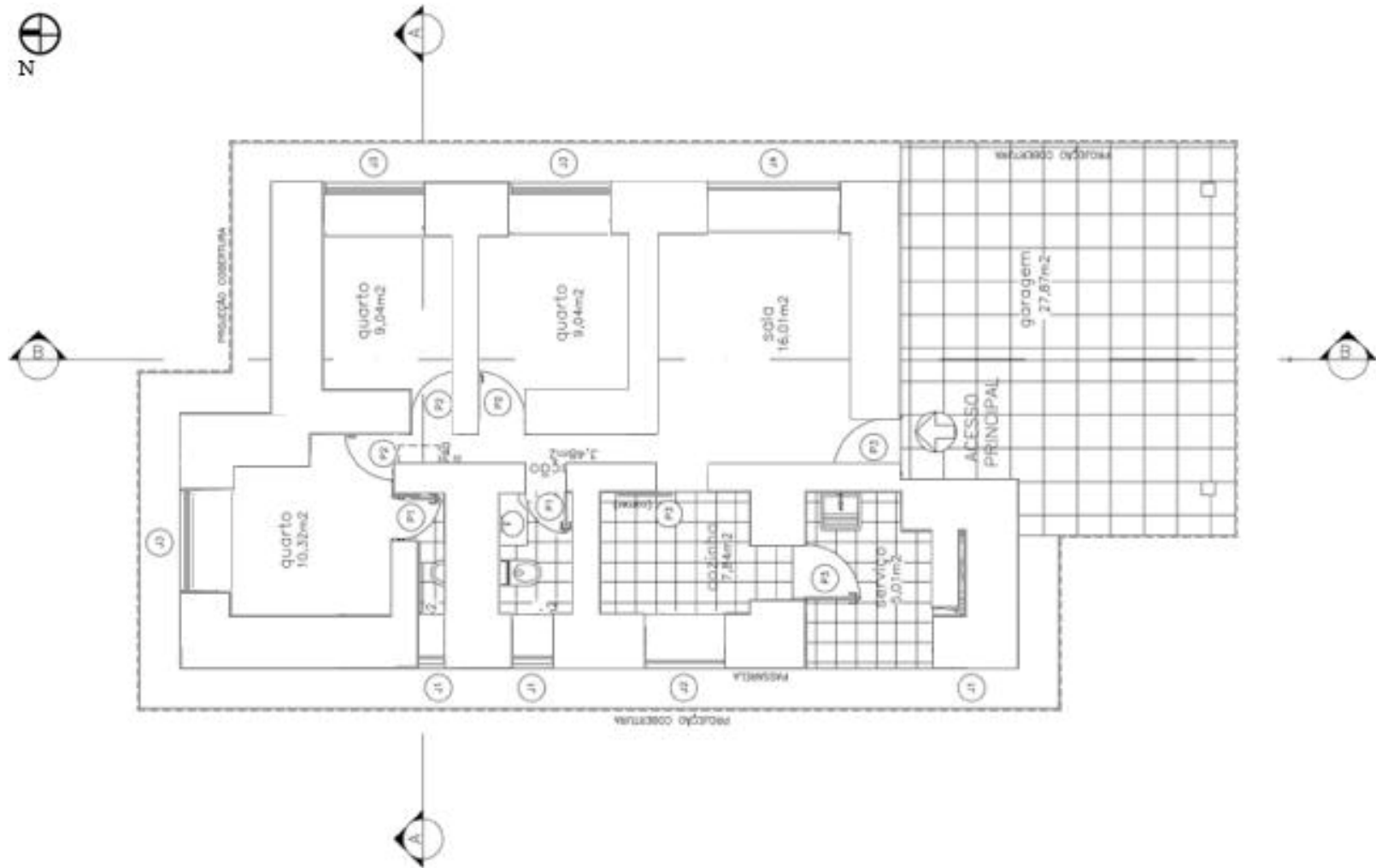


Figura 6 - Projeto R1-N -4x  
 Fonte: A autora (2011), adaptado de SINDUSCON-MG (2007).

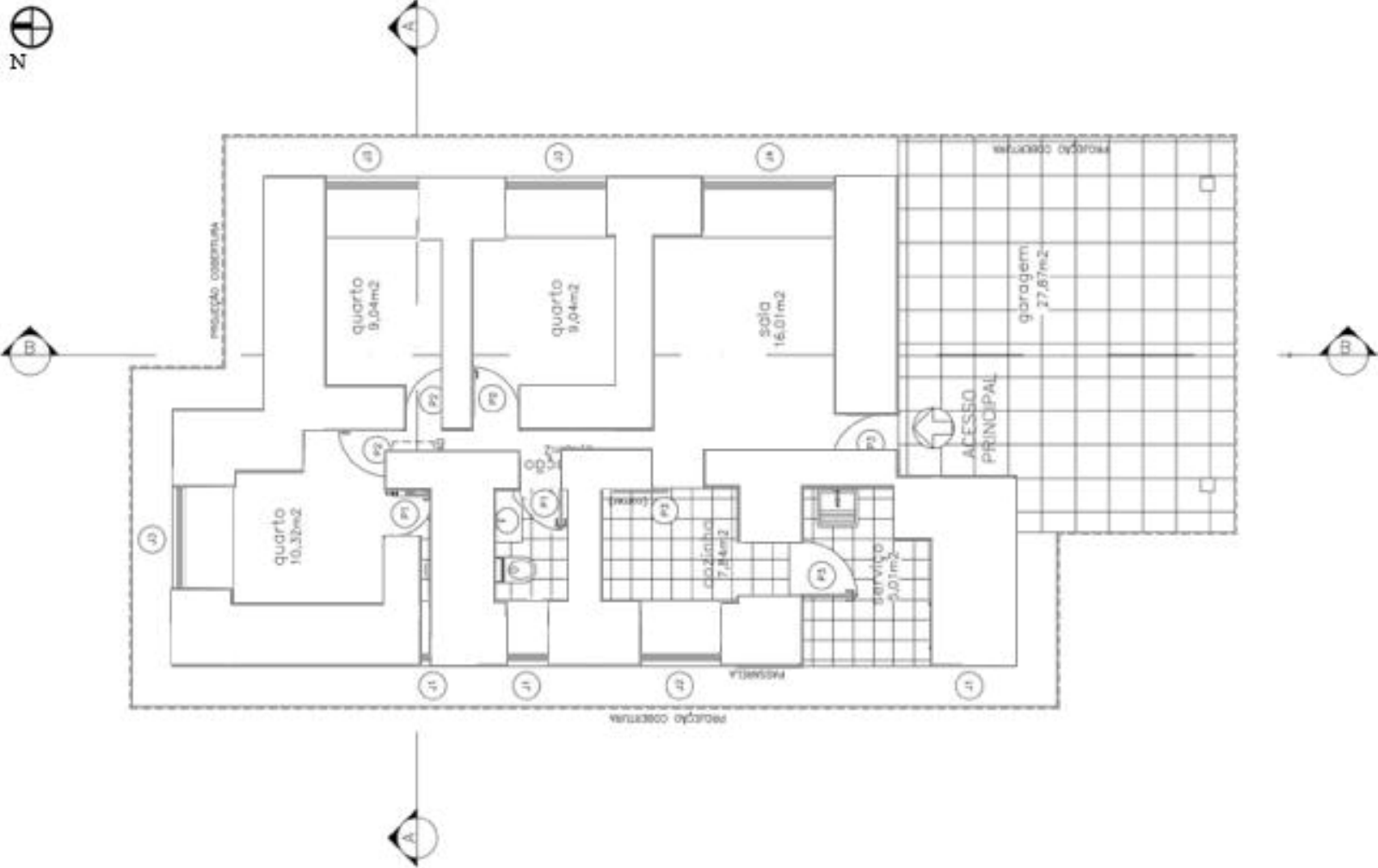


Figura 7 - Projeto R1-N -5x  
Fonte: A autora (2011), adaptado de SINDUSCON-MG (2007).

### 3.3 ENERGIA INCORPORADA

Os cálculos de energia incorporada são feitos, nesse estudo, utilizando os dados de Tavares (2006), por preferência a valores, em sua maioria, oriundos de fontes nacionais. São apresentados (Tabela 8) os valores dos materiais que compõe o invólucro da edificação padrão brasileira R1-N, conforme a tabela de composição dos elementos (Tabela 5), para permitir o cálculo. Através da densidade dos materiais dos elementos (Tabela 8), é possível transformar a energia incorporada por massa (kg) para energia incorporada por volume (m<sup>3</sup>) e *vice versa*. Aqui, ambas as situações serão calculadas.

Tabela 8 – Energia incorporada dos materiais da R1-N

Material	Energia incorporada		Densidade
	(MJ/m <sup>3</sup> )	(MJ/kg)	d ou ρ (Kg/m <sup>3</sup> )
Tijolos furados	3770	2.90	1300
Argamassa de cal, cimento e areia	3990	2.10	1900
Argamassa de cimento e areia	4410	2.10	2100
Argamassa pré-fabricada	3990	2.10	1900
Massa corrida PVA	4000	4.00	1000
Tinta látex PVA	84500	65.00	1300
Impermeabilizantes - asfalto	117300	51.00	2300
Concreto simples	2880	1.20	2400
Concreto armado	7750	3.10	2500
Cimento	6300	4.20	1500
Lajotas cerâmicas	9000	5.00	1800
Telha de fibrocimento	9000	6.00	1500
Madeira peroba-rosa	395	0.50	790
Alumínio anodizado natural	567000	210.00	2700
Vidro comum	46250	18.50	2500
Tinta esmalte	79300	61.00	1300
Madeira (porta)	2275	3.50	650

Fonte: A autora (2011), a partir de dados de TAVARES (2006), ABNT (1980), FROTA; SCHIFFER (1999), ABNT (2005), HOLMAN (1983), SZOKOLAY (2010), IPT (2011).

Para o consumo energético de caminhões para transportar materiais de construção civil, a partir de dados nacionais, foi obtida uma relação de 1.62 MJ/t/Km (TAVARES, 2006). A partir desta relação e da distância percorrida, é possível calcular a energia incorporada de transporte nos materiais. Para obter a distância percorrida, um trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Ambiente Construído simultaneamente a este, o qual apresenta uma listagem das indústrias brasileiras da construção civil, elaborada a partir de dados obtidos em sindicatos e associações da indústria da construção civil (LAC, 2010). As distâncias das indústrias até a cidade de Curitiba foram obtidas da ABCR – Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (2010), adotando a distância mais curta, ou seja, utilizando o local de produção mais próximo a Curitiba.

A partir das fontes de origem de energia para o setor industrial de materiais de construção civil apresentadas pelo Balanço Energético Nacional (MME, 2009), estas puderam ser separadas entre fontes de origem renováveis e fontes de origem fóssil (ou não renováveis), obtendo um percentual desses tipos de energia usados na indústria de materiais. Foram considerados como fontes fósseis: carvão mineral, óleo combustível, eletricidade oriunda de usinas térmicas e nucleares (20%), coque de petróleo, gás natural e outras; e como fontes renováveis: eletricidade oriunda de usinas hidroelétricas (80%) e carvão vegetal (Tabela 9).

Tabela 9 – Fonte de origem da energia para o setor industrial de materiais da construção civil (2008)

Setor industrial	Fontes fósseis (%)*	Fontes renováveis (%)**
Cimento	84.60	15.40
Ferro-gusa e aço	67.36	32.74
Ferroligas	26.60	73.50
Mineração e pelotização	76.88	23.12
Não Ferrosos e outros metálicos	54.96	45.04
Papel e celulose	71.02	28.98
Cerâmica	43.14	56.76
Outras indústrias	48.64	51.36

\*Fontes de origem fóssil consideradas: carvão mineral, óleo combustível, eletricidade oriunda de usinas térmicas e nucleares (20%), coque de petróleo, gás natural, outras.

\*\*Fontes de origem renovável consideradas: eletricidade oriunda de usinas hidroelétricas (80%), carvão vegetal.

Fonte: A autora (2011), a partir de dados de MME (2009).

### 3.4 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

A Norma Brasileira NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) define seções e camadas para fins de cálculo, onde seção é uma parte da espessura do componente contendo apenas resistências térmicas em série; e camada é uma parte dessa seção – onde uma seção pode ser composta de uma ou mais camadas (Figura 8). Os cálculos foram feitos conforme esta metodologia.

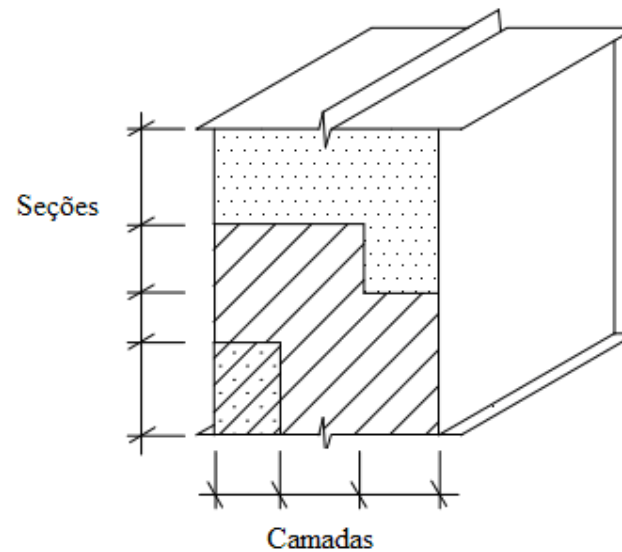


Figura 8 - Seções de um componente e suas camadas  
Fonte: A autora, adaptado de ABNT (2005).

São usadas para o cálculo da transmitância térmica (ABNT, 2005):

Transmitância térmica (U)	<b><math>U=1/RT</math></b>
Resistência térmica (R)	Valores obtidos por medições feitas através de ensaios normalizados ou <b><math>R=e/\lambda</math></b>
Condutividade térmica ( $\lambda$ )	Valores tabelados (Tabela 10)

Dessa forma, são usadas as fórmulas:

$$R = e/\lambda$$

$$RT = Rse + Rt + Rsi$$

$$Rt = R t1 + R t2 + \dots + Rtn + Rar1 + Rar2 + \dots + Rarn \quad (\text{para superfícies homogêneas})$$

$$Rt = (Aa + Ab + \dots + An)/(Aa/Ra + Ab/Rb + \dots + An/Rn) \quad (\text{para superfícies heterogêneas})$$

Onde RT é a resistência total de face a face da superfície, Rt é a resistência total dos materiais, Rse é a resistência da superfície externa, Rsi é a resistência da superfície interna, A é a área da superfície. Enquanto os valores de resistência térmica e transmitância térmica precisam ser calculados, os valores de condutividade térmica são obtidos da bibliografia (Tabela 10) para serem realizados os cálculos e obtidos os resultados.

Tabela 10 - Propriedades térmicas dos materiais (R1-N)

Material	Densidade	Condutividade	Calor específico
	$d$ ou $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$c$ (J/Kg.K)
Tijolos furados	1300	0.90	920
Argamassa de cal, cimento e areia	1900	1.15	1000
Argamassa de cimento e areia	2100	1.15	1000
Argamassa pré-fabricada	1900	1.15	1000
Massa corrida PVA	1000	0.53	837
Tinta látex PVA	1300	0.53	837
Impermeabilizantes - asfalto	2300	1.15	920
Concreto simples	2400	1.74	1005
Concreto armado	2500	1.75	1005
Cimento	1500	0.29	779
Lajotas cerâmicas	1800	1.05	920
Telha de fibrocimento	1500	0.58	1050
Madeira peroba-rosa	790	0.23	1424
Alumínio anodizado natural	2700	236.00	877
Vidro comum	2500	1.00	840
Tinta esmalte	1300	0.53	837
Madeira (porta)	650	0.23	1340

Fonte: A autora (2011), a partir de dados de ABNT (1980), FROTA; SCHIFFER (1999), TAVARES (2006), ABNT (2005), HOLMAN (1983), SZOKOLAY (2010), IPT (2011), COSTA (1982).

### 3.5 FAIXA DE CONFORTO TÉRMICO

A partir das pesquisas realizadas e visando obter uma faixa de conforto térmico ao invés de zona de conforto térmico, optou-se pela equação apresentada por Nicol e Humphreys. A escolha foi feita pela abrangência mundial dos estudos que embasam a equação – em mais de 60 regiões do planeta - e pela preocupação com a aclimação e condições locais, a qual se aplica em função do ar externo. Como as pessoas se adaptam termicamente ao local onde estão (conforto adaptativo), ao serem feitas experiências em laboratórios para estudar e mensurar a sensação térmica, esses resultados podem ser tendenciosos, uma vez que a pessoa está condicionada à situação adaptativa de sua cidade e época (mês ou estação do ano). A faixa de conforto térmico é apresentada em um Gráfico Nicol (ROAF; FUENTES; THOMAS, 2006, NICOL; HUMPHREYS, 2002). Dessa forma, é feito o cálculo das temperaturas de conforto para a cidade de Curitiba ao longo do ano. Para realizar essa tarefa, as temperaturas do ar mensais foram obtidas (temperatura externa) das Normais Climatológicas (1961-1990), as quais compreendem dados de períodos de trinta anos e são utilizados para fins de pesquisas e estatísticas (BRASIL, 1992), são apresentadas (Tabela 11).

Tabela 11 - Normais Climatológicas - Série 1961 - 1990 - Temperaturas - Estação de Curitiba

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
Normais de temperatura máxima (°C)	25.6	25.8	24.9	22.3	21.1	18.3	19.4	20.9	21.3	22.6	24.5	25.4	22.7
Normais de temperatura mínima (°C)	15.8	16.3	15.4	12.8	10.2	7.8	8.1	9.2	10.8	12.5	14	15.4	12.3

Fonte: BRASIL (1992).

A temperatura externa -  $T_e$  é calculada a partir da média entre a média mensal da temperatura externa diária máxima e a média mensal da temperatura externa diária mínima. A partir da temperatura externa, as temperaturas de conforto –  $T_c$ , para cada mês, são calculadas pela fórmula  $T_c = 13,5 + 0,54T_e$ , e a faixa de conforto é estabelecida através da margem de tolerância de 2°C para baixo ou para cima, resultando em uma faixa de conforto térmico que oscila ao longo do ano.



## 3.6 SIMULAÇÃO

As simulações do desempenho térmico e energético da edificação R1-N (e suas variações) são feitas pelo *software* MESTRE (2011) por ser um sistema nacional e gratuito, além de atender às necessidades da pesquisa. A partir do projeto da edificação R1-N, objeto de estudo, é construído o modelo para a simulação – em arquivo .obj – que permite a simulação da edificação. Essa construção do modelo é feita conforme a entrada de dados do arquivo. O *software*, até o presente trabalho, não havia sido validado. Para possibilitar a realização deste trabalho sem comprometer a confiabilidade dos dados obtidos, foi submetido a um processo de validação internacionalmente reconhecido (descrito no item 3.6.1).

### 3.6.1 VALIDAÇÃO DO *SOFTWARE*

O processo de validação do MESTRE (2011) compreende o uso do *software* para simulações seguindo a rotina de testes de acordo com o procedimento para sistemas em múltiplas zonas sem fluxo de ar do *Building Energy Simulation Tool Bestest and Diagnostic Method* da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*). Os resultados podem ser consultados em Schmid, Graf (2011), documento de validação do MESTRE, disposto no Anexo deste trabalho.

### 3.6.2 CONSTRUÇÃO DO .obj

Aqui é apresentada a construção do modelo usado para a simulação térmica e energética feita no *software* MESTRE (2011), a partir do projeto da edificação R1-N, assim como, os dados de alimentação e como esses dados foram obtidos, tratados ou calculados para criar o arquivo, na ordem em que os estes precisam ser posicionados. É construído o modelo geométrico usado, modelo de estudo, apresentado o método e obtida a edificação pronta para ser simulada. A simulação é executada no *Prompt* de Comando do computador, a partir de um arquivo de texto com extensão *.obj*. Esse arquivo contém, nessa ordem, dados iniciais, dados da geometria da edificação, dados de materiais, dados das zonas térmicas e dados climáticos. Para a criação dos dados da geometria e dados das zonas térmicas, os ambientes que compõem as zonas térmicas precisam estar previamente estabelecidos (Quadro 2). Dessa forma, as zonas térmicas para a simulação são determinadas a partir do projeto arquitetônico apresentado (SINDUSCON-MG, 2007). São formadas por espaços que contenham um volume de ar delimitado por superfícies.

Quadro 2- Zonas térmicas determinadas para o modelo

Zona	Descrição	Orientação das faces das paredes externas
0 ar externo	ar externo - pré-estabelecida pelo software	-
1 solo	terra - pré-estabelecida pelo software	-
2 quarto N-O	Quarto de casal/suíte	Norte e Oeste
3 quarto N-L	Quarto de solteiro - 1º filho(a)	Norte e Leste
4 quarto L	Quarto de solteiro - 2º filho(a)	Leste
5 sala e circulação	Sala de estar e corredor/circulação	Leste
6 banheiro externo	Banheiro de serviço	Sul e Oeste
7 cozinha	Cozinha e copa	Oeste
8 banheiro social	Banheiro social	Oeste
9 banheiro suíte	Banheiro do quarto de casal/suíte	Oeste
10 sótão	Área entre laje de forro e telhado	-

Fonte: A autora, 2011.

Por convenção, as zonas foram numeradas no sentido horário, iniciando pelo ambiente do canto superior esquerdo, tomando por base a orientação norte do desenho como a parte superior da representação do projeto. Dessa forma, são apresentadas as 10 zonas definidas para a simulação de desempenho térmico do modelo e representadas sob o projeto arquitetônico (exceto 0 ar externo, 1 solo e 10 sótão, ambientes não habitados e os quais não aparecem em planta) na Figura 9.

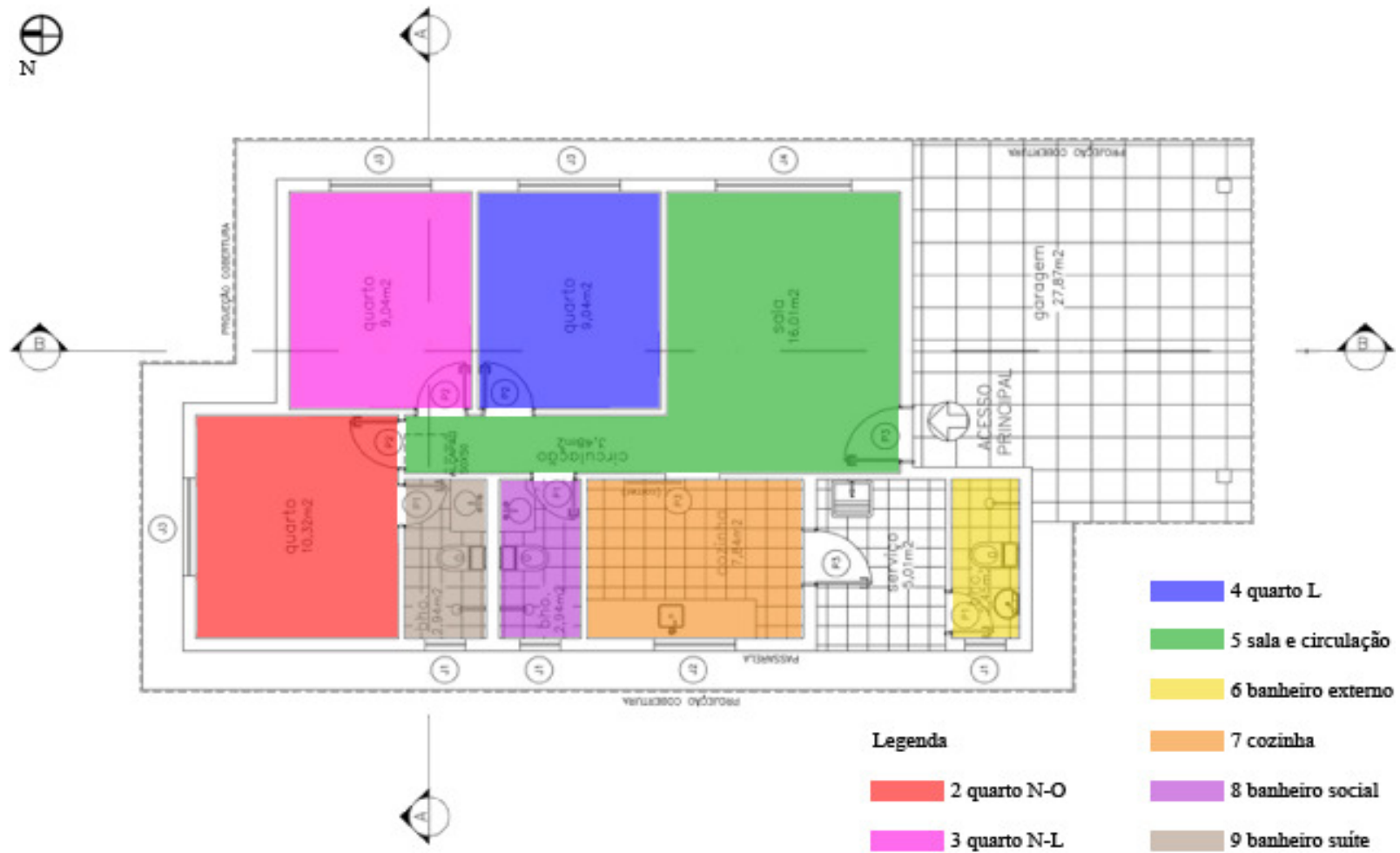


Figura 9 – Zonas térmicas da R1-N (exceto: 0 ar externo, 1 solo e 10 sótão) sob projeto arquitetônico.  
 Fonte: A autora (2011), a partir do projeto arquitetônico (SINDUSCON-MG, 2007).

Após salvo o arquivo no diretório do *software* MESTRE, gera-se a simulação de temperaturas através do *Prompt* de Comando do computador, aguardando o tempo necessário para simular, o qual varia conforme a quantidade de elementos da geometria do objeto. Para o objeto em estudo dessa pesquisa, as simulações foram feitas, em aproximadamente quatro horas cada, em um computador LG P310 (Fabricante: LG Electronics, Modelo LG PC, Processador: Inter(R) Core(TM)2 Duo CPU P8600 2.40GHz, Memória (RAM): 3.00GB, Sistema Operacional de 32 Bits). Os resultados gerados das simulações térmicas são transformados manualmente em gráficos e tabelas com o auxílio de uma planilha eletrônica. São apresentados gráficos de temperatura e são contabilizadas as horas de conforto e desconforto ao longo do ano. Para as simulações energéticas, dos resultados gerados, não são feitos gráficos de temperaturas, pois todas as horas ficam dentro da faixa de conforto devido ao recurso do *set point*. (explicação no item 3.6.2.4). A criação dos dados é explicada nos subitens deste tópico para a geração do modelo geométrico (Figura 19) e, a partir dele, realizar as simulações térmicas e energéticas da R1-N. Semelhante ao arquivo descrito nos subitens desse item, para cada variação de projeto (R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x e R1-N-5x) foi feito um novo arquivo com as espessuras devidas. Ao todo foram construídos 10 arquivos *.obj*, sendo um para simulação térmica e outro para simulação energética (climatização) de cada uma das cinco situações de projeto:

- 1) R1-N.obj;
- 2) R1-N-clim.obj;
- 3) R1-N-2x.obj;
- 4) R1-N-2x-clim.obj;
- 5) R1-N-3x.obj;
- 6) R1-N-3x-clim.obj;
- 7) R1-N-4x.obj;
- 8) R1-N-4x-clim.obj;
- 9) R1-N-5x.obj;
- 10) R1-N-5x-clim.obj;

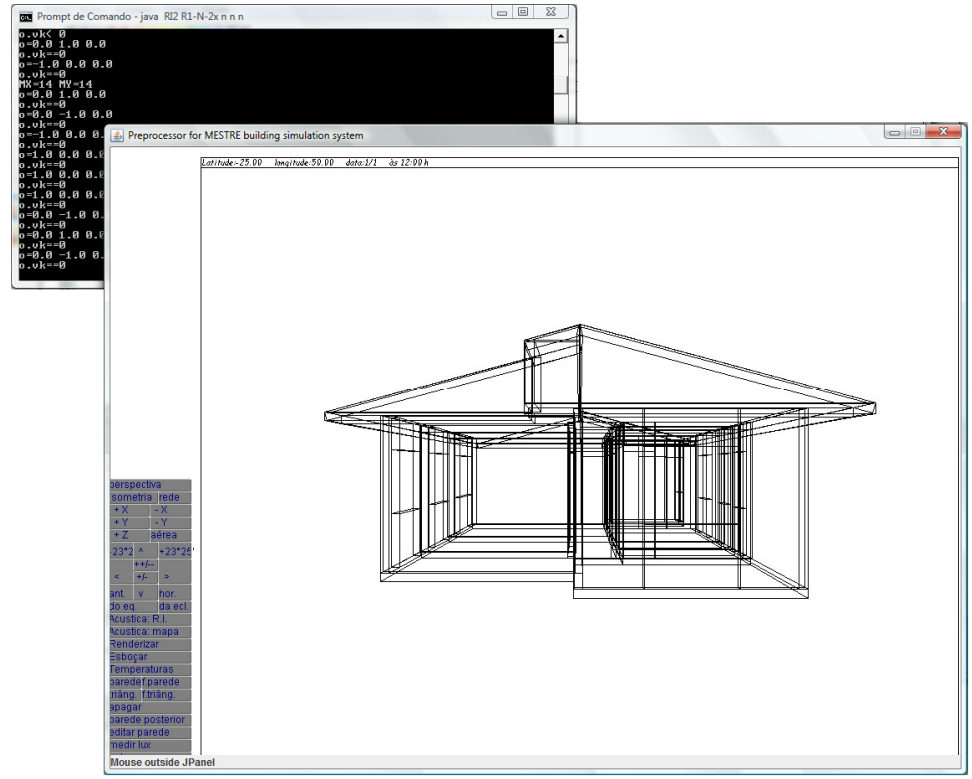


Figura 10 – Modelo geométrico da R1-N.  
Fonte: A autora (2011), a partir de MESTRE (2011).

### 3.6.2.1 Dados iniciais

Os dados iniciais são os que necessitam serem dispostos ao início do arquivo. São eles e na seguinte ordem: código, dia, mês (onde, *código* -1 significa ano inteiro, hora a hora e 0 significa uma vez por mês, no dia estabelecido em *dia*, 1 a 12 significa o *mês*), hora inicial, hora final, intervalo de tempo em segundos, latitude, longitude, temperatura inicial do gráfico, temperatura final do gráfico, taxa de calor inicial do gráfico, taxa de calor final do gráfico (escala para início do cálculo), temperatura de conforto inicial e final (apenas para desenho da faixa no gráfico, não correspondendo à faixa de conforto usada para cálculos), rotação da implantação, erro de convergência, resolução da malha de radiação solar direta - para os cálculos (x e y, x e y), nebulosidade e albedo. Dessa forma, os dados iniciais foram montados conforme a ordem necessária para a leitura pelo MESTRE e são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Dados iniciais para arquivo .obj de simulação

x	DadosIniciais																					
cod	dia	mes	hi	hf	deltat	lat	long	graf(Ti	Tf	qi	qf	TconfI	TconfF)	rot	erroConv	resSol(x	y	resSol(x	y)	neb+air	mass	albedo
d	1	-1	0	24	3600	-25	50	0	40	-5000	5000	22.7	26.7	0	0.2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25		0

Fonte: A autora (2011).

### 3.6.2.2 Dados de geometria

Os dados da geometria da edificação são descritos, utilizando um sistema de coordenadas, orientação e dimensões, os elementos que compõem as superfícies do invólucro. Os dados dos elementos da geometria são compostos por código, coordenada inicial x, coordenada inicial y, coordenada inicial z, azimute solar, altura do vetor normal ao plano, largura (aqui, entende-se como o comprimento da superfície), espessura, altura da parede (ou outra superfície), número do material, zona interna, zona externa, temperatura inicial e descrição. Superfícies horizontais são entendidas pelo programa como paredes deitadas, ou seja, inclinada (altura do vetor normal ao plano). Por convenção, e para manter ordem no trabalho, a

listagem das paredes é feita zona a zona, iniciando pela parede mais ao norte e esquerda da primeira zona (Zona 2) e dando sequência pelas demais no sentido horário (norte, leste, sul, oeste) contornando todo o perímetro da zona em questão e depois passando para as paredes da próxima zona, listando-as excluindo as já listadas anteriormente por estarem na divisa de zonas já listadas. Leia-se aqui paredes (termo usado no *software*) todos os elementos que compõem o invólucro como paredes, portas e janelas. A seguir, são listados os elementos que formam as lajes de piso e forro (da mesma forma que as paredes, mas alterando a altura do vetor normal ao plano), elementos triangulares (oitões) e cobertura (águas do telhado). Superfícies triangulares são estabelecidas pelas coordenadas (x, y, z) dos três pontos que o compõem. Os dados de geometria são apresentados parcialmente (Quadro 4) e o arquivo *.obj* com a descrição completa da geometria é apresentado em documento digital.

Quadro 4 - Dados de geometria para arquivo *.obj* de simulação

x cod	Dados Geometria												descrição
	x	y	z	azi	alt-n	larg	esp	alt	mat	zi	ze	t	
p	0	15.75	0	0	0	1.05	0.15	2.8	2	0	2	20	norteZ2parede
p	1.05	15.75	0	0	0	1.5	0.15	1	2	0	2	20	norteZ2peitoril
p	1.05	15.75	1	0	0	1.5	0.15	1.2	3	0	2	20	norteZ2janela
p	1.05	15.75	2.2	0	0	1.5	0.15	0.6	2	0	2	20	norteZ2verga
p	2.55	15.75	0	0	0	1.1	0.15	2.8	2	0	2	20	norteZ2parede
p	3.65	15.75	0	90	0	1.4	0.15	2.8	2	0	2	20	lesteZ2parede

Continua no documento digital

Fonte: A autora, 2011.

Para cada elemento de superfície são atribuídas as zonas térmicas (interna e externa) às quais pertencem e o material de qual é feito. As zonas e os materiais são estabelecidos por código, o qual é especificado em outro bloco de informações no arquivo *.obj*. A espessura apresentada nos dados de geometria consiste em uma informação para a geração gráfica do modelo (Figura 11). Para fins de cálculos envolvendo as propriedades dos materiais, a espessura utilizada é a apresentada nos dados de materiais. A primeira espessura apenas é usada quando a segunda for nula.



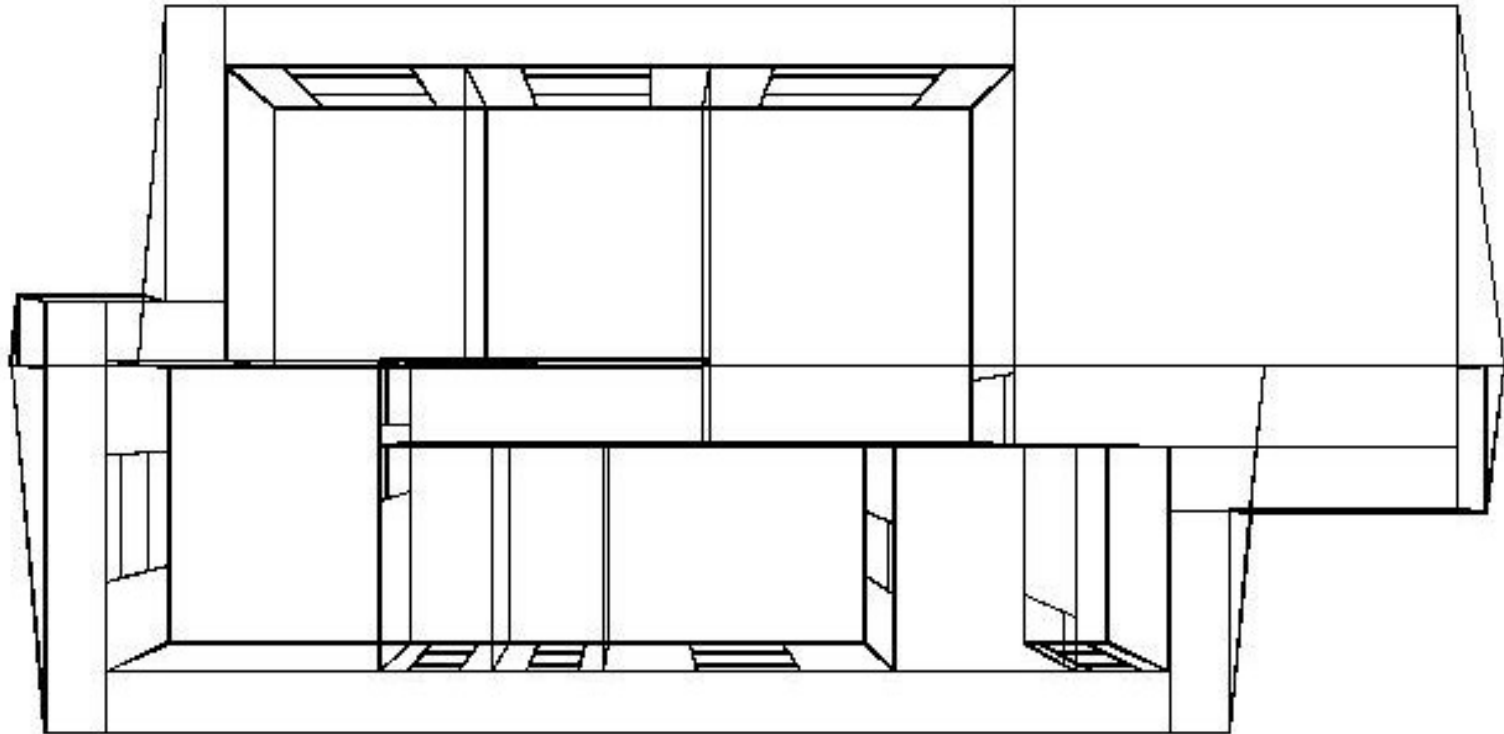


Figura 11 – Modelo geométrico da R1-N para simulações no MESTRE (vista superior)  
Fonte: A autora (2011), a partir de MESTRE (2011).

### 3.6.2.3 Dados de materiais

Cada material citado na descrição da geometria (por código) é especificado por parâmetros. Valores de condutividade térmica, calor específico, massa específica (densidade), absorvância para radiação solar das faces, transmissividade à radiação de ondas curtas, dados de acústica (esses ficam zerados para simulações térmicas e energéticas), espessura padrão, textura, código do material e nome/descrição são inseridos no arquivo, nesta ordem para representar o material. A Tabela 12 apresenta valores de condutividade térmica, calor específico e densidade obtidos a partir do cálculo inverso da resistência térmica, por média ponderada de valores da composição (Tabela 5).

Tabela 12 - Propriedades térmicas para alimentar o MESTRE 2011

Cód.	Elementos construtivos	Condutividade térmica* $\lambda$ (W/mK)	Calor específico** c (J/kg.K)	Densidade** d ou $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
(1)	Parede de meia-vez	0.5007	945.68	1507.72
(2)	Parede de uma vez	0.5960	946.29	1504.77
(3)	Janela	1.0000	859.92	2607.68
(4)	Porta	0.2306	1335.44	655.89
(5)	Laje de forro	0.8996	972.71	1963.88
(6)	Cobertura	0.5800	969.36	1221.81
(7)	Laje de piso	1.0377	984.78	2124.71

\*Para alimentar o MESTRE 2011 com valores de condutividade térmica foi feito o cálculo inverso a partir dos valores obtidos de resistência térmica ( $R_t$ ) da Tabela 4 usando a fórmula  $\lambda = e/R$ . O *software* não utiliza os valores de resistência de superfícies calculados por utilizar valores de coeficiente de filme por zona térmica.

\*\*Os valores de calor específico e densidade foram calculados por média ponderada.

Fonte: a autora, 2011.

Valores de absorvância térmica para as superfícies são apresentados (Tabela 13). A espessura é obtida da composição dos elementos (Tabela 5), assim como o código do material e o nome, os quais são mantidos os mesmos em todo o trabalho. A partir disso, os dados dos materiais são apresentados (Quadro 5).

Tabela 13 – Absortância térmicas das superfícies dos elementos construtivos (R1N)

Elementos contrutivos		Absortância ( $\alpha$ ) para radiação solar			
Código	Elemento	Face interna ou inferior	$\alpha$	Face externa ou superior	$\alpha$
(1)	Parede de meia-vez	Pintura branca	0.20	Pintura branca	0.20
(2)	Parede de uma vez	Pintura branca	0.20	Pintura branca	0.20
(3)	Janela	Vidro incolor simples	0.25	Vidro incolor simples	0.25
(4)	Porta	Pintura esmalte	0.20	Pintura esmalte	0.20
(5)	Laje de forro	Pintura branca	0.20	Argamassa	0.65
(6)	Cobertura	Telha de fibrocim ento	0.80	Telha de fibrocim ento	0.80
(7)	Laje de piso	Laje pré-fabricada	0.80	Piso cerâmico branco	0.20

Fonte: A autora (2011), a partir de dados de ABNT (2005) e composicao dos elementos (Tabela 5).

Quadro 5 - Dados de materiais para arquivo .obj de simulação

DadosMateriais																						
x	cód	condT	calEsp	mEsp	alfaInt( RGB )			alfaExt( RGB )			taus( RGB )			absAc			125 250 500 1k 2k 4kHz)			fonte( R,G,B )		
m	0.500671	945.67676	1507.7234	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m	0.5960391	946.28794	1504.7711	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m	1	859.92148	2607.6837	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m	0.230594	1335.4428	655.88901	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m	0.8995676	972.71431	1963.8829	0.2	0.2	0.2	0.65	0.65	0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m	0.58	969.36131	1221.8082	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m	1.0376932	984.78148	2124.7051	0.8	0.8	0.8	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Continua (nesta lateral)

Continuação (lateral)	espPadr	textura	codTex	nome
	0.10587	1	-1	Parede de meia-vez
0.20587	1	-2	Parede de uma vez	
0.004	1	-3	Janela	
0.03516	1	-4	Porta	
0.12187	1	-5	Laje de forro	
0.0083384	1	-6	Cobertura	
0.201	1	-7	Laje de piso	

Fonte: A autora, 2011.

#### 3.6.2.4 Dados de zonas térmicas

Para descrever cada zona no arquivo *.obj*, é preciso calcular a capacidade térmica, a geração interna de calor espontânea, o coeficiente de filme e a taxa de ventilação da zona. O coeficiente de filme foi obtido a partir do inverso da resistência térmica de superfície ( $1/R$ ) para o ambiente da zona conforme ABNT (2005). A taxa de ventilação foi mantida constante em  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$  para todas as zonas, valor necessário para a higiene dos ambientes (ANVISA, 2000). Para permitir a realização da simulação energética, as temperaturas de conforto são determinadas para que o sistema forneça energia de climatização (aquecimento ou resfriamento) nos momentos em que a temperatura da zona esteja fora dessa faixa através do *set point* do *software*. Esses dados são apresentados no Quadro 6.

Além da modelagem dos elementos geométricos da residência, as zonas são compostas por informações referentes à capacidade térmica dos espaços, onde foram incluídos elementos que fazem parte da edificação para fins térmicos como móveis e equipamentos (Apêndice B e Apêndice C). Também foi considerada, para o cálculo pelo programa, a geração interna de calor por pessoas, equipamentos e iluminação, sem e com climatização. Para estimar a geração interna de calor (Apêndice D e Apêndice E), foi considerado o uso da edificação por uma família de quatro



Continuação 2 (lateral)	Setpoint																nome		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 ar externo	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1 solo	
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	2 quarto N-O
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	3 quarto N-L
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	4 quarto L
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	5 sala e circulação
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	6 banheiro externo
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	7 cozinha
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	8 banheiro social
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	9 banheiro suíte
	19.6	20.2	21	21.9	22.5	0	26.7	26.9	26.4	25	24	22.5	22.9	23.6	24.2	25	25.9	26.5	10 sótão

Em azul, *set point* inferior, em vermelho, *set point* superior.

Fonte: A autora, 2011.

Para realizar as simulações térmicas, é mantida a configuração original do .obj sem usar o recurso de *set point* para climatização. Para realizar as simulações energéticas, é alterada a configuração dos dados para usar o recurso: o código 0 da coluna *set point* é substituído por 1 para que o sistema entenda que deverá climatizar os ambientes. O *set point* é ligado desta forma tanto para aquecimento quanto para resfriamento (*set point* inferior e *set point* superior, respectivamente). Ao lado da coluna que liga/desliga o recurso, colunas de temperaturas para cada mês são apresentadas, sendo valores de referência para, com a climatização, a faixa de conforto ser atingida para cada zona térmica.

### 3.6.2.5 Dados climáticos

No intuito de alimentar o *software* de simulação, foram solicitados os dados climáticos de um ano típico para a cidade de Curitiba ao SIMEPAR – Instituto Tecnológico *Simepar* e ao INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, sendo que o INMET alegou que não havia um ano totalmente típico desde a abertura da estação automática de Curitiba em 2003 e que não havia registros de radiação solar, disponibilizando para a pesquisa,

dados horários de temperatura do ano de 2008 que, segundo a orientação deste órgão, poderia ser utilizado substituindo o ano típico por ter tido “La Niña fraca”. Em resposta a mesma solicitação, o SIMEPAR disponibilizou dados horários de temperatura e dados horários de radiação solar de todo o período existente nos registros (julho de 1997 a janeiro de 2011). Por apresentar dados de temperatura e radiação solar e por ter menos lacunas em seus dados, foram utilizados os registros do SIMEPAR, porém considerando a orientação do INMET, utilizando os dados de 2008 na ausência de um ano típico (INMET, 2011; SIMEPAR, 2011).

As lacunas existentes nos registros dos dados utilizados (das 7 às 19 horas do dia 16 de janeiro, das 8 às 10 horas do dia 23 de janeiro e às 13 horas do dia 15 de julho) foram completadas pela transformação feita por Schmid (2011) através das seguintes fórmulas e adaptando-se os dados ao formato *.obj* do MESTRE. Uma amostra parcial dos dados climáticos utilizados para a simulação encontram-se no Quadro 7. A continuação é disponibilizada de forma digital.

$$\mathbf{radDif(h) = radDif (h-1) + [radDif(h-24) - radDif(h-25)]}$$

$$\mathbf{T(h)=T(h-1) + [ T(h-24)-T(h-25)]}$$

Onde,            radDir = radiação direta;  
                      h = hora;  
                      radDif = radiação difusa;  
                      T = temperatura.

Quadro 7 - Dados climáticos de Curitiba - ano 2008

Dados Climáticos Curitiba 2008 do SIMEPAR no Formato MESTRE						
Cod	Mês	Dia	Hora	Rad Direta (2/3 da Global)	Rad Difusa (1/3 da Global)	Temperatura
tm2	1	1	1	0	0	20.5
tm2	1	1	2	0	0	19.6
tm2	1	1	3	0	0	19.1
tm2	1	1	4	0.165	0.085	19.2
tm2	1	1	5	0	0	18.9
tm2	1	1	6	0.66	0.34	18.9
tm2	1	1	7	27.885	14.365	19.1
tm2	1	1	8	44.715	23.035	19.6
tm2	1	1	9	61.215	31.535	20.3
tm2	1	1	10	104.94	54.06	20.6
tm2	1	1	11	184.47	95.03	21.3
tm2	1	1	12	154.77	79.73	22
tm2	1	1	13	156.255	80.495	22.5
tm2	1	1	14	92.565	47.685	22.1
tm2	1	1	15	203.94	105.06	22
tm2	1	1	16	191.07	98.43	22.6
tm2	1	1	17	133.98	69.02	22.6
tm2	1	1	18	69.465	35.785	22
tm2	1	1	19	17.49	9.01	21.6
tm2	1	1	20	1.32	0.68	20.7
tm2	1	1	21	0.165	0.085	20.4
tm2	1	1	22	0.165	0.085	20.2
tm2	1	1	23	0	0	19.9
tm2	1	1	24	0.165	0.085	19.8
tm2	1	2	1	0	0	19.7
tm2	1	2	2	0	0	18.8

Continua no documento digital

Fonte: SIMEPAR (2011), adaptado por SCHMID (2011).



## 4 RESULTADOS E RELAÇÕES

### 4.1 RESULTADOS DE ENERGIA INCORPORADA

A partir dos valores de energia incorporada para a produção dos materiais, foi possível obter o valor para cada superfície da R1-N, em função de sua composição. Estes são apresentados nos resultados como energia de produção incorporada – EPI (para cada componente) por metro quadrado de superfície e seus quantitativos parciais são separados entre EPI de fontes de origem fóssil e renovável. Também, o total de EPI, por elemento construtivo, é apresentado. Todos os valores são dados para uma unidade de área (metro quadrado) de superfície. Também são apresentados os resultados de energia de transporte incorporada - ETI a essas superfícies, os quais o cálculo foi feito pela distância da cidade de produção à cidade de Curitiba, conforme explica a metodologia. Toda a ETI é oriunda de fontes fósseis. Todos os resultados são apresentados em megajoule - MJ (Tabela 14). Resultados parciais podem ser consultados no Apêndice I.

Tabela 14 - Energia incorporada dos elementos construtivos (R1-N) por área de superfície (m²)

Código do material	Elementos construtivos	Energia de produção incorporada - EPI				Energia de transporte incorporada - ETI		Total de EI (EPI+ETI)				
		de origem fóssil		de origem renovável		Total - EPI	(100% de origem fóssil)	de origem fóssil		de origem renovável		TOTAL
(1)	<b>Parede de meia-vez</b>	236 MJ	53%	207 MJ	47%	444 MJ	22 MJ	258 MJ	55%	207 MJ	45%	<b>465 MJ</b>
(2)	<b>Parede de uma vez</b>	458 MJ	53%	409 MJ	47%	867 MJ	44 MJ	502 MJ	55%	409 MJ	45%	<b>910 MJ</b>
(3)	<b>Janela</b>	632 MJ	28%	1616 MJ	72%	2246 MJ	0 MJ	632 MJ	28%	1616 MJ	72%	<b>2248 MJ</b>
(4)	<b>Porta</b>	63 MJ	68%	30 MJ	32%	92 MJ	0 MJ	63 MJ	68%	30 MJ	32%	<b>93 MJ</b>
(5)	<b>Laje de forro</b>	369 MJ	56%	288 MJ	44%	657 MJ	15 MJ	384 MJ	57%	288 MJ	43%	<b>672 MJ</b>
(6)	<b>Cobertura</b>	66 MJ	84%	13 MJ	16%	79 MJ	0 MJ	67 MJ	84%	13 MJ	16%	<b>80 MJ</b>
(7)	<b>Laje de piso</b>	522 MJ	54%	439 MJ	46%	961 MJ	19 MJ	541 MJ	55%	439 MJ	45%	<b>980 MJ</b>

\* Essa tabela com mais detalhes pode ser vista no Apêndice I

Fonte: A autora, 2011.

A partir do quantitativo de superfícies (Tabela 6), é possível obter o valor de energia incorporada total por material (quantidade em cada tipo de superfície) e o valor de energia incorporada total da edificação. A partir da relação entre área de superfícies e área de piso, é possível obter o resultado da energia incorporada por área de piso da residência (Tabela 15).

Tabela 15 - Totais de EI da edificação R1-N

Código do material	Elementos construtivos	Quantidade de área de superfície (m²)*	Total de EI (MJ) por m² de superfície**	Total de EI (MJ) por elemento construtivo
(1)	Parede de meia-vez	69.92	465	32530
(2)	Parede de uma vez	115.85	911	105530
(3)	Janela	11.40	2246	25609
(4)	Porta	14.74	93	1365
(5)	Laje de forro	128.11	673	86151
(6)	Cobertura	132.63	80	10553
(7)	Laje de piso	69.64	981	68285
Total da edificação		542.28		330022
Total por área de superfície***				609
Total por área de piso***				3101

Fonte: A autora (2011), a partir de \*Tabela 6, \*\*Tabela 10, \*\*\*Tabela 7.

Quanto às variações da edificação, em função do aumento da espessura, a energia incorporada foi multiplicada proporcionalmente para cada situação, donde obteve uma relação linear, sendo que aumentando a espessura, a EI da superfície é aumentada proporcionalmente (Tabela 16).

Tabela 16 - Energia incorporada dos elementos construtivos após alteração de projeto

Cód.	Elementos construtivos	Edificação	Espessura*	Energia incorporada**
			e (m)	EI (MJ/m <sup>2</sup> de superfície)
(1)	Parede de meia-	R1-N-1x (projeto original)	0.10587	465
		R1-N-2x	0.21174	931
		R1-N-3x	0.31761	1396
		R1-N-4x	0.42348	1861
		R1-N-5x	0.52935	2326
(2)	Parede de uma v	R1-N-1x (projeto original)	0.20587	911
		R1-N-2x	0.41174	1822
		R1-N-3x	0.61761	2733
		R1-N-4x	0.82348	3644
		R1-N-5x	1.02935	4555
(3)	Janela	R1-N-1x (projeto original)	0.004	2246
		R1-N-2x	0.008	4493
		R1-N-3x	0.012	6739
		R1-N-4x	0.016	8986
		R1-N-5x	0.02	11232
(4)	Porta	R1-N-1x (projeto original)	0.03516	93
		R1-N-2x	0.07032	185
		R1-N-3x	0.10548	278
		R1-N-4x	0.14064	370
		R1-N-5x	0.1758	463
(5)	Laje de forro	R1-N-1x (projeto original)	0.12187	673
		R1-N-2x	0.24374	1345
		R1-N-3x	0.36561	2018
		R1-N-4x	0.48748	2690
		R1-N-5x	0.60935	3363
(6)	Cobertura	R1-N-1x (projeto original)	0.0083384	80
		R1-N-2x	0.01667679	159
		R1-N-3x	0.02501519	239
		R1-N-4x	0.03335359	318
		R1-N-5x	0.04169198	398
(7)	Laje de piso	R1-N-1x (projeto original)	0.201	981
		R1-N-2x	0.402	1961
		R1-N-3x	0.603	2942
		R1-N-4x	0.804	3922
		R1-N-5x	1.005	4903

\*Valores da Tabela 4 para R1-N e multiplicado para os demais; \*\*valores da Tabela 10 para R1-N e multiplicado para os demais.

Fonte: A autora, 2011.

## 4.2 RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA E ENERGIA INCORPORADA

Um gráfico ilustra a relação linear da espessura e da energia incorporada. Elementos como paredes e lajes têm uma relação muito próxima por serem compostos, praticamente, dos mesmos materiais. A janela, ao ter uma alta taxa de energia incorporada devido ao uso de alumínio, sofre um aumento muito grande desse valor com pequenas variações na espessura (apenas as condições das espessuras de R1-N e R1-N-2x aparecem dentro do gráfico, pois as demais extrapolam os limites especificados). Os elementos de porta e cobertura têm um aumento pequeno em função de sua pequena espessura, a qual, multiplicada, não acrescenta muito em energia incorporada (Gráfico 1).

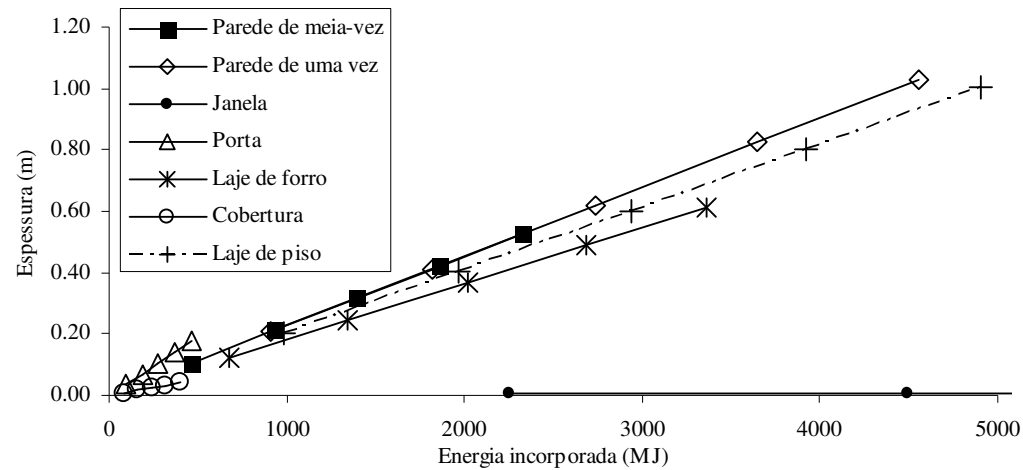


Gráfico 1 – Relação entre espessura (e) e energia incorporada (EI) dos elementos da R1-N e variações.  
Fonte: A autora (2011).

### 4.3 RESULTADOS DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

Após escolhido o método de cálculos da Norma Brasileira NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005), foi feito uso deste método para calcular os valores de transmitância térmica. Esta mesma norma apresenta exemplos de elementos usualmente empregados nas construções e suas transmitâncias térmicas, porém estas não foram usadas. Visando uma maior precisão, todos os elementos, após definida sua composição, tiveram seus valores de transmitância térmica das superfícies da residência brasileira calculados.

A partir das propriedades térmicas (Tabela 10) dos materiais, o cálculo das resistências foi feito para cada camada de cada seção de cada elemento. Para os elementos constituídos de um único material – como o vidro - não foi preciso realizar o cálculo por seções e camadas devido à sua homogeneidade e seus resultados são calculados e apresentados diretamente (Tabela 17). Para os demais materiais, foi feito primeiramente o cálculo da resistência térmica de cada elemento composto, o qual é disponibilizado no Apêndice F e, depois, os valores encontrados foram apresentados. A resistência térmica é obtida para permitir o cálculo da transmitância térmica, conforme a metodologia adotada.

Tabela 17 - Transmitância térmica dos elementos construtivos (R1-N)\*

Cód.	Elementos construtivos	Composição de materiais (camadas)	Componentes	Resistência térmica parcial			Resistência térmica total $R_T$ ( $m^2 \cdot K/W$ )	Transmitância térmica $U$ ( $W/m^2 \cdot K$ )
				$R_{t^{**}}$	$R_{se}$	$R_{si}$		
(1)	Parede de meia	Alvenaria de meia-vez	Bloco cerâmico	0.2115	0.04	0.13	0.38	2.62
			Argamassa					
		Chapisco	Argamassa					
		Massa única	Argamassa pré-fabricada					
		Emassamento	Massa corrida PVA					
		Pintura	Tinta látex PVA					
(2)	Parede de uma	Alvenaria de uma-vez	Bloco cerâmico	0.3454	0.04	0.13	0.52	1.94
			Argamassa					
		Chapisco	Argamassa					
		Massa única	Argamassa pré-fabricada					
		Emassamento	Massa corrida PVA					
		Pintura	Tinta látex PVA					
(3)	Janela	Alumínio	-	0.0040	0.04	0.13	0.17	5.75
		Vidro	-					
(4)	Porta	Pintura	-	0.1525	0.04	0.13	0.32	3.10
		Madeira	-					
(5)	Laje de forro	Argamassa	Argamassa	0.1355	0.04	0.17	0.35	2.89
		Impermeabilizante	Emulsão asfáltica					
		Laje pré-fabricada	Enchimento cerâmico					
			Inteiroixo					
		Chapisco	Argamassa					
		Massa única	Argamassa pré-fabricada					
		Emassamento	Massa corrida PVA					
Pintura	Tinta látex PVA							
(6)	Coertura	Telha de fibrocimento	-	0.0144	0.04	0.17	0.22	4.46
		Estrutura de madeira	-					
(7)	Laje de piso	Piso cerâmico	Argamassa	0.1937	0.04	0.1	0.33	3.00
			Cimento					
			Piso cerâmico					
		Argamassa	Argamassa					
		Contrapiso	Concreto com seixo					
		Impermeabilizante	Emulsão asfáltica					
		Laje pré-fabricada	Enchimento cerâmico					
			Inteiroixo					
		Capecamento						

\*cálculo feito conforme ABNT (2005); \*\*cálculos de  $R_t$  detalhados no Apêndice B.

Fonte: A autora, 2011.

A partir do momento em que apenas são multiplicadas as espessuras sem alterar a composição, a condutividade térmica do elemento é mantida em R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x e R1-N-5x como em R1-N, porém, a transmitância térmica muda ao haver alteração da resistência térmica do elemento. As resistências superficiais permanecem as mesmas e fazem diferença nesse cálculo. Dessa forma, a transmitância térmica foi novamente calculada em função das mudanças de projeto (variações) e são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Transmissão térmica dos elementos construtivos após alteração de projeto

Cód.	Elementos construtivos	Edificação	Espessura*	Condutividade térmica**	parcial			Resistência térmica total	Transmissão térmica
			e (m)	$\lambda$ (W/m.K)	Rt	Rse	Rsi	$R_T$ (m <sup>2</sup> .K/W)***	U (W/m <sup>2</sup> .K)***
(1)	Parede de meia-	R1-N (projeto original)	0.1059	0.5007	0.2115	0.04	0.13	0.381456213	2.62
		R1-N-2x	0.2117	0.5007	0.4229	0.04	0.13	0.592912425	1.69
		R1-N-3x	0.3176	0.5007	0.6344	0.04	0.13	0.804368638	1.24
		R1-N-4x	0.4235	0.5007	0.8458	0.04	0.13	1.015824851	0.98
		R1-N-5x	0.5294	0.5007	1.0573	0.04	0.13	1.227281063	0.81
(2)	Parede de uma v	R1-N (projeto original)	0.2059	0.5960	0.3454	0.04	0.13	0.515396823	1.94
		R1-N-2x	0.4117	0.5960	0.6908	0.04	0.13	0.860793645	1.16
		R1-N-3x	0.6176	0.5960	1.0362	0.04	0.13	1.206190468	0.83
		R1-N-4x	0.8235	0.5960	1.3816	0.04	0.13	1.55158729	0.64
		R1-N-5x	1.0294	0.5960	1.7270	0.04	0.13	1.896984113	0.53
(3)	Janela	R1-N (projeto original)	0.0040	1.0000	0.0040	0.04	0.13	0.174	5.75
		R1-N-2x	0.0080	1.0000	0.0080	0.04	0.13	0.178	5.62
		R1-N-3x	0.0120	1.0000	0.0120	0.04	0.13	0.182	5.49
		R1-N-4x	0.0160	1.0000	0.0160	0.04	0.13	0.186	5.38
		R1-N-5x	0.0200	1.0000	0.0200	0.04	0.13	0.19	5.26
(4)	Porta	R1-N (projeto original)	0.0352	0.2306	0.1525	0.04	0.13	0.3224758	3.10
		R1-N-2x	0.0703	0.2306	0.3050	0.04	0.13	0.4749516	2.11
		R1-N-3x	0.1055	0.2306	0.4574	0.04	0.13	0.6274274	1.59
		R1-N-4x	0.1406	0.2306	0.6099	0.04	0.13	0.779903199	1.28
		R1-N-5x	0.1758	0.2306	0.7624	0.04	0.13	0.932378999	1.07
(5)	Laje de forro	R1-N (projeto original)	0.1219	0.8996	0.1355	0.04	0.17	0.345476205	2.89
		R1-N-2x	0.2437	0.8996	0.2710	0.04	0.17	0.48095241	2.08
		R1-N-3x	0.3656	0.8996	0.4064	0.04	0.17	0.616428615	1.62
		R1-N-4x	0.4875	0.8996	0.5419	0.04	0.17	0.75190482	1.33
		R1-N-5x	0.6094	0.8996	0.6774	0.04	0.17	0.887381025	1.13
(6)	Cobertura	R1-N (projeto original)	0.0083	0.5800	0.0143765	0.04	0.17	0.224376546	4.46
		R1-N-2x	0.0167	0.5800	0.0287531	0.04	0.17	0.238753092	4.19
		R1-N-3x	0.0250	0.5800	0.0431296	0.04	0.17	0.253129638	3.95
		R1-N-4x	0.0334	0.5800	0.0575062	0.04	0.17	0.267506184	3.74
		R1-N-5x	0.0417	0.5800	0.0718827	0.04	0.17	0.281882729	3.55
(7)	Laje de piso	R1-N (projeto original)	0.2010	1.0377	0.1936989	0.04	0.1	0.333698874	3.00
		R1-N-2x	0.4020	1.0377	0.3873977	0.04	0.1	0.527397747	1.90
		R1-N-3x	0.6030	1.0377	0.5810966	0.04	0.1	0.721096621	1.39
		R1-N-4x	0.8040	1.0377	0.7747955	0.04	0.1	0.914795494	1.09
		R1-N-5x	1.0050	1.0377	0.9684944	0.04	0.1	1.108494368	0.90

\*Valores da Tabela 4 para R1-N e multiplicado para os demais; \*\*valores da Tabela 19; \*\*\*cálculos de Rt e U conforme ABNT (2005).

Fonte: A autora, 2011.



#### 4.4 RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

A alteração da espessura permite relacioná-la à transmitância térmica apresentando uma curva dessas variáveis. Com o aumento da espessura, paredes e lajes diminuem a transmitância de forma não linear, tendendo a um ponto ótimo, onde a curva estabiliza-se para, logo, começar a retornar. Porém, esse ponto não pôde ser atingido devido à redução de área útil dos ambientes, tornando-os inabitáveis, sendo apenas testadas as condições definidas (R1-N, R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x e R1-N-5x), estas já capazes de inviabilizar o uso de alguns ambientes. Elementos como cobertura e janela tem uma curva imperceptível, pois suas espessuras, de pequenos valores, não criam uma variação visível graficamente no eixo da transmitância térmica.

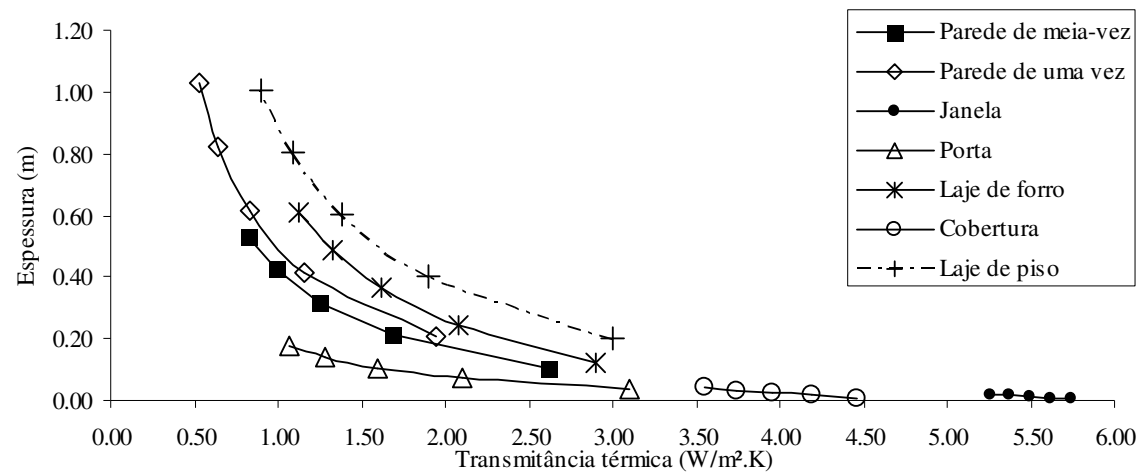


Gráfico 2 – Relação entre espessura (e) e transmitância térmica (U) dos elementos da R1-N e variações.  
Fonte: A autora (2011).

#### 4.5 RELAÇÃO ENTRE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA E ENERGIA INCORPORADA

Relacionando a transmitância térmica com a energia incorporada dos elementos, é possível observar que o elemento feito de **madeira** (porta) obteve a **melhor relação**, pois tem pouca energia incorporada devido aos poucos processos industriais pelos quais a matéria-prima é submetida e devido as suas propriedades térmicas de material isolante, obtendo a melhor relação entre os materiais estudados. A composição para a **cobertura** tem uma baixa energia incorporada, pois, apesar de ter fibrocimento com alta EI, tem madeira em sua composição (estrutura do telhado), a qual contribui para baixar o valor de EI do elemento como um todo. Dessa forma, o conjunto da composição não causa grande impacto ambiental, porém sua **transmitância térmica é alta**, não sendo recomendada. Materiais que contem **cimento** em sua composição (lajes e paredes) tendem a **aumentar** rapidamente a **energia incorporada** com a multiplicação da espessura, no entanto, sem melhorar significativamente a transmitância térmica do invólucro. Por fim, a **janela** (vidro e alumínio) apresentou a **pior relação** e as piores condições para ambos os valores (no gráfico, apenas as situações da R1-N e R1-N-2x são visíveis, porém é possível verificar a tendência das demais).

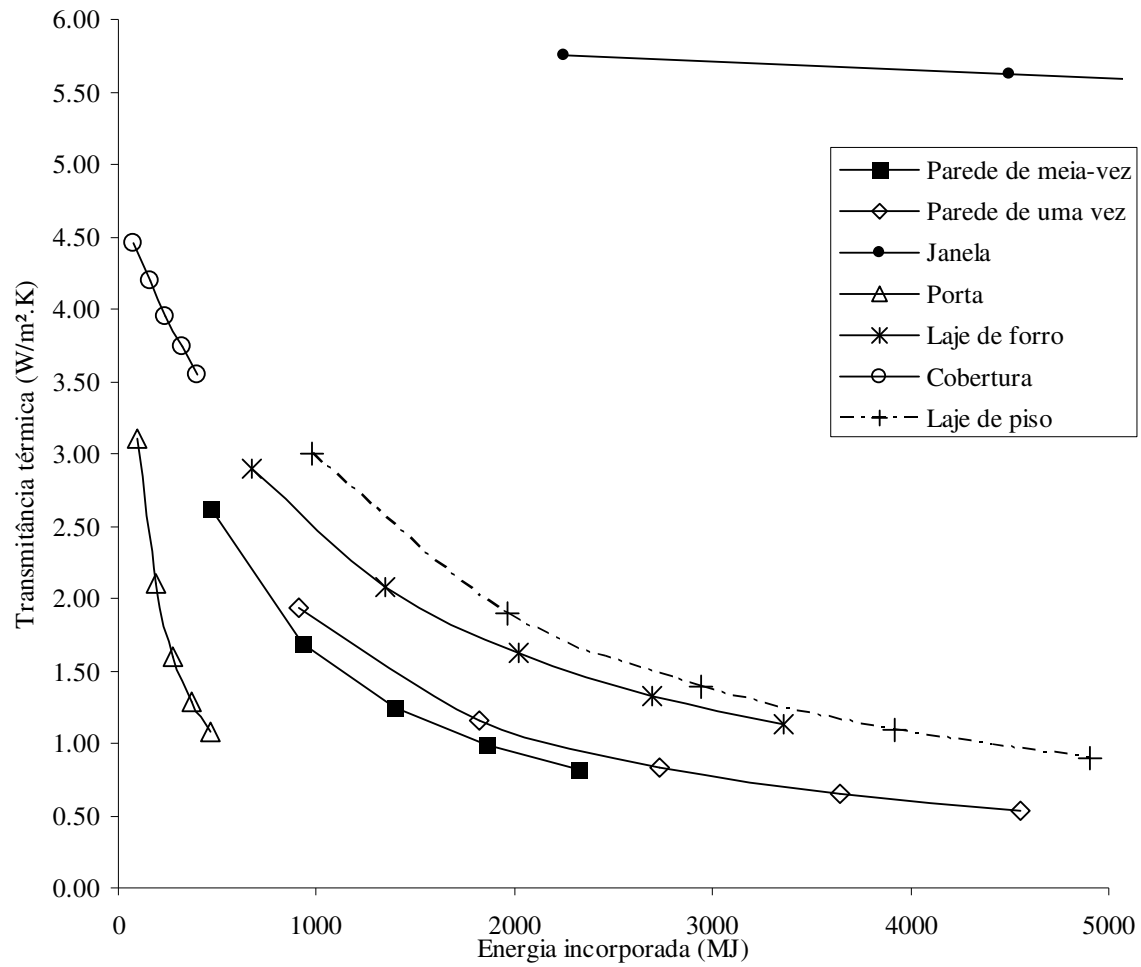


Gráfico 3 – Relação entre transmitância térmica (U) e energia incorporada (EI) dos elementos da R1-N e variações.  
Fonte: A autora (2011).

#### 4.6 FAIXA DE CONFORTO TÉRMICO

A temperatura externa -  $T_e$  foi calculada a partir da média entre a média mensal da temperatura externa diária máxima e a média mensal da temperatura externa diária mínima, seguindo a metodologia proposta. A partir da temperatura externa, as temperaturas de conforto – TC, para cada mês, foram calculadas pela fórmula  $T_c = 13,5 + 0,54T_e$  e a faixa de conforto foi estabelecida através da margem de tolerância de 2°C para baixo e para cima, resultando em uma faixa de conforto térmico de 4°C de amplitude que oscila ao longo do ano. As temperaturas de conforto máximas -  $TC_{máx}$  – e as temperaturas de conforto mínimas –  $TC_{mín}$  – delimitam a faixa (Tabela 19).

Tabela 19 -  $T_e$  e TC anual para Curitiba (°C)

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
$T_e$	20.7	21.05	20.15	17.55	15.65	13.05	13.75	15.05	16.05	17.55	19.25	20.4
TC	24.7	24.9	24.4	23.0	22.0	20.5	20.9	21.6	22.2	23.0	23.9	24.5
$TC_{máx}$ (TC + 2°C)	26.7	26.9	26.4	25.0	24.0	22.5	22.9	23.6	24.2	25.0	25.9	26.5
$TC_{mín}$ (TC - 2°C)	22.7	22.9	22.4	21.0	20.0	18.5	18.9	19.6	20.2	21.0	21.9	22.5

Fonte: A autora (2011), pelo método de cálculo para o gráfico Nicol.

Segundo o método, e como pode ser verificado no Gráfico Nicol para a cidade de Curitiba (Gráfico 4), a temperatura de conforto necessária nos ambientes internos varia conforme a temperatura externa média, especialmente em edificações não climatizadas. Isso acontece devido à aclimação das pessoas às condições locais.

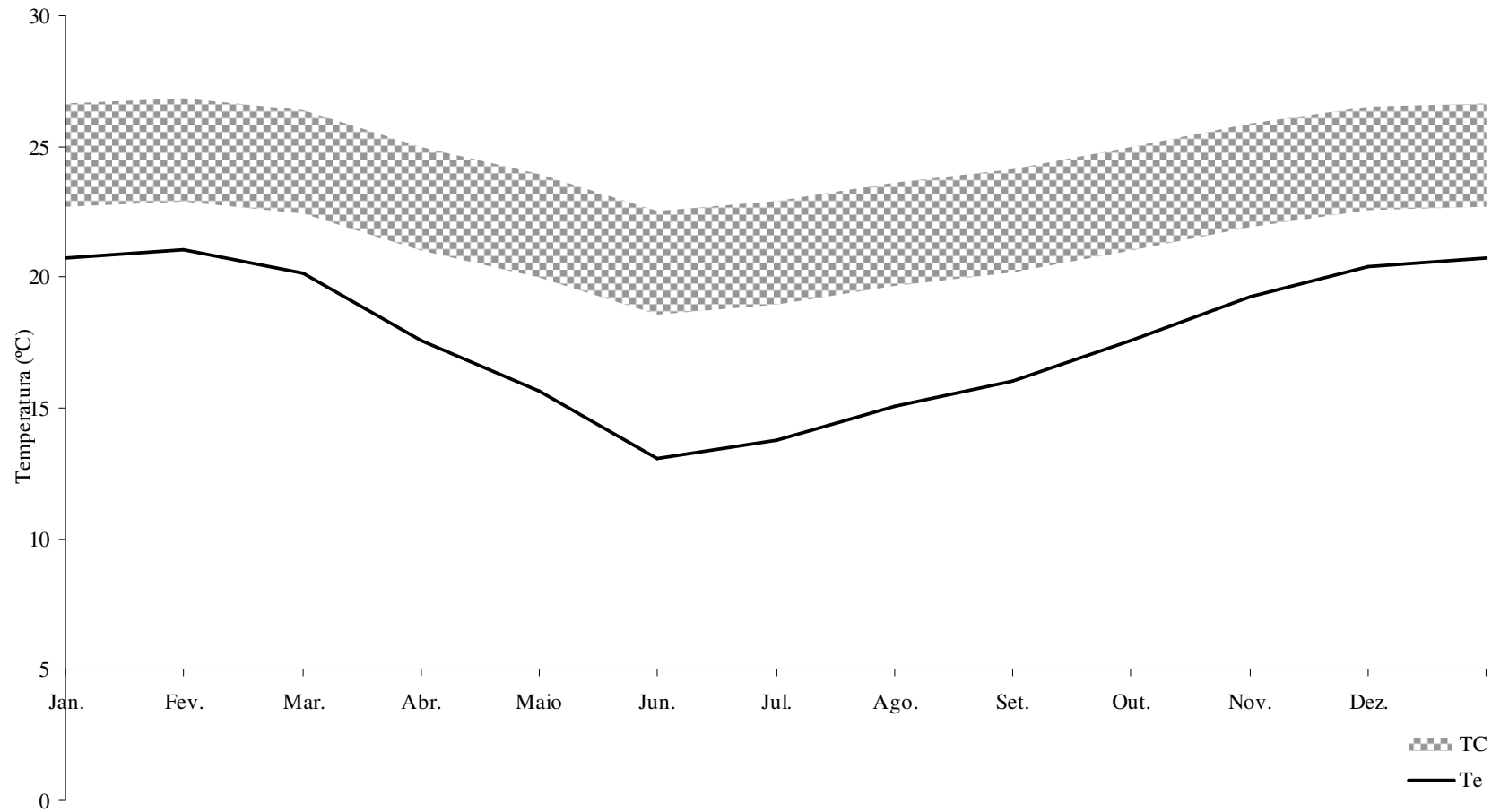


Gráfico 4 – Gráfico Nicol: faixa de conforto térmico para Curitiba.  
Fonte: A autora (2011).

#### 4.7 RESULTADOS DE CONFORTO TÉRMICO

A partir das simulações de desempenho térmico, são obtidos os resultados de temperaturas da edificação R1-N ao longo do ano para cada hora (8760 horas) e para cada zona térmica da residência. A representação gráfica de cada zona é apresentada no Apêndice G e uma média das zonas habitadas (hora a hora) é apresentada como as temperaturas da edificação (Gráfico 5), de forma que a variação das temperaturas, ao longo do ano, pode ser vista. A faixa de conforto térmico é apresentada junto às temperaturas da edificação permitindo visualizar graficamente as temperaturas que estão fora das condições de conforto necessárias para a utilização dos ambientes. Pode-se verificar que há uma quantidade expressiva de horas fora do conforto térmico, prevalecendo as horas de frio na R1-N, inviabilizando-a para uso de habitação nas condições originais em que se encontra. As horas em desconforto são contabilizadas e tabeladas e os arquivos que permitiram a geração desses gráficos e tabelas são disponibilizados de forma digital, assim como os gráficos (por zona e média das zonas habitadas) das demais situações (R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x, R1-N-5x).

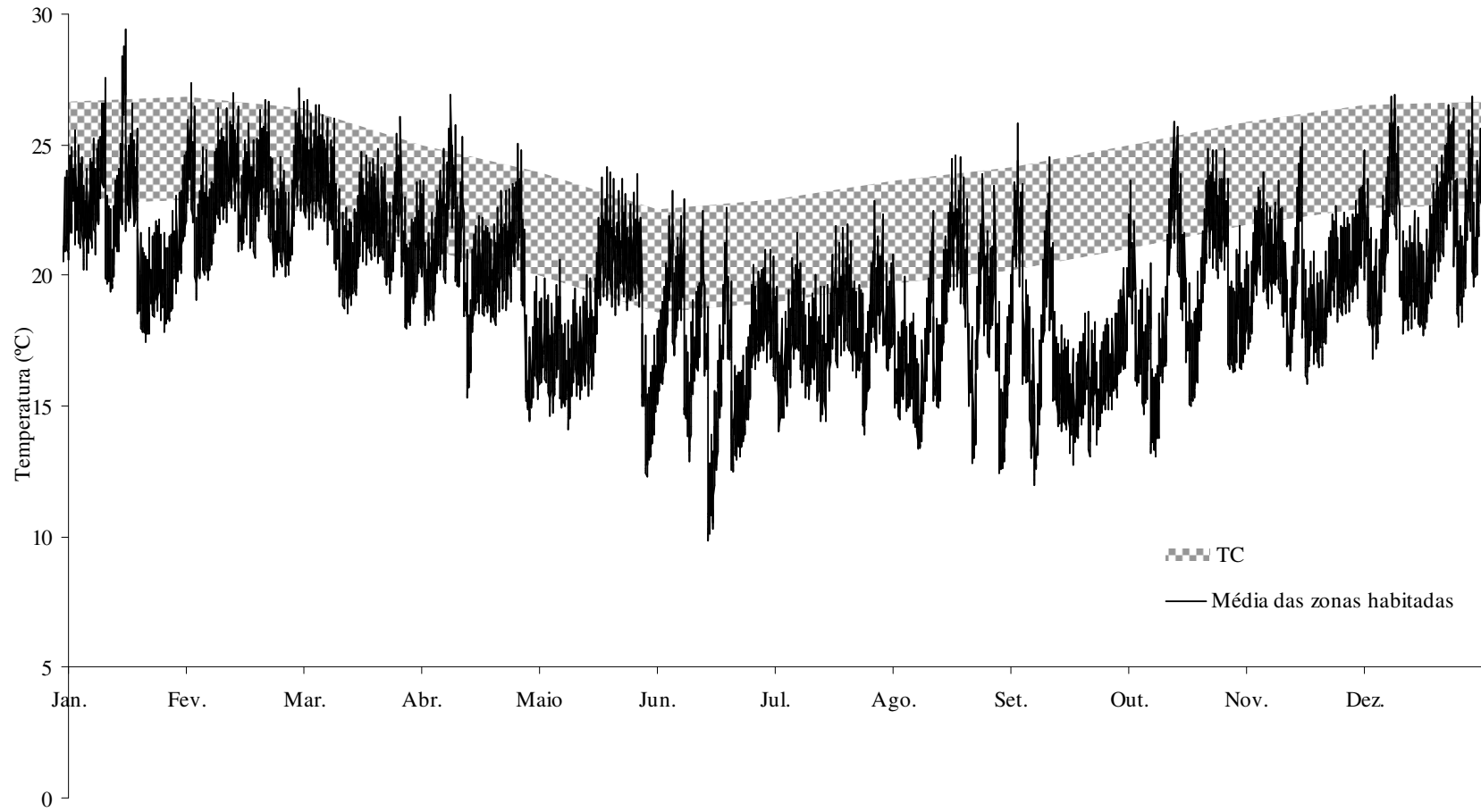


Gráfico 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – média das zonas habitadas.  
Fonte: A autora (2011).

4.7.1 PORCENTAGEM DE HORAS EM CONFORTO E DESCONFORTO TÉRMICO

São apresentados os resultados da quantidade de horas do ano em que estão dentro da faixa de conforto térmico determinada e a quantidade de horas em que estão fora da mesma. Estas são separadas em horas acima (calor) e horas abaixo (frio) das temperaturas da faixa. Os resultados por zona térmica da proporção de horas em conforto e desconforto térmico por mês para a R1-N, R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x e R1-N-5x são apresentados no Apêndice H. A proporção anual das médias das zonas é apresentada para a R1-N e suas variações (Gráfico 6).

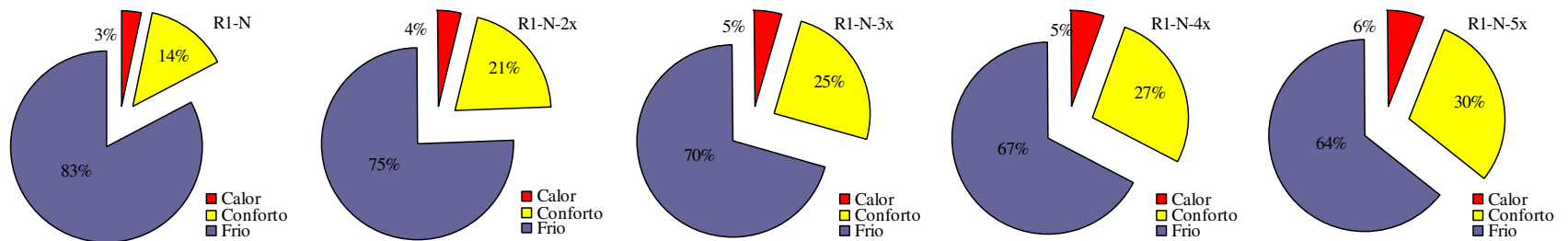


Gráfico 6 – Porcentagem de horas (h) de conforto térmico e desconforto (por frio e calor) da R1-N e variações em Curitiba.  
 Fonte: A autora (2011).

A edificação em sua situação original, R1-N, encontra-se em **83%** do tempo em **frio**, 3% em calor e apenas 14% em conforto térmico durante o ano (porcentagem das horas). Observa-se que à medida que a edificação ganha em aumento da espessura das superfícies, o desempenho térmico é melhorado e as horas em desconforto dos usuários diminuem, chegando a aumentar em 30% o tempo em conforto (R1-N-5x). Porém, mesmo com a espessura das superfícies quintuplicadas, com os materiais usados, não se obtêm um desempenho satisfatório da edificação, sendo necessário o uso de climatização artificial, principalmente para **aquecer** os ambientes.



#### 4.8 RELAÇÃO ENTRE HORAS DENTRO DA FAIXA DE CONFORTO TÉRMICO E ENERGIA INCORPORADA

A relação entre horas dentro da faixa de conforto térmico e energia incorporada apenas pode ser apresentada para a edificação como um todo, uma vez que a primeira é mensurada por zona térmica (ambiente) e a segunda é mensurada por superfície (Gráfico 7).

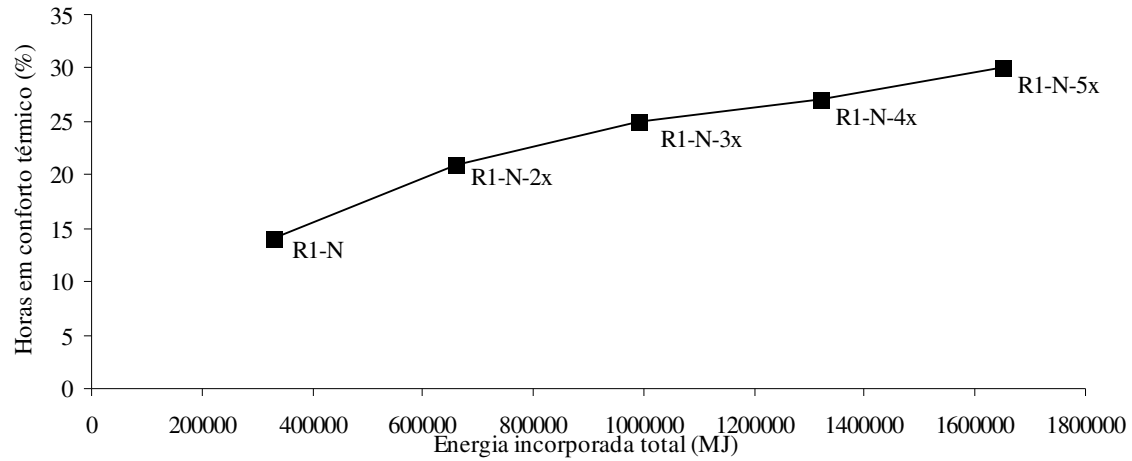


Gráfico 7 – Relação entre horas (h) dentro da faixa de conforto térmico (porcentagem) e energia incorporada (EI) da R1-N e variações.  
 Fonte: A autora (2011).

#### 4.9 RESULTADOS DA ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO

Os resultados de valores de energia apresentados – desempenho energético – são oriundos da climatização para manter a edificação com as temperaturas, ao longo do ano, sempre dentro da faixa de conforto térmico estabelecida. Os resultados são apresentados por zona térmica, separados entre climatização de aquecimento e climatização de resfriamento. O resultado total a partir da soma das zonas térmicas também é apresentado.

Também são apresentados os gastos, em reais, para climatização, a partir do valor atual da energia, R\$ 0.46012/kWh, segundo a COPEL (2011). Como foram climatizadas (pelo uso do recurso de *set point*) apenas as zonas térmicas correspondentes a ambientes habitados (2 quarto N-O, 3 quarto N-L, 4 quarto L, 5 sala e circulação, 6 banheiro externo, 7 cozinha, 8 banheiro social, 9 banheiro suíte), os resultados se restringem a essas zonas. Os arquivos com a totalidade dos dados que permitiram a síntese em tabela apresentada são disponibilizados de forma digital. Dessa forma, permite-se a comparação entre R1-N, R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x e R1-N-5x (Tabela 20). Foi considerado o Coeficiente de Performance – COP como 2.5 (SISSOM; PITTS, 1988).

Tabela 20 : Energia usada para climatização (ano) - Wh/ano

Zona	R1-N		R1-N-2x		R1-N-3x		R1-N-4x		R1-N-5x	
	Aquec.	Resfr.	Aquec.	Resfr.	Aquec.	Resfr.	Aquec.	Resfr.	Aquec.	Resfr.
2 quarto N-O	3364267	-214	1979405	-184	1401066	-170	1123704	-338	957684	-909
3 quarto N-L	2520111	-385	1448034	-382	1003176	-338	792536	-285	667945	-287
4 quarto L	2721815	-797	1848905	-427	1491588	-424	1315574	-426	1196010	-455
5 sala e circulação	5009336	-2173	2918055	-1783	2055547	-1556	1643337	-1185	1397858	-1241
6 banheiro externo	2331753	-2957	1548160	-1315	1201433	-1475	1012714	-1884	887711	-2471
7 cozinha	1636966	-982158	813876	-1244734	514077	-1385270	380970	-1470412	302457	-1529451
8 banheiro social	923131	-556936	724049	-671504	657312	-730136	628824	-765161	608950	-789015
9 banheiro suíte	968123	-551093	758639	-666290	682844	-726231	646834	-762438	620859	-787293
	<b>19475503</b>	<b>-2096712</b>	<b>12039124</b>	<b>-2586618</b>	<b>9007043</b>	<b>-2845600</b>	<b>7544494</b>	<b>-3002128</b>	<b>6639473</b>	<b>-3111124</b>
	90.28%	9.72%	82.31%	17.69%	75.99%	24.01%	71.53%	28.47%	68.09%	31.91%
<b>Total</b>	<b>21572215</b> Wh/ano ou <b>77660</b> MJ/ano		<b>14625742</b> Wh/ano ou <b>52653</b> MJ/ano		<b>11852643</b> Wh/ano ou <b>42670</b> MJ/ano		<b>10546622</b> Wh/ano ou <b>37968</b> MJ/ano		<b>9750597</b> Wh/ano ou <b>35102</b> MJ/ano	
Tarifa de energia (R\$/kWh)*	0.46012									
Custo por ano (R\$)**	<b>3970.32</b>		<b>2691.84</b>		<b>2181.46</b>		<b>1941.08</b>		<b>1794.58</b>	
Custo por mês - média (R\$)**	<b>330.86</b>		<b>224.32</b>		<b>181.79</b>		<b>161.76</b>		<b>149.55</b>	

\*Valor da COPEL (2011).

\*\*considerando COP - Coeficiente de Performance = 2.5 (SISSOM; PITTS, 1988).

Fonte: A autora, 2011.

#### 4.10 RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA E ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO

A energia necessária para a climatização e sua relação com a espessura das superfícies do invólucro é apresentada (Gráfico 8), onde os fatores de multiplicação da espessura (1x, 2x, 3x, 4x, 5x) são dispostos no eixo vertical, representando as variações de projeto (R1-N, R1-N-2x, R1-N-3x, R1-N-4x e R1-N-5x) e a energia necessária para manter a edificação termicamente confortável (dentro da faixa definida) é apresentada como a energia total (usada para aquecimento e resfriamento da edificação) e, em separado, energia de aquecimento e energia de resfriamento.

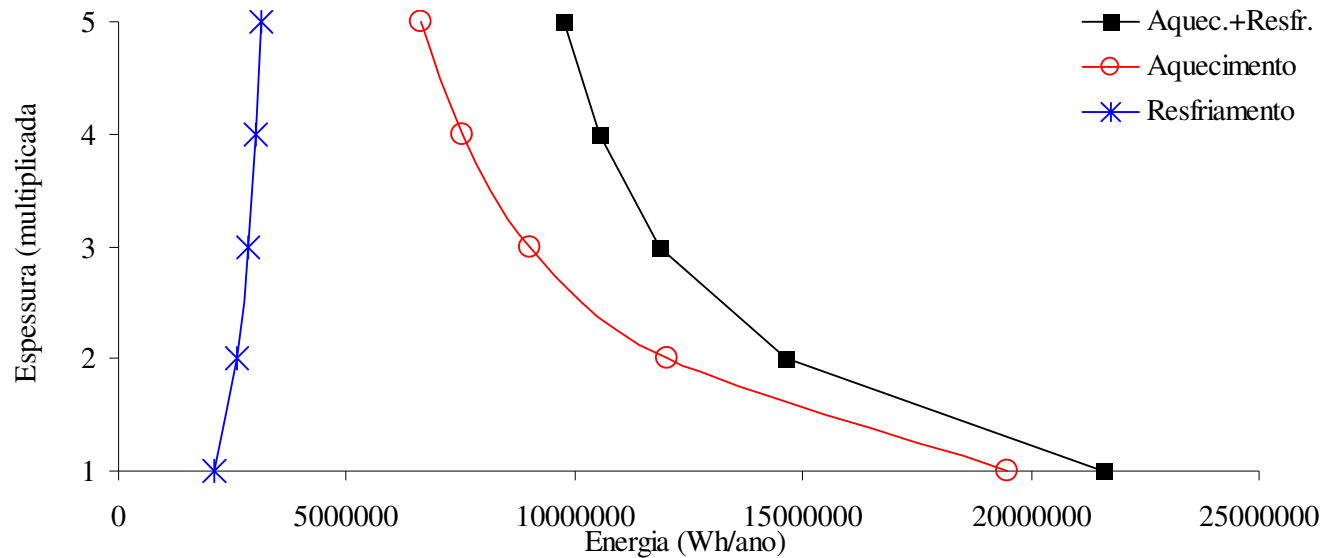


Gráfico 8 – Relação entre espessura (e) e energia para climatização (Q) da R1-N e variações.  
 Fonte: A autora (2011).

#### 4.11 RELAÇÃO ENTRE ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO E ENERGIA INCORPORADA

Para obter a relação entre a energia usada para climatização e a energia incorporada da edificação, foram utilizados os valores totais da residência, uma vez que não é possível comparar resultados de zonas térmicas (climatização) com elementos/ superfícies (energia incorporada dos materiais). A energia incorporada (por área de superfície) aumenta de forma proporcional quando multiplicada pelos fatores utilizados (1x, 2x, 3x, 4x, 5x). O mesmo acontece com a energia total incorporada da edificação, obtendo-se os totais da residência: 330022 MJ, 660044 MJ, 990067 MJ, 1320089 MJ, 1650111 MJ, respectivamente (Gráfico 9). Dividindo esses totais pela área de piso da residência (106.44m<sup>2</sup>), é possível observar os valores obtidos para uma unidade de área de piso (Gráfico 10).

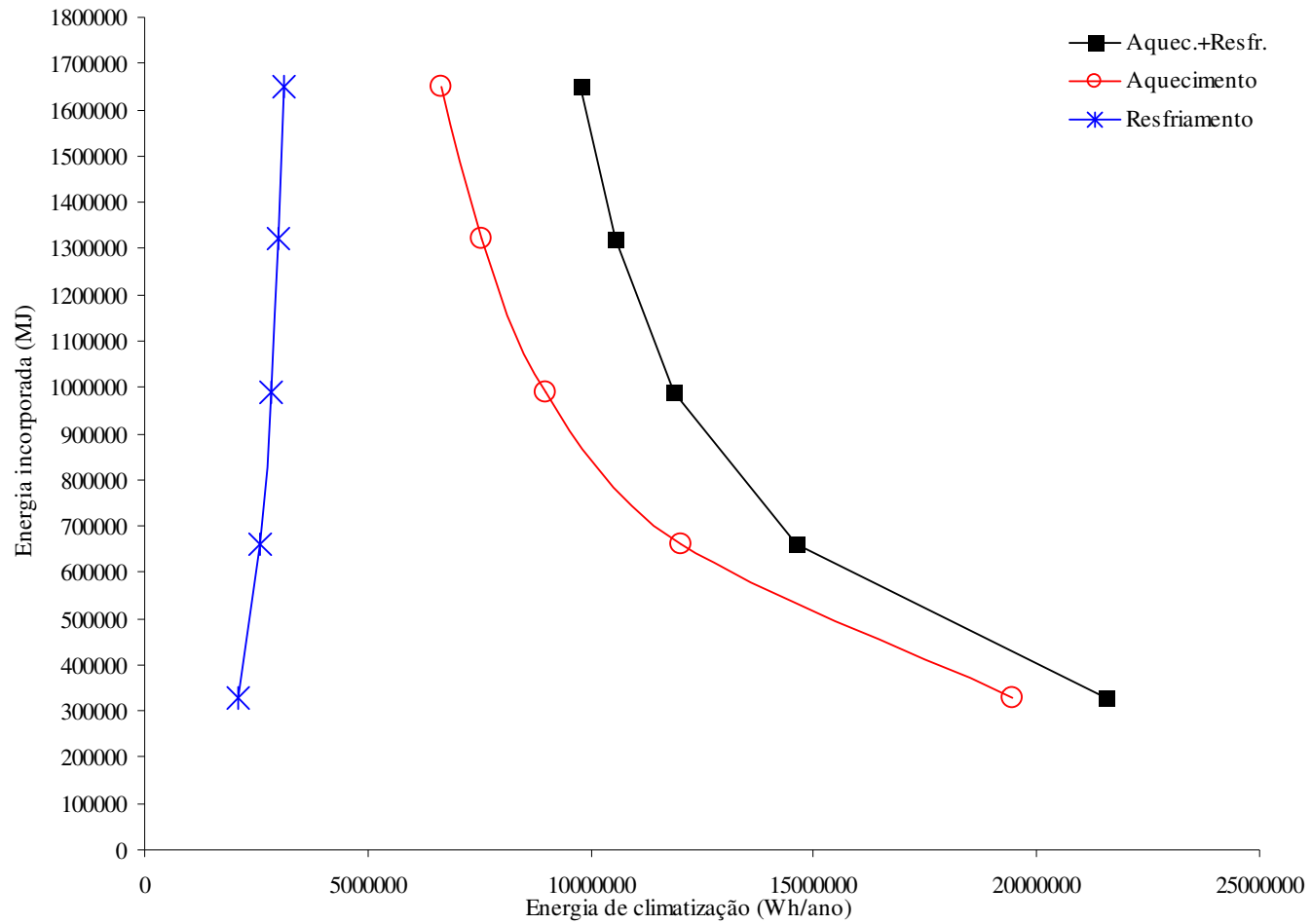


Gráfico 9 – Relação entre energia incorporada (e) e energia para climatização (Q) da R1-N e variações (total da edificação).  
 Fonte: A autora (2011).

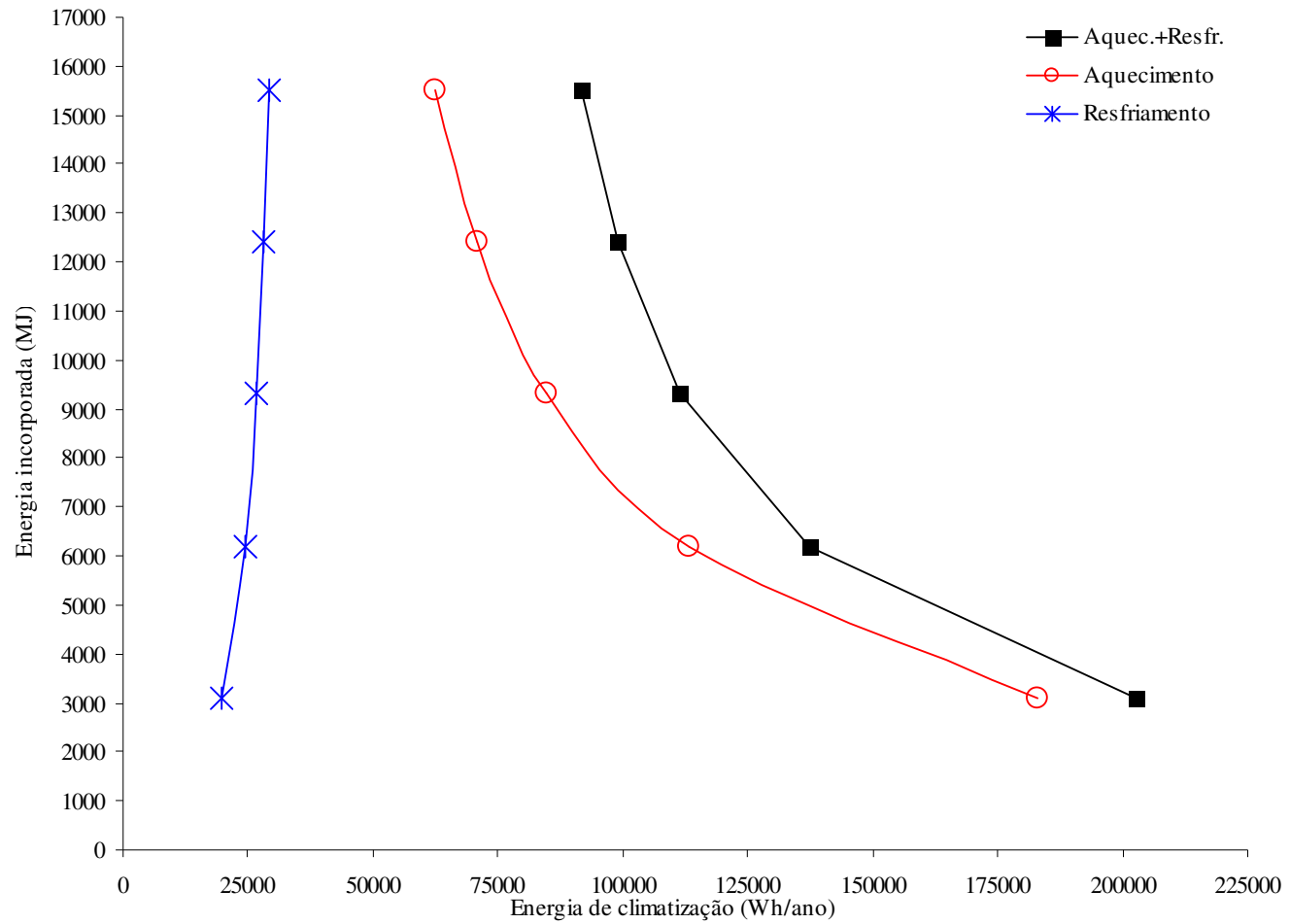


Gráfico 10 – Relação entre energia incorporada (e) e energia para climatização (Q) da R1-N e variações (por área de piso – m²).  
 Fonte: A autora (2011).

#### 4.12 RELAÇÃO ENTRE ENERGIAS E ESPESSURA – PONTO DE EQUILÍBRIO

A relação final do trabalho (Gráfico 11) é apresentada como uma relação entre as **energias** da edificação (energia para a climatização somada à energia incorporada) e a **espessura** (dada pelo seu fator de multiplicação). Considerando que a **energia incorporada** adquirida ao ser construída a residência permanece a mesma ao longo de **toda a vida** da edificação (não contabilizando reformas e manutenções), e que a **energia para a climatização** é dada para o período de **um ano**, as energias não podem ser somadas. Como não é possível a soma entre energias usadas em períodos de tempo diferentes, para permitir tal soma, a **energia incorporada** foi dividida pela quantidade de anos que uma edificação dura (vida útil) - 50 anos (TAVARES, 2006) - obtendo-se a energia equivalente **por ano**. Dessa forma, a soma é realizada e obtêm-se o quantitativo das **energias por ano** e relacionando-as à **espessura**.



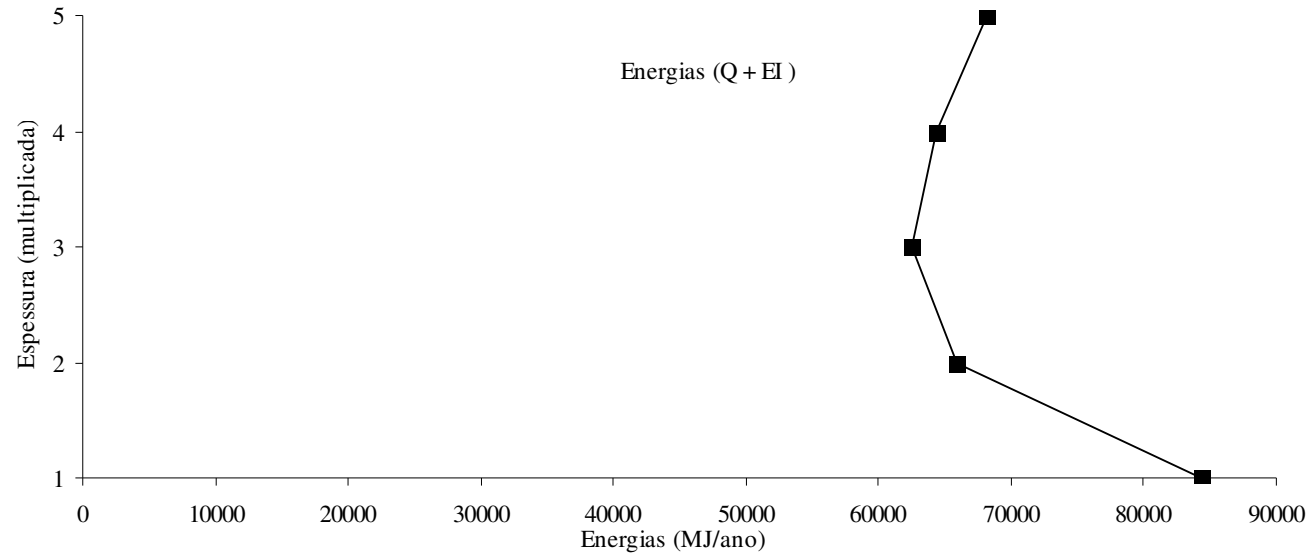


Gráfico 11 – Relação entre energias – incorporada (EI) + para climatização (Q) – e espessura da R1-N e variações (para o período anual).  
Fonte: A autora (2011).

## 5 CONCLUSÕES

Como no trabalho são estudadas as sete diferentes superfícies compreendidas pelos elementos construtivos (parede de meia-vez, parede de uma vez, janela, porta, laje de forro, cobertura e laje de piso, sendo estas laterais, superiores ou inferiores), a relação obtida entre **transmitância térmica e energia incorporada** não apresenta um único valor, mas valores para as superfícies de uma determinada variação do projeto. Foi encontrado um **ponto de equilíbrio** entre as energias (incorporada mais climatização) da edificação e o fator multiplicador das espessuras, sendo o melhor ponto obtido na **variação R1-N-3x** da edificação residencial padrão brasileira R1-N. A **R1-N** (projeto original) apresenta o **maior valor de energias** para estar em conforto térmico, necessitando de alterações. A **R1-N-2x**, ao duplicar suas espessuras do invólucro, **reduz o valor das energias**, mesmo aumentando a energia incorporada, por melhorar a eficiência energética de climatização. Ao triplicar as espessuras, na **R1-N-3x**, a **eficiência energética melhora** ainda mais em relação à anterior, porém, ao quadruplicar, **R1-N-4x**, o **valor das energias aumenta** novamente, pois, apesar de diminuir o consumo de climatização, a grande quantidade de materiais utilizados para o invólucro faz a energia incorporada ter relevante peso na soma. O **mesmo acontece** com a **R1-N-5x**, seguindo essa tendência. Dessa forma, o **ponto ótimo** que determina as condições de equilíbrio foi encontrado na situação **R1-N-3x**, dentre as estudadas, ao serem triplicadas as espessuras de forma proporcional em cada elemento de superfície do invólucro da edificação residencial padrão brasileira localizada na cidade de Curitiba. A partir dessa informação e considerando a não alteração das técnicas construtivas (dispondo apenas dos materiais utilizados no país para esse fim), conclui-se que os valores ideais de **transmitância térmica (U) e energia incorporada (EI)** (ambas por área de superfície) para os elementos que compõem o invólucro da edificação, para o **clima de Curitiba**, são:

(1) Parede de meia-vez:	$U = 1.24 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$EI = 1396 \text{ MJ/m}^2$
(2) Parede de uma vez:	$U = 0.83 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$EI = 2733 \text{ MJ/m}^2$
(3) Janela:	$U = 5.49 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$EI = 6739 \text{ MJ/m}^2$
(4) Porta:	$U = 1.59 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$EI = 278 \text{ MJ/m}^2$
(5) Laje de forro:	$U = 1.62 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$EI = 2018 \text{ MJ/m}^2$
(6) Cobertura:	$U = 3.95 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$EI = 239 \text{ MJ/m}^2$
(7) Laje de piso:	$U = 1.39 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$EI = 2942 \text{ MJ/m}^2$

Obtidos os maiores valores para transmitância térmica e menores valores para energia incorporada dos elementos do invólucro, conclui-se que para construir de modo mais sustentável com a tecnologia nacional, considerando as condições necessárias de conforto térmico para a vivência em Curitiba, as edificações haveriam de ter todos os seus elementos de fechamento **triplicados em espessura**. Porém, essa pode não ser a única alternativa, abrindo campo para complementações desse estudo. Os valores ideais encontrados de transmitância térmica (U) e energia incorporada (EI) não excluem a possibilidade de que outras variações, onde as espessuras não sejam multiplicadas de forma proporcional para todas as superfícies do conjunto como feito neste estudo, possam resultar nos mesmos ou em melhores desempenhos térmico e energético que o encontrado para a situação R1-N-3x, mesmo que se mantendo os materiais do projeto original. Uma forma diferente da realizada de análise da edificação pode ser pela alteração das espessuras dos elementos de superfícies em separado (um por vez). Seria feita a análise da influência

.....

específica de cada composição de materiais na edificação e, por fim, uma análise do comportamento da edificação como um todo. Depois de feitos estudos por simulações computacionais variando um elemento de superfície de cada vez, uma relação entre horas dentro da faixa de conforto térmico e transmitância térmica poderia ser obtida para cada tipo de superfície. O mesmo poderia ser feito para energia para a climatização e transmitância térmica, obtendo-se uma relação direta (sendo esta, uma sugestão para estudos futuros).

Apesar de obtido o ponto de equilíbrio, a edificação R1-N-3x ainda necessita de energia de climatização para estar dentro da faixa de conforto térmico para fins de habitação. Além de impactar o meio ambiente, essa necessidade de climatização gera um custo de energia médio mensal de R\$ 181,79, calculado a partir do valor da tarifa de energia em Curitiba para residências, o qual é de 0.46012 R\$/kWh (COPEL, 2011). Sendo a média de consumo por edificação brasileira de 159 kWh/mês (TAVARES, 2006), o que resultaria em uma conta de energia no valor de R\$ 73.16 (para toda a energia da edificação), pela tarifa da Copel (2011), verifica-se que o gasto da R1-N-3x, apenas com climatização, já equivale a aproximadamente 2.5 vezes esse valor de consumo total de uma residência. Sem interferências no modo de construir ou sem o apoio de um sistema de climatização, a **edificação padrão brasileira não pode ser utilizada em Curitiba** como moradia, por estar fora das condições ambientais para ser habitável ao não atender às necessidades de temperatura conforme a possibilidade de adaptação do corpo humano.

Os cálculos da transmitância térmica permitem visualizar as condições do invólucro das edificações brasileiras em relação à troca de calor com o ambiente externo. As superfícies estudadas apresentam valores de transmitância térmica muito acima de valores internacionais, os quais, para uma residência tradicional, são menores que 0.4 W/m<sup>2</sup>.K (sendo que a espessura das superfícies varia normalmente entre 25 e 40 centímetros) (KROPE; GORICANEC, 2009). Esse valor de transmitância térmica não poderá ser atingido, dentro de uma espessura viável de ser construída e de forma sustentável, com a tecnologia construtiva brasileira, sugerindo-se estudos com a inserção de materiais exóticos, ou mesmo, estudos de novas tecnologias locais para criação de materiais ou compostos que possam melhorar esses valores. Quanto ao uso de materiais locais para ser feita uma alteração na tecnologia construtiva para a localidade e o clima de Curitiba, a madeira poderia ser escolhida para a construção de elementos de superfície devido às suas propriedades térmicas e baixo impacto ambiental. A porta, elemento de madeira da edificação, obteve,

.....

dentre os demais estudados, o melhor desempenho na relação entre energia incorporada e transmitância térmica. Dos resultados encontrados para a energia incorporada, observa-se que as janelas apresentam o maior valor por metro quadrado em função do alumínio, um material que demanda muita energia para ser fabricado, porém, a quantidade deste elemento não é representativa, sendo usado em apenas 2.1% das superfícies. Se em pequena quantidade e para elementos específicos, seu uso pode ser vantajoso pela praticidade de instalação, porém, sempre que possível, recomenda-se sua substituição.

Estudos de desempenho térmico e energético, assim como de sustentabilidade, para Curitiba são recomendados testando-se não apenas outros materiais, mas alterações de geometria (volume e forma), assim como, observando-se o comportamento da residência quanto à orientação solar das superfícies do invólucro e seus efeitos a partir da composição formal da edificação.

Após estudos (futuros) para o invólucro da edificação (de forma a resolver as questões de conforto térmico e de sustentabilidade) pela alteração da tecnologia construtiva brasileira (para minimizar a energia necessária para climatização), pode ser feita também a análise do ciclo de vida da edificação, a qual envolve todas as energias utilizadas em todas as fases da residência. Esta envolve a energia incorporada, a energia de uso (de toda a edificação: equipamentos, iluminação, climatização e demais), a energia incorporada de reposição/manutenção e outras (como descrito no item 2.1). Esta análise não se relaciona diretamente com o estudo de conforto térmico da edificação, mas, se previamente este for feito (como aqui), dará mais credibilidade à análise do ciclo de vida.

Recomenda-se realizar o presente estudo da edificação R1-N em outras localidades brasileiras, a fim de verificar se a tecnologia construtiva usada como nacional pode ser aplicada em um determinado local, e seu clima específico, ou se não há aplicabilidade desta no território brasileiro. Considerando a grande extensão do país e a variedade de climas, e edificação padrão brasileira pode ser adequada para outro local, que não Curitiba.

Dessa forma, conclui-se que o projeto da edificação padrão, mesmo em sua melhor opção de variação de projeto, R1-N-3x, não atende às necessidades da cidade de Curitiba sem o uso de climatização (de alto custo ambiental e financeiro). São necessárias intervenções de projeto como a substituição de materiais e tecnologias construtivas, alteração da disposição dos ambientes, volume e/ou forma. Intervenções que incluam outros materiais e tecnologias fazem-se necessárias também pela considerável perda de área de piso dentro dos ambientes, devido ao aumento das espessuras das superfícies, ao ser mantida a tecnologia construtiva inicial do projeto da R1-N. Um estudo que associe as superfícies do invólucro e a orientação solar das mesmas também seria de relevante contribuição.

Ambas as **hipóteses** puderam ser **confirmadas**, uma vez que a primeira foi confirmada ao obter-se um ponto ótimo entre transmitância térmica e energia incorporada das superfícies na terceira situação, R1-N-3x, dentre as apresentadas e respeitada a tecnologia construtiva nacional. Porém, apesar dessa ser a melhor situação, não pode ser considerada como ideal e definitiva para estabelecer o método construtivo para a localidade em questão. Assim é confirmada a segunda hipótese, uma vez que a tecnologia construtiva usada em todo o país não atende às demandas do clima de Curitiba, comprovando que um projeto padronizado não pode ser utilizado em todo o Brasil, este que apresenta tantas características diferentes ao longo do seu território, em especial, os climas.

## 6 REFERÊNCIAS

ABCR - Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias. **Distâncias rodoviárias**. Disponível em: <http://www.abcr.org.br/geode/index.php?uf1=PR&po=1&uf2=SP&ori=5742&des=9170>. Acesso em: 01/10/2010. 2010.

ABEYSUNDARA, U. G. Y; BABEL, S.; GHEEWALA, S. **A matrix in life cycle perspective for selecting sustainable materials for buildings in Sri Lanka**. Building and Environment. v. 44, ed. 5, p. 997-1004, 2008.

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

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14859. Laje pré-fabricada - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2002

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 1980.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Norma Brasileira NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

ALCORN, J.A.; BAIRD, G. **Use of a hybrid energy analysis method for evaluating the embodied energy of building materials**. WREC. 1996.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2009.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução n. 176, de 24 de outubro de 2000.** Disponível em: [http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/176\\_00re.htm](http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/176_00re.htm). Acesso em: 12/08/2011. 2011.

ASHRAE. **Standard Method for Determining and Expressing the Heat Transfer and Total Optical Properties of Fenestration Products**, Public Review Draft of Standard 142P, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 1998.

BAIRD, George; ALCORN, Andrew; HASLAM, Phil. **The energy embodied in building materials - updated New Zealand coefficients and their significance.** IPENZ Transactions, Vol. 24, No. 1/CE, 1997.

BLANUSA, Petar; GOSS, William P.; ROTH, Hartwig; WEITZMANN, Peter; JENSEN, Claus F.; SVENDSEN, Svend; ELMAHDY, Hakim; **Comparison between ASHRAE and ISO thermal transmittance calculation methods.** Energy and Buildings 39 (2007) 374–384. 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia - Divisão de Meteorologia Aplicada. **Normais Climatológicas (1961-1990).** Brasília: SPI/Emprapa. 1992.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia. **Taxas e Tarifas, Tarifas por Classe - Residencial Convencional.** Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Fe3a5cb971ca23bf503257488005939ba>. Acesso em: 26/04/11. 2011.

COSTA, Ennio Cruz da. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural.** São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

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

FANGER, P. O. **Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering.** New York. McGraw-Hill. 1972.

FAY, Roger; TRELOAR, Graham; IYER-RANIGA, Usha. **Life-cycle energy analysis of buildings: a case study.** Building Research & Information (2000) 28(1), 31–41. 2000.

FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de conforto térmico.** 3ªed. São Paulo: Studio Nobel, 1999.



GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. Elsevier, Amsterdam. 1969.

GOULART, Solange; LAMBERTS, Roberto; FIRMINO, Samanta. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. 2ª ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.

GRAF, Helena Fernanda. **Diminuição dos impactos ambientais de edificações em áreas de relevante interesse ambiental**. Monografia (pós-graduação MBA em Sistema de Gestão Ambiental), Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2008.

GUEDES, Milber Fernandes. **Caderno de encargos**. São Paulo: Pini, 2005.

HACKER, Jacob N. et al. **Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change**. Energy & Buildings, mar. 2007.

HALLIDAY, S. P. **Architecture of habitat: design for life**. The Royal society, London, 1997.

HARRIS, D. J. **A quantitative approach to the assessment of the environmental impact of building materials**. Building and Environment. v. 34, ed. 6, p. 751-758, 1998.

HOLMAN, Jack Philip. **Transferência de calor**. Tradução: Luiz Fernando Milanez; revisão técnica: José Maria Saiz Jabardo. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.

HUBERMAN, N.; PEARLMUTTER, D. **A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert**. Energy and Buildings 40 (2008) 837–848. 2008.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **A Família Brasileira**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/ibgeteen/pesquisas/familia.html>. Acesso em: 26/01/2011. 2011b.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área Territorial Oficial**. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_territ\\_area.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm). Acesso em: 26/01/2010. 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Anuário Estatístico do Brasil. **Unidades climáticas**. 1997.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa interativo do Brasil. **Mapa de divisões territoriais**. 2005. Disponível em: <http://mapas.ibge.gov.br/brasil/viewer.htm>. Acesso em: 23/03/2011. 2011a.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Re: [Fwd: DADOS PARA PESQUISA]**. [Mensagem de pesquisa]. Mensagem recebida por: <seoma.rs@inmet.gov.br>, em: 08/02/2011. 2011.

IPPUC - Instituto de pesquisa e planejamento urbano de Curitiba. **Curitiba em dados 2008**. Disponível em: [http://ippucnet.ippuc.org.br/Bancodedados/Curitibaemdados/Curitiba\\_em\\_dados\\_Pesquisa.asp](http://ippucnet.ippuc.org.br/Bancodedados/Curitibaemdados/Curitiba_em_dados_Pesquisa.asp). Acesso em: 26/01/2010. 2010.

IPT - Instituto de pesquisas tecnológicas. **Informações sobre madeiras: Peroba rosa**. Disponível em: [http://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras3.php?madeira=25](http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=25). Acesso em: 03/01/2011. 2011.

ISO - International Standards Organization. **INTERNATIONAL STANDARD - ISO 7730: Moderate thermal environments - determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort**. International Standards Organization, 1994.

ISO - International Standards Organization. **INTERNATIONAL STANDARD - ISO 10077-2: Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters—Calculation of Thermal Transmittance — Part 2: Numerical Method for Frames**, International Standards Organization, Geneva, 2003.

KROPE, Jurij; GORICANEC, Darko. **Capítulo 2: Energy Efficiency and Thermal Envelope**. A Handbook of Sustainable Building Design & Engineering - An Integrated Approach to Energy, Health and Operational Performance. Editado por: Dejan Mumovic, Mat Santamouris. Londres: Earthscan, 2009.

LAC - Laboratório de Ambiente Construído - Universidade Federal do Paraná. Organizado por: GRAF, Helena Fernanda. **Indústrias brasileiras associadas às entidades dos setores da construção civil: base de dados – Revisão 2010**. Curitiba, 2010.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 2ªed. São Paulo: ProLivros, 2004.

MENDES, Nathan; WESTPHAL, Fernando Simon; LAMBERTS, Roberto; CUNHA NETO, José A. Bellini da. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005. ISSN 1415-8876, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 2005.

..... 120

**MESTRE - Mestre Building Simulation System.** Versão 2011. Desenvolvido por: SCHMID, Aloísio Leoni. *Software*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2011.

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

MME - Ministério das Minas e Energia (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2009: Ano base 2008.** Rio de Janeiro : EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2009.

NEYMARK, J.; JUDKOFF, R. IEA – International Energy Agency. **Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST)**, Technical Report NREL /TP-550-43827, 2008.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A.. **Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings.** Energy and Buildings 34 (2002) 563-572. 2002.

NIMER, Edmon. **Climatologia do Brasil.** 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

OZISIK, M. Necati. **Transferência de calor: um texto básico.** 661p., il., 25 cm. Inclui bibliografia e índice. ISBN 852770160X (broch.). Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, c1990.

PINI. **TCPO 13 : tabelas de composições de preços para orçamentos / 13.** ed. São Paulo : Pini, 2008.

REDDY, B.V. Venkatarama; JAGADISH, K.S. **Embodied energy of common and alternative building materials and technologies.** Energy and Buildings 35 (2003) 129–137. 2003.

ROAF, Sue; FUENTES, Manuel; THOMAS Stephanie. **Ecohouse – A Casa Ambientalmente Sustentável.** 2ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2006.

ROBSON, Colin. **Real world research: A Resource for Social Scientists and Practitioner - Researchers.** 2ª ed. Blackwell, 2006.

RORIZ, M. ; BASSO, A. **Comparação entre 10 critérios para a definição da Zona de Conforto Térmico.** Anais do I Encontro Nacional sobre Normalização Ligada ao Uso Racional de Energia e ao Conforto Térmico de Edificações, p. 57-76. Florianópolis - SC. Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.

SCHMID, Aloísio Leoni. **Simulação da luz natural: combinação dos algoritmos de raytracing e radiosidade e suas aplicações na Arquitetura.** Revista Ambiente construído, v.4, p.51 - 59, 2004.

SCHMID, Aloísio Leoni. **Simulação de desempenho térmico em múltiplas zonas: MESTRE, um sistema brasileiro na linguagem Java.** VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2001, S. Pedro (SP). Anais do ENCAC 2001, 2001.

SCHMID, Aloísio Leoni. **Tecnologia nacional em simulação acústica para ver e ouvir ambientes futuros.** Engenharia e construção, p.31 - 34, 2006.

SCHMID, Aloísio Leoni. **RE: Dados SIMEPAR.** [Mensagem de pesquisa]. Mensagem recebida por: <iso@ufpr.br>, em: 07/03/2011. 2011.

SCHMID, Aloísio Leoni; GRAF, Helena Fernanda. **Validation of Mestre Building Simulation System according to Best-Test Multi-Zone, Non-Airflow, In-Depth Diagnostic Cases.** In: BUILDING SIMULATION 2011, Sydney. Anais. Sydney, 2011.

SIMEPAR – Instituto Tecnológico *Simepar*. **Re: Solicitação de dados.** [Mensagem de pesquisa]. Mensagem recebida por: <osmar@simepar.br>, em: 31/01/2011. 2011.

SINDUSCON-MG - 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. 112p. CDU 69: 657.474.5. 2007

SISSOM, L. E.; PITTS, D. R. **Fenômenos de Transporte.** Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

SZOKOLAY, Steven V. **Introduction to Architectural Science – The Basis of Sustainable Design.** 2ª edição. 2010.

TAVARES, Sergio Fernando. **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.

THORMARK, C. **A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential**. Building and Environment. v. 37, ed. 4, p. 429-435, 2001.

U. S. - United States Department of Energy. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: [www.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory](http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory). Acesso em: 30/04/2011. 2011.

YAZIGI, Walid. **A técnica de edificar**. 7ª ed. 722 p., il. Inclui referencias bibliográficas. ISBN 8572661719 (broch.). São Paulo: SindusCon SP: Pini, 2006.

ZHANG, Zhihui; WU, Xing; YANG, Xiaomin; ZHU, Yimin. **BEPAS—a life cycle building environmental performance assessment model**. Building and Environment, v. 41, ed. 5, p 669-675, 2005.

ZUHAIRY, A. A.; SAYIGH, A. A. M. **The development of the bioclimatic concept in building design**. Renewable energy, v. 3, 1993.

## 6.1 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14724 - Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação.** Rio de Janeiro, 2005.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023 – Informação e documentação – Referências – Elaboração.** Rio de Janeiro, 2002.

ECO, Umberto. **Como se faz uma tese.** 17ª edição. São Paulo: Perspectiva S.A., 2002.

UFPR - Universidade Federal do Paraná, Sistema de Bibliotecas. **Normas para apresentação de documentos científicos.** 2ª ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2007.

YIN, Robert K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 3ªed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

# **7 APÊNDICES**

## APÊNDICE A

Tabela complementar à Tabela 5 - Detalhamento dos componentes da composição dos elementos

Componentes	Componentes detalhados
Bloco cerâmico (0,09x0,19x0,19m)	Bloco cerâmico furado de vedação (0,09x0,19x0,19m)
Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:2:8	Areia lavada tipo média - 0.01647 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
	Cal hidratada CH III - 2.457 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 2.457 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	Areia lavada tipo média - 0.0061 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 2.43 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
Massa única impermeável para parede externa com argamassa pré-fabricada	Argamassa pré-fabricada para revestimento interno, externo e assentamento de alvenaria e pisos
Massa corrida à base de PVA	Massa corrida à base de PVA com duas demãos, para pintura látex
Tinta látex PVA	Tinta látex PVA (tipo de acabamento: fosco) de cor branca
Bloco cerâmico (0,09x0,19x0,19m)	Bloco cerâmico furado de vedação (0,09x0,19x0,19m)
Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:2:8	Areia lavada tipo média - 0.05124 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
	Cal hidratada CH III - 7.644 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 7.644 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	Areia lavada tipo média - 0.0061 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
	Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 2.43 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
Massa única impermeável para parede externa com argamassa pré-fabricada	Argamassa pré-fabricada para revestimento interno, externo e assentamento de alvenaria e pisos
Massa corrida à base de PVA	Massa corrida à base de PVA com duas demãos, para pintura látex
Tinta látex PVA	Tinta látex PVA (tipo de acabamento: fosco) de cor branca

Continua (1)



Tabela complementar à Tabela 5 - Detalhamento dos componentes da composição dos elementos

Continuação (1)	
Componentes	Componentes detalhados
Alumínio anodizado natural	Alumínio anodizado natural - perfil 25mm
Vidro 4mm	Vidro simples/comum
Pintura esmalte acetinado fosco	-
Madeira compensada lisa	-
Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	Areia lavada tipo média - 0.0061m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 2.43m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
Impermeabilização de piso com três demãos de emulsão asfáltica	Emulsão asfáltica elastomérica
Elemento de enchimento cerâmico	Laje pré-fabricada convencional para forro (peso próprio: 155 kgf/m <sup>2</sup> / sobrecarga: 50 kgf/m <sup>2</sup> / espessura: 80mm / vão livre: 3m)
Inteiro	Pedra britada 1, Barra de aço CA-50 1/4" (bitola: 6,30mm / massa linear 0,245 kg/m), Areia lavada tipo média, Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa)
Capeamento	Pedra britada 2, Areia lavada tipo média, Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa)
Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	Areia lavada tipo média - 0.0061m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 2.43m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
Massa única impermeável para parede externa com argamassa pré-fabricada	Argamassa pré-fabricada para revestimento interno, externo e assentamento de alvenaria e pisos
Massa corrida à base de PVA	Massa corrida à base de PVA com duas demãos, para pintura látex
Tinta látex PVA	Tinta látex PVA (tipo de acabamento: fosco) de cor branca
Telha de fibrocimento ondulada	Telha de fibrocimento ondulada (espessura: 6 mm / altura: 51 mm / comprimento: 2,44 m / largura: 1,10 m / inclinação: 27%)
Estrutura de madeira para telha ondulada de fibrocimento, ancorada em laje ou parede	Madeira (tipo de madeira: peroba)

Continua (2)

Tabela complementar à Tabela 5 - Detalhamento dos componentes da composição dos elementos

Componentes	Componentes detalhados
Argamassa mista de cimento, cal hidratada e areia sem peneirar traço 1:0,5:5	Areia lavada tipo média - 0.0305m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície Cal hidratada CH III - 1.825kg/ m <sup>2</sup> de superfície Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 7.3kg/m <sup>2</sup> de superfície
Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa)	-
Piso cerâmico esmaltado liso brilhante	Piso cerâmico esmaltado liso brilhante (resistência à abrasão: 3 / espessura 8mm / largura: 300mm / comprimento: 300mm*****)
Argamassa de cimento e areia sem peneirar traço 1:3	Areia lavada tipo média - 0.0061m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> de superfície Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 2.43m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície
Contrapiso em concreto com seixo (espessura = 0,05)	Seixo rolado ou cascalho rolado fino - 0.0439m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície Areia lavada tipo média - 0.0338m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> de superfície Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa) - 110kg/m <sup>2</sup> de superfície
Impermeabilização de piso com três demãos de emulsão asfáltica	Emulsão asfáltica elastomérica
Elemento de enchimento cerâmico	Laje pré-fabricada convencional para forro (peso próprio: 155 kgf/m <sup>2</sup> / sobrecarga: 50 kgf/m <sup>2</sup> / espessura: 80mm / vão livre: 3m)
Inteiro	Pedra britada 1, Barra de aço CA-50 1/4" (bitola: 6,30mm / massa linear 0,245 kg/m), Areia lavada tipo média, Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa)
Capoteamento	Pedra britada 2, Areia lavada tipo média, Cimento Portland CP II-E-32 (resistência: 32 MPa)

Fonte: A autora (2011), como tabela complementar à Tabela 5.

## APÊNDICE B

Capacidade térmica de elementos (móveis, objetos e outros)

Elemento	Massa * m (Kg)	Material	Calor específico c (J/Kg.K)	Capacidade térmica C (J/K)
Vaso sanitário - bacia	15	Cerâmica	920	13800
Cuba - banheiro	10	Cerâmica	920	9200
Tanque	10	Concreto	1005	10050
Colchão casal	35	Espuma	1400	49000
Colchão solteiro	15	Espuma	1400	21000
Bancada de granito	50	Granito	820	41000
Cadeira	5	Madeira	1200	6000
Mesa lateral	5	Madeira	1200	6000
Mesa de centro	25	Madeira	1200	30000
Mesa grande	55	Madeira	1200	66000
Mesa pequena	35	Madeira	1200	42000
Cama casal	75	Madeira	1200	90000
Cama solteiro	30	Madeira	1200	36000
Armário 3 portas	125	Madeira	1200	150000
Criado-mudo	15	Madeira	1200	18000
Cômoda	40	Madeira	1200	48000
Estante	75	Madeira	1200	90000
Aparador	25	Madeira	1200	30000
Armário de cozinha/banheiro - módulo	20	Madeira	1200	24000
Sofá 3 lugares	45	Madeira e espuma	1300	58500
Sofá 2 lugares	40	Madeira e espuma	1300	52000
Poltrona	30	Madeira e espuma	1300	39000
Pufe	5	Madeira e espuma	1300	6500
Caixa d'água	500	Água	4187	2093500
Fogão	30	Plástico e metal	700	21007
Geladeira	70	Plástico e metal	700	49016
Lavadora de roupas	70	Plástico e metal	700	49016
Televisão	10	Plástico e metal	700	7002
Microondas	10	Plástico e metal	700	7002
Roupa	30	Tecido/algodão	310	9300

\*Valores estimados

Fonte: A autora (2011), a partir de dados de ABNT (2005), FROTA; SCHIFFER (1999), SZOKOLAY (2010), OZISIK (1990).

## APÊNDICE C

Capacidade térmica das zonas térmicas (R1-N)

Zona térmica	Elementos (móveis, objetos, outros)	Quantidade	Capacidade térmica	
			C (J/K)	
			Parcial	Total por zona
2 quarto N-O	Colchão casal	1	49000	427800
	Cama casal	1	90000	
	Armário 3 portas	1	150000	
	Criado-mudo	2	36000	
	Cômoda	1	48000	
	Poltrona	1	39000	
	Pufe	1	6500	
	Roupa	1	9300	
3 quarto N-L	Colchão solteiro	1	21000	336300
	Cadeira	1	6000	
	Mesa pequena	1	42000	
	Cama solteiro	1	90000	
	Armário 3 portas	1	150000	
	Criado-mudo	1	18000	
	Roupa	1	9300	
	4 quarto L	Colchão solteiro	1	
Cadeira		1	6000	
Mesa pequena		1	42000	
Cama solteiro		1	90000	
Armário 3 portas		1	150000	
Criado-mudo		1	18000	
Roupa		1	9300	

Continua

## Capacidade térmica das zonas térmicas (R1-N)

Continuação

Zona térmica	Elementos (móveis, objetos, outros)	Quantidade	Capacidade térmica	
			C (J/K)	
			Parcial	Total por zona
5 sala e circulação	Mesa lateral	2	12000	279502
	Mesa de centro	1	30000	
	Estante	1	90000	
	Aparador	1	30000	
	Sofá 3 lugares	1	58500	
	Sofá 2 lugares	1	52000	
	Televisão	1	7002	
6 banheiro externo	Vaso sanitário - bacia	1	13800	23000
	Cuba - banheiro	1	9200	
7 cozinha	Bancada de granito	1	41000	316025
	Cadeira	6	36000	
	Mesa grande	1	66000	
	Armário de cozinha/banheiro - módulo	4	96000	
	Fogão	1	21007	
	Geladeira	1	49016	
	Microondas	1	7002	
8 banheiro social	Vaso sanitário - bacia	1	13800	47000
	Cuba - banheiro	1	9200	
	Armário de cozinha/banheiro - módulo	1	24000	
9 banheiro suíte	Vaso sanitário - bacia	1	13800	47000
	Cuba - banheiro	1	9200	
	Armário de cozinha/banheiro - módulo	1	24000	
10 sótão	Caixa d'água	1	2093500	2093500

Fonte: A autora (2011), a partir de dados do Apêndice B.

## APÊNDICE D

Calor dissipado para o ambiente (W)

Equipamento	Chuveiro elétrico	1200
	Ferro de passar roupa elétrico	240
	Foçã elétrico	2400
	Geladeira	120
	Lavadora de roupas	360
	Secador de cabelos	210
	Televisão	120
	Dormindo	40
Pessoas (atividade)	Sentado, cosendo à mão	65
	Escritório (atividade moderada)	
	Em pé, trabalho leve	
	Datilo grafando rápido	
	Lavando pratos	
Iluminação (lâmpadas)	100W	100
	60W	60

Fonte: A autora (2011), a partir de dados de FROTA; SCHIFFER (1999).

## APÊNDICE E

### Geração interna da calor (R1-N)

Zona térmica	Geração de calor (W)																									
	Horário	0-1h	1-2h	2-3h	3-4h	4-5h	5-6h	6-7h	7-8h	8-9h	9-10h	10-11h	11-12h	12-13h	13-14h	14-15h	15-16h	16-17h	17-18h	18-19h	19-20h	20-21h	21-22h	22-23h	23-24h	
2 quarto N-O	Iluminação							100																100		
	Pessoas	80	80	80	80	80	80	130																130	80	80
	Equipamentos							120																120		
	<b>Iluminação + pessoas + equipamentos</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>80</b>	<b>350</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>350</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
3 quarto N-L	Iluminação							100																100		
	Pessoas	40	40	40	40	40	40	65																65	40	40
	Equipamentos							120																120		
	<b>Iluminação + pessoas + equipamentos</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>285</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>285</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
4 quarto L	Iluminação							100																100		
	Pessoas	40	40	40	40	40	40	65																65	40	40
	Equipamentos							120																120		
	<b>Iluminação + pessoas + equipamentos</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>285</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>285</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
5 sala e circulação	Iluminação	60	60	60	60	60	60	60													160	160	160	60	60	60
	Pessoas																				130	260	260			
	Equipamentos																				120	120	120			
	<b>Iluminação + pessoas + equipamentos</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>410</b>	<b>540</b>	<b>540</b>	<b>60</b>	<b>60</b>	<b>60</b>

Continua

## Geração interna da calor (R1-N)

Continuação

Zona térmica	Horário	Geração de calor (W)																							
		0-1h	1-2h	2-3h	3-4h	4-5h	5-6h	6-7h	7-8h	8-9h	9-10h	10-11h	11-12h	12-13h	13-14h	14-15h	15-16h	16-17h	17-18h	18-19h	19-20h	20-21h	21-22h	22-23h	23-24h
6 banheiro externo	Iluminação																								
	Pessoas																								
	Equipamentos																								
	Iluminação + pessoas + equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7 cozinha	Iluminação								100											100					
	Pessoas								260											130					
	Equipamentos	120	120	120	120	120	120	120	2640	120	120	120	120	120	120	120	120	120	2520	120	120	120	120	120	
	Iluminação + pessoas + equipamentos	120	120	120	120	120	120	120	3000	120	120	120	120	120	120	120	120	120	2750	120	120	120	120	120	
8 banheiro social	Iluminação							100															100		
	Pessoas							65															65		
	Equipamentos							1410															1200		
	Iluminação + pessoas + equipamentos	0	0	0	0	0	0	1575	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1365	0	
9 banheiro suíte	Iluminação							100															100		
	Pessoas							65															65		
	Equipamentos							1410															1200		
	Iluminação + pessoas + equipamentos	0	0	0	0	0	0	1575	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1365	0	
10 sócio	Iluminação																								
	Pessoas																								
	Equipamentos																								
	Iluminação + pessoas + equipamentos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Fonte: A autora (2011), a partir de dados do Apêndice D.



APÊNDICE F

Tabela complementar à Tabela 13 - Cálculos complementares de resistência térmica – Rt

Código do material	Elementos construtivos	Seção	Camadas														Rt (m2.K/W)													
			Camadas:	Pintura	Emassa mento	Massa úrica	Chapisc o	Argama ssa	Chapisc o	Massa úrica	Emassa mento	Pintura	Emassa mento	Massa úrica	Chapisc o	Cerâmi ca		Chapisc o	Massa úrica	Emassa mento	Pintura	Cerâmi ca	Ar	Cerâmi ca	Ar	Cerâmi ca	Ar	Cerâmi ca	Ar	Cerâmi ca
(1)	Parede de meia-vez	1ª fatia	e	0.0002	0.0007	0.0100	0.0050	0.0900	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002																		
			λ	0.5300	0.5300	1.1500	1.1500	1.1500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300																		
			R=	0.1076																										
		A=	0.0039																											
		2ª fatia	e	0.0002	0.0007	0.0100	0.0050	0.0900	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002																		
			λ	0.5300	0.5300	1.1500	1.1500	1.0500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300																		
			R=	0.1151																										
		A=	0.0095																											
		3ª fatia	e	0.0002	0.0007	0.0100	0.0050	0.0100			0.0100		0.0100	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002													
	λ		0.5300	0.5300	1.1500	1.1500	1.0500	0.1600	1.0500	0.1600	1.0500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300															
	R=		0.3779																											
	A=	0.0266																												
																	0.2115													
(2)	Parede de uma vez	1ª fatia	e	0.0002	0.0007	0.0100	0.0050	0.1900	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002																		
			λ	0.5300	0.5300	1.1500	1.1500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300																			
			R=	0.1946																										
		A=	0.0029																											
		2ª fatia	e	0.0002	0.0007	0.0100	0.0050	0.1900	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002																		
			λ	0.5300	0.5300	1.1500	1.1500	1.0500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300																		
			R=	0.2103																										
		A=	0.0057																											
		3ª fatia	e	0.0002	0.0007	0.0100	0.0050	0.0100			0.0100		0.0100	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002													
	λ		0.5300	0.5300	1.1500	1.1500	1.0500	0.1600	1.0500	0.1600	1.0500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300															
	R=		0.7170																											
	A=	0.0114																												
																	0.3454													

Continua

Tabela complementar à Tabela 13 - Cálculos complementares de resistência térmica – Rt

Continuação

Código do material	Elementos construtivos	Seção	Camadas											Rt (m2.K/W)							
			Camadas:	Argamassa	Impermeabilizante	Capamento	Cerâmica	Chapisco	Massa única	Emassamento	Pintura	Camadas:	Argamassa		Impermeabilizante	Capamento	Cerâmica	Ar	Cerâmica	Chapisco	Massa única
(5)	Laje de forro	1ª fatia	Camadas:	Argamassa	Impermeabilizante	Capamento	Cerâmica	Chapisco	Massa única	Emassamento	Pintura										
			e	0.0050	0.0010	0.0200	0.0800	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002										
			λ	1.1500	1.1500	1.7400	1.0500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300										
			R=	0.1076																	
		A=	0.0500																		
		2ª fatia	Camadas:	Argamassa	Impermeabilizante	Capamento	Cerâmica	Ar	Cerâmica	Chapisco	Massa única	Emassamento	Pintura								
			e	0.0050	0.0010	0.0200	0.0100	0.1700	0.0100	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002								
			λ	1.1500	1.1500	1.7400	1.0500	0.1700	1.0500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300								
			R=	0.2204																	
		A=	0.2300																		
		3ª fatia	Camadas:	Argamassa	Impermeabilizante	Capamento	Concreto	Chapisco	Massa única	Emassamento	Pintura										
			e	0.0050	0.0010	0.0200	0.0800	0.0050	0.0100	0.0007	0.0002										
λ	1.1500		1.1500	1.7400	1.7500	1.1500	1.1500	0.5300	0.5300												
R=	0.0771																				
A=	0.1000																				
												0.1355									
(7)	Laje de piso	1ª fatia	Camadas:	Piso cerâmico	Argamassa	Contrapiso	Impermeabilização	Capamento	Cerâmica												
			e	0.0250	0.0050	0.0500	0.0010	0.0400	0.0800												
			λ	1.0500	1.1500	1.7400	1.1500	1.7400	1.0500												
			R=	0.1569																	
		A=	0.0500																		
		2ª fatia	Camadas:	Piso cerâmico	Argamassa	Contrapiso	Impermeabilização	Capamento	Cerâmica	Ar	Cerâmica										
			e	0.0250	0.0050	0.0500	0.0010	0.0400	0.0100	0.1700	0.0100										
			λ	1.0500	1.1500	1.7400	1.1500	1.7400	1.0500	0.1700	1.0500										
			R=	0.2698																	
		A=	0.2300																		
		3ª fatia	Camadas:	Piso cerâmico	Argamassa	Contrapiso	Impermeabilização	Capamento	Concreto												
			e	0.0250	0.0050	0.0500	0.0010	0.0400	0.0800												
λ	1.0500		1.1500	1.7400	1.1500	1.7400	1.7500														
R=	0.1265																				
A=	0.1000																				
												0.1937									

Fonte: A autora, conforme ABNT (2005), onde, e - espessura (m), λ - condutividade térmica (W/m.K), R - resistência térmica (m2.K/W), A - área (m²).

**APÊNDICE G**

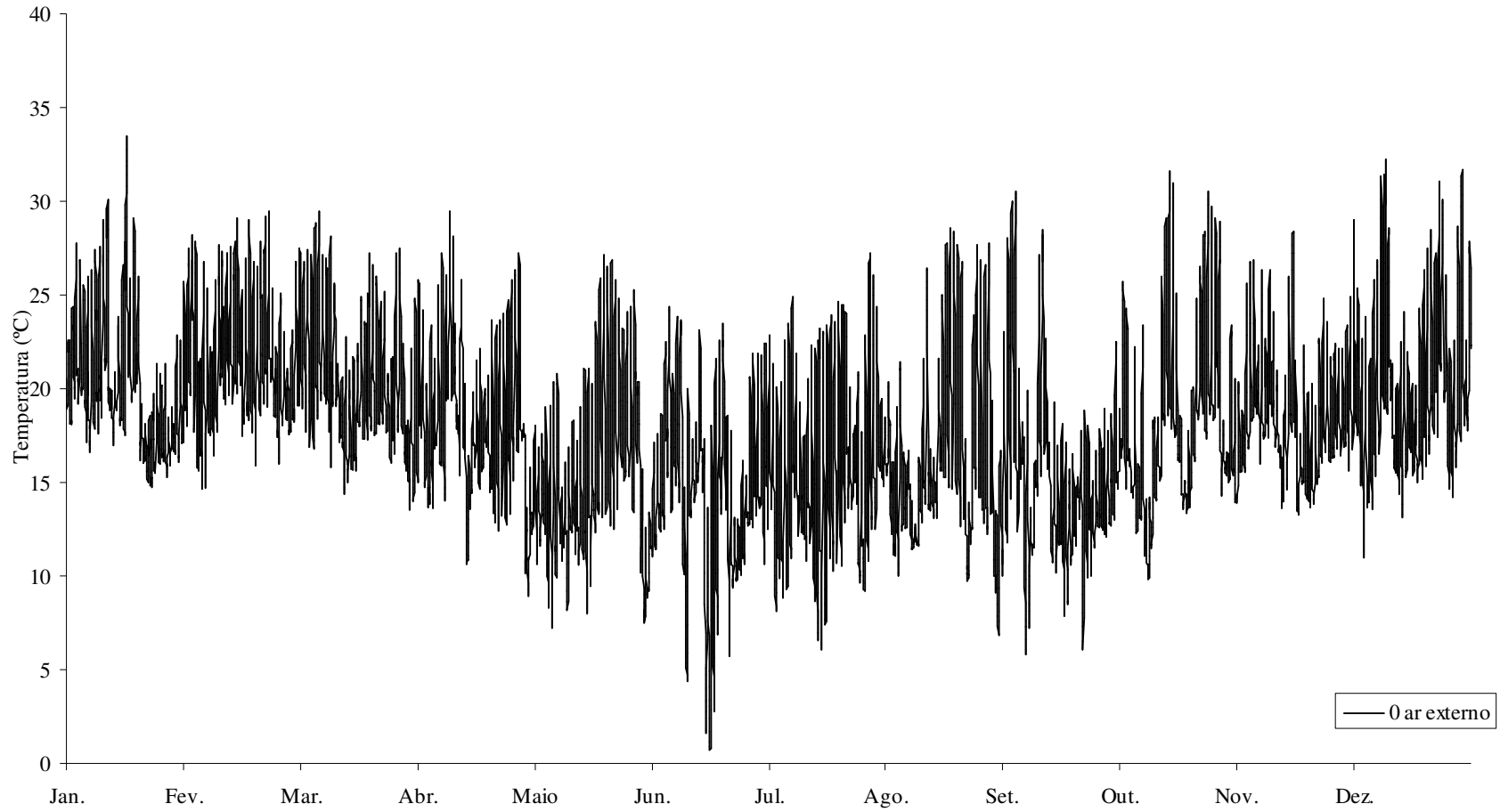


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

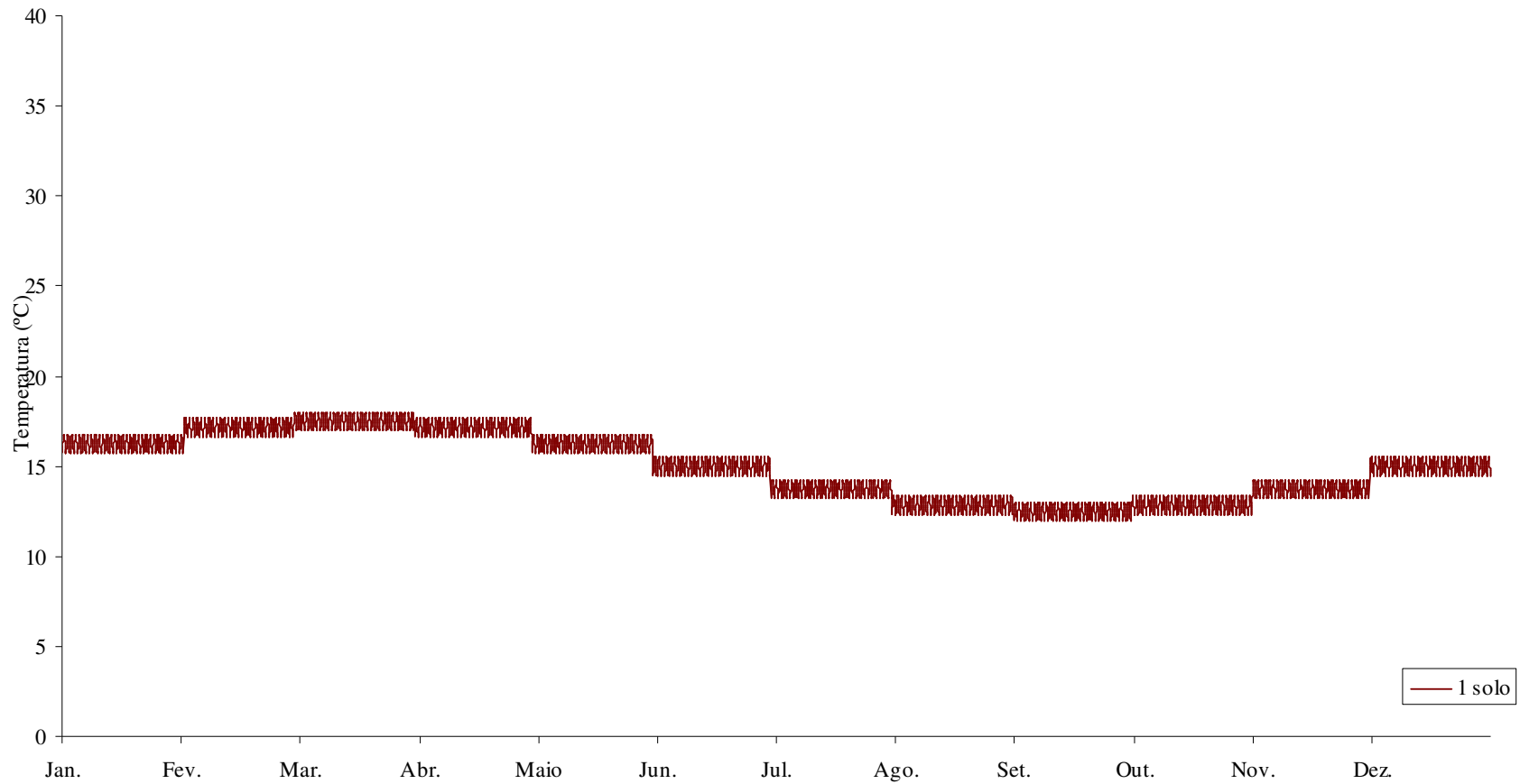


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

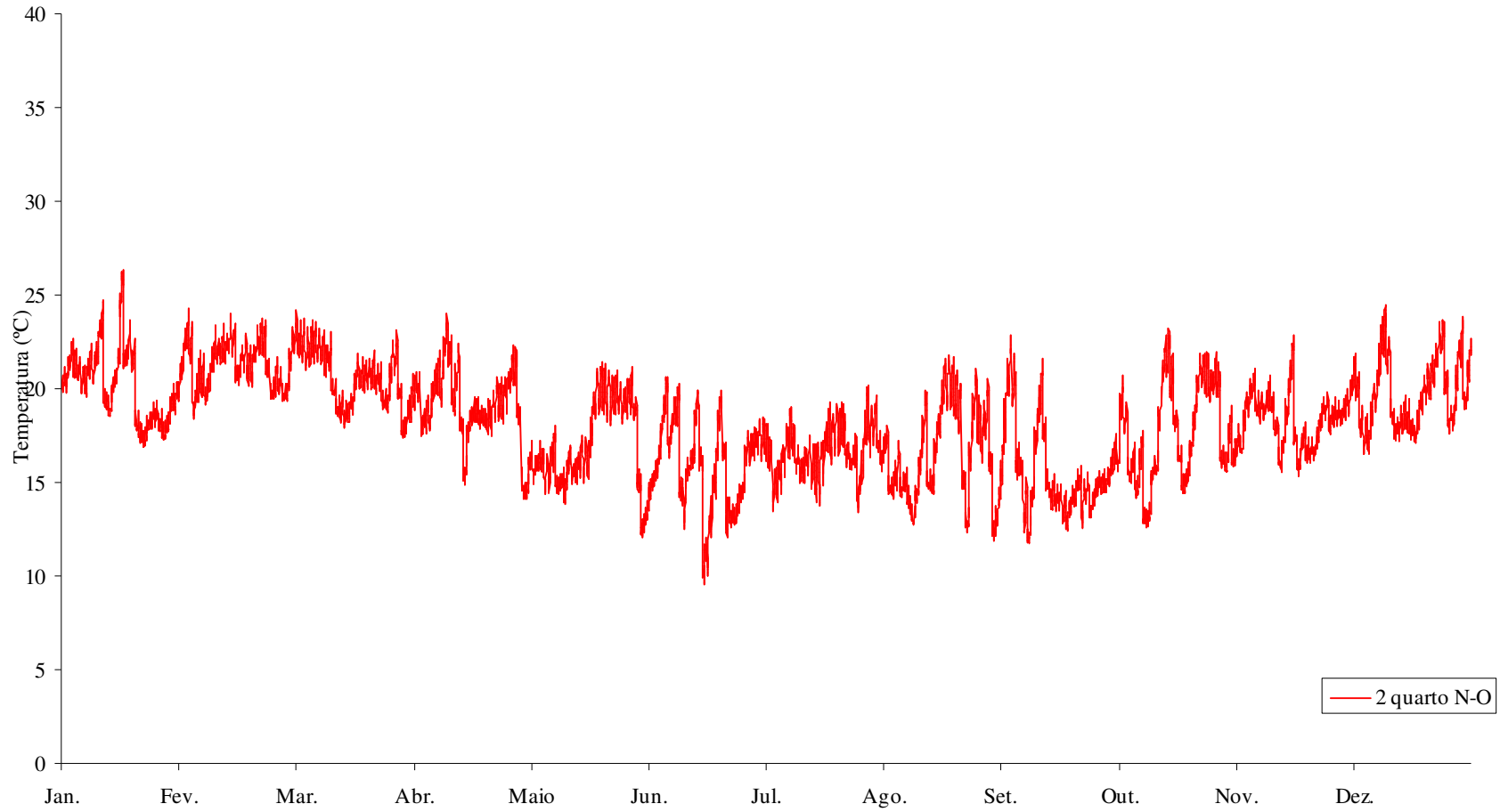


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).



Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

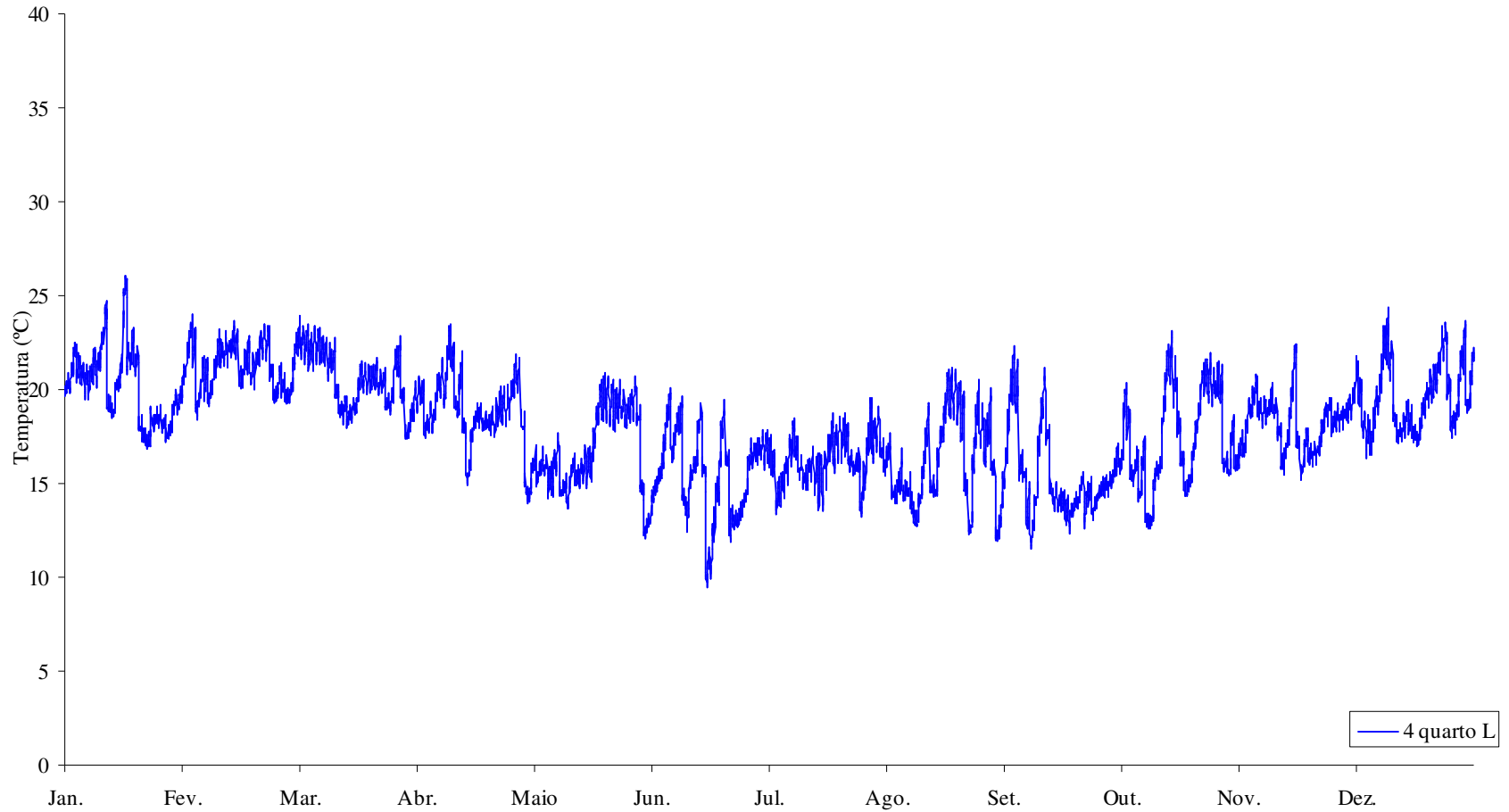


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).



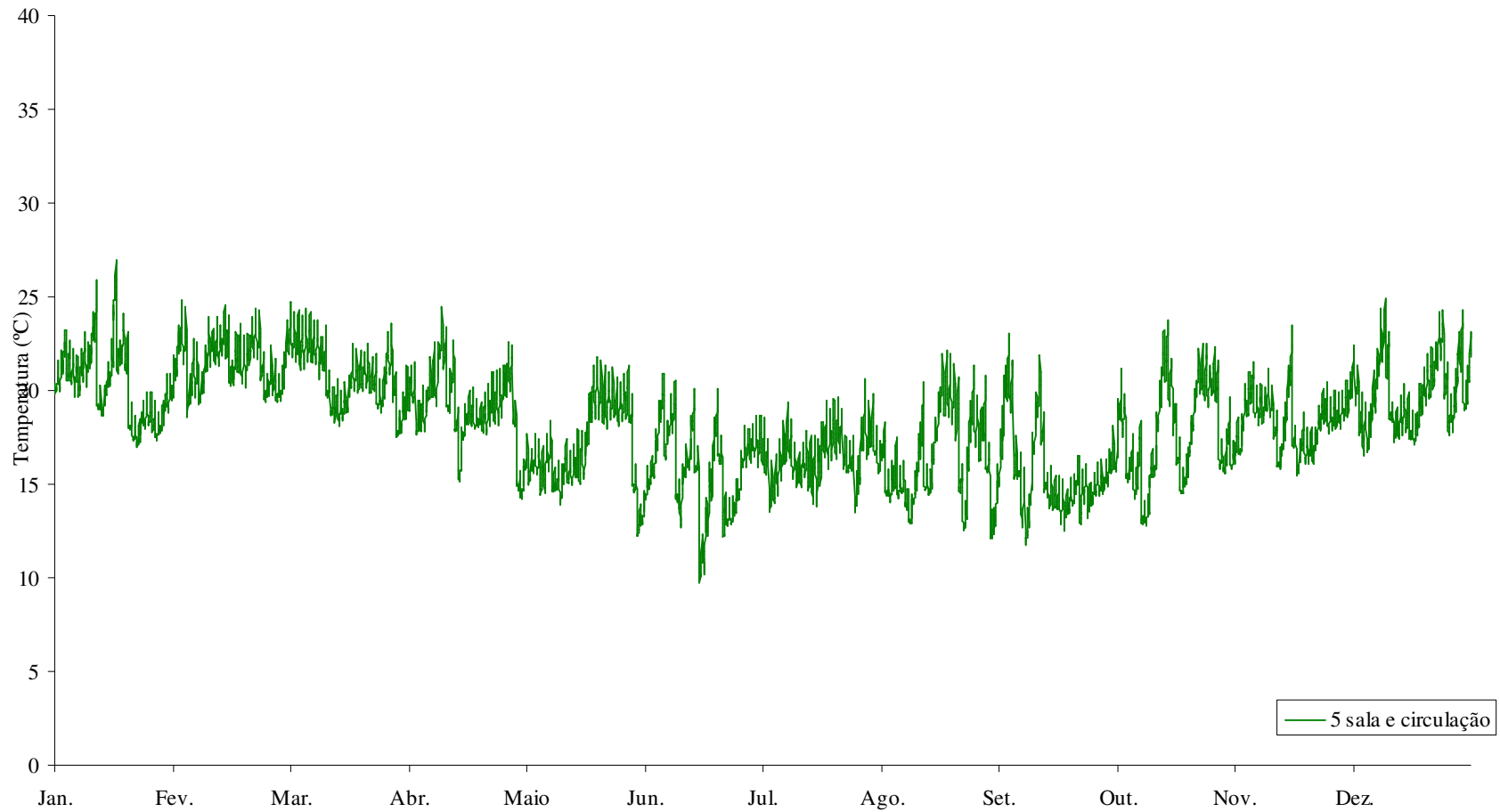


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

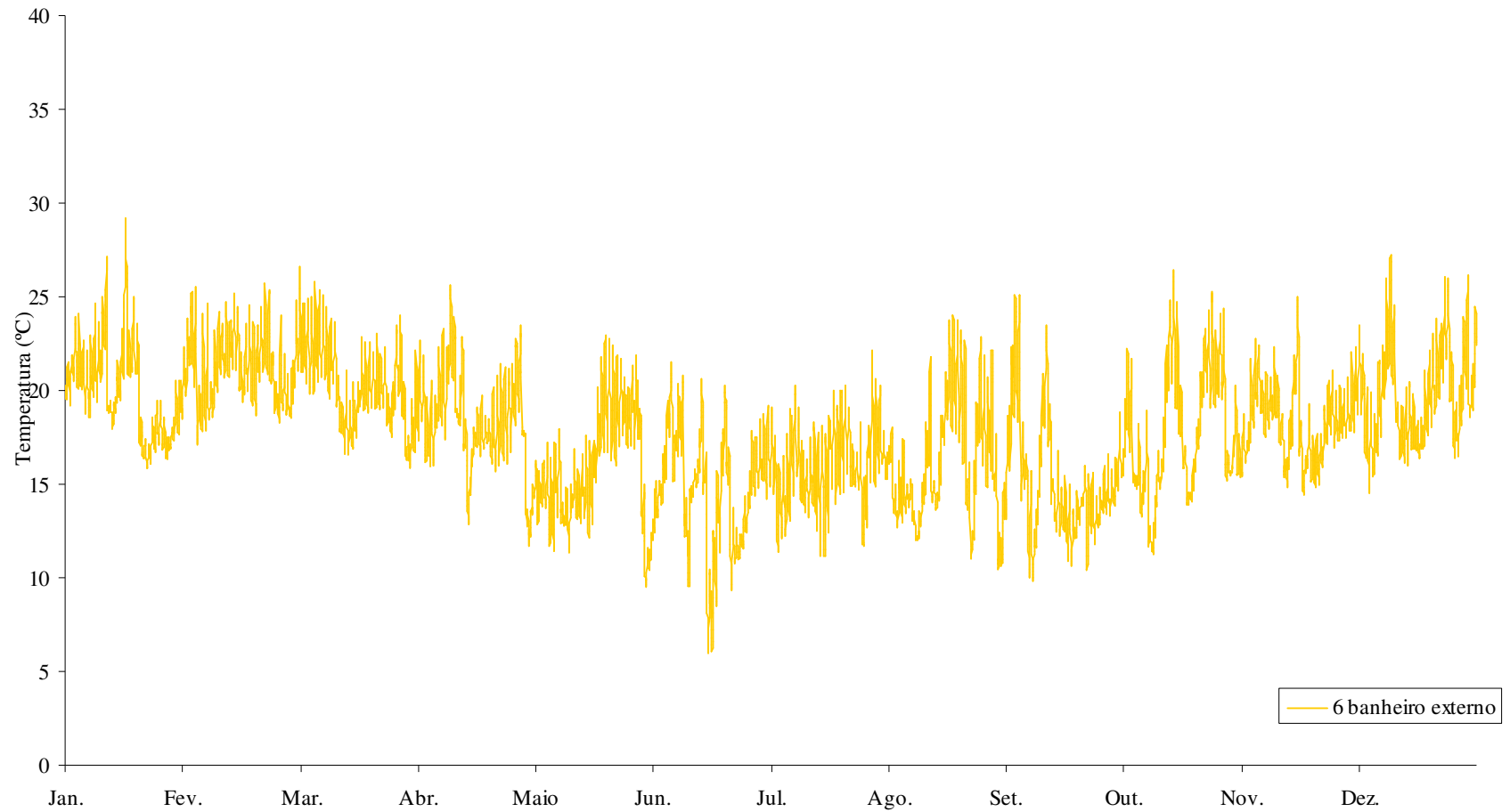


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

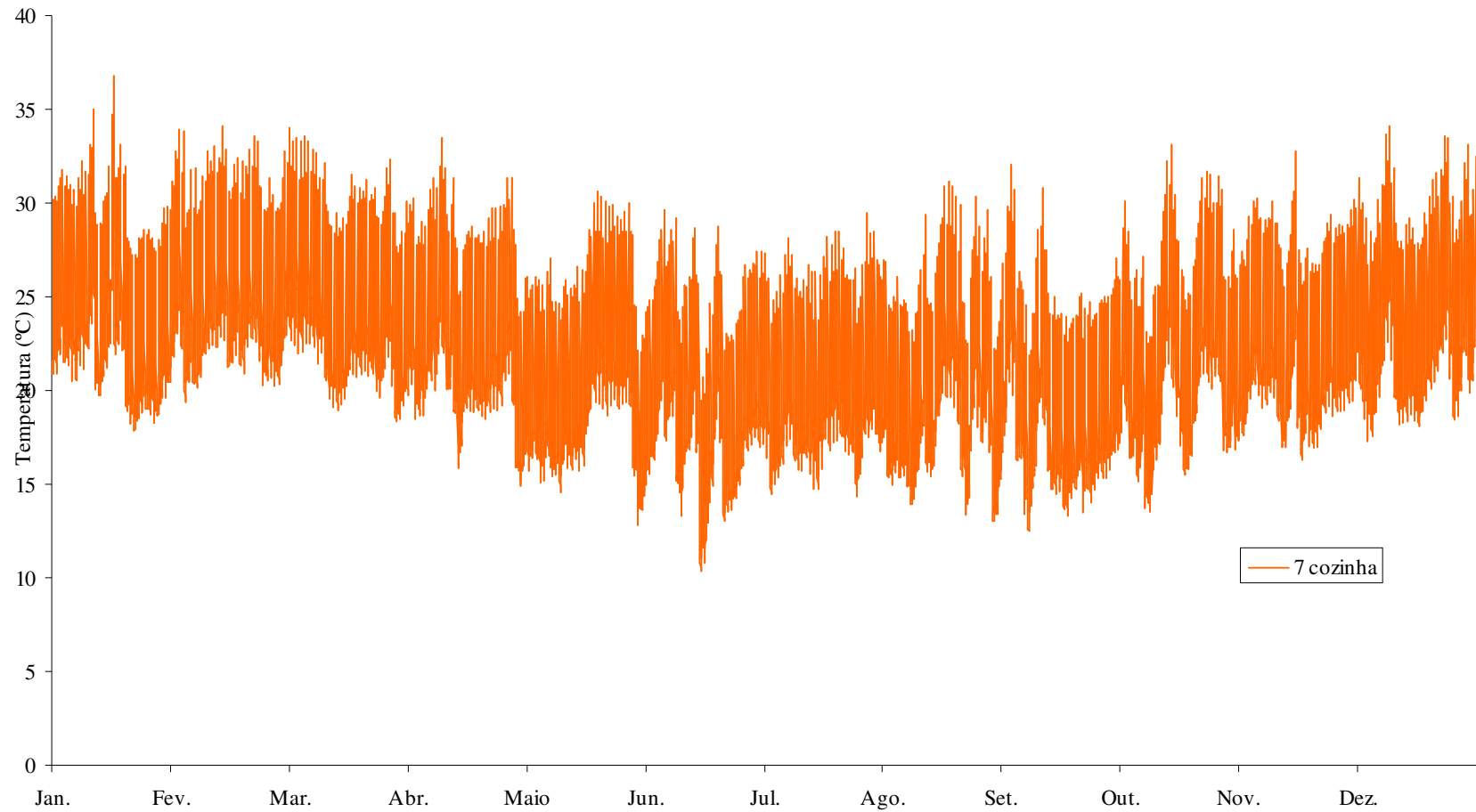


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

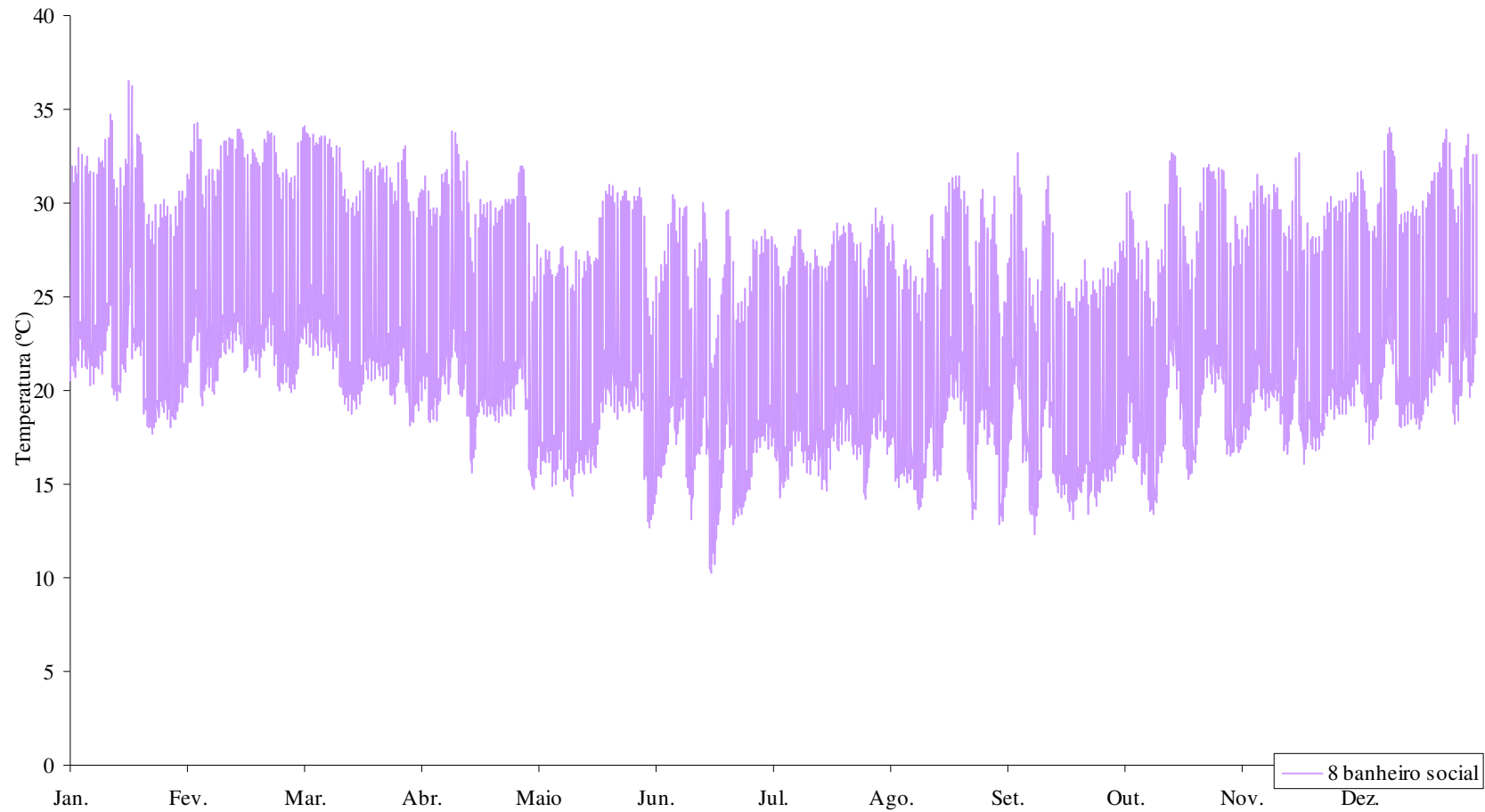


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

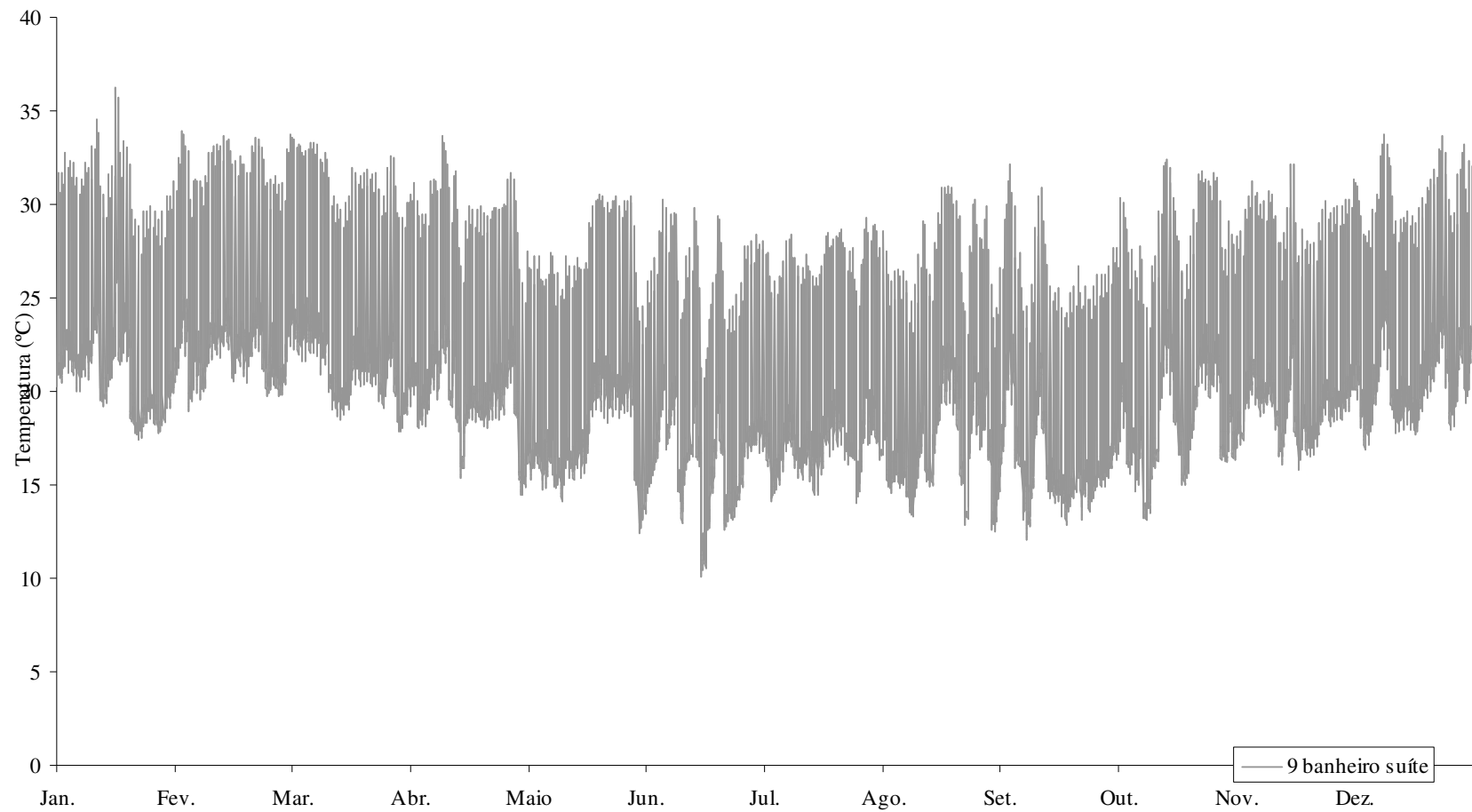


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

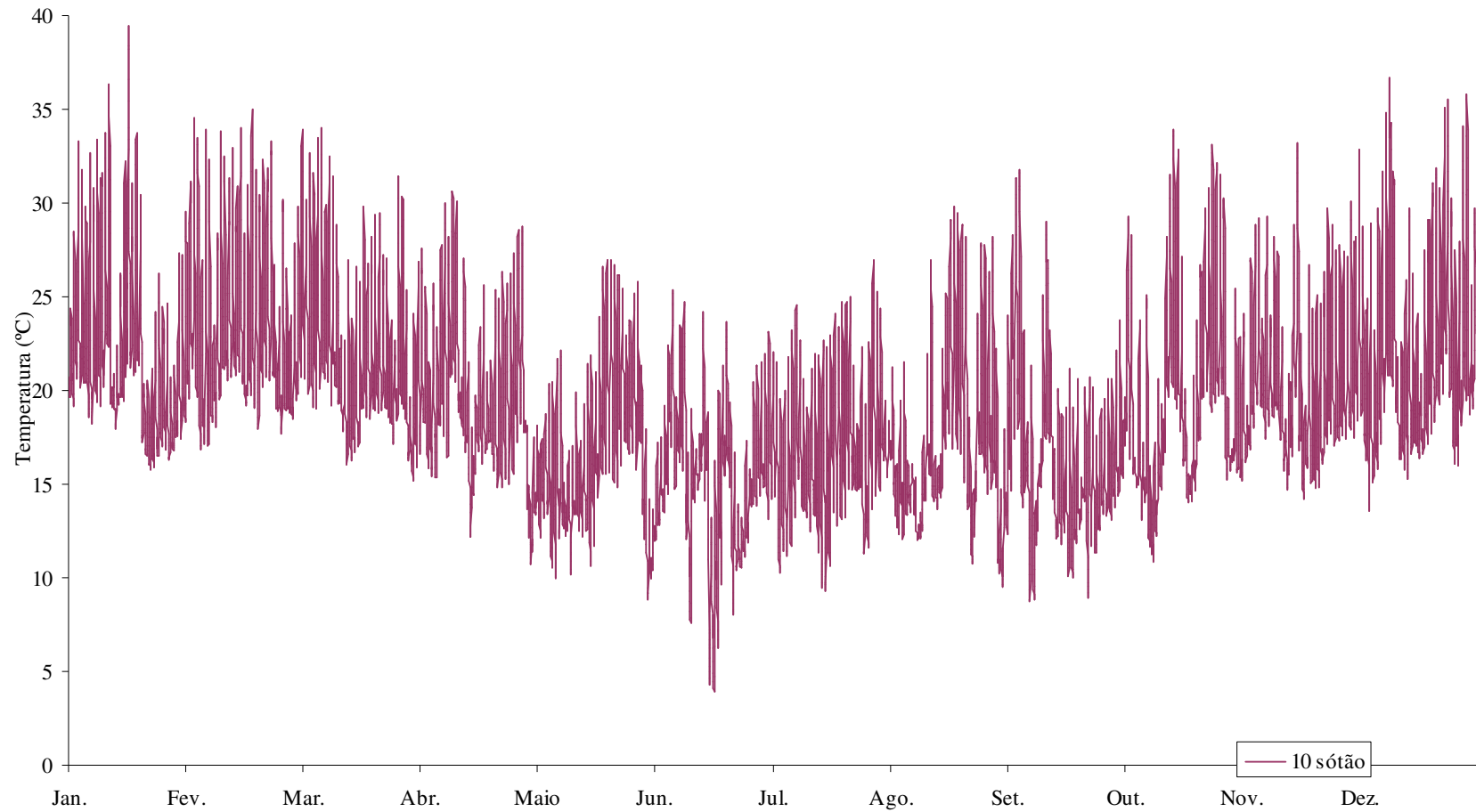


Gráfico complementar ao 5 – Temperatura ao longo do ano na R1-N – para a zona indicada.  
Fonte: A autora (2011).

**APÊNDICE H**

Tabela - Quantidade de horas de conforto e desconforto térmico (R1-N)

Zona	Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
térmica	Total H	744	672	744	720	744	720	744	743	719	743	719	743
	CT máx*	26.7	26.9	26.4	25.0	24.0	22.5	22.9	23.6	24.2	25.0	25.9	26.5
	CT mín*	22.7	22.9	22.4	21.0	20.0	18.5	18.9	19.6	20.2	21.0	21.9	22.5
2 quarto N O	H acima	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	H em CT	68	9%	61	9%	104	14%	99	14%	96	13%	94	13%
	H abaixo	676	91%	611	91%	640	86%	621	86%	648	87%	626	87%
3 quarto N L	H acima	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	H em CT	59	8%	40	6%	86	12%	83	12%	29	4%	63	9%
	H abaixo	685	92%	632	94%	658	88%	637	88%	715	96%	657	91%
4 quarto L	H acima	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	H em CT	63	8%	52	8%	97	13%	85	12%	44	6%	67	9%
	H abaixo	681	92%	620	92%	647	87%	635	88%	700	94%	653	91%
5 sala e circulação	H acima	3	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%
	H em CT	75	10%	88	13%	122	16%	113	16%	66	9%	78	11%
	H abaixo	666	90%	584	87%	622	84%	607	84%	678	91%	642	89%
6 banheiro externo	H acima	10	1%	0	0%	1	0%	3	0%	0	0%	0	0%
	H em CT	90	12%	126	19%	131	18%	106	15%	80	11%	75	10%
	H abaixo	644	87%	546	81%	612	82%	611	85%	664	89%	645	90%
7 cozinha	H acima	81	11%	62	9%	72	10%	70	10%	64	9%	58	8%
	H em CT	196	26%	301	45%	315	42%	259	36%	199	27%	181	25%
	H abaixo	467	63%	309	46%	357	48%	391	54%	481	65%	481	67%
8 banheiro social	H acima	72	10%	56	8%	63	8%	62	9%	60	8%	57	8%
	H em CT	154	21%	259	39%	266	36%	197	27%	165	22%	144	20%
	H abaixo	518	70%	357	53%	415	56%	461	64%	519	70%	519	72%
9 banheiro suíte	H acima	68	9%	56	8%	62	8%	61	8%	60	8%	56	8%
	H em CT	108	15%	189	28%	215	29%	160	22%	125	17%	122	17%
	H abaixo	568	76%	427	64%	467	63%	499	69%	559	75%	542	75%
Total	H acima	3.93%	3.24%	3.33%	3.40%	3.09%	2.97%	3.14%	3.15%	2.69%	3.08%	3.09%	3.26%
	H em CT	13.66%	20.76%	22.45%	19.13%	13.51%	14.31%	8.50%	15.73%	7.67%	15.85%	2.83%	14.38%
	H abaixo	82.41%	76.00%	74.23%	77.47%	83.40%	82.73%	88.36%	81.12%	89.64%	81.07%	94.07%	82.35%

Fonte: A autora (2011), onde, Total H - total de horas no mês; H acima - quantidade de horas acima do conforto térmico; H em CT - quantidade de horas em conforto térmico; H abaixo - quantidade de horas abaixo do conforto térmico. \*CT máx e CT mín é obtido da Tabela 19.



Tabela - Quantidade de horas de conforto e desconforto térmico (R1-N-2x)

Zona	Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Zona térmica	Total H	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
	CT máx*	26.7	26.9	26.4	25.0	24.0	22.5	22.9	23.6	24.2	25.0	25.9	26.5
	CT mín*	22.7	22.9	22.4	21.0	20.0	18.5	18.9	19.6	20.2	21.0	21.9	22.5
2 quarto N-O	H acima	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	78 10%	96 14%	149 20%	136 19%	150 20%	144 20%	101 14%	161 22%	67 9%	145 19%	13 2%	104 14%
	H abaixo	666 90%	576 86%	595 80%	584 81%	594 80%	576 80%	643 86%	583 78%	653 91%	599 81%	707 98%	640 86%
3 quarto N-L	H acima	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	93 13%	100 15%	154 21%	112 16%	77 10%	124 17%	29 4%	140 19%	58 8%	138 19%	16 2%	110 15%
	H abaixo	651 88%	572 85%	590 79%	608 84%	667 90%	596 83%	715 96%	604 81%	662 92%	606 81%	704 98%	634 85%
4 quarto L	H acima	1 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	99 13%	128 19%	160 22%	114 16%	95 13%	110 15%	39 5%	134 18%	59 8%	145 19%	17 2%	102 14%
	H abaixo	644 87%	544 81%	584 78%	606 84%	649 87%	610 85%	705 95%	610 82%	661 92%	599 81%	703 98%	642 86%
5 sala e circulação	H acima	3 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	111 15%	169 25%	209 28%	149 21%	111 15%	140 19%	58 8%	151 20%	65 9%	166 22%	19 3%	126 17%
	H abaixo	630 85%	503 75%	535 72%	571 79%	633 85%	580 81%	686 92%	593 80%	655 91%	578 78%	701 97%	618 83%
6 banheiro externo	H acima	9 1%	0 0%	1 0%	2 0%	0 0%	0 0%	0 0%	4 1%	5 1%	5 1%	0 0%	2 0%
	H em CT	89 12%	117 17%	121 16%	108 15%	77 10%	79 11%	53 7%	125 17%	58 8%	137 18%	22 3%	112 15%
	H abaixo	646 87%	555 83%	622 84%	610 85%	667 90%	641 89%	691 93%	615 83%	657 91%	602 81%	698 97%	630 85%
7 cozinha	H acima	110 15%	90 13%	105 14%	98 14%	85 11%	81 11%	79 11%	94 13%	78 11%	98 13%	65 9%	90 12%
	H em CT	306 41%	410 61%	388 52%	369 51%	270 36%	287 40%	372 50%	261 35%	121 17%	264 35%	183 25%	289 39%
	H abaixo	328 44%	172 26%	251 34%	253 35%	389 52%	352 49%	293 39%	389 52%	521 72%	382 51%	472 66%	365 49%
8 banheiro social	H acima	83 11%	56 8%	66 9%	67 9%	62 8%	61 8%	62 8%	71 10%	66 9%	71 10%	60 8%	67 9%
	H em CT	219 29%	333 50%	326 44%	273 38%	208 28%	209 29%	246 33%	211 28%	88 12%	236 32%	85 12%	214 29%
	H abaixo	442 59%	283 42%	352 47%	380 53%	474 64%	450 63%	436 59%	462 62%	566 79%	437 59%	575 80%	463 62%
9 banheiro suíte	H acima	78 10%	56 8%	62 8%	64 9%	62 8%	60 8%	62 8%	62 8%	63 9%	65 9%	60 8%	66 9%
	H em CT	157 21%	259 39%	270 36%	210 29%	173 23%	171 24%	180 24%	187 25%	79 11%	200 27%	47 7%	173 23%
	H abaixo	509 68%	357 53%	412 55%	446 62%	509 68%	489 68%	502 67%	495 67%	578 80%	479 64%	613 85%	505 68%
Total	H acima	4.77%	3.76%	3.93%	4.01%	3.51%	3.51%	3.41%	3.88%	3.68%	4.02%	3.21%	3.78%
	H em CT	19.35%	29.99%	29.86%	25.54%	19.51%	21.94%	18.11%	23.02%	10.33%	24.04%	6.98%	20.67%
	H abaixo	75.87%	66.26%	66.21%	70.45%	76.98%	74.55%	78.48%	73.10%	85.99%	71.94%	89.81%	75.55%

Fonte: A autora (2011), onde, Total H - total de horas no mês; H acima - quantidade de horas acima do conforto térmico; H em CT - quantidade de horas em conforto térmico; H abaixo - quantidade de horas abaixo do conforto térmico. \*CT máx e CT mín é obtido da Tabela 19.

Tabela - Quantidade de horas de conforto e desconforto térmico (R1-N-3x)

Zona	Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Zona térmica	Total H	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
	CT máx*	26.7	26.9	26.4	25.0	24.0	22.5	22.9	23.6	24.2	25.0	25.9	26.5
	CT mín*	22.7	22.9	22.4	21.0	20.0	18.5	18.9	19.6	20.2	21.0	21.9	22.5
2 quarto N-O	H acima	1 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	90 12%	117 17%	168 23%	176 24%	203 27%	193 27%	226 30%	207 28%	79 11%	185 25%	17 2%	119 16%
	H abaixo	653 88%	555 83%	576 77%	544 76%	541 73%	527 73%	518 70%	537 72%	641 89%	559 75%	703 98%	625 84%
3 quarto N-L	H acima	4 1%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	106 14%	133 20%	180 24%	139 19%	153 21%	150 21%	136 18%	204 27%	78 11%	178 24%	21 3%	125 17%
	H abaixo	634 85%	539 80%	564 76%	581 81%	591 79%	570 79%	608 82%	540 73%	642 89%	566 76%	699 97%	619 83%
4 quarto L	H acima	10 1%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	102 14%	160 24%	187 25%	131 18%	132 18%	141 20%	103 14%	174 23%	73 10%	171 23%	20 3%	129 17%
	H abaixo	632 85%	512 76%	557 75%	589 82%	612 82%	579 80%	641 86%	570 77%	647 90%	573 77%	700 97%	615 83%
5 sala e circulação	H acima	7 1%	0 0%	0 0%	2 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	134 18%	205 31%	234 31%	178 25%	165 22%	172 24%	169 23%	210 28%	85 12%	212 28%	40 6%	155 21%
	H abaixo	603 81%	467 69%	510 69%	540 75%	579 78%	548 76%	575 77%	534 72%	635 88%	532 72%	680 94%	589 79%
6 banheiro externo	H acima	11 1%	0 0%	1 0%	3 0%	0 0%	0 0%	0 0%	7 1%	5 1%	7 1%	0 0%	2 0%
	H em CT	88 12%	116 17%	120 16%	120 17%	90 12%	91 13%	79 11%	133 18%	59 8%	144 19%	30 4%	110 15%
	H abaixo	645 87%	556 83%	623 84%	597 83%	654 88%	629 87%	665 89%	604 81%	656 91%	593 80%	690 96%	632 85%
7 cozinha	H acima	141 19%	133 20%	151 20%	145 20%	103 14%	120 17%	125 17%	143 19%	100 14%	140 19%	102 14%	136 18%
	H em CT	333 45%	409 61%	398 53%	418 58%	305 41%	340 47%	476 64%	295 40%	164 23%	276 37%	265 37%	318 43%
	H abaixo	270 36%	130 19%	195 26%	157 22%	336 45%	260 36%	143 19%	306 41%	456 63%	328 44%	353 49%	290 39%
8 banheiro social	H acima	87 12%	61 9%	77 10%	74 10%	63 8%	66 9%	64 9%	80 11%	70 10%	84 11%	62 9%	74 10%
	H em CT	237 32%	345 51%	329 44%	276 38%	227 31%	262 36%	356 48%	242 33%	109 15%	246 33%	116 16%	235 32%
	H abaixo	420 56%	266 40%	338 45%	370 51%	454 61%	392 54%	324 44%	422 57%	541 75%	414 56%	542 75%	435 58%
9 banheiro suíte	H acima	80 11%	56 8%	64 9%	65 9%	62 8%	62 9%	63 8%	76 10%	66 9%	73 10%	60 8%	68 9%
	H em CT	170 23%	274 41%	272 37%	235 33%	185 25%	206 29%	267 36%	204 27%	92 13%	224 30%	85 12%	198 27%
	H abaixo	494 66%	342 51%	408 55%	420 58%	497 67%	452 63%	414 56%	464 62%	562 78%	447 60%	575 80%	478 64%
Total	H acima	5.73%	4.65%	4.92%	5.02%	3.83%	4.31%	4.23%	5.14%	4.18%	5.11%	3.89%	4.70%
	H em CT	21.17%	32.72%	31.72%	29.05%	24.53%	27.00%	30.44%	28.04%	12.83%	27.49%	10.31%	23.34%
	H abaixo	73.10%	62.63%	63.36%	65.94%	71.64%	68.70%	65.32%	66.82%	82.99%	67.41%	85.80%	71.96%

Fonte: A autora (2011), onde, Total H - total de horas no mês; H acima - quantidade de horas acima do conforto térmico; H em CT - quantidade de horas em conforto térmico; H abaixo - quantidade de horas abaixo do conforto térmico. \*CT máx e CT mín é obtido da Tabela 19.

Tabela - Quantidade de horas de conforto e desconforto térmico (R1-N-4x)

Zona	Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
térmica	Total H	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
	CT máx*	26.7	26.9	26.4	25.0	24.0	22.5	22.9	23.6	24.2	25.0	25.9	26.5
	CT mín*	22.7	22.9	22.4	21.0	20.0	18.5	18.9	19.6	20.2	21.0	21.9	22.5
2 quarto N-O	H acima	2 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	7 1%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	85 11%	106 16%	152 20%	194 27%	236 32%	263 37%	370 50%	249 33%	96 13%	205 28%	21 3%	119 16%
	H abaixo	657 88%	566 84%	592 80%	526 73%	508 68%	450 63%	374 50%	495 67%	624 87%	539 72%	699 97%	625 84%
3 quarto N-L	H acima	5 1%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	110 15%	141 21%	172 23%	160 22%	192 26%	210 29%	279 38%	240 32%	97 13%	201 27%	27 4%	133 18%
	H abaixo	629 85%	531 79%	572 77%	560 78%	552 74%	510 71%	465 63%	504 68%	623 87%	543 73%	693 96%	611 82%
4 quarto L	H acima	13 2%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	107 14%	159 24%	181 24%	145 20%	148 20%	177 25%	194 26%	194 26%	87 12%	183 25%	26 4%	133 18%
	H abaixo	624 84%	513 76%	563 76%	575 80%	596 80%	543 75%	550 74%	550 74%	633 88%	561 75%	694 96%	611 82%
5 sala e circulação	H acima	7 1%	0 0%	0 0%	2 0%	0 0%	2 0%	0 0%	5 1%	2 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	138 19%	207 31%	230 31%	205 28%	195 26%	238 33%	305 41%	241 32%	99 14%	238 32%	64 9%	162 22%
	H abaixo	599 81%	465 69%	514 69%	513 71%	549 74%	480 67%	439 59%	498 67%	619 86%	506 68%	656 91%	582 78%
6 banheiro externo	H acima	11 1%	1 0%	4 1%	3 0%	0 0%	0 0%	1 0%	9 1%	5 1%	9 1%	0 0%	2 0%
	H em CT	89 12%	117 17%	112 15%	128 18%	97 13%	110 15%	122 16%	136 18%	62 9%	137 18%	35 5%	103 14%
	H abaixo	644 87%	554 82%	628 84%	589 82%	647 87%	610 85%	621 83%	599 81%	653 91%	598 80%	685 95%	639 86%
7 cozinha	H acima	170 23%	156 23%	181 24%	159 22%	146 20%	161 22%	165 22%	199 27%	132 18%	190 26%	125 17%	172 23%
	H em CT	325 44%	414 62%	407 55%	423 59%	350 47%	359 50%	507 68%	310 42%	194 27%	285 38%	305 42%	317 43%
	H abaixo	249 33%	102 15%	156 21%	138 19%	248 33%	200 28%	72 10%	235 32%	394 55%	269 36%	290 40%	255 34%
8 banheiro social	H acima	88 12%	66 10%	82 11%	75 10%	68 9%	76 11%	69 9%	96 13%	81 11%	97 13%	65 9%	78 10%
	H em CT	234 31%	321 48%	314 42%	262 36%	234 31%	302 42%	396 53%	248 33%	110 15%	255 34%	134 19%	232 31%
	H abaixo	422 57%	285 42%	348 47%	383 53%	442 59%	342 48%	279 38%	400 54%	529 73%	392 53%	521 72%	434 58%
9 banheiro suíte	H acima	81 11%	57 8%	65 9%	69 10%	63 8%	73 10%	66 9%	88 12%	69 10%	81 11%	61 8%	73 10%
	H em CT	178 24%	259 39%	265 36%	234 33%	207 28%	241 33%	329 44%	220 30%	105 15%	233 31%	102 14%	206 28%
	H abaixo	485 65%	356 53%	414 56%	417 58%	474 64%	406 56%	349 47%	436 59%	546 76%	430 58%	557 77%	465 63%
Total	H acima	6.33%	5.21%	5.58%	5.35%	4.65%	5.54%	5.06%	6.67%	5.02%	6.33%	4.36%	5.46%
	H em CT	21.27%	32.07%	30.80%	30.40%	27.87%	32.99%	42.04%	30.88%	14.76%	29.18%	12.40%	23.61%
	H abaixo	72.40%	62.72%	63.63%	64.25%	67.47%	61.48%	52.91%	62.45%	80.23%	64.48%	83.25%	70.93%

Fonte: A autora (2011), onde, Total H - total de horas no mês; H acima - quantidade de horas acima do conforto térmico; H em CT - quantidade de horas em conforto térmico; H abaixo - quantidade de horas abaixo do conforto térmico. \*CT máx e CT mín é obtido da Tabela 19.

Tabela - Quantidade de horas de conforto e desconforto térmico (R1-N-5x)

Zona	Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
térmica	Total H	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	720	744
	CT máx*	26.7	26.9	26.4	25.0	24.0	22.5	22.9	23.6	24.2	25.0	25.9	26.5
	CT mín*	22.7	22.9	22.4	21.0	20.0	18.5	18.9	19.6	20.2	21.0	21.9	22.5
2 quarto N-O	H acima	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	86 12%	94 14%	151 20%	222 31%	264 35%	344 48%	503 68%	299 40%	106 15%	223 30%	21 3%	124 17%
	H abaixo	658 88%	578 86%	593 80%	498 69%	480 65%	361 50%	238 32%	445 60%	614 85%	521 70%	699 97%	620 83%
3 quarto N-L	H acima	6 1%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	112 15%	135 20%	170 23%	185 26%	218 29%	307 43%	446 60%	287 39%	103 14%	217 29%	32 4%	138 19%
	H abaixo	626 84%	537 80%	574 77%	535 74%	526 71%	413 57%	298 40%	457 61%	617 86%	527 71%	688 96%	606 81%
4 quarto L	H acima	13 2%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%	0 0%
	H em CT	111 15%	161 24%	180 24%	157 22%	160 22%	220 31%	278 37%	210 28%	92 13%	201 27%	29 4%	136 18%
	H abaixo	620 83%	511 76%	564 76%	563 78%	584 78%	500 69%	466 63%	534 72%	628 87%	543 73%	691 96%	608 82%
5 sala e circulação	H acima	8 1%	0 0%	0 0%	2 0%	0 0%	8 1%	2 0%	6 1%	3 0%	4 1%	0 0%	0 0%
	H em CT	142 19%	200 30%	235 32%	221 31%	226 30%	323 45%	436 59%	286 38%	114 16%	255 34%	76 11%	171 23%
	H abaixo	594 80%	472 70%	509 68%	497 69%	518 70%	389 54%	306 41%	452 61%	603 84%	485 65%	644 89%	573 77%
6 banheiro externo	H acima	11 1%	2 0%	4 1%	3 0%	5 1%	1 0%	1 0%	14 2%	8 1%	13 2%	1 0%	2 0%
	H em CT	87 12%	115 17%	111 15%	134 19%	101 14%	125 17%	162 22%	141 19%	70 10%	136 18%	39 5%	110 15%
	H abaixo	646 87%	555 83%	629 85%	583 81%	638 86%	594 83%	581 78%	589 79%	642 89%	595 80%	680 94%	632 85%
7 cozinha	H acima	188 25%	171 25%	203 27%	185 26%	169 23%	198 28%	207 28%	222 30%	162 23%	215 29%	134 19%	189 25%
	H em CT	321 43%	405 60%	402 54%	405 56%	373 50%	383 53%	503 68%	357 48%	254 35%	315 42%	327 45%	337 45%
	H abaixo	235 32%	96 14%	139 19%	130 18%	202 27%	139 19%	34 5%	165 22%	304 42%	214 29%	259 36%	218 29%
8 banheiro social	H acima	91 12%	76 11%	95 13%	79 11%	73 10%	82 11%	76 10%	102 14%	86 12%	100 13%	65 9%	86 12%
	H em CT	222 30%	289 43%	285 38%	246 34%	241 32%	321 45%	397 53%	249 33%	133 18%	257 35%	143 20%	235 32%
	H abaixo	431 58%	307 46%	364 49%	395 55%	430 58%	317 44%	271 36%	393 53%	501 70%	387 52%	512 71%	423 57%
9 banheiro suíte	H acima	81 11%	60 9%	69 9%	72 10%	68 9%	78 11%	71 10%	95 13%	76 11%	91 12%	61 8%	78 10%
	H em CT	188 25%	248 37%	254 34%	228 32%	221 30%	271 38%	357 48%	225 30%	118 16%	220 30%	117 16%	211 28%
	H abaixo	475 64%	364 54%	421 57%	420 58%	455 61%	371 52%	316 42%	424 57%	526 73%	433 58%	542 75%	455 61%
Total	H acima	6.69%	5.75%	6.23%	5.92%	5.29%	6.63%	6.05%	7.38%	5.82%	7.11%	4.53%	5.96%
	H em CT	21.32%	30.64%	30.04%	31.22%	30.31%	39.83%	51.78%	34.51%	17.19%	30.65%	13.61%	24.56%
	H abaixo	71.99%	63.62%	63.73%	62.86%	64.40%	53.54%	42.17%	58.11%	77.00%	62.25%	81.86%	69.47%

Fonte: A autora (2011), onde, Total H - total de horas no mês; H acima - quantidade de horas acima do conforto térmico; H em CT - quantidade de horas em conforto térmico; H abaixo - quantidade de horas abaixo do conforto térmico. \*CT máx e CT mín é obtido da Tabela 19.

## APÊNDICE I

Tabela complementar à Tabela 14 - Energia incorporada dos elementos construtivos (R1-N) por área de superfície (m²)

Código do material	Elementos construtivos	Composição de materiais (camadas)	Componentes	Energia de produção incorporada - EPI							
				EPI do material* (MJ/m³)	EPI do material* (MJ/kg)	EPI/m² de superfície (MJ)	Fontes de origem**		Total EPI (MJ)		
(1)	Parede de meia-vez	Alvenaria de meia-vez	Bloco cerâmico	3770	2.9	314.79	43.14	% fóssil e	56.76	% renovável	444
			Argamassa	3990	2.1	53.87	77.58	% fóssil e	22.42	% renovável	
		Chapisco	Argamassa	4410	2.1	22.05	78.81	% fóssil e	21.19	% renovável	
		Massa única	Argamassa pré-fabricada	3990	2.1	35.70	77.58	% fóssil e	22.42	% renovável	
		Emassamento	Massa corrida PVA	4000	4.0	2.80	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável	
		Pintura	Tinta látex PVA	84500	65.0	14.37	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável	
(2)	Parede de uma vez	Alvenaria de uma-vez	Bloco cerâmico	3770	2.9	624.69	43.14	% fóssil e	56.76	% renovável	867
			Argamassa	3990	2.1	167.58	77.58	% fóssil e	22.42	% renovável	
		Chapisco	Argamassa	4410	2.1	22.05	78.81	% fóssil e	21.19	% renovável	
		Massa única	Argamassa pré-fabricada	3990	2.1	35.70	77.58	% fóssil e	22.42	% renovável	
		Emassamento	Massa corrida PVA	4000	4.0	2.80	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável	
		Pintura	Tinta látex PVA	84500	65.0	14.37	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável	
(3)	Janela	Alumínio	-	567000	210.0	2088.64	26.60	% fóssil e	73.50	% renovável	2246
		Vidro	-	46250	18.5	157.74	48.64	% fóssil e	51.36	% renovável	

Continua (vertical)

Continua (nesa lateral)

Continuação (lateral)	Energia de transporte incorporada - ETI				
	Cidade de produção	Distância (Km)***	ETI (MJ)****	Total ETI (MJ) (100% de origem fóssil)	Total de EI (MJ)
	Ponta Grossa - PR	114	20.0468		
	Rio Branco - PR	32	0.1209		
	Colombo - PR	19	0.1435		sendo:
	Araucária - PR	28	0.8462		55 % ou 258 MJ de origem fóssil e
	Rio Branco - PR	32	0.1361		
	Araucária - PR	28	0.3572		
	Curitiba - PR	0	0.0000		
	Colombo - PR	19	0.0215		45 % ou 207 MJ de origem renovável
	Colombo - PR	19	0.0068	22	465
	Ponta Grossa - PR	114	39.7817		
	Rio Branco - PR	32	0.3761		
	Colombo - PR	19	0.4466		sendo:
	Araucária - PR	28	2.6325		55 % ou 502 MJ de origem fóssil e
	Rio Branco - PR	32	0.1361		
	Araucária - PR	28	0.3572		
	Curitiba - PR	0	0.0000		
	Colombo - PR	19	0.0215		45 % ou 409 MJ de origem renovável
	Colombo - PR	19	0.0068	44	911
	Curitiba - PR	0	0.0000		28 % ou 632 MJ de origem fóssil e
	Curitiba - PR	0	0.0000	0	72 % ou 1616 MJ de origem renovável

Continua (para baixo)

Continuação (vertical)

(4)	Porta	Pintura	-	79300	61.0	12.69	48.64	% fóssil e	51.36	% renovável	92
		Madeira	-	2275	3.5	79.63	71.02	% fóssil e	28.98	% renovável	
(5)	Laje de forro	Argamassa	Argamassa	4410	2.1	22.05	78.81	% fóssil e	21.19	% renovável	657
		Impermeabiliza	Emulsão asfáltica	117300	51.0	117.30	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável	
		Laje pré-fabricada	Enchimento cerâmico	3770	2.9	222.23	43.14	% fóssil e	56.76	% renovável	
			Intereixo	7750	3.1	163.16	48.64	% fóssil e	51.36	% renovável	
			Caapeamento	2880	1.2	57.60	48.64	% fóssil e	51.36	% renovável	
		Chapisco	Argamassa	4410	2.1	22.05	78.81	% fóssil e	21.19	% renovável	
		Massa única	Argamassa pré-fabricada	3990	2.1	35.70	77.58	% fóssil e	22.42	% renovável	
		Emassamento	Massa corrida PVA	4000	4.0	2.80	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável	
Pintura	Tinta látex PVA	84500	65.0	14.37	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável			
(6)	Cobertura	Telha de fibrocimento	-	9000	6.0	75.05	84.60	% fóssil e	15.40	% renovável	79
		Estrutura de madeira	-	395	0.5	4.03	71.02	% fóssil e	28.98	% renovável	
(7)	Laje de piso	Piso cerâmico	Argamassa	3990	2.1	99.75	77.58	% fóssil e	22.42	% renovável	961
			Cimento	6300	4.2	5.46	84.60	% fóssil e	15.40	% renovável	
			Piso cerâmico	9000	5.0	72.00	43.14	% fóssil e	56.76	% renovável	
		Argamassa	Argamassa	4410	2.1	22.05	78.81	% fóssil e	21.19	% renovável	
		Contrapiso	Concreto com seixo	2880	1.2	144.00	48.64	% fóssil e	51.36	% renovável	
		Impermeabilizante	Emulsão asfáltica	117300	51.0	117.30	76.88	% fóssil e	23.12	% renovável	
		Laje pré-fabricada	Enchimento	3770	2.9	222.23	43.14	% fóssil e	56.76	% renovável	
			Intereixo	7750	3.1	163.16	48.64	% fóssil e	51.36	% renovável	
Caapeamento	2880		1.2	115.20	48.64	% fóssil e	51.36	% renovável			

Continua (nesa lateral)

Continuação (vertical)							
Continuação (lateral)	Colombo - PR	19	0.0064	0	93	68 % ou 63 MJ de origem fóssil e	
	Pinhais - PR	8	0.2948			32 % ou 30 MJ de origem renovável	
	Rio Branco - PR	32	0.1361	15	673	sendo: 57 % ou 384 MJ de origem fóssil e	
	Araucária - PR	28	0.3572				
	Pinhais - PR	8	0.0298				
	Ponta Grossa - PR	114	14.1523				
	Curitiba - PR	0	0.0000				
	Curitiba - PR	0	0.0000				
	Rio Branco - PR	32	0.5443				
	Araucária - PR	28					
	Curitiba - PR	0	0.0000				43 % ou 288 MJ de origem renovável
	Colombo - PR	19	0.0215				
	Colombo - PR	19	0.0068				
	Colombo - PR	19	0.3850	0	80	84 % ou 67 MJ de origem fóssil e	
	Pinhais - PR	8	0.1044			16 % ou 13 MJ de origem renovável	
	Rio Branco - PR	32	0.2239	19	981	sendo: 55 % ou 541 MJ de origem fóssil e	
	Colombo - PR	19	0.2658				
	Araucária - PR	28	1.5670				
	Rio Branco - PR	32	0.0674				
	Ponta Grossa - PR	114	2.6594				
Rio Branco - PR	32	0.1361					
Araucária - PR	28	0.3572					
Curitiba - PR	0	0.0000					
Pinhais - PR	8	0.0298					
Ponta Grossa - PR	114	14.1523	45 % ou 439 MJ de origem renovável				
Curitiba - PR	0	0.0000					
Curitiba - PR	0	0.0000					

\*Conforme Tabela 6.

\*\*Conforme Tabela 7.

\*\*\* Distância do local de produção do material mais próximo de Curitiba conforme LAC (2010).

\*\*\*\* 1,62 MJ/t/Km conforme TAVARES (2006) .

Fonte: A autora, 2011.



**8 ANEXO**

## VALIDATION OF MESTRE BUILDING SIMULATION SYSTEM ACCORDING TO BEST-TEST MULTI-ZONE, NON-AIRFLOW, IN-DEPTH DIAGNOSTIC CASES

Schmid, Aloísio Leoni<sup>1</sup> and Graf, Helena Fernanda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineer, Dr.-Ing, Professor, UFPR, iso@ufpr.br

<sup>2</sup>Architect, MSc. in Civil Construction, UFPR, helenafernanda@terra.com.br

Laboratório de Ambiente Construído – Departamento de Arquitetura e Urbanismo

Federal University of Paraná – UFPR - Phones (+55 41) 3361-3069

### ABSTRACT

The MESTRE building simulation system is a highly portable tool written in Java for describing the thermal, acoustic and luminic performance of buildings. The present paper introduces the validation results of the thermal behavior module according to IEA Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (Bestest), for multi-zone, non-air flow, in-depth diagnostic cases. Results were compared with theoretical results as well as results provided by already validated simulation packages. Results by MESTRE is in reasonable approximation. Comments on the improvement process in order to achieve the correct range and difficulties found are presented too.

### INTRODUCTION

The MESTRE building simulation system was started in 2001 as a tool for describing the thermal behaviour of buildings. The author intended to address the main mechanisms of heat transfer in buildings without oversimplifying the geometry. Besides, he intended to create a portable tool, based on a light code. Further, it should be operational with climate and material data available in Brazil. His belief was that, rather than adopting one of the then available commercial systems, the development of a new tool could deepen the comprehension of such systems. A close knowledge of the methods and algorithms beyond them could provide a support to the classroom needs.

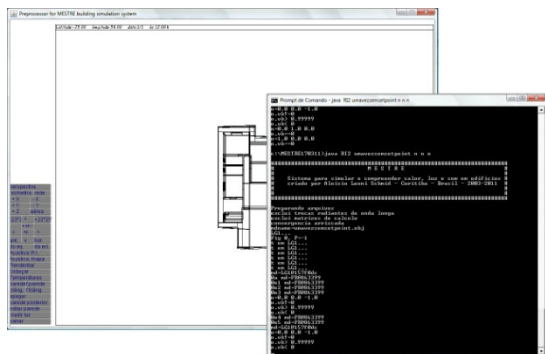


Figure 1  
MESTRE interface

MESTRE was written in the Java language. This allowed an extremely lightweight code, totaling only 201 kB in the current, 2011 version. Several numeric algorithms were implemented. For data input, a simple (not necessarily user-friendly) language was created.

In 2003, a daylighting module was added, with the generation of realistic images. An example of an image generated by MESTRE (daylight on an office desk) is shown in Figure 2.

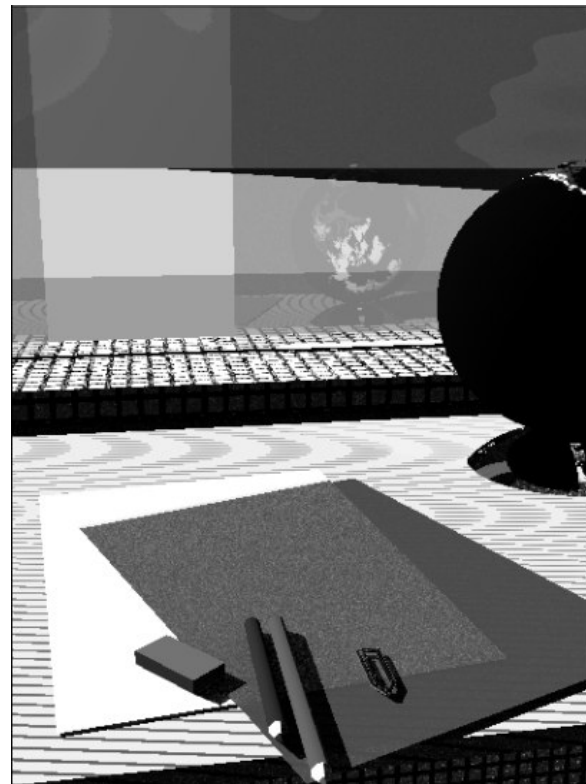


Figure 2  
Daylighting image by MESTRE

In 2006, an acoustics module was added, including auralization (i.e. the generation of audible simulation from anechoic recordings and computation of the impulse response of rooms). Figure 3 shows some views of the computation of the impulse response of a room by means of

raytracing. In order to build impulse responses, a vectorial acoustical field is combined to a diffuse acoustical field. The number of reflections has to be much higher than in daylighting simulations, as the human ear registers sound intensities in a range from 1 to 1 trillion. This generates a huge number of reflections. Therefore, view factors generated by raytracing provide a bound to the possible arrangements of surfaces hit in the way from the sound source to the receiver.

In a next processing, the impulse response is Fourier-transformed, generating data in frequency (instead of time) domain. An anechoic recording in .WAV format is opened and its main (wave) part also Fourier-transformed. Both arrays are convoluted and the result undergoes the inverse Fourier transform. Then, a new .WAV file is assembled and the result becomes audible (reverberation was added to the anechoic recording). The Fourier transform is necessary to significantly reduce computation time.

In 2010, a review was conducted in the thermal simulation module. Instead of only providing the zone temperatures as a result, an automatic computation of the energy requirements for acclimatization in each zone was included (heating and cooling, based on predefined temperature setpoints).

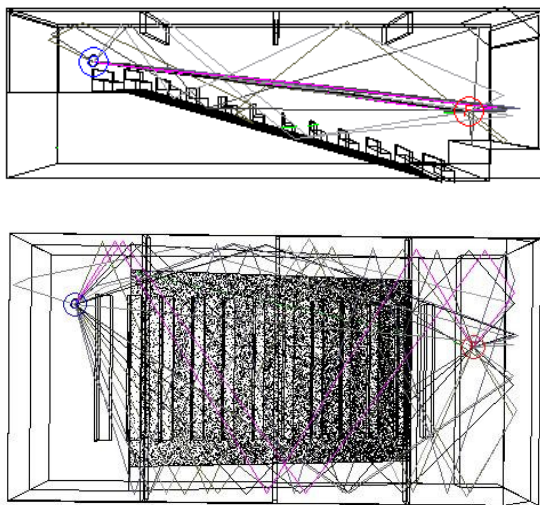


Figure 3  
Computation of the impulse response of a theatre

The present paper presents the new version of thermal analysis module, including the latest improvements. Analysis is based on a lumped mass approach (that resembling resistive-capacitive electric circuits). Thermal zones are associated to temperature nodes and are defined in correspondence with the building compartments, but not exclusively: building walls and other solid elements contain each a temperature node, too. Solid elements (as walls and slabs) have a thermal

resistance and a thermal capacity. Air zones have a film coefficient and a thermal capacity.

Direct and diffuse solar irradiation are approximated by means of a Ray-tracing technique.

The system understands data, which includes following groups:

- General simulation parameters like location, duration and convergence criteria;
- Model geometry (of solid elements like walls, slabs and windows), including dimensions, placement relative to the local coordinate system and the zone numbering scheme, and material code
- Thermal zones including zone thermal capacity, film coefficients, schedules for zone heat generation, ventilation, and temperature setpoints;
- Materials (thermal properties, besides visual and acoustic properties, here not used);
- Climate data: daily, monthly or annual records of air temperature, direct and diffuse solar radiation.

More details are provided by Schmid (2001, 2004 and 2006).

## VALIDATION

In December, 2010 an attempt was initiated to validate the MESTRE system according to the IEA's Building Energy Simulation Tool Test and Diagnostic Method (Bestest) for multiple zones, non-airflow building models. At the same time, the new version of the software was created. Both were concluded in 2011.

The TR2 climate file for Miami, USA was downloaded and converted into a compatible format. Data files were generated considered five test cases:

- MZ320 (three-zone, steady-state, with internal heat generation in two of the zones and a temperature setpoint in the third zone),
- MZ340 (six-zone, west-facing building, as a calorimeter to measure transmitted beam and diffuse solar energy in hourly timesteps over one representative year),
- MZ350 (same with partial shading by a fin),
- MZ355 (fin replaced by a shading zone)
- MZ360 (a triple window with intermediate zones between the panes).

The main information source on the Bestest procedure was a NREL report by Neymark and Judkoff (2008).

Next, a description of each test is provided. At the end of the paper, some reflections on the improvements in the code are added. Further, a discussion is presented on the difficulties found during the validation process, as well as on the meaning of developing a new simulation tool.

### MZ320

This test is related to the behavior of a single-floor building, consisting of three adjacent zones. Every zone has a different heat production rate. Only a steady-state analysis is performed. No solar radiation is considered. The geometry is depicted in Figure 4.

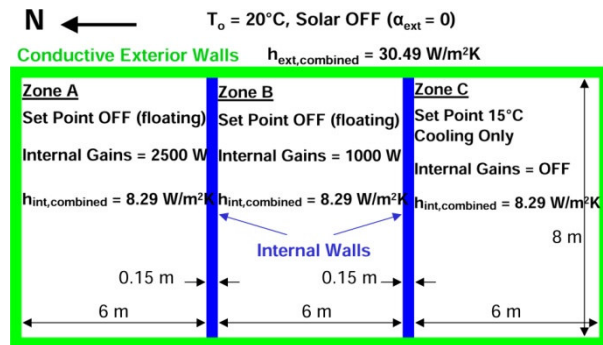


Figure 4

Case MZ320 - plan view (Neymark; Judkoff, 2008)

Simulation results by MESTRE are shown in Table 1, besides the Bestest result range (obtained by several participating packages such as ESP and Energy Plus). The analytic solution according to Neymark e Judkoff (2008) is also presented.

Table 1  
MZ320 simulation results by MESTRE

	Heat load (W)	Temperature, Zone 1	Temperature, Zone 2	Temperature, Zone 3
Mestre	1541	31.06	24.8	15
Best Test, minimum	1517	30.99	24.65	15
Best Test, maximum	1546	31.93	24.8	15
Analytic solution	1541	31.06	24.8	15
Deviation, 1-4 (%)	0	0	0	0

### MZ340

This test refers to the behavior of a two-floor, six-zone building. All zones have a wide aperture facing west. Hour-by-hour solar gains (both direct, on a perpendicular plane, and diffuse, on a horizontal plane) were read from the TR2 weather data file, which is valid for Miami, USA. All walls are adiabatic. Figures 5 and 6 present the building geometry.

Solar angles considered were as for Miami, USA. Outside air temperature was kept at 20°C. As solar radiation is the only heat source, its elimination by means of artificial refrigeration had to be achieved. Results are presented in Table 2.

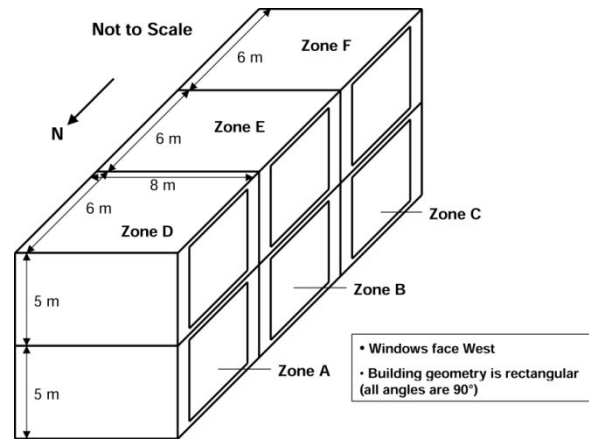


Figure 5

Case MZ340 - unshaded calorimeter isometric (Neymark; Judkoff, 2008)

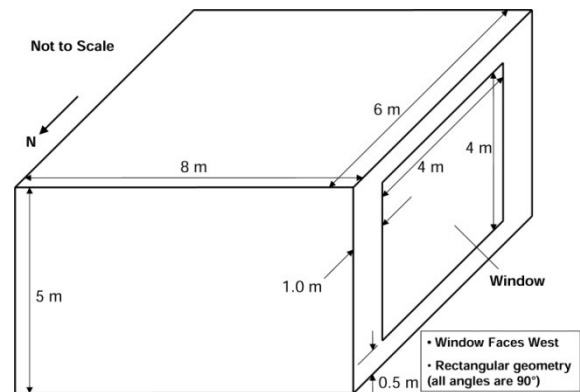


Figure 4

Case MZ340 - single zone (Neymark; Judkoff, 2008)

Table 2  
MZ340 simulation results by MESTRE

	Refrigeration load: average of six zones (W)
Mestre	13662
Best Test, minimum	12290
Best Test, maximum	12849
Deviation, 1-3 (%)	6.30%

### MZ350

This test is derived from MZ340 with the addition of a vertical plan throwing shadows mainly to A, B, D and E zones. Results are presented in Table 3. They resemble those of MZ340, as other than the shadow, there are no differences.

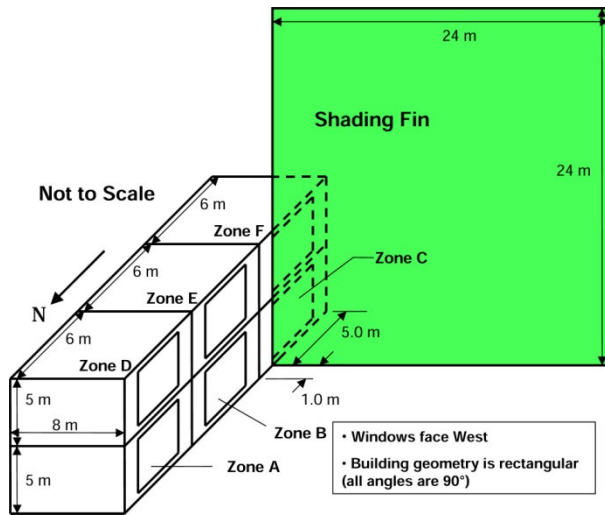


Figure 6

Case MZ340 - Case MZ350 - fin shading isometric  
(Neymark; Judkoff, 2008)

Table 2  
MZ350 simulation results by MESTRE

	Refrigeration load (W)						Average
	B	E	A	D	C	F	
Mestre	6274	6952	8869	9277	10085	10216	8612
Best Test, minimum	5867	6098	8011	8404	8485	8582	7575
Best Test, maximum	6671	6895	8730	9113	9388	9452	8375
Deviation (%)	0	0.8	1.6	1.8	7.4	8.1	3.3

### MZ355

The MZ355 test is a variation of MZ350, which uses, to throw shadow, an additional zone, instead of a fin. Thus, insolation on zones C and F is completely blocked. Figure 7 presents the building geometry.

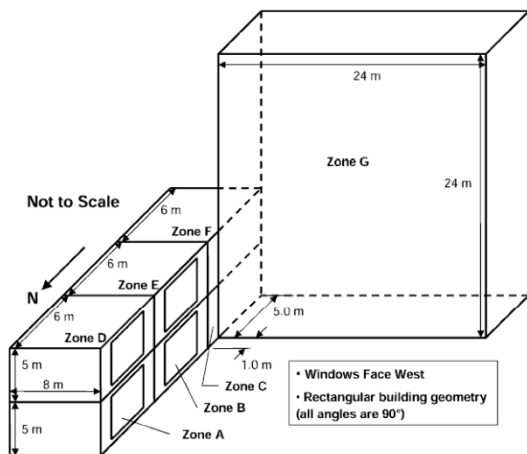


Figure 7

Case MZ355 - building self-shading isometric  
(Neymark; Judkoff, 2008)

Results are presented in Table 4.

Table 4  
MZ355 simulation results by MESTRE

	Zona A	Zona B	Zona D	Zona E
Mestre	8872	6647	9285	6902
Best Test, minimum	8259	6053	8642	6291
Best Test, maximum	8726	6668	9106	6895
Deviation (%)	1.7	0	2	0

### MZ360

This test consists in an approximately cubic shape with a complex window, consisting in three layers. The windows face southwest (Figure 8).

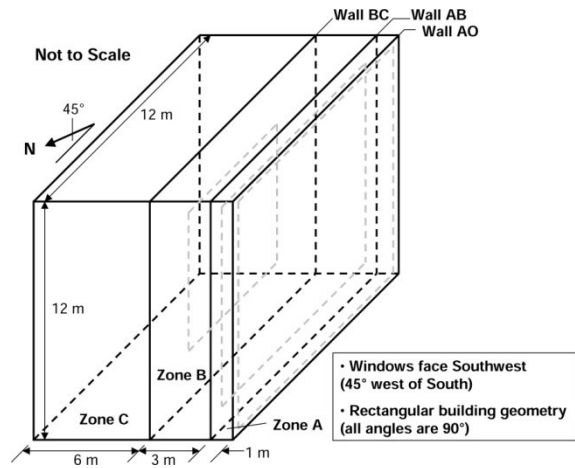


Figure 8

Case MZ360 - internal window isometric (Neymark; Judkoff, 2008)

Results are presented in Table 5.

Table 5  
MZ360 simulation results by MESTRE

	Zona A	Zona B	Zona C	Total
Mestre	43449	59971	19332	122752
Best Test, minimum	43480	54130	8550	120538
Best Test, maximum	60817	63512	28421	129653
Deviation	-0.10%	0	0	0

## DISCUSSION

The MESTRE system showed a tendency to agree with the Bestest standards, but showed some deviation in tests MZ340 and MZ350. Next, a closer analysis of accuracy issues will be presented.

MESTRE has proven accurate in the following simulation tasks:

- Zone interaction
- Natural convection phenomenon
- Heat conduction
- Modelling of direct solar energy and shadow projection

Some difficulties in convergence were initially reported, due to the less common characteristics of the tests, as the assumption of adiabatic walls in MZ340 thru MZ360 and the lack of thermal capacity. However, after some corrections, the performance was considered adequate.

Some deviations in the non-shadowed zones facing West are probably due to the lack of critical considerations in the implementation of the diffuse Sky model according to Pérez *et al.* (apud Duffie & Beckmann, 1991), which divides diffuse solar radiation in three components:

- Uniform
- Circumsolar
- Close to horizon

This discrepancy becomes noticeable at the end of the days in Windows facing sunset.

In cases MZ340 e MZ350, where there is a stronger exposition to West, the circumsolar component seems excessive, deviating from the IEA range the yearly totals of diffuse radiation. It is worth mentioning that the IEA BESTEST report (Neymark & Judkoff, 2008) mentions the fact that the Pérez *et al.* model superestimates diffuse radiation.

Other discrepancies are due to the adoption, by MESTRE, of solar positions at half time steps: for example, the 12h00 computation uses the 11h30 values and so on. To achieve a higher accuracy, rather, a better numerical integration procedure should be implemented, with use of shorter timesteps than one hour.

The validation attempt according to IEA Bestest was useful as it motivated the introduction of two major changes in the 2011 version of MESTRE:

- Hour-by-hour simulation along the year, based on 8760 hourly records;
- Automatic computation of climatization energy, based on setpoints;

In addition, following improvements were done:

- Differentiation of the radiation absorptances of two opposing surfaces of the same wall element;
- Modelling of diffuse radiation

However, data on diffuse radiation are not available for Brazilian cities.

### Comments on modelling

In MESTRE both direct and diffuse radiation were first mathematically described and then numerically approximated. The decision for a model is based on the developer's knowledge of the physical phenomena, and also his or her ability of translating it into algorithms, and there may be a limitation in both aspects. However, only a validation procedure provides the developer an opportunity to really quantify the merit or demerit of his developing work.

To calculate the contribution of direct radiation, first the position of the sun is calculated in terms of local coordinates  $P_{sun}(X,Y,Z)$ . Subtraction of this point from the building domain's central point  $P_{central}(X,Y,Z)$  originates a vector representing the instantaneous direction of the incident solar rays  $v_{ray}$ . On a plan perpendicular to that vector, a grid is originated to expand the point representing the sun to a surface. Each of these grid points will generate a new ray projected to the building domain. A test is made to verify whether the ray intersects a building surface.

Modelling of direct radiation was first based on the admission of every radiant flux through a window to the corresponding zone. First Best Test validation attempts demonstrated noticeable deviations. Consequently, there is a not fair distribution of heat flux between the zone where the solar ray first hits an opaque surface and the other zone limited by that wall. But physically it represents a worse mistake: this first model considered every surface a 100% reflective and the air 100% absorbing. This was not realistic at all.

Therefore, the following improvement was made. If a surface is hit, a radiant flux contribution is added to that surface. If it is an outside surface, this flux is considered when calculating the sun-air temperature. If it is a window surface, it is admitted into the zone and the absorbed component generates a sol-air temperature at the corresponding inner surface it hits on; the reflected component is added to the zone air. To adequately represent the effect of the windows, a grid density has to be chosen which is at least the half height and width of the smallest window in the model.

Diffuse radiation was not modeled before the Best Test. It was introduced as calculations widely deviated from the expected values. Introduction of diffuse modeling has two tradeoffs:

- As in daylighting simulation, an accurate modeling of radiation exchange between surfaces has to be achieved without causing the computation time to be excessive;
- A sky model has to be chosen, which represents the main influences on the building model, but does not excessively idealize the real sky (it has to be noted that data on diffuse radiation are not available in Brazil).

Only the rays from the sky and neighboring surfaces (albedo) to the building surfaces were modeled. No further reflections were included. Every surface was first represented by its central point. On it, a hemisphere was generated and discretized in a number of height angles and azimuth angles. A raytracing procedure was then adopted (diffuse radiation was traced back to its origin – the sky). Only a ray hitting the sky either directly or through



one or more transparent elements has a contribution to be accounted for.

This first attempt to model diffuse radiation proved insufficient. A new attempt was then made, adopting not only the central point of every surface, but four points in rectangular surface elements (by dividing every rectangular surface element in four regions), and three points in triangular elements (by dividing every triangular surface element in three regions). This procedure certainly demanded programming effort, and also added an extra delay to the computation time. However, the MZ360 results became closer to the expected range.

### **Comments on the general orientation in system development**

MESTRE attempts to be object-oriented, but it is not really. It attempts, first because of the Java logics, which lets almost no choice to the developer. Second, because an object-oriented software is much easier to update; the interface with building design software would also become much easier. It is not really due to the developer inability to think object-oriented. In object-oriented programming, by definition, a class encompasses variables and methods (functions) involving these variables; however, this is true, mainly, for the variables; several methods were implemented outside the classes, due to an initial lack of comprehension that they belong within the class. In addition, sometimes the developer's hurry to see simulation results may have encouraged several precarious solutions which are not compatible to a fully object-oriented approach. There is a set of global variables which were included along the development history. Such global variables are not necessarily considered when, for instance, a wall class is modified. Thus, the programming effort to refine or even verify the performance of a given class may be almost prohibitive.

The development of MESTRE by a single author made not necessary any collaborative effort, thus allowing the use of a rather hermetic code. As the software was initiated in 2001, it is prohibitive to repair this deficiency. The best decision would be to write a new code within a team, raising the concern for information design and information management.

### **Why to write a new simulation code?**

There have been multiple didactic and scientific benefits, allowing a customized use in undergraduate classrooms and graduate seminars. MESTRE has proved useful particularly in the education of Architects, where sustainable design choices require a comprehension of combined building physics problems (rather than stressing on a single physical context). A detailed description was presented by Schmid (2008).

The treatment of three different problems such as heat transfer, acoustics and daylighting profited from a library of vectorial algebra methods.

Student complaints about the complexity of the data files to be entered motivated a discussion on a possible interface with Building Integrated Modelling packages like Autodesk Revit or Archicad. A review on the topic of access to the integrated building model is provided by Ayres (2007). Accordingly, the best found choice was defined as the implementation of translating methods from IFC classes. MESTRE would then give up the task of refining the graphical input. However, no progress was done so far.

### **FINAL REMARKS**

A new thermal module of the MESTRE building simulation code was presented.

There was a very good agreement, with perfect similarity to the theoretical solution at MZ320. Results were 6.3 % above the Bestest range in yearly cooling loads at MZ340. A similar deviation was found in the yearly cooling loads at two of the zones at MZ350. Results were almost within Bestest range in yearly cooling loads at MZ355, and there was only a 0.1% deviation in zone A at MZ360.

The ratio of costs and benefits of developing MESTRE have been favorable. However, there are still several improvements to be done. Probably, a team will be formed and a new code will be started.

### **REFERENCES**

- AYRES, C.A.F. Acesso ao modelo integrado do edifício. Master Thesis. UFPR, Curitiba, Brazil, 2009.
- NEYMARK, J. & JUDKOFF, R. IEA – International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST), Technical Report NREL/TP-550-43827, 2008.
- DUFFIE, J.A. & BECKMANN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, Nova Iorque: Wiley, 1991.
- SCHMID, A. L. Simulação de desempenho térmico em múltiplas zonas: MESTRE, um sistema brasileiro na linguagem Java. In: VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2001, S. Pedro (SP). Anais do ENCAC 2001, 2001.
- SCHMID, A. L., Simulação da luz natural: combinação dos algoritmos de raytracing e radiosidade e suas aplicações na Arquitetura. Ambiente construído, v.4, pp.51 - 59, 2004.
- SCHMID, A.L. The introduction of building simulation into an architectural faculty: preliminary findings. Journal of Building Performance Simulation. Volume 1, Issue 3, 2008, pp. 197 – 208, 2008.
- SCHMID, A. L., Tecnologia nacional em simulação acústica para ver e ouvir ambientes futuros. Engenharia e construção, p.31 - 34, 2006.