

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**LUCAS BELTRAM**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO  
ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO COMERCIAL**

Porto Alegre

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

# **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO COMERCIAL**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Flávio Antonio Becon Lemos

Porto Alegre  
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**LUCAS BELTRAM**

## **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO COMERCIAL**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

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

Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina UFSC

Florianópolis, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Flávio Antonio Becon Lemos, UFRGS

Doutor pela UFSC - Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UFRGS

Doutor pela UNICAMP – Campinas, Brasil

Eng. Rafael Gerzson Torres

Engenheiro pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, 2015

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho ao meu pai Gilberto Beltram, minha mãe Salete Beltram e minha avó Maria Beltram, como agradecimento por tudo que já fizeram pela minha vida nesses 24 anos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado força em todos os problemas que foram superados nessa caminhada.

Agradeço também aos meus pais pelo incentivo e apoio, sem eles jamais chegaria aonde cheguei.

Agradeço à minha namorada por todo o companheirismo, carinho e compreensão ao longo desses últimos anos juntos.

Agradeço aos meus amigos e colegas pela companhia, distração e viagens.

Agradeço ao meu orientador Flávio pelo tempo dedicado a mim e pela ajuda durante o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço à toda equipe da Petinelli por tudo que me foi ensinado nesse incrível período de estágio e pela colaboração no meu projeto de diplomação.

*“ O pessimista vê um copo meio vazio;  
O otimista vê um copo meio cheio;  
O engenheiro vê um copo superdimensionado.”*

*Autor desconhecido*

## RESUMO

Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o desempenho energético de uma edificação comercial, na cidade de Itajaí - Santa Catarina, que busca a certificação LEED (Leadership in Energy & Environmental Design). Analisou-se o impacto que a aplicação de medidas de eficiência energética possui na redução do consumo de energia elétrica da edificação. Foram estudados os seguintes sistemas: envoltória, iluminação e condicionamento de ar. Para isso, simulou-se a edificação na ferramenta computacional EnergyPlus, em três diferentes cenários: Edificação Referência, Edificação Proposta e Edificação Padrão de Mercado. O primeiro cenário utilizou os parâmetros dos requisitos mínimos exigidos pela norma ASHRAE 90.1-2007; o segundo cenário utilizou os parâmetros dos projetos utilizados na edificação construída, considerando as medidas de conservação de energia; o terceiro cenário utilizou parâmetros estimados para o padrão de projetos entregues ao mercado. O resultado de consumo de energia elétrica anual da Edificação Proposta foi 53% menor em relação à Edificação Referência. Um sistema de geração local de energia fotovoltaica com potência instalada de 1,96kWp é capaz de produzir 18% da energia consumida em um ano na Edificação Proposta. Por outro lado, a Edificação Padrão de Mercado apresentou resultado de consumo anual de energia elétrica 4% menor que o da Edificação Referência. A partir dos resultados obtidos com as simulações, conclui-se que a aplicação de medidas de eficiência energética no desenvolvimento de projetos de edificações comerciais possui impacto significativo na redução do consumo de energia elétrica.

**Palavras-chaves: Eficiência Energética. EnergyPlus. LEED. Energia Fotovoltaica.**

## ABSTRACT

The purpose of this work was to evaluate the energy performance of a commercial building in the city of Itajaí - Santa Catarina that is currently seeking for LEED certification. It has analyzed the impact that energy efficiency measures has in reducing the electricity consumption of the building. The studied systems were envelope, lighting and air conditioning. The software EnergyPlus was used to simulate the building in three different scenarios: Reference Building, Designed Building and Industry Standard Building. The first scenario used the parameters required by the standard ASHRAE 90.1-2007; the second scenario used the parameters of the real building, considering the energy conservation measures; the third scenario used estimated parameters for the industry standard. The result of annual electricity consumption of Designed Building was 47% lower compared to the Reference Building. A local generation system of photovoltaic energy installed capacity of 1,96 kWp, is capable of producing 18% of energy consumed in a year in Designed Buildings. On the other hand, the Industry Standard Building presented results of annual electricity consumption 4% lower than the Reference Building. From the results of the simulations, it was possible to conclude that the application of energy efficiency measures in the development of commercial building projects has a significant impact on reducing energy consumption.

**Keywords: Energy Efficiency. EnergyPlus. LEED. Photovoltaics.**



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>14</b>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Envoltória da Edificação.....</b>	<b>16</b>
2.2.1	Propriedades Físicas dos Elementos Construtivos .....	16
<b>2.3</b>	<b>Sistemas de Iluminação .....</b>	<b>18</b>
2.3.1	Conceitos de Luminotécnica .....	18
2.3.2	Normas de Iluminação .....	20
<b>2.4</b>	<b>Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC).....</b>	<b>20</b>
2.4.1	Ciclo de Refrigeração.....	21
2.4.2	Tipos de Sistemas de Condicionamento de Ar.....	22
<b>2.5</b>	<b>Energia Solar Fotovoltaica .....</b>	<b>24</b>
2.5.1	Definição de Conceitos Relacionados.....	25
2.5.2	Resolução Normativa ANEEL 482/2012 .....	29
<b>2.6</b>	<b>Certificação LEED .....</b>	<b>30</b>
<b>2.7</b>	<b>ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2007 .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8</b>	<b>Ferramenta Computacional - EnergyPlus .....</b>	<b>33</b>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Apresentação da Edificação.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Desenvolvimento do Modelo Geométrico .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3</b>	<b>Edificação Referência .....</b>	<b>38</b>
3.3.1	Envoltória da Edificação Referência .....	39
3.3.2	Sistema de Iluminação na Edificação Referência .....	40
3.3.3	Sistema de AVAC da Edificação Referência .....	41
<b>3.4</b>	<b>Edificação Proposta .....</b>	<b>41</b>
3.4.1	Envoltória da Edificação Proposta .....	41
3.4.2	Sistema de Iluminação da Edificação Proposta.....	43
3.4.3	Sistema de AVAC da Edificação Proposta .....	44
3.4.4	Geração Fotovoltaica na Edificação Proposta.....	44
<b>3.5</b>	<b>Edificação Padrão de Mercado .....</b>	<b>45</b>
3.5.1	Envoltória da Edificação Padrão de Mercado .....	45

3.5.2	Sistema de Iluminação na Edificação Padrão de Mercado .....	46
3.5.3	Sistema de AVAC na Edificação Padrão de Mercado .....	47
<b>3.6</b>	<b>Premissas Comuns Entre as Edificações .....</b>	<b>48</b>
<b>3.7</b>	<b>Simulações Realizadas.....</b>	<b>49</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Simulação 1: Edificação Referência.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulação 2: Simulação 1 + Envoltória da Edificação Proposta .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3</b>	<b>Simulação 3: Simulação 2 + Sistema de Iluminação .....</b>	<b>52</b>
<b>4.4</b>	<b>Simulação 4: Edificação Proposta.....</b>	<b>53</b>
<b>4.5</b>	<b>Simulação 5: Edificação Padrão de Mercado .....</b>	<b>55</b>
<b>4.6</b>	<b>Simulação 6: Geração local de energia com Painéis Fotovoltaicos .....</b>	<b>58</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>64</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Diagrama representativo do ciclo de refrigeração básico. ....	22
Figura 2 Ar condicionado de janela.....	22
Figura 3 Sistema ar condicionado do tipo Split.....	23
Figura 4 Sistema de ar condicionado do tipo Multisplit.....	23
Figura 5 Sistema de ar condicionado do tipo Água Gelada. ....	24
Figura 6 Evolução da produção de painéis fotovoltaicos no período de 1995 a 2012. ....	25
Figura 7 Espectro solar. ....	26
Figura 8 Junção PN presente nos módulos fotovoltaicos. ....	27
Figura 9 Representação de uma célula, um módulo e um painel fotovoltaico.....	27
Figura 10 Exemplo de SFVI. ....	28
Figura 11 Exemplo de SFVCR. ....	29
Figura 12 Níveis de certificação e referente faixa de pontuação para o LEED.....	32
Figura 13 Crescimento da certificação LEED no Brasil. ....	32
Figura 14 Interface de edição de parâmetros do EnergyPlus. ....	34
Figura 15 Modelo geométrico utilizado no EnergyPlus.....	34
Figura 16 Ilustração da edificação real analisada no estudo. ....	36
Figura 17 Planta baixa do (a) pavimento térreo e do (b) mezanino. ....	37
Figura 18 Modelo geométrico desenvolvido para a edificação do estudo. ....	38
Figura 19 Modelo geométrico desenvolvido para a Edificação Proposta. ....	43
Figura 20 Selo Procel para equipamentos de ar condicionados Split.....	47
Figura 21 Perfil horário de uso aplicado ao sistema de iluminação. ....	48
Figura 22 Perfil horário aplicado à ocupação das edificações.....	48
Figura 23 Resultado do consumo mensal de energia elétrica para a Edificação Referência....	50
Figura 24 Representatividade do consumo anual para a Edificação Referência. ....	51
Figura 25 Comparação entre o consumo da simulação 2 com a Edificação Referência. ....	51
Figura 26 Resultado do consumo anual para as simulações 1, 2 e 3. ....	52
Figura 27 Resultado de consumo de AVAC para as simulações 2 e 3.....	53
Figura 28 Resultado de consumo anual de energia para as simulações 01 a 04.....	54
Figura 29 Resultado do consumo de AVAC para as simulações 03 e 04. ....	54
Figura 30 Resultado para o consumo mensal de energia elétrica da Edificação Proposta. ....	55
Figura 31 Resultado para o consumo de refrigeração na Edificação Proposta. ....	55
Figura 32 Resultado do consumo anual de energia para as 3 edificações em estudo.....	56
Figura 33 Resultado do consumo mensal de energia para a Edificação Padrão de Mercado...57	
Figura 34 Resultado do consumo anual de AVAC para as 3 edificações do estudo.....	58
Figura 35 Resultado para a geração local de energia via painéis fotovoltaicos. ....	58
Figura 36 Consumo versus geração mensal de energia elétrica para a Edificação Proposta. ..	59
Figura 37 Resultado para o consumo anual da Edificação Proposta. ....	60
Figura 38 Resultado para os consumos anuais em comparação com a geração local. ....	60
Figura 39 Parcela de Energia elétrica gerada localmente.....	61
Figura 40 Análise de retorno de investimento.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Valores de eficiência luminosa para diferentes tecnologias de lâmpadas. ....	19
Tabela 2 Diferenças entre a norma NBR 5413 e a NBR ISO 8995-1. ....	20
Tabela 3 Denominação adotada para os cenários. ....	35
Tabela 4 Divisão de zonas térmicas do modelo geométrico. ....	38
Tabela 5 Parâmetros dos elementos opacos construtivos da Edificação Referência. ....	39
Tabela 6 Parâmetros dos elementos translúcidos construtivos da Edificação Referência. ....	39
Tabela 7 Potência instalada de iluminação da Edificação Referência. ....	40
Tabela 8 Potência de iluminação externa para a Edificação Referência. ....	40
Tabela 9 Ordem em que as medidas de eficiência energética foram empregadas. ....	41
Tabela 10 Parâmetros dos elementos opacos construtivos da Edificação Proposta. ....	42
Tabela 11 Parâmetros dos elementos translúcidos construtivos da Edificação Proposta. ....	42
Tabela 12 Potência de iluminação interna instalada na Edificação Proposta. ....	44
Tabela 13 Potência de iluminação externa instalada na Edificação Proposta. ....	44
Tabela 14 Especificações dos módulos utilizados. ....	45
Tabela 15 Parâmetros dos elementos opacos da Edificação Padrão de Mercado. ....	45
Tabela 16 Parâmetros dos elementos translúcidos da Edificação Padrão de Mercado. ....	46
Tabela 17 Potência instalada de iluminação interna a Edificação Padrão de Mercado. ....	47
Tabela 18 Potência instalada de iluminação externa para a Edificação Padrão de Mercado. ...	47
Tabela 19 Potências instaladas de equipamentos consideradas para cada zona. ....	49
Tabela 20 Descrição das 6 simulações realizadas. ....	49
Tabela 21 Representatividade da geração local na Edificação Proposta. ....	59
Tabela 22 Parcela do consumo que é suprido pela geração local. ....	61
Tabela 23 Análise de número de painéis. ....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
COP	Coefficiente de Performance
DELET	Departamento de Engenharia Elétrica
DOE	<i>Department of Energy</i>
DPI	Densidade de Potência Instalada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GBCBrasil	<i>Green Building Council</i> Brasil
GTES	Grupo de Trabalho de Energia Solar
IBRE	Instituto Brasileiro de Economia
IEA	<i>International Energy Agency</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
MEE	Medidas de Eficiência Energética
SFVCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFVI	Sistema Fotovoltaico Isolado
SHGC	<i>Solar Heat Gain Coefficient</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USGBC	<i>United States Green Building Council</i>
VA	Via Artística
VLT	<i>Visible Light Transmittance</i>
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i>
VRV	Volume de Refrigerante Variável
WBCSD	<i>World Business Council of Sustainable Development</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Condutividade Térmica
<b>R</b>	Resistência Térmica
<b>L</b>	Espessura do Material
<b>U</b>	Transmitância Térmica
<b>C<sub>Ta</sub></b>	Capacidade Térmica
<b>c</b>	Calor Específico
$\rho$	Densidade do Material
$\varphi$	Fluxo Luminoso
<b>E</b>	Eficiência Luminosa
<b>P</b>	Potência Elétrica
<b>I</b>	Iluminância
<b>A</b>	Área
<b>COP<sub>r</sub></b>	Coefficiente de Performance de Refrigeração;
<b>Q<sub>e</sub></b>	Calor Transferido na Refrigeração;
<b>W<sub>e</sub></b>	Trabalho Externo;
<b>COP<sub>a</sub></b>	Coefficiente de Performance de Aquecimento;
<b>Q<sub>s</sub></b>	Calor Transferido no Aquecimento;
<b>c-Si</b>	Silício Cristalino

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O acelerado crescimento na demanda de energia elétrica mundial tem como consequência alguns problemas como: o aumento na tarifa de energia elétrica para o consumidor final e impactos ambientais associados ao aumento da potência de geração instalada.

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2014), a capacidade energética terá de ser aumentada em cerca de 40% até 2040 para atender ao padrão atual de crescimento da demanda. Além disso, comenta-se que os investimentos no aumento da capacidade de geração térmica (necessário para manter uma segurança energética com a recorrente desregulação dos períodos de chuva), juntamente com o investimento em energias renováveis e o elevado preço de combustíveis fósseis, irão acarretar encarecimento do fornecimento de energia elétrica e, conseqüentemente, provocar um aumento na conta de eletricidade do consumidor (IEA, 2014).

Considerando que o relatório de Eficiência Energética em Edificações do *World Business Council of Sustainable Development* (WBCSD, 2009) mostra que edificações representam 40% do consumo global de eletricidade, espera-se que medidas de eficiência energéticas aplicadas a edificações tenham impacto significativo nesse consumo. Segundo o relatório, comparado a outros setores, existem maiores e mais atrativas oportunidades de redução de consumo que possuem custo reduzido e retorno de investimentos mais rápidos.

No cenário nacional, o consumo energético em edificações (residencial, comercial e público) representa uma parcela ainda maior quando comparado ao cenário mundial: cerca de 48 % do consumo total de energia elétrica do país (EPE, 2014). Além disso, em 2014, os setores residencial e comercial tiveram um aumento de 5,7% e 7,3% no consumo de energia elétrica, respectivamente (EPE, 2015). Projeções mostram que, até 2023, o maior aumento no consumo de energia elétrica em edificações será o do setor comercial, com alta de 5,5% ao ano (EPE, 2013).

Segundo nota técnica sobre a projeção de demanda de energia no Brasil (EPE, 2014b), a perspectiva é de crescente expansão da quantidade de edificações, seja devido à construção de moradias para atender a crescente população do país, seja pela expansão da atividade do setor de comércio e serviços. Atualmente, as edificações residenciais

somam aproximadamente 63 milhões de domicílios, e estima-se que nos próximos dez anos sejam construídos 13 milhões de domicílios adicionais.

Em termos de impactos econômicos, no final do mês de janeiro de 2015, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou uma revisão tarifária que implicou um aumento médio de 23,4% na conta de energia elétrica do consumidor brasileiro. Além disso, segundo cálculo feito pelo Instituto Brasileiro de Economia (IBRE, 2015) da Fundação Getúlio Vargas (FGV), o item que mais pressionou a inflação, no período inicial do ano de 2015, foi a tarifa de eletricidade residencial. Sendo assim, com a maximização da eficiência energética em edificações pode-se obter uma redução significativa na conta de energia elétrica que, devido a constantes acréscimos na tarifa, refletirá em grandes economias ao usuário final.

## **1.2 OBJETIVOS**

Considerando os problemas associados ao crescimento da demanda de energia elétrica, o objetivo principal do presente trabalho é demonstrar que medidas de conservação de energia possuem impacto significativo na redução do consumo de energia elétrica de edificações.

Os objetivos secundários do trabalho são:

- Avaliar o impacto de medidas de eficiência energética em sistemas de iluminação e condicionamento de ar de uma edificação comercial do tipo showroom de móveis;
- Avaliar o impacto de medidas de eficiência energética para aumentar a representatividade da parcela do consumo de eletricidade que é fornecida pela geração local via painéis fotovoltaicos;
- Avaliar o padrão de edificações existente no mercado, comparando-o ao exigido pela norma americana ASHRAE 90.1-2007 e a uma edificação projetada para possuir a certificação ambiental *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED);
- Verificar o impacto da certificação LEED na redução do consumo de uma edificação comercial.



### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Após introdução feita sobre a motivação e os objetivos do trabalho, o Capítulo 2 faz uma revisão sobre os estudos já realizados no tema em questão, além de fornecer uma contextualização necessária ao entendimento da metodologia utilizada. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e discussões. E por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões mais relevantes obtidas com o estudo e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITUAÇÃO**

Primeiramente, será apresentada uma revisão bibliográfica de estudos desenvolvidos por outros autores e depois serão apresentados conceitos e fundamentos necessários ao entendimento da análise realizada nesse trabalho.

### **2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Segundo Lamberts (2005), uma edificação é mais eficiente energeticamente que outra quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia.

Mendes et al. (2005) apresenta uma síntese da utilização de ferramentas computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. Segundo os autores, a utilização dessa ferramenta é imprescindível para a determinação de indicadores de consumo de edificações.

Westphal (2007) realizou uma análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais que serve de apoio para calibrações dos modelos utilizados. Na sua tese, obteve como resultado um modelo com consumo anual de 145 MWh  $\pm$  11%, ao nível de 95% de confiabilidade, quando o consumo real da edificação é de 149 MWh.

Rupp (2011), baseado no consumo de energia elétrica em edificações comerciais, desenvolveu um método para dimensionar área de janela, quando se utiliza ventilação híbrida (alternando entre ventilação natural e condicionamento artificial) e aproveitamento de iluminação natural. Seus resultados mostraram que essas medidas possuem potencial de redução de até 64,9% no consumo de energia elétrica das edificações.

Pietzsch (2012) dimensionou um sistema de ar condicionado de fluxo refrigerante variável para o prédio da Escola de Engenharia Nova da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), propondo medidas de eficiência energética. No seu estudo, utilizou a ferramenta computacional EnergyPlus 7.0.0 (DOE, 2011) para simular o modelo geométrico do prédio e seus sistemas, atingindo uma redução anual de 20% no consumo de energia elétrica. As medidas analisadas no estudo foram: utilização de películas nos vidros, redução de potência instalada de iluminação através da

utilização de lâmpadas de LED (*Lighting Emiting Diode*) e controles automáticos de iluminação.

## **2.2 ENVOLTÓRIA DA EDIFICAÇÃO**

Define-se a envoltória de uma edificação como os elementos construtivos da sua estrutura, ou seja: paredes, janelas, portas, telhados, etc. Segundo Lamberts (2005), a principal fração de ganhos térmicos de uma edificação é proveniente da parcela de radiação que é transmitida para o seu interior através da envoltória. Esses elementos construtivos são divididos em duas classes: fechamentos opacos e fechamentos translúcidos.

Nos fechamentos opacos, a transmissão de calor acontece quando há uma diferença de temperatura entre suas superfícies internas e externas – sendo, o sentido natural do fluxo, da superfície mais quente para a mais fria (LAMBERTS, 2005). Paredes são exemplos de fechamentos opacos da edificação.

Fechamentos translúcidos são os principais responsáveis por trocas térmicas em edificações. Nesse tipo de fechamento, podem ocorrer três tipos básicos de trocas térmicas: condução, convecção e radiação. Com relação às duas primeiras trocas, o comportamento é similar ao dos fechamentos opacos; a diferença encontra-se na troca de calor por radiação, que é elevada quando comparada aos fechamentos opacos (LAMBERTS, 2005). Janelas e claraboias são exemplos de fechamentos translúcidos.

### **2.2.1 Propriedades Físicas dos Elementos Construtivos**

A seguir, serão apresentadas as principais propriedades físicas dos elementos construtivos, utilizando definições e equações apresentadas na norma brasileira de desempenho térmico de edificações NBR 15.520-2 (ABNT, 2005). Essa norma apresenta exemplos de cálculos de resistência térmica de materiais homogêneos e heterogêneos, capacidade térmica, transmitância térmica, fator solar e atraso térmico.

#### **a) Condutividade Térmica ( $\lambda$ )**

A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é proporcional a densidade do material e representa a capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo. Sua unidade é o watt por metro kelvin (W/m.K).

### **b) Resistência Térmica (R)**

A resistência térmica ( $R$ ) de um material é a propriedade que define o quão resistente é o material em relação à troca de calor. O valor de  $R$  é diretamente proporcional à espessura do material ( $L$ ) e inversamente proporcional à  $\lambda$ . A Equação 1 define o valor de  $R$ .

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (1)$$

Onde:

$R$ : Resistência térmica [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ];

$L$ : Espessura [ $\text{m}$ ];

$\lambda$ : Condutividade térmica [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ].

### **c) Transmitância Térmica (Fator U)**

A transmitância térmica ( $U$ ) é igual ao inverso da resistência térmica; ou seja, quantifica a capacidade de transmitir calor de um material. A Equação 2 define o Fator  $U$ .

$$U = \frac{1}{R} \quad (2)$$

Onde:

$U$ : Transmitância térmica [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ];

$R$ : Resistência térmica do material [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ].

### **d) Capacidade Térmica ( $C_{Ta}$ )**

A capacidade térmica ( $C_{Ta}$ ) quantifica a propriedade de um material em reter calor, ou seja: indica a quantidade de energia necessária para variar, em uma unidade, a temperatura de seus componentes, por unidade de área. O cálculo da capacidade térmica de um material é feito pela Equação 3.

$$C_{Ta} = L \cdot c \cdot \rho \quad (3)$$

Onde:

$C_{Ta}$ : Capacidade térmica do material [ $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ];

$L$ : Espessura do material [ $\text{m}$ ];

$c$ : Calor específico do material [ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ];

$\rho$ : Densidade do material [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

### **e) Fator Solar (SHGC)**

O fator solar, conhecido como SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient*), se aplica a elementos translúcidos. É definido como a razão entre a quantidade de energia solar que é transmitida através do elemento e o total de energia que nele incide. Vidros comuns possuem SHGC de 0,8.

#### **f) Transmitância à radiação Visível (VLT)**

A transmitância à radiação visível, conhecida como VLT (*Visible Light Transmittance*), também se aplica a elementos translúcidos. É definida como a razão entre a radiação solar no espectro visível que é transmitida através de um elemento e o total incidente.

### **2.3 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO**

No setor comercial dos Estados Unidos, os sistemas de iluminação representam cerca de 25% do consumo total de energia da edificação (DOE, 2008). Logo, é factível concluir que desenvolver projetos luminotécnicos eficientes impacta significativamente na redução do consumo da edificação.

#### **2.3.1 Conceitos de Luminotécnica**

A seguir, serão apresentados conceitos e definições relacionados à área de luminotécnica, necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

##### **a) Fluxo Luminoso ( $\varphi$ )**

O fluxo luminoso ( $\varphi$ ) é a quantidade de luz emitida por uma fonte de luz na tensão nominal de funcionamento. Pode ser definido, também, como a radiação total da fonte luminosa entre os comprimentos de onda 380 nm e 780 nm (OSRAM, 2007). Sua unidade é o lúmen (lm).

##### **b) Eficiência Luminosa (E)**

As lâmpadas se diferenciam não só pelo fluxo luminoso que irradiam, mas também pelas suas potências elétricas. Sendo assim, para que seja possível realizar uma comparação entre elas, define-se a eficiência luminosa como a razão entre o fluxo luminoso irradiado e a respectiva potência elétrica consumida. Sua unidade é o lúmen

por watt (lm/W). Calcula-se a eficiência luminosa de uma lâmpada através da Equação 4.

$$E = \frac{\varphi}{P} \quad (4)$$

Onde:

$E$ : Eficiência da lâmpada [lm/W];

$\varphi$ : Fluxo luminoso da lâmpada [lm];

$P$ : Potência elétrica da lâmpada [W].

A Tabela 1 apresenta o valor de  $E$  para diferentes tecnologias de lâmpadas, desconsiderando luminárias.

Tabela 1 Valores de eficiência luminosa para diferentes tecnologias de lâmpadas.

Tecnologia	Eficiência luminosa [lm/W]
Incandescente translúcida	13,3
Halógena bipino	18,6
Fluorescente compacta	60
Fluorescente tubular (T8)	84,4
Fluorescente tubular (T5)	90,6
Vapor de sódio de alta pressão	80
Multivapor metálico	94,3
LED	50 a 110

Fonte: Modificado de Barbosa (2013).

### c) Iluminância (I)

A incidência do fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz em uma superfície leva a determinação da chamada iluminância; ou seja, é a quantidade de luz incidindo em uma dada superfície. O valor de  $I$  pode ser medido com o auxílio de um instrumento chamado Luxímetro. Devido a não uniformidade da distribuição de fluxo luminoso por uma fonte, a iluminância não necessariamente será a mesma em todos pontos de uma superfície; sendo assim, normalmente se determina a iluminância média. Sua unidade é o lux. Calcula-se a iluminância em uma dada superfície através da Equação 5.

$$I = \frac{\varphi}{A} \quad (5)$$

Onde:

$I$ : Iluminância [lux];

$\varphi$ : Fluxo luminoso da lâmpada [lm];

$A$ : Área da superfície [m<sup>2</sup>].

### 2.3.2 Normas de Iluminação

A normatização da iluminação no Brasil iniciou no ano de 1958, quando se publicou a norma NBR 5413, que continha os níveis de iluminância recomendados para ambientes interiores. Em 1969, 1982 e 1992 a NBR 5413 sofreu atualizações; sendo, em 2013, substituída pela NBR ISO 8995-1. Essa última foi desenvolvida baseada na norma internacional (ISO 8995-1 – *Lighting of Indoor Workplaces*) e está em consonância com a norma europeia EN 12464-1 (GIACOBBO, 2014).

A NBR ISO 8995-1 trouxe parâmetros novos em relação à norma anterior, proporcionando uma série de melhorias, tornando a normatização mais completa e detalhada. A Tabela 2 apresenta os diferenciais entre a norma antiga e a nova.

Tabela 2 Diferenças entre a norma NBR 5413 e a NBR ISO 8995-1.

<b>Fator</b>	<b>NBR 5413</b>	<b>NBR ISSO 8995-1</b>
Idade	Contempla	Não contempla
Ofuscamento	Não contempla	Contempla
IRC	Não contempla	Contempla
Manutenção	Não contempla	Contempla
Uniformidade	Não contempla	Contempla
Temperatura de Cor	Não contempla	Comtempla

Fonte: Modificado de Giacobbo (2014).

### 2.4 SISTEMAS DE AQUECIMENTO, VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO (AVAC)

Pesquisas mostram que, no setor comercial dos Estados Unidos, os sistemas de AVAC representam cerca de 33% do consumo total de energia da edificação (DOE, 2008). Sendo assim, medidas de eficiência energética aplicadas a esse sistema impactam significativamente na redução do consumo de energia elétrica da edificação.

A seguir, serão apresentados alguns conceitos relacionados aos sistemas de AVAC.

### 2.4.1 Ciclo de Refrigeração

Um ciclo de refrigeração é um sistema térmico que continuamente transfere energia térmica (calor) de uma região de menor para outra de maior temperatura. Como este fluxo contraria a tendência natural do calor, isso só é possível consumindo energia externa (BEYER, 2011).

Define-se, então, o chamado Coeficiente de Performance (COP) de um equipamento como a razão entre o calor transferido e a energia externa utilizada. A Equação 6 determina matematicamente o COP de refrigeração e a Equação 7 o COP de aquecimento.

$$COP_r = \frac{Q_e}{W_e} \quad (6)$$

$$COP_a = \frac{Q_s}{W_e} \quad (7)$$

Onde:

$COP_r$ : Coeficiente de performance para o ciclo de refrigeração;

$Q_e$ : Calor transferido na refrigeração;

$W_e$ : Trabalho externo;

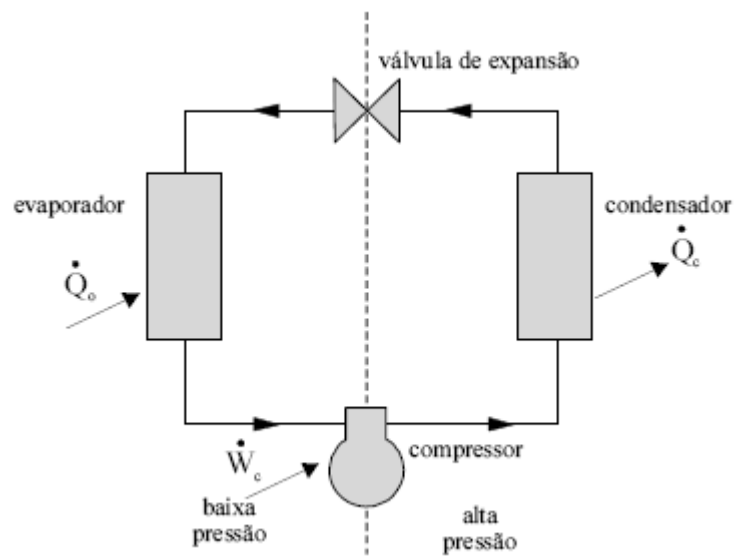
$COP_a$ : Coeficiente de performance para o ciclo de aquecimento;

$Q_s$ : Calor transferido no aquecimento;

A Figura 1 ilustra os componentes presentes em um ciclo de refrigeração básico. São eles: evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão. Nesse sistema, a refrigeração ocorre a partir da transferência de calor do meio onde a evaporadora se localiza para o meio onde a condensadora se localiza. No evaporador, o fluido de refrigeração, em um estado praticamente líquido (comumente 70% líquido e 30% vapor), absorve o calor presente no ar do ambiente a ser refrigerado e evapora completamente. Em seguida, esse fluido, no estado gasoso, é sugado para o compressor, onde é comprimido para vapor de alta pressão e temperatura. Logo após, esse vapor passa pelo condensador, perde calor para o ambiente externo e condensa (passa para o estado líquido). Por fim, a válvula de expansão é responsável por expandir o fluido e deixá-lo novamente no estado praticamente líquido, completando o ciclo.



Figura 1 Diagrama representativo do ciclo de refrigeração básico.

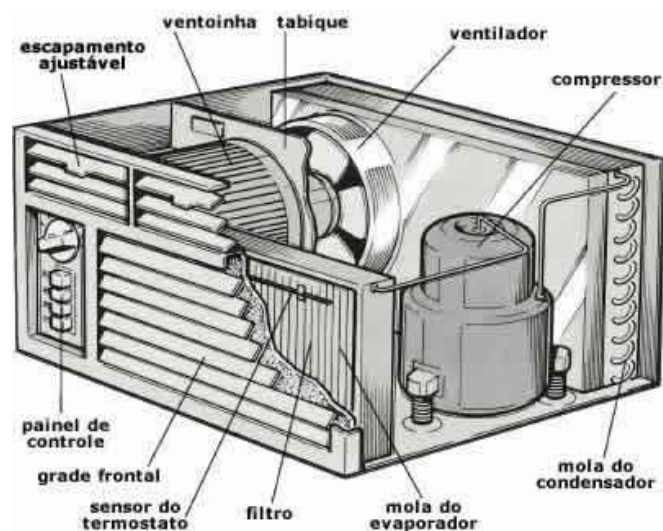


Fonte: (IEMA/ES, 2007).

## 2.4.2 Tipos de Sistemas de Condicionamento de Ar

O mais simples tipo de sistema de condicionamento de ar é comumente conhecido como ar condicionado de janela. Como pode ser observado na Figura 2, nesse tipo de sistema todos os equipamentos mostrados na Figura 1 estão montados no mesmo gabinete. Normalmente, ele é utilizado em aplicações residenciais de carga térmica reduzida.

Figura 2 Ar condicionado de janela.

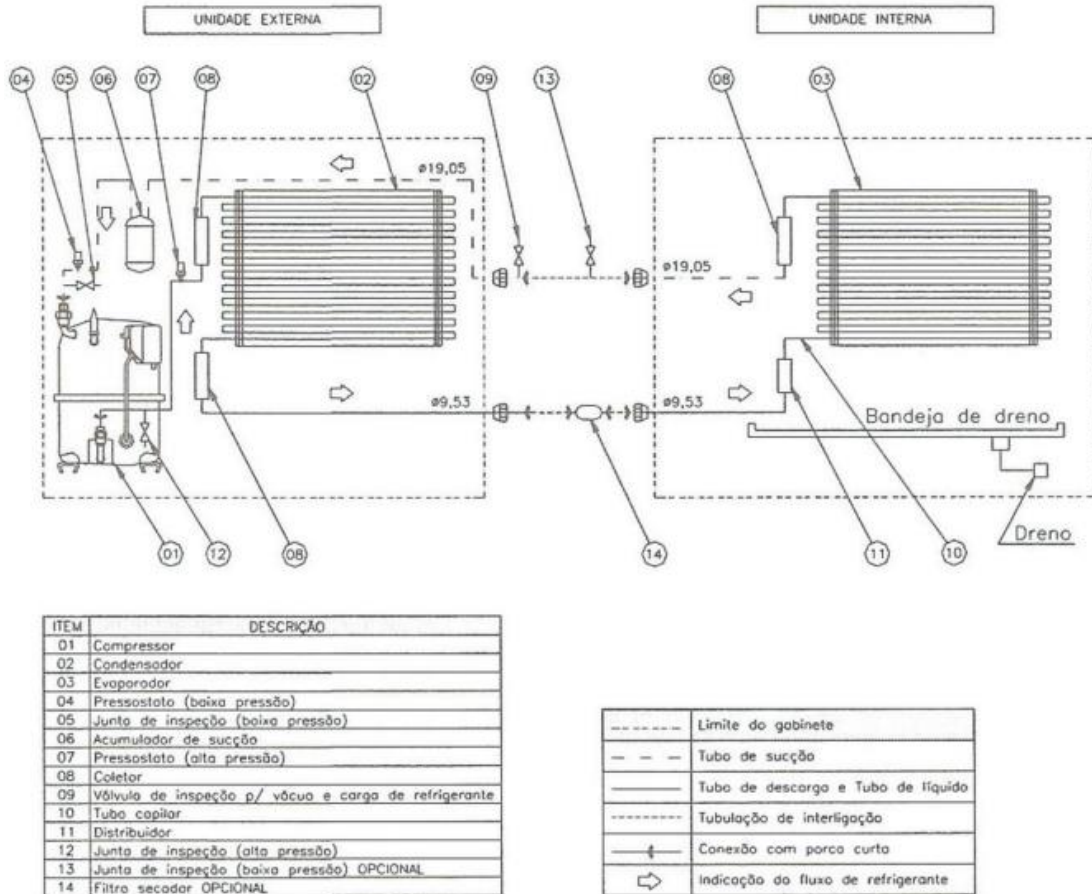


Fonte: (CLIQUE ARQUITETURA, nd).

Diferentemente do sistema anterior, no sistema Split, os equipamentos mostrados na Figura 1 se encontram divididos em dois gabinetes: um interno

(evaporador) e um externo (condensador). Ainda dentro dos sistemas divididos, existe o sistema do tipo Multisplit, onde um condensador central realiza a troca de calor com o ar externo para múltiplos evaporadores que compõe o sistema de ar condicionado. A Figura 3 ilustra um sistema Split e a Figura 4 ilustra um sistema Multisplit.

Figura 3 Sistema ar condicionado do tipo Split.



Fonte: (PROCEL, 2011)

Figura 4 Sistema de ar condicionado do tipo Multisplit.



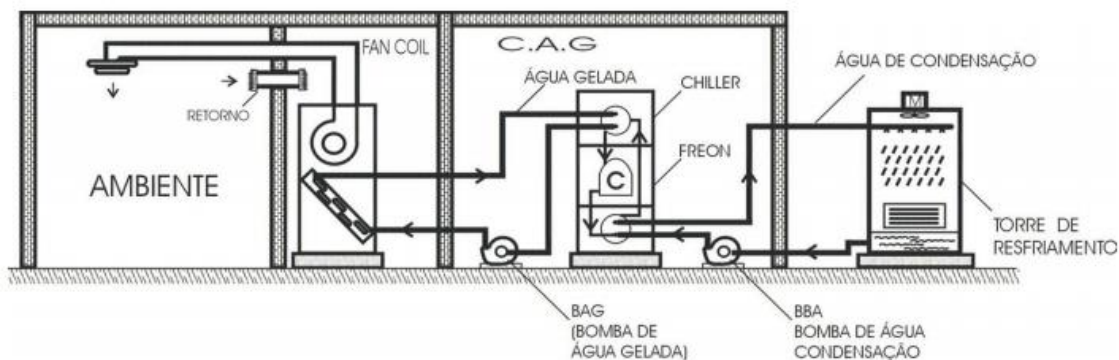
Fonte: (LG, 2015).

Uma tecnologia aplicada a sistemas do tipo Split é a utilização de um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor do compressor, operando-o conforme a carga solicitada. Sem a utilização do inversor de frequência, o compressor opera utilizando um controle do tipo ON/OFF. Equipamentos que utilizam inversor de frequência são conhecidos como Splits Inverter. Nesses equipamentos o consumo de energia elétrica é reduzido, resultando em uma medida de conservação de energia.

Uma tecnologia aplicada a sistemas Multisplit é o chamado VRF (*variable refrigerant flow*), traduzido como VRV (volume de refrigerante variável). Nessa tecnologia, realiza-se o controle do fluxo de gás refrigerante conforme a carga térmica solicitada, reduzindo, assim, o consumo de energia.

Além dessa classificação, os sistemas de condicionamento de ar podem ser classificados de acordo com a troca de calor existente. A troca de calor entre o fluido e o ar pode ocorrer diretamente (caso dos sistemas de janela, Splits e Multisplits) ou indiretamente (através de um fluido intermediário, normalmente água). No caso indireto, tem-se os chamados sistemas de água gelada - justamente por utilizarem a água como fluido intermediário. Neles, são utilizados *chillers* para realizar a troca de calor entre o fluido refrigerante e a água. A Figura 5 ilustra um sistema típico de água gelada.

Figura 5 Sistema de ar condicionado do tipo Água Gelada.



Fonte: (PROCEL, 2011).

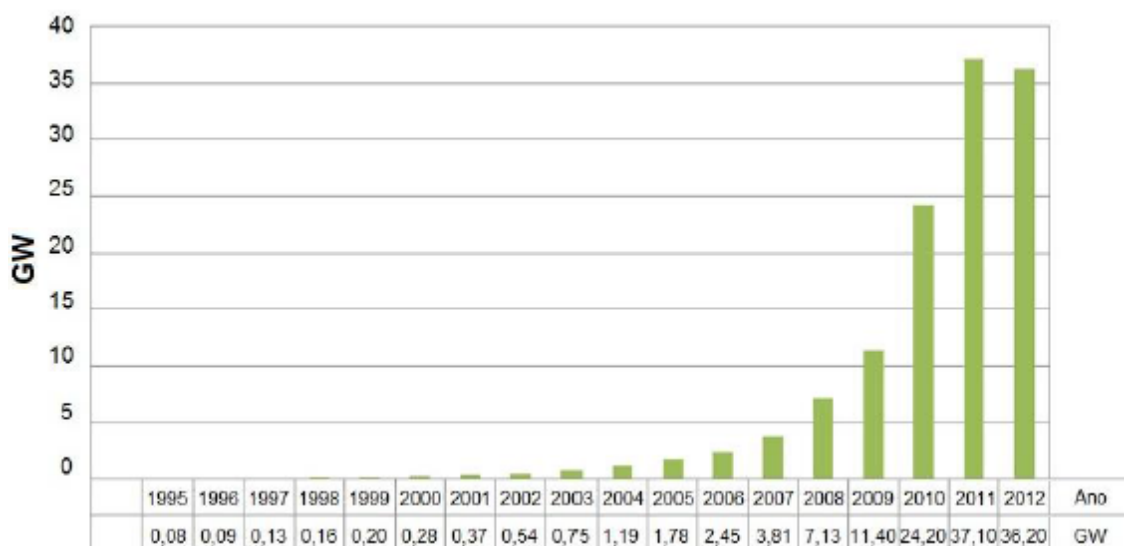
## 2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

De acordo com o Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES, 2014), embora abundante na Terra, a energia solar para a produção de energia elétrica ainda é pouco utilizada. Nos países desenvolvidos este cenário vem mudando, pois fortes incentivos já foram concedidos para a instalação de sistemas fotovoltaicos. A Figura 6 apresenta a

evolução da produção mundial de células fotovoltaicas, sendo produzidos cerca de 36,2 GWp no ano de 2012. Essa potência equivale a mais de duas vezes e meia a potência da usina hidroelétrica de Itaipu, a maior central de produção de energia elétrica do Brasil. Nos últimos 11 anos, o crescimento anual médio da indústria de células e módulos fotovoltaicos foi de 54,2% (GTES, 2014).

O custo para investir em um sistema fotovoltaico ainda é um obstáculo para a indústria e para a disseminação de sua utilização. Porém, esse custo vem sofrendo reduções significativas, tornando-o cada vez mais competitivo no mercado de geração de energia. No final de 2013, para venda em maior escala, o preço do módulo fotovoltaico de silício cristalino (c-Si) encontrava-se em cerca de 0,60 €/Wp na Europa, de 0,65 U\$/Wp nos EUA e menos de 3 R\$/Wp no Brasil (GTES, 2014).

Figura 6 Evolução da produção de painéis fotovoltaicos no período de 1995 a 2012.



Fonte: (GTES, 2014).

### 2.5.1 Definição de Conceitos Relacionados

A seguir, alguns conceitos relacionados à energia fotovoltaica serão definidos.

#### a) Irradiância Solar

A irradiância solar é uma forma de transferência de energia advinda do sol através da propagação de ondas eletromagnéticas. O valor de irradiância solar representa uma unidade de densidade de potência e sua unidade é o watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

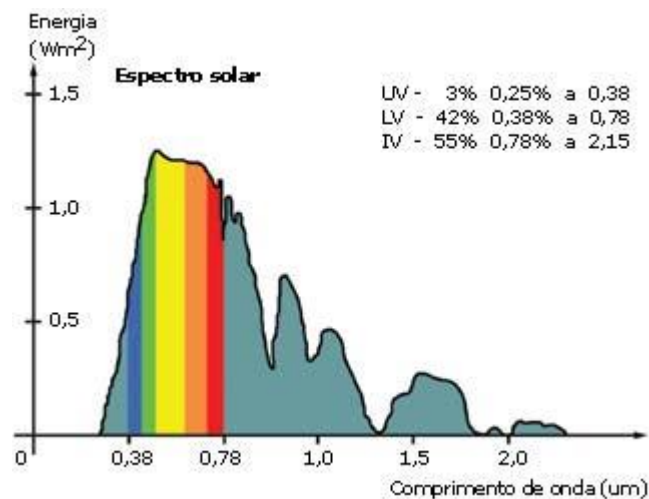
## b) Irradiação Solar

A irradiação solar é definida como a integral da irradiância solar em um determinado intervalo de tempo. O valor de irradiação representa uma densidade de energia e sua unidade é o watt-hora por metro quadrado ( $\text{Wh/m}^2$ ).

## c) Espectro Solar

O espectro solar trata-se da ampla gama de radiações eletromagnéticas. Pode ser dividido em três regiões: ultravioleta, luz visível e infravermelho. A Figura 7 apresenta o gráfico do espectro solar.

Figura 7 Espectro solar.

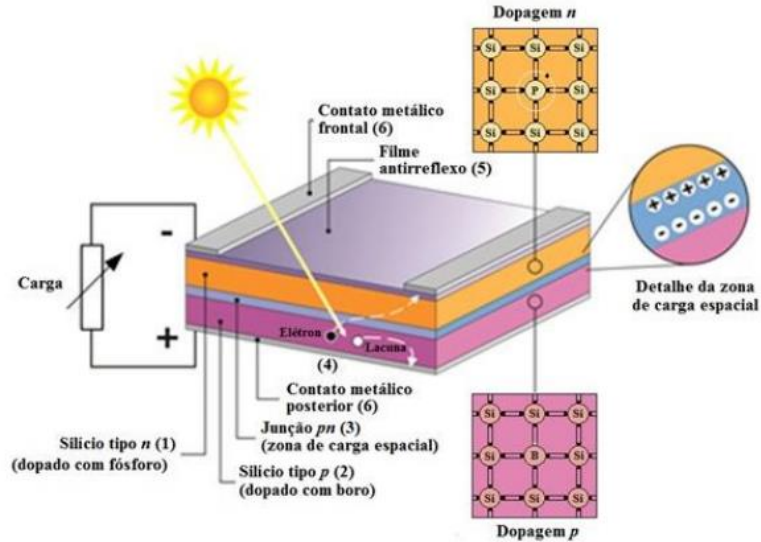


Fonte: (GELINSKI, 2004).

## d) Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é caracterizado pelo surgimento de uma tensão elétrica entre os terminais de um dispositivo semicondutor quando este é exposto à luz. A formação de pares elétron-lacuna dentro do material do dispositivo é responsável pelo surgimento de uma diferença de potencial elétrico. Como pode ser observado na Figura 8, os elétrons gerados a partir da incidência solar são movidos para o material N (terminal negativo) e as lacunas para o material P (terminal positivo). A circulação dos elétrons pelo circuito externo acarreta na geração de corrente elétrica, resultando na conversão da energia da luz em energia elétrica.

Figura 8 Junção PN presente nos módulos fotovoltaicos.



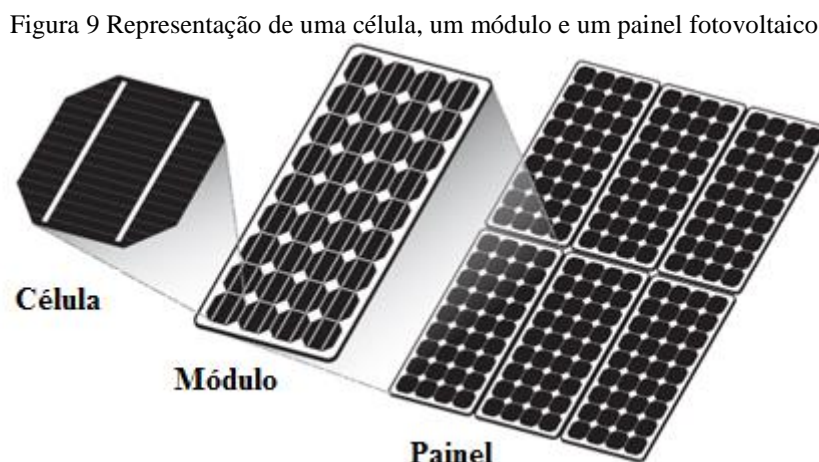
Fonte: Modificado de (MOEHLECKE e ZANESCO, 2005).

### e) Célula Fotovoltaica

Célula fotovoltaica é um componente que realiza o efeito fotoelétrico para converter diretamente a energia solar em energia elétrica. É composta por materiais semicondutores (normalmente Silício) que formam uma junção PN. A tensão elétrica proveniente da junção tem valor de, aproximadamente, 0,6 V.

### f) Módulo e Painel Fotovoltaico

O módulo são células fotovoltaicas interligadas eletricamente e encapsuladas. Painel é um conjunto de módulos fotovoltaicos, montado de modo a formar uma única estrutura. A Figura 9 mostra uma célula, um módulo e um painel fotovoltaico.



Fonte: Modificado de SAMLEX (nd).



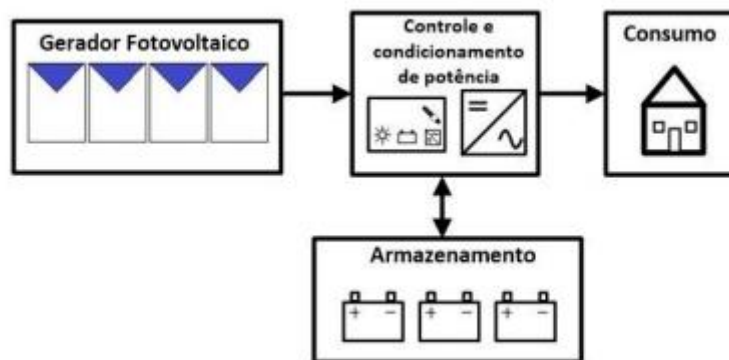
### g) Sistema Fotovoltaico

Sistema fotovoltaico é o conjunto de elementos necessários para realizar a conversão de energia solar em energia elétrica com características adequadas para alimentar aparelhos elétricos e eletrônicos.

### h) Sistema Fotovoltaico Isolado (SFVI)

Sistema que não possui conexão com o sistema público de fornecimento de energia elétrica. Normalmente, é utilizado para atender locais sem acesso à rede elétrica. Composto por painel fotovoltaico, controlador de carga, banco de baterias e inversor de frequência. A Figura 10 apresenta os componentes de um SFVI.

Figura 10 Exemplo de SFVI.



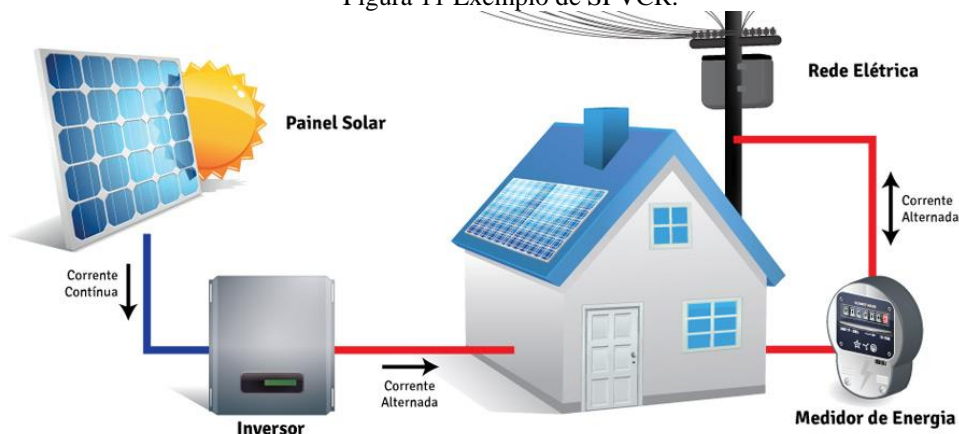
Fonte: (GTES, 2014).

### i) Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFVCR)

Sistema conectado ao sistema público de distribuição de energia. Normalmente, não possui dispositivo de armazenamento de energia, pois a energia gerada é injetada diretamente na rede elétrica, sendo utilizada pelos aparelhos da edificação ou exportada para a rede da concessionária.

Os SFVCR possuem basicamente dois componentes: o painel fotovoltaico, responsável pela conversão direta de energia solar em energia elétrica; e o inversor de frequência, responsável por converter a tensão elétrica contínua em tensão elétrica alternada com comportamento senoidal e frequência compatível com a rede e equipamentos. A Figura 11 apresenta um SFVCR e seus componentes.

Figura 11 Exemplo de SFVCR.



Fonte: (REAL SOLAR, nd.).

## 2.5.2 Resolução Normativa ANEEL 482/2012

A Resolução Normativa Nº 482 foi determinada pela Agência Nacional de Energia Elétrica em 17 de abril de 2012 e estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e de minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.

A normativa classifica o sistema de geração conforme a faixa de potência instalada conforme segue:

### a) Microgeração Distribuída

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

### b) Minigeração Distribuída

Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidade consumidoras.

O sistema de compensação determinado pela resolução utiliza um medidor de energia bidirecional, onde os sistemas que proporcionarem momentos de envio de energia para a rede pública (geração maior que consumo) podem abater essa quantia excedente da sua conta de energia elétrica.



## 2.6 CERTIFICAÇÃO LEED

O LEED, *Leadership in Energy and Environmental Design*, é um sistema para avaliação de edificações que as classifica conforme seus níveis de sustentabilidade. Sendo utilizada em 143 países, essa certificação foi desenvolvida pelo *United States Green Building Council* (USGBC). Em âmbito nacional, o *Green Building Council Brasil* (GBCBrasil) é o responsável pela expansão da certificação no país.

A versão piloto do LEED, conhecida como LEED v1.0, foi lançada no ano de 1998, sendo substituída em 2000 pela versão 2.0, seguida da versão 2.1 (lançada em 2002), da versão 2.2 (lançada em 2005), da versão 3.0 (lançada em 2009) e da versão mais atual, lançada em 2014, o LEED versão 4. Atualmente, podem ser certificados edificações nas duas mais recentes versões; porém, a partir do ano de 2016, as edificações passarão a ser certificadas apenas na versão 4. A principal diferença entre as duas últimas versões (em termos de energia) é a versão da norma ASHRAE 90.1 que é utilizada por cada uma; a versão 3 utiliza a versão 2007 e a versão 4 utiliza a versão 2010 da norma.

Por englobar edificações de diferentes características, o LEED se divide em sete categorias específicas, cada uma aplicada à um tipo de edificação. As categorias são:

**a) LEED NC: para novas construções e grandes reformas.**

Aplica-se a situações em que o proprietário detenha 50% ou mais da ocupação da edificação. Pode ser utilizada para certificar prédios comerciais, residenciais, governamentais, instalações recreativas, laboratórios e plantas industriais.

**b) LEED EBOM: para prédios existentes: operação e manutenção.**

Aplica-se à certificação de prédios existentes focando na eficiência operacional energética da edificação.

**c) LEED CI: para interiores comerciais.**

Busca garantir a eficiência energética, qualidade do ambiente interno, baixo custo de manutenção e operação em interiores.

**d) LEED CS: para projetos de envoltória e parte central da edificação.**

Aplica-se a situações onde o proprietário não detenha mais de 50% da ocupação.

**e) LEED For Homes: para residências.**

**f) LEED For Schools: para escolas.**

**g) LEED ND: para o desenvolvimento de bairros.**

O método de quantificação utilizado pelo LEED é baseado na avaliação de itens relacionados à sustentabilidade, divididos em sete categorias específicas. O GBCBrasil descreve as categorias da seguinte forma:

**a) Espaços sustentáveis (SS)** - Encoraja estratégias que minimizam o impacto no ecossistema durante a implantação da edificação e aborda questões fundamentais de grandes centros urbanos, como redução do uso de veículos e das ilhas de calor.

**b) Uso eficiente da água (WE)** - Promove inovações para o uso racional da água, com foco na redução do consumo de água potável e alternativas de tratamento e reuso dos recursos.

**c) Energia e atmosfera (EA)** - Promove eficiência energética nas edificações por meio de estratégias como, por exemplo, simulações energéticas, medições, comissionamento de sistemas e utilização de equipamentos e sistemas eficientes.

**d) Materiais e recursos (MR)** - Encoraja o uso de materiais de baixo impacto ambiental (reciclados, regionais, recicláveis, de reuso, etc.), reduz a geração de resíduos e promove o descarte consciente - desviando o volume de resíduos gerados dos aterros sanitários.

**e) Qualidade do ambiente interno (IEQ)** - Promove a qualidade ambiental interna do ar - essencial para ambientes com alta permanência de pessoas - com foco na escolha de materiais com baixa emissão de compostos orgânicos voláteis, controlabilidade de sistemas, conforto térmico e priorização de espaços com visibilidade ao exterior e luz natural.

Cada uma das categorias possui itens que são pré-requisitos e itens que são créditos. Para obter a certificação deve-se obrigatoriamente cumprir todos os pré-requisitos. Já os créditos, não necessariamente precisam ser cumpridos, porém, são eles que fornecem os pontos necessários para obter o nível de certificação desejado. O nível da certificação é definido conforme a quantidade de pontos adquiridos, sendo 110 a pontuação máxima. Os níveis seguem a divisão de intervalos de pontuação representados pela Figura 12.

Figura 12 Níveis de certificação e referente faixa de pontuação para o LEED.

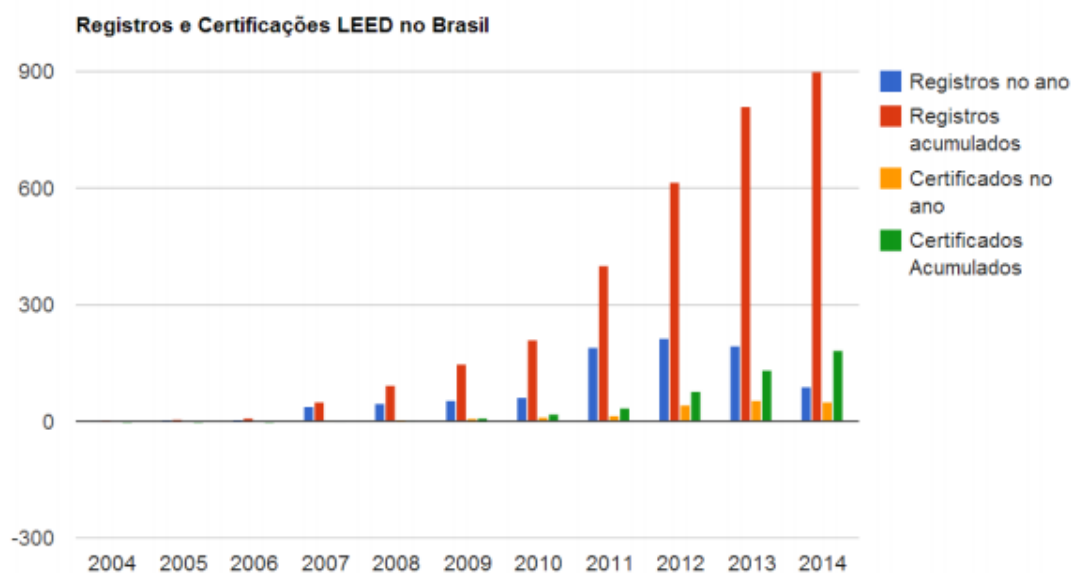


Fonte: Modificado de Green Building Alliance (GBA, nd).

Alguns benefícios da certificação LEED são diminuição dos custos operacionais, valorização do imóvel para revenda ou arrendamento, aumento na velocidade de ocupação, modernização e menor obsolescência da edificação, aumento da satisfação e bem-estar dos usuários, uso racional e redução da extração dos recursos naturais, redução do consumo de água e energia, uso de materiais e tecnologias de baixo impacto ambiental.

A certificação LEED é a mais utilizada atualmente ao redor do mundo e seu crescimento também é verificado no mercado brasileiro. A Figura 13 ilustra o crescimento da certificação LEED no mercado brasileiro, entre os anos 2004 e 2014.

Figura 13 Crescimento da certificação LEED no Brasil.



Fonte: (GBCBrasil, 2014).

## **2.7 ANSI/ASHRAE STANDARD 90.1-2007**

A norma *ANSI/ASHRAE Standard 90.1-2007 (Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings)* é uma norma americana, criada *pela American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)*; faz parte do programa de eficiência energética dos Estados Unidos e tem como objetivo estabelecer os requisitos mínimos para garantir a eficiência energética em projetos de edificações (ASHRAE, 2007). A norma técnica é reconhecida internacionalmente, sendo aplicada em diversos países.

A primeira versão dessa norma foi publicada em 2001 e é atualizada a cada três anos; sendo assim, já existe a versão 2004, 2007, 2010 e 2013. A versão utilizada nesse estudo é a do ano 2007, pois trata-se da norma utilizada pelos pré-requisitos de energia da certificação LEED versão 2009 (utilizada na certificação do empreendimento do estudo). A certificação LEED utiliza a norma para estabelecer o consumo de uma edificação referência, que serve para quantificar a eficiência energética de outras edificações; ou seja, as reduções de consumo de energia elétrica são sempre referentes ao consumo da edificação referência.

Os sistemas englobados pela norma, cada um com seus requisitos mínimos, são: componentes da envoltória da edificação, AVAC, serviço de aquecimento de água, sistema elétrico, sistema de iluminação e equipamentos.

## **2.8 FERRAMENTA COMPUTACIONAL - ENERGYPLUS**

O EnergyPlus 8.3 (DOE, 2015) é uma ferramenta computacional que simula o desempenho energético de edificações, desenvolvida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (*Department of Energy - DOE*). Com ela, engenheiros, arquitetos e pesquisadores modelam e otimizam a utilização de energia elétrica pelos sistemas de uma edificação. A ferramenta permite que sejam modelados, de uma forma integrada, os sistemas de aquecimento, resfriamento, ventilação, iluminação, geração local de energia e uso de água.

Primeiramente, utiliza-se a ferramenta computacional Sketchup 8 (Google, 2010) juntamente com a extensão Legacy OpenStudio 1.0.11 (DOE, 2008), para criar um modelo geométrico da edificação. Em seguida, no EnergyPlus, definem-se as propriedades dos materiais utilizados no modelo desenvolvido. A ferramenta utiliza dados climáticos da localização da edificação para realizar a análise de desempenho. Os

dados são fornecidos por um arquivo com formato “.epw” que contém indicadores de latitude, longitude, altitude, temperatura do solo, direção e velocidade dos ventos, temperaturas de bulbo seco e de orvalho, umidade relativa e radiação solar. Outros dados de entrada do programa são as cargas internas da edificação, dentre elas: equipamentos, ocupação e iluminação. Define-se, também, um perfil horário de uso para todos esses parâmetros de entrada, pelo qual o programa se baseia para calcular o consumo de energia. Após realizada a simulação, os dados de saída são apresentados em forma de um relatório. Uma das informações apresentadas nesse relatório é o consumo da edificação no período determinado.

Para ilustrar o processo de simulação desenvolvido, a Figura 14 mostra a interface de edição de parâmetros do EnergyPlus e a Figura 15 apresenta o modelo geométrico do prédio da Engenharia Nova da UFRGS (PIETZSCH, 2012) utilizado em uma simulação.

Figura 14 Interface de edição de parâmetros do EnergyPlus.

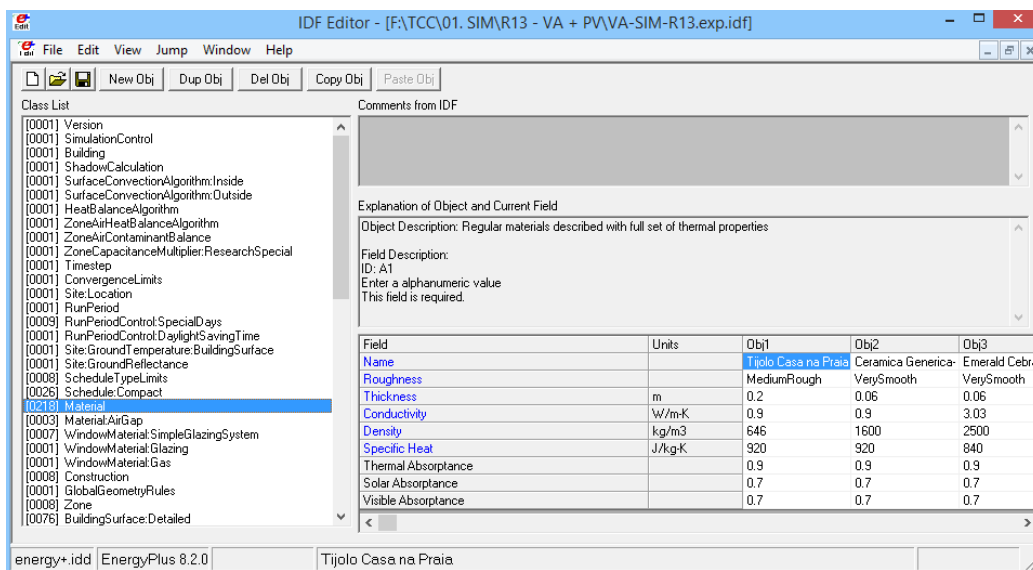


Figura 15 Modelo geométrico utilizado no EnergyPlus.



Fonte: (PIETZSCH, 2012).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho consiste em simulações computacionais para avaliar o impacto da utilização de medidas de eficiência energética na redução do consumo de uma edificação comercial. A análise foi realizada a partir do estudo do projeto de uma edificação comercial real (apresentada na Seção 3.1).

Foram determinados três cenários para a edificação em questão. A Tabela 3 apresenta as denominações adotadas para cada cenário.

Tabela 3 Denominação adotada para os cenários.

Cenário 1	Edificação Referência
Cenário 2	Edificação Proposta
Cenário 3	Edificação Padrão de Mercado

O primeiro cenário representa a edificação referência, que é utilizada pela certificação LEED para quantificar a redução de consumo. Essa edificação referência segue os requisitos mínimos exigidos pela norma ASHRAE 90.1 (2007).

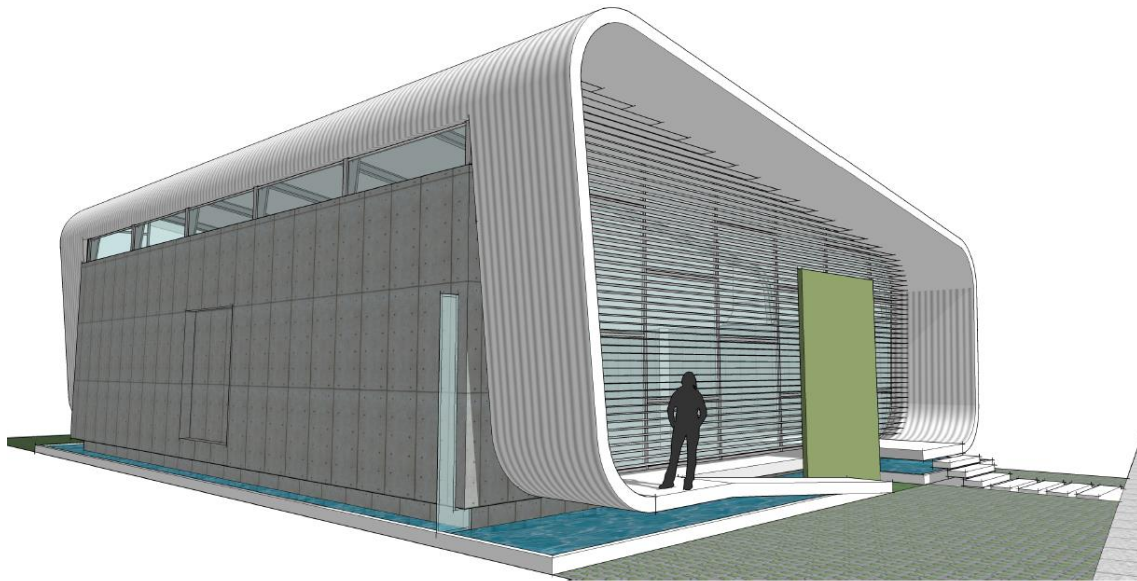
O segundo cenário segue os projetos desenvolvidos para a construção do empreendimento. Foram analisados os projetos de condicionamento de ar, elétrico e arquitetônico. Os projetos têm como premissa a eficiência energética.

O terceiro e último cenário é baseado em uma estimativa de parâmetros dos sistemas que são encontrados no padrão de projetos de edificações comerciais entregues ao mercado atualmente.

#### 3.1 APRESENTAÇÃO DA EDIFICAÇÃO

A edificação comercial analisada trata-se de um empreendimento localizado na cidade de Itajaí, no estado de Santa Catarina, destinado a ser utilizado como um showroom de mobiliário externo da marca Via Artística (VA). O empreendimento é chamado pelos seus idealizadores como VA Casa na Praia. A Figura 16 apresenta uma ilustração da edificação em estudo.

Figura 16 Ilustração da edificação real analisada no estudo.

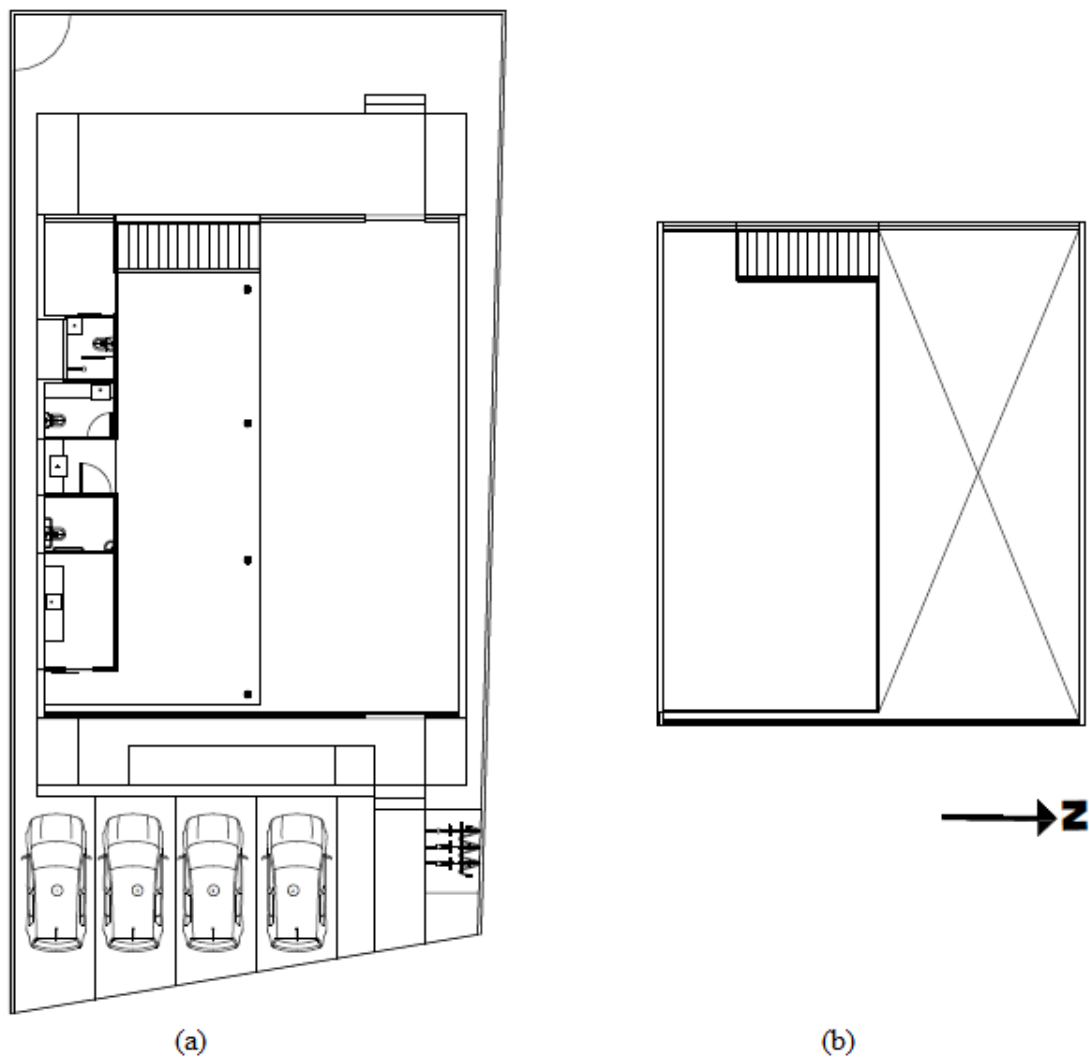


Fonte: Via Artística (2015).

A partir da utilização de estratégias que promovem a sustentabilidade, tanto na concepção dos projetos da edificação, quanto no processo de construção e na operação do empreendimento, busca-se a certificação LEED, versão 2009, categoria NC, no nível Platina. As simulações apresentadas neste estudo foram cedidas pela empresa Petinelli, que as utilizou no processo de documentação de pré-requisitos e créditos da categoria EA, no processo de certificação do empreendimento.

A Figura 17 apresenta uma planta baixa da edificação. Totalizando aproximadamente 287 m<sup>2</sup> de área construída, a edificação é dividida em dois pavimentos (térreo e mezanino) e sua divisão de ambientes é composta por três banheiros, uma copa e duas áreas de exposição de mercadoria: uma no térreo e uma no mezanino.

Figura 17 Planta baixa do (a) pavimento térreo e do (b) mezanino.



### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO GEOMÉTRICO

O modelo geométrico da edificação utilizado nas simulações foi desenvolvido utilizando a ferramenta computacional SketchUp 8 (Google, 2010) em conjunto com a extensão Legacy Open Studio 1.0.11 (DOE, 2008).

A edificação foi modelada respeitando a separação de zonas térmicas existentes no projeto, conforme exigido pelo Apêndice G da ASHRAE 90.1 (2007). A Tabela 4 apresenta a divisão estabelecida e a Figura 18 apresenta o modelo geométrico desenvolvido.

Uma limitação na modelagem é a incapacidade do EnergyPlus de interpretar janelas que não sejam retangulares, como é o caso do projeto em questão. Sendo assim, foi necessário realizar uma aproximação das aberturas, criando aberturas retangulares

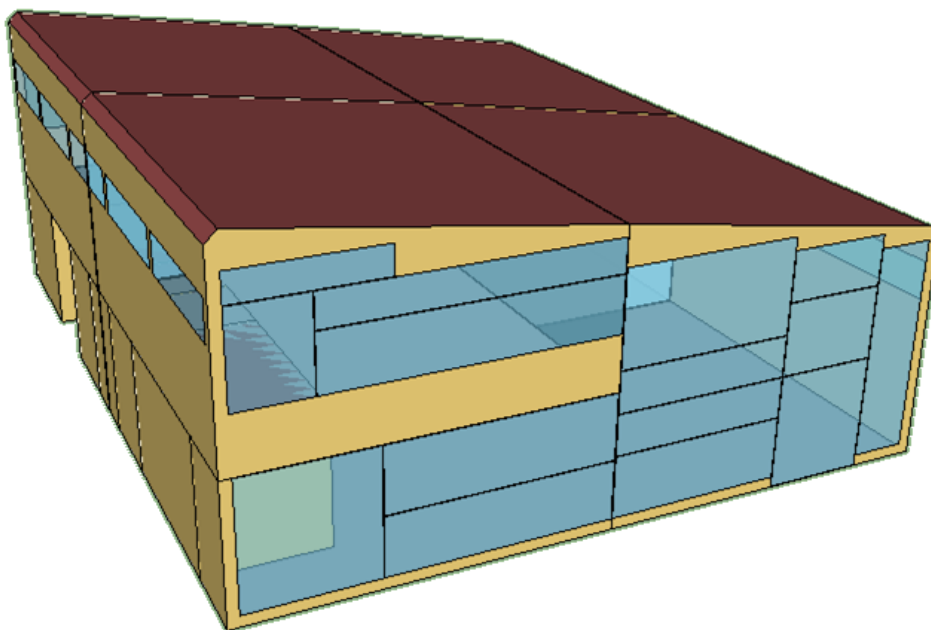


que se aproximassem ao máximo da abertura real. A aproximação desenvolvida pode ser observada na Figura 18.

Tabela 4 Divisão de zonas térmicas do modelo geométrico.

Nome da Zona	Área (m <sup>2</sup> )
Térreo 1	83,59
Térreo 2	80,51
Superior 1	48,75
Superior 2	48,75
WC deficientes	3,74
WC	7,00
Depósito	6,60
Copa	7,92

Figura 18 Modelo geométrico desenvolvido para a edificação do estudo.



### 3.3 EDIFICAÇÃO REFERÊNCIA

Utilizando o modelo geométrico desenvolvido, conforme descrito na Seção 3.2, configurou-se os parâmetros de entrada do modelo na ferramenta computacional EnergyPlus 8.3 (DOE, 2015). Na edificação referência, todos os parâmetros de entrada da simulação foram determinados de acordo com o Apêndice G da norma ASHRAE 90.1 (2007). Além disso, para que seja desconsiderada a influência da orientação da

edificação, a norma exige que se simule o prédio referência em quatro orientações defasadas em 90° entre elas, calculando a média do consumo energético das quatro orientações.

Nas seções seguintes, serão apresentados os parâmetros de entrada que foram utilizados na determinação da edificação referência a ser simulada.

### 3.3.1 Envoltória da Edificação Referência

Para a envoltória da edificação, a ASHRAE 90.1 (2007) fornece requisitos mínimos conforme a zona climática da localização da edificação. Sendo assim, primeiramente, determinou-se a zona climática utilizando o Apêndice B da ASHRAE 90.1 (2007), chegando à classificação de 2A (Quente e Úmida).

A partir disso, os parâmetros dos elementos construtivos da envoltória foram determinados utilizando a Tabela 5.5-2 da ASHRAE 90.1 (2007). A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam os parâmetros dos elementos construtivos opacos e translúcidos da envoltória, respectivamente, que foram utilizados na edificação referência.

Tabela 5 Parâmetros dos elementos opacos construtivos da Edificação Referência.

Elemento Construtivo	Fator U [W/K.m <sup>2</sup> ]
Telhado	0,273
Paredes Externas	0,705
Pisos Internos	0,296
Pisos Externos	1,264

Tabela 6 Parâmetros dos elementos translúcidos construtivos da Edificação Referência.

Elemento Construtivo	Fator U [W/K.m <sup>2</sup> ]	SHGC	VLT
Vidros	4,26	0,25	0,18

Além disso, na edificação referência, a norma determina que não se deve considerar sombreamentos durante a simulação. Para cumprir a exigência, configurou-se o EnergyPlus de forma a realizar a simulação desconsiderando sombreamentos.

### 3.3.2 Sistema de Iluminação na Edificação Referência

Para as cargas internas de iluminação, a norma exige que a potência instalada seja determinada a partir dos requisitos mínimos definidos em seu Capítulo 9. Essa exigência é dada em termos de Densidade de Potência Instalada (DPI), em watts por metro quadrado [ $W/m^2$ ]. A norma fornece uma tabela de DPI em função da atividade desempenhada no ambiente. Sendo assim, as zonas foram categorizadas e uma potência instalada de iluminação foi calculada a partir de cada área. A Tabela 7 apresenta as zonas, sua classificação e a potência de iluminação interna instalada na edificação de referência.

Tabela 7 Potência instalada de iluminação da Edificação Referência.

Nome da Zona	Classificação	DPI [ $W/m^2$ ]	Potência [W]
Térreo 1	Área de Venda	18	1435,26
Térreo 2	Área de Venda	18	1435,26
Superior 1	Área de Venda	18	832,57
Superior 2	Área de Venda	18	832,57
WC deficientes	Banheiros	10	38,65
WC	Banheiros	10	67,43
Depósito	Armazenagem	3	23,25
Copa	Refeições	10	79,63

Além da iluminação interna contida na Tabela 7, adicionou-se uma potência de iluminação externa conforme apresentado na Tabela 8. A iluminação externa passou pelo mesmo processo de classificação da iluminação interna, sendo determinada a partir do valor de área iluminada e da classificação da aplicação. Fachadas e marquises são exemplos de aplicações para iluminação externa.

Tabela 8 Potência de iluminação externa para a Edificação Referência.

Iluminação	Potência [W]
Externa	595

### 3.3.3 Sistema de AVAC da Edificação Referência

Utilizou-se o Apêndice G da ASHRAE 90.1 (2007) para determinar o sistema de AVAC da edificação de referência. Por se tratar de uma edificação não-residencial, menor que 4 andares e menor que 2300m<sup>2</sup>, a norma exige que se utilize um sistema do tipo expansão direta que possui volume de ar constante e bomba de calor (sistema 4). É exigido também que o sistema de refrigeração da edificação referência possua um COP mínimo de 3,28.

### 3.4 EDIFICAÇÃO PROPOSTA

No modelo da edificação proposta, foram utilizados parâmetros determinados nos projetos dos sistemas da edificação em estudo. Uma série de medidas de eficiência energética foram utilizadas na concepção dos projetos. Sendo assim, para permitir uma avaliação individual de cada medida, elas foram adicionadas uma a uma ao modelo, de forma que o impacto fosse discriminado entre as simulações. A Tabela 9 apresenta a as medidas de eficiência energética e a ordem com que foram adicionadas nas simulações. A Subseção 3.7 explica detalhadamente as simulações realizadas.

Tabela 9 Ordem dos sistemas em que as medidas de eficiência energética foram empregadas.

Ordem	MEE
1	Sombreamentos
2	Elementos Construtivos
3	Sistema de Iluminação
4	Sistema de AVAC
5	Geração Fotovoltaica

Nas subseções seguintes, serão apresentados os parâmetros de entrada utilizados na determinação da edificação proposta.

#### 3.4.1 Envoltória da Edificação Proposta

Para a envoltória da edificação proposta, os parâmetros dos elementos construtivos foram retirados dos projetos. A Tabela 10 apresenta os parâmetros dos elementos construtivos opacos utilizados e a Tabela 11 apresenta os parâmetros dos elementos translúcidos.

Nota-se que os elementos construtivos utilizados possuem valor de fator U maior que os da edificação referência expressos na Tabela 5. Espera-se, assim, que o isolamento da edificação seja inferior, aumentando o consumo de energia pelo sistema de AVAC. Percebe-se que as exigências mínimas da ASHRAE 90.1 (2007) para a envoltória da edificação são rígidas.

Tabela 10 Parâmetros dos elementos opacos construtivos da Edificação Proposta.

Elemento Construtivo	Fator U [W/m <sup>2</sup> .K]
Telhado	0,83
Paredes Externas	2,26
Pisos Internos	2,6
Pisos Externos	3,14

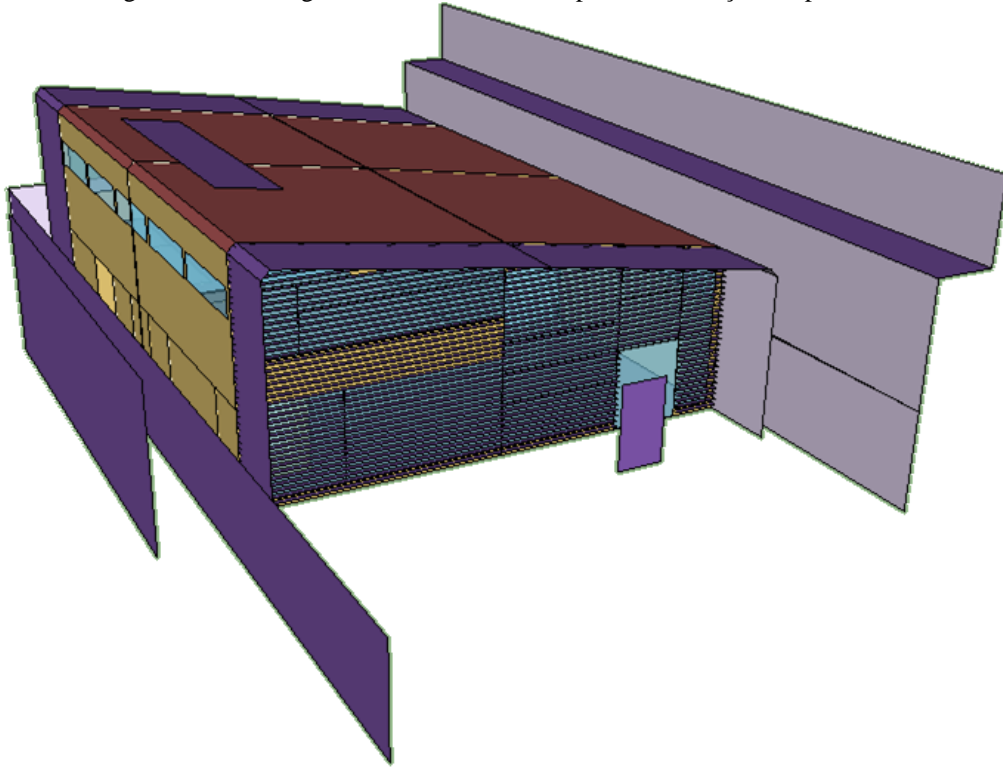
Tabela 11 Parâmetros dos elementos translúcidos construtivos da Edificação Proposta.

Elemento Construtivo	Fator U [W/m <sup>2</sup> .K]	SHGC	VLT
Vidros	5,66	0,452	0,545

Para as paredes externas utilizou-se alvenaria comum (reboco + tijolo + reboco) e para o telhado utilizou-se uma telha metálica dupla com isolamento térmico de poliuretano de 26mm de espessura.

A Figura 19 apresenta uma imagem do modelo geométrico utilizado na simulação da Edificação Proposta.

Figura 19 Modelo geométrico desenvolvido para a Edificação Proposta.



Os sombreamentos, desconsiderados anteriormente, foram agora considerados nas simulações. Como pode ser visto na Figura 19, utilizaram-se brises nas aberturas frontais e uma projeção no contorno da edificação - ambos para proporcionar sombra. Os sombreamentos referentes a edificações vizinhas também foram considerados.

### 3.4.2 Sistema de Iluminação da Edificação Proposta

Para o sistema de iluminação, foi utilizada a potência instalada que havia sido determinada no projeto luminotécnico. Foi utilizada iluminação com tecnologia LED em praticamente a totalidade do projeto (com exceção de uma luminária com lâmpada T5 de 13W). Devido à escolha dessas tecnologias, a eficiência luminosa do sistema foi aprimorada, reduzindo a potência instalada de iluminação. Na área de vendas, por exemplo, utilizaram-se 30 lâmpadas de LED tubulares de 18W que possuem fluxo luminoso equivalente às lâmpadas fluorescentes tubulares T8 de 32W, essa substituição proporcionou uma redução na potência instalada de 420W. Ainda, em relação à referência estabelecida pela ASHRAE 90.1 (2007), a redução de potência instalada total de iluminação foi de aproximadamente 1900W.

Para ambientes onde o controle da iluminação utiliza sensores de presença, a potência instalada foi reduzida em 10%, segundo recomendação do Apêndice G da

ASHRAE 90.1 (2007), como forma de adicionar esse impacto ao resultado de consumo de energia da simulação.

A Tabela 12 apresenta a potência instalada de iluminação interna para cada zona da edificação proposta. A Tabela 13 apresenta a potência instalada de iluminação externa para a edificação proposta. Ambas as Tabelas 12 e 13 já estão considerando a redução de 10% nos ambientes com sensores de presença.

Tabela 12 Potência de iluminação interna instalada na Edificação Proposta.

Nome da Zona	Potência [W]
Térreo 1	900
Térreo 2	900
Superior 1	197
Superior 2	197
WC Deficientes	20,4
WC	143
Depósito	85
Copa	79

Tabela 13 Potência de iluminação externa instalada na Edificação Proposta.

Iluminação	Potência [W]
Externa	504

### 3.4.3 Sistema de AVAC da Edificação Proposta

Para o sistema de AVAC da Edificação Proposta, foram utilizados os parâmetros dos equipamentos determinados em projeto de climatização. Nesse projeto, foi empregado um sistema do tipo multisplit com tecnologia VRV. O sistema consiste em quatro evaporadoras, instaladas nos ambientes e interligadas a uma central condensadora. O COP dos equipamentos utilizados no sistema de refrigeração da Edificação Proposta foi de 4,27.

### 3.4.4 Geração Fotovoltaica na Edificação Proposta

Também foi adicionado um sistema de geração local de energia elétrica, a partir de um SFVCR. O SFVCR foi instalado na cobertura da edificação em uma inclinação

de 10°, onde a média anual de irradiação global horizontal diária é aproximadamente igual à 4,5 kWh/m<sup>2</sup> (dados da cidade de Itajaí, Santa Catarina). O sistema é composto por oito módulos de 245 Wp, totalizando uma instalação de 1,96 kWp. A Tabela 14 apresenta as especificações dos módulos utilizados no sistema.

Tabela 14 Especificações dos módulos utilizados.

Tecnologia	Dimensões [m]	Potência Nominal [Wp]	Eficiência [%]	Potência/Área [W/m <sup>2</sup> ]
p-Si	1,65 x 0,99	245	15	150

Para a conversão da corrente contínua em corrente alternada, utilizou-se um inversor de frequência com potência nominal de 2,5 kW.

### 3.5 EDIFICAÇÃO PADRÃO DE MERCADO

Os parâmetros de entrada da Edificação Padrão de Mercado são todas estimativas realizadas pelo autor, auxiliado por profissionais com experiência na construção civil. Não foram realizadas pesquisas no mercado devido à limitação de tempo no desenvolvimento do estudo.

#### 3.5.1 Envoltória da Edificação Padrão de Mercado

Os parâmetros dos elementos opacos da envoltória da Edificação Padrão de Mercado foram retirados da norma NBR 15220 (ABNT, 2003). Para a zona climática 3, referente à localização do projeto, a norma exige que paredes externas tenham fator U inferiores a 3,6 W/K.m<sup>2</sup>. Os parâmetros utilizados na edificação padrão de mercado se encontram expressos na Tabela 15.

Tabela 15 Parâmetros dos elementos opacos da envoltória da Edificação Padrão de Mercado.

Elemento Construtivo	Fator U [W/ m <sup>2</sup> .K]
Telhado	7,28
Paredes Externas	3,60
Pisos Internos	2,6
Pisos Externos	3,14



Utilizou-se alvenaria comum para as paredes externas, com tijolo de 180mm e cobertura com reboco de 25mm. Além disso, para o telhado utilizou-se uma telha metálica simples sem isolamento.

Para os elementos translúcidos, utilizou-se os parâmetros do vidro temperado comum. Esse vidro é o mais utilizado no mercado para aplicações em vitrines de edificações comerciais. Os parâmetros dos elementos translúcidos utilizados se encontram na Tabela 16.

Tabela 16 Parâmetros dos elementos translúcidos da envoltória da Edificação Padrão de Mercado.

Elemento Construtivo	Fator U [W/K.m <sup>2</sup> ]	SHGC	VLT
Vidros	5,66	0,8	0,8

### 3.5.2 Sistema de Iluminação na Edificação Padrão de Mercado

A determinação do sistema de iluminação utilizado na Edificação Padrão de Mercado levou em consideração algumas premissas.

A quantidade de pontos de iluminação na área de vendas foi baseada na quantidade de pontos da primeira emissão do projeto elétrico, antes que medidas de eficiência energética fossem aplicadas a ele. Considerou-se, também, que a tecnologia das lâmpadas mais utilizada nessa aplicação são lâmpadas T5 de 28W e 54W.

Para os ambientes menores, como por exemplo banheiros, considerou-se como padrão de mercado uma lâmpada fluorescente compacta integrada de 15W por ambiente. Na iluminação externa, considerou-se como padrão de mercado a utilização de lâmpadas de vapor metálico com 150W de potência - estimando um número de lâmpadas através da dimensão da área externa.

A Tabela 17 apresenta a potência instalada de iluminação interna para cada zona e a Tabela 18 apresenta a potência instalada de iluminação externa. A determinação dessa potência total levou em consideração perdas de reatores comerciais.

Tabela 17 Potência instalada de iluminação interna para cada zona da Edificação Padrão de Mercado.

Nome da Zona	Potência [W]
Térreo 1	1208
Térreo 2	1208
Superior 1	632,5
Superior 2	632,5
WC Deficientes	30
WC	60
Depósito	60
Copa	124

Tabela 18 Potência instalada de iluminação externa para a Edificação Padrão de Mercado.

Iluminação	Potência [W]
Externa	1592

### 3.5.3 Sistema de AVAC na Edificação Padrão de Mercado

Para a Edificação Padrão de Mercado, utilizou-se o sistema de ar condicionado do tipo Split, sem tecnologia Inverter (rotação fixa). O COP dos equipamentos foi determinado a partir do selo Procel. A Figura 20 apresenta a divisão de classes utilizada pelo Procel, para equipamentos de ar condicionados do tipo Split. Percebe-se, na Figura 20, que a Classe C (com COP entre 2,80 e 3,00) possui a maior quantidade de equipamentos no mercado (31,5%). Sendo assim, para equipamentos da Edificação Padrão de Mercado utilizou-se um COP de 2,90.

Figura 20 Selo Procel para equipamentos de ar condicionados Split.

CONDICIONADORES DE AR SPLIT HI-WALL				Data atualização: 19/02/2014			
Classes	Coeficiente de eficiência energética (W/W)		Split Hi-Wall				
			Rotação Fixa		Rotação Variável		
<b>A</b>	<b>3,20</b>	<b>&lt;CEE</b>	309	28,9%	206	88,0%	
<b>B</b>	<b>3,00</b>	<b>&lt;CEE ≤ 3,20</b>	218	20,4%	17	7,3%	
<b>C</b>	<b>2,80</b>	<b>&lt;CEE ≤ 3,00</b>	337	31,5%	11	4,7%	
<b>D</b>	<b>2,60</b>	<b>&lt;CEE ≤ 2,80</b>	180	16,8%	0	0,0%	
<b>E</b>	<b>2,39</b>	<b>≤CEE ≤ 2,60</b>	25	2,3%	0	0,0%	

1069 un

234 un

Fonte: (INMETRO, 2014).

### 3.6 PREMISSAS COMUNS ENTRE AS EDIFICAÇÕES

Alguns parâmetros de entrada foram comuns entre as 3 edificações estudadas. Entre esses parâmetros encontramos a potência de equipamentos, a ocupação e o perfil horário de uso dos sistemas.

A Figura 21 apresenta o perfil horário de uso aplicado ao sistema de iluminação das 3 edificações. A Figura 22 apresenta o perfil horário aplicado à ocupação para as 3 edificações.

Figura 21 Perfil horário de uso aplicado ao sistema de iluminação.

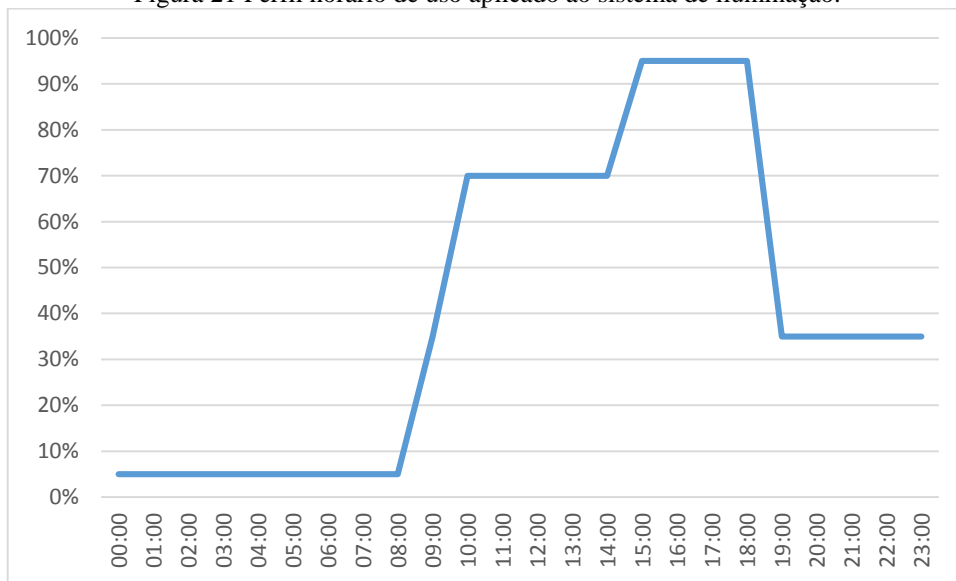
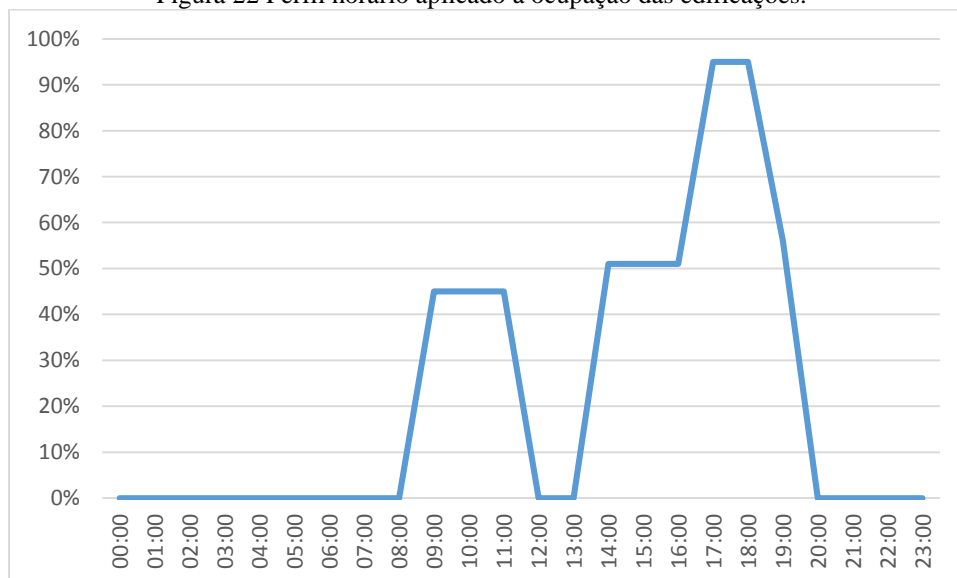


Figura 22 Perfil horário aplicado à ocupação das edificações.



A Tabela 19 apresenta a potência de equipamentos consideradas para cada zona das 3 edificações. Essas potências elétricas foram determinadas a partir de informações do proprietário sobre equipamentos que constariam nos ambientes.

Tabela 19 Potências instaladas de equipamentos consideradas para cada zona.

Nome da Zona	Equipamento	Potência [W]	Operação [horas/dia]
Térreo 1	Forno Elétrico	500	1
Térreo 2	Televisão	83	5
Superior 1	Aparelho de Som	110	3
Superior 2	-	-	-
WC deficientes	-	-	-
WC	-	-	-
Depósito	-	-	-
Copa	Cafeteira	794	1

### 3.7 SIMULAÇÕES REALIZADAS

Afim de obter os resultados desejados, foram realizadas 6 diferentes simulações, cada uma adicionando diferentes parâmetros das edificações apresentadas nas seções anteriores à simulação anterior. A Tabela 20 apresenta as 6 simulações realizadas e a descrição de cada uma.

Tabela 20 Descrição das 6 simulações realizadas.

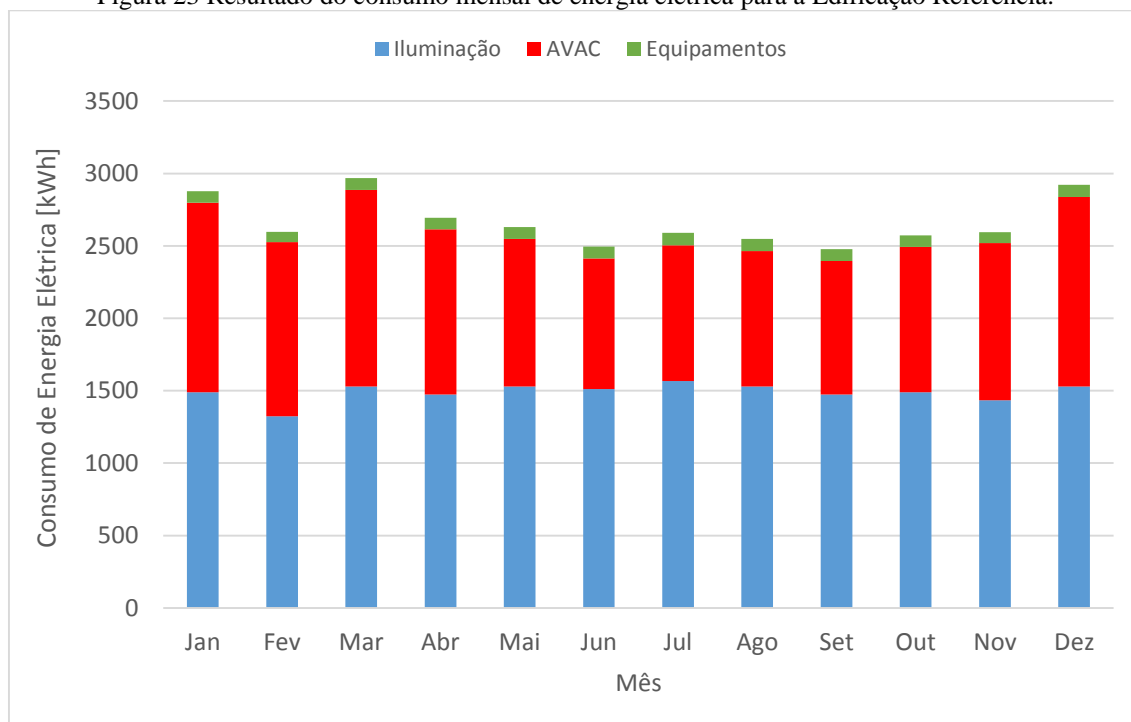
Simulação	Descrição
1	Essa simulação foi baseada completamente nos parâmetros da Edificação Referência - apresentados na Seção 3.3.
2	Essa simulação adicionou à anterior os parâmetros da envoltória da Edificação Proposta - apresentados na Seção 3.4. Além disso, passou-se a considerar os sombreamentos, brises e orientação da edificação.
3	Essa simulação adicionou à anterior a potência instalada de iluminação interna e externa da Edificação Proposta - apresentadas na Seção 3.4.
4	Essa simulação adicionou à anterior o sistema de AVAC da Edificação Proposta apresentada na Seção 3.4. Representando, assim, a Edificação Proposta por completa.
5	Essa simulação utilizou os parâmetros estimados para a Edificação Padrão de Mercado por completo.
6	Essa simulação adicionou à simulação 4 o sistema de geração local de energia via painéis fotovoltaicos.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 SIMULAÇÃO 1: EDIFICAÇÃO REFERÊNCIA

Na Figura 23, é apresentado o resultado da simulação em relação ao consumo mensal de energia elétrica, no período de 1 ano, para a Edificação Referência.

Figura 23 Resultado do consumo mensal de energia elétrica para a Edificação Referência.

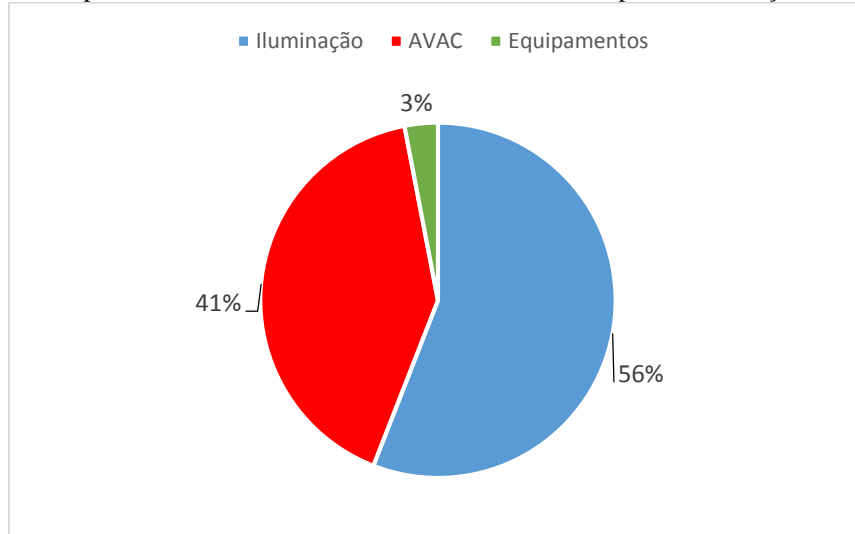


A simulação da Edificação Referência apresentou um consumo anual de energia elétrica no valor de, aproximadamente, 32 MWh. O sistema de iluminação tem a maior representatividade no consumo total em todos os meses (média de 56%). O sistema de AVAC possui consumos superiores nos meses de verão, provavelmente devido à maior demanda de refrigeração dos ambientes nessa estação. Equipamentos representam uma parcela muito pequena no consumo quando comparada a outros sistemas.

Além disso, verificou-se que o consumo mensal não sofreu grandes alterações durante o ano. Obteve-se consumos mensais com valores entre 2500 kWh e 3000 kWh, aproximadamente. A variação máxima foi de 473 kWh, calculada entre os consumos dos meses de março (2969 kWh) e junho (2496 kWh).

A Figura 24 apresenta o consumo anual total, com a representatividade de cada uso final.

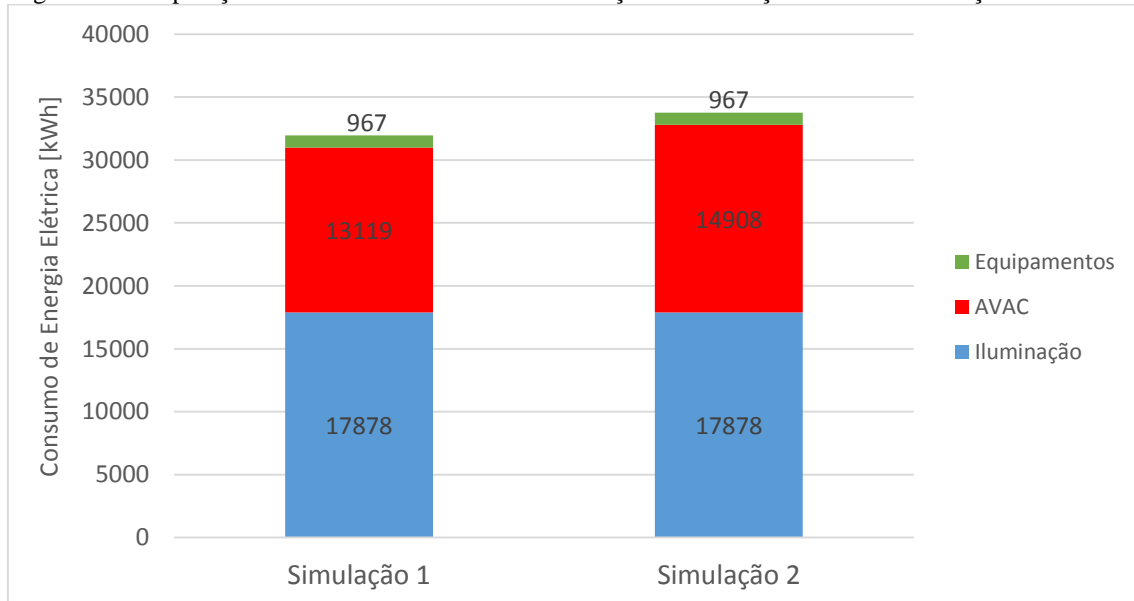
Figura 24 Representatividade do consumo anual do usos finais para a Edificação Referência.



#### 4.2 SIMULAÇÃO 2: SIMULAÇÃO 1 + ENVOLTÓRIA DA EDIFICAÇÃO PROPOSTA

Na Figura 25, pode ser observado o resultado do consumo anual de energia para a Simulação 1 e Simulação 2.

Figura 25 Comparação entre o consumo anual da edificação da simulação 2 com a Edificação Referência.



Percebe-se que, como consequência das novas considerações, o consumo anual total sofreu um acréscimo de 1788 kWh, que representa um aumento de, aproximadamente, 6% em relação ao consumo da Edificação Referência.

Um possível motivo para esse aumento pode ser o fato de que, na edificação real, as faces das fachadas envidraçadas são orientadas no sentido leste/oeste (isso

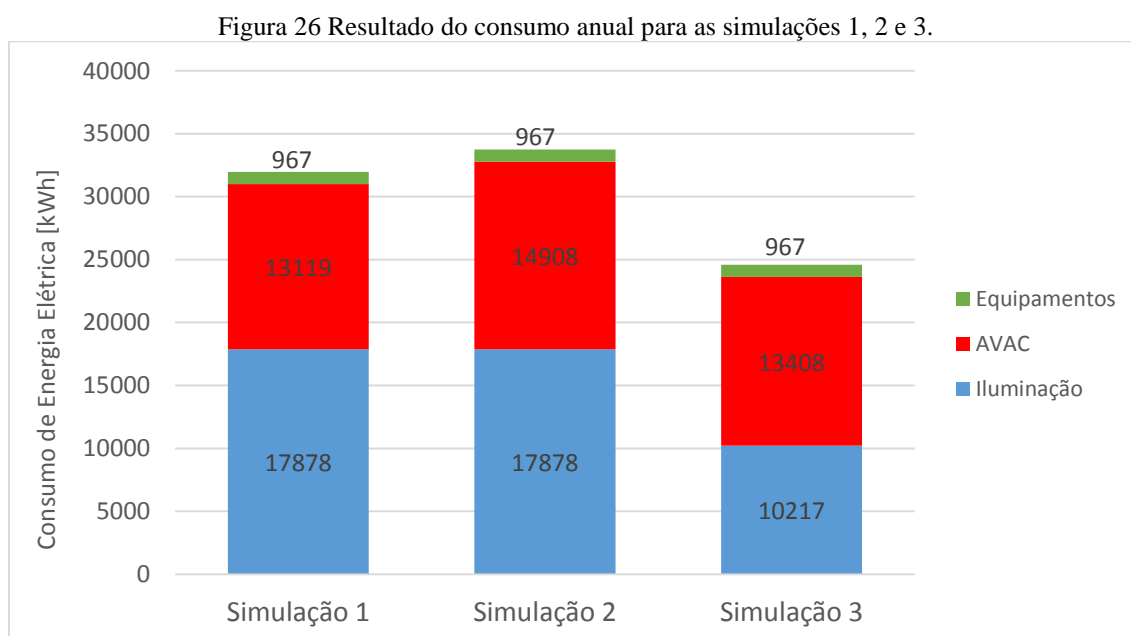
significa que a incidência solar é maior do que se elas estivessem orientadas no sentido norte/sul). Sendo assim, o consumo do sistema de refrigeração pode ter sido maior devido ao aquecimento dos ambientes resultante dessa incidência solar. Já na edificação referência, onde calculou-se a média aritmética das quatro orientações defasadas em 90°, esse fator é desconsiderado.

Além disso, os requisitos mínimos para os elementos construtivos da envoltória, exigidos pela ASHRAE 90.1 (2007), são superiores daqueles utilizados na edificação proposta.

### 4.3 SIMULAÇÃO 3: SIMULAÇÃO 2 + SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

Na Figura 26 é apresentado o resultado de consumo anual, dividido por uso final, para a Simulação 1, Simulação 2 e Simulação 3.

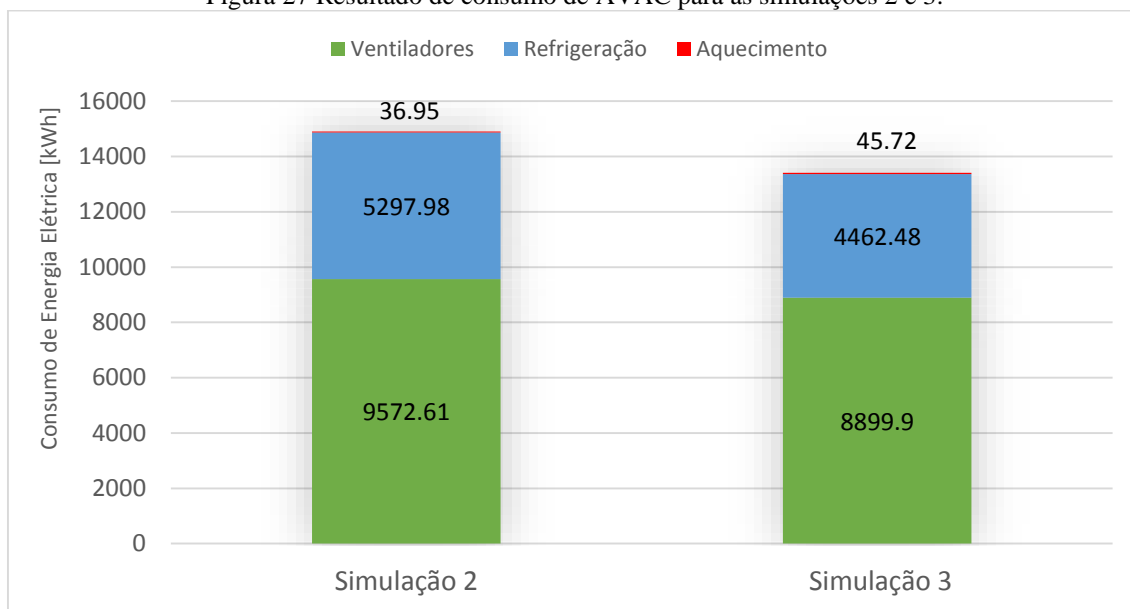
Observa-se que a redução de potência instalada de iluminação e a utilização de sensores de presença reduziram o consumo anual da iluminação em, aproximadamente, 43% em relação à edificação referência.



Verifica-se, também, que o consumo do sistema de AVAC foi inferior quando comparado à Simulação 2 (redução de 10%). Isso se deve ao fato de que, ao reduzir a potência instalada de iluminação interna, diminui-se a carga térmica produzida pelo sistema de iluminação. Como consequência, a demanda por refrigeração é menor, reduzindo, assim, o consumo de energia do sistema de AVAC.

A Figura 27 apresenta o consumo do sistema AVAC subdividido em aquecimento, refrigeração e ventilação, considerando e não considerando a redução de potência instalada de iluminação interna. Como previsto, o consumo anual de refrigeração da Simulação 1 foi 835 kWh menor que o da Simulação 2.

Figura 27 Resultado de consumo de AVAC para as simulações 2 e 3.



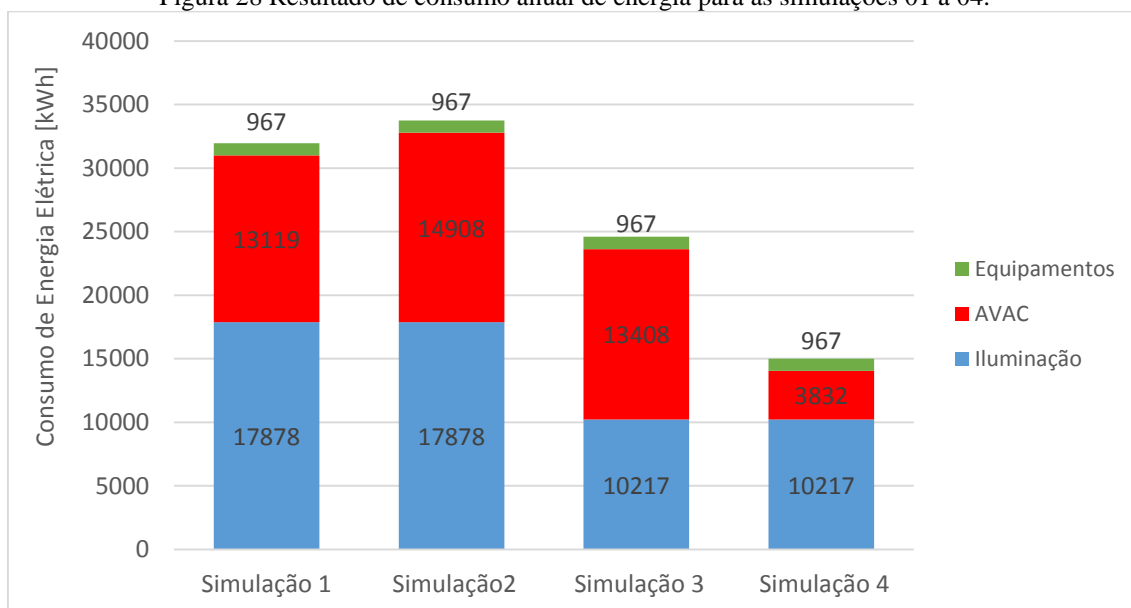
Ainda, é possível perceber que o consumo de aquecimento foi 24% maior na Simulação 1 em relação à Simulação 2. A causa desse aumento de consumo de aquecimento também é a diminuição da carga interna de iluminação - que contribui no aquecimento dos ambientes.

#### 4.4 SIMULAÇÃO 4: EDIFICAÇÃO PROPOSTA

A Figura 28 apresenta o resultado do consumo anual da Simulação 4, sendo comparada às outras 3 simulações. Observa-se, na Figura 28, que o consumo anual da edificação foi 53% menor na Edificação Proposta em relação à Edificação Referência. Da mesma forma, o consumo do sistema de AVAC foi 71% menor na Edificação Proposta em relação à Edificação Referência. Com essa redução de 53% no consumo anual, obtém-se os 19 pontos possíveis no crédito de otimização do desempenho energético da categoria EA do LEED. Essa foi uma das estratégias adotadas para a obtenção da certificação nível Platina para o empreendimento.

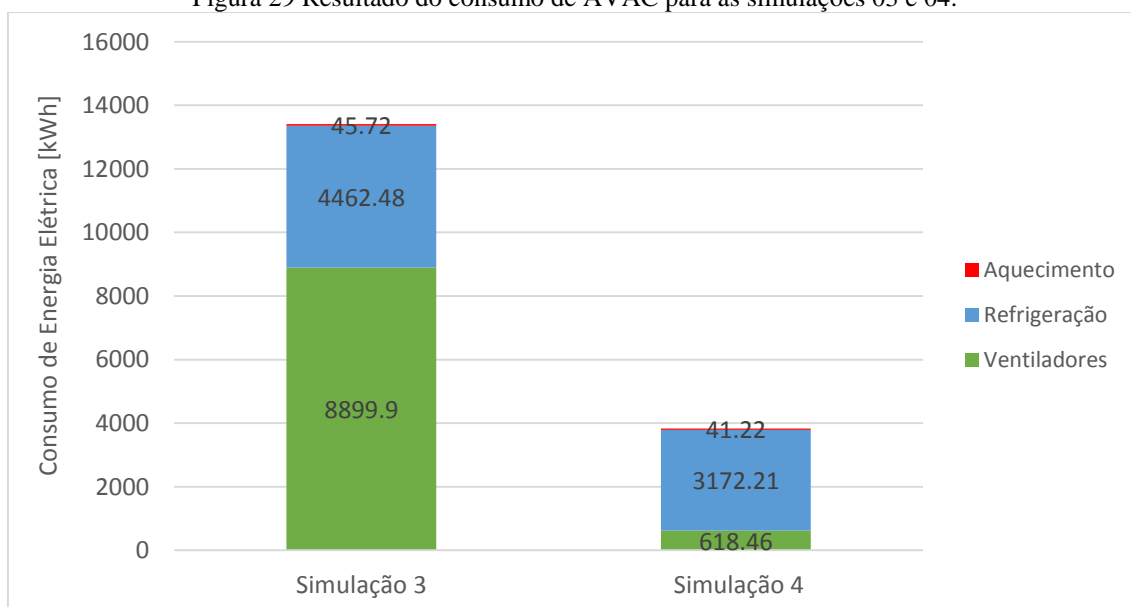


Figura 28 Resultado de consumo anual de energia para as simulações 01 a 04.



A Figura 29 apresenta o consumo do sistema de AVAC subdividido em ventilação, refrigeração e aquecimento. Percebe-se que o consumo de ventiladores na Simulação 4 foi o que mais sofreu redução de consumo: 94% em relação à Simulação 3. Logo, os ventiladores se mostraram muito mais eficientes no sistema da Edificação Proposta do que no sugerido pela norma ASHRAE 90.1 (2007).

Figura 29 Resultado do consumo de AVAC para as simulações 03 e 04.



A Figura 30 apresenta o consumo mensal da Edificação Proposta, subdividida entre os usos finais. A Figura 31 apresenta o consumo mensal de refrigeração da Edificação Proposta. A partir das figuras 30 e 31, verifica-se que nos meses de verão (temperaturas altas) o consumo é superior (maior demanda de refrigeração) quando

comparado ao consumo nos meses de inverno (temperaturas baixas), evidenciando que o clima pode influenciar de maneira significativa no consumo da edificação.

Figura 30 Resultado para o consumo mensal de energia elétrica da Edificação Proposta.

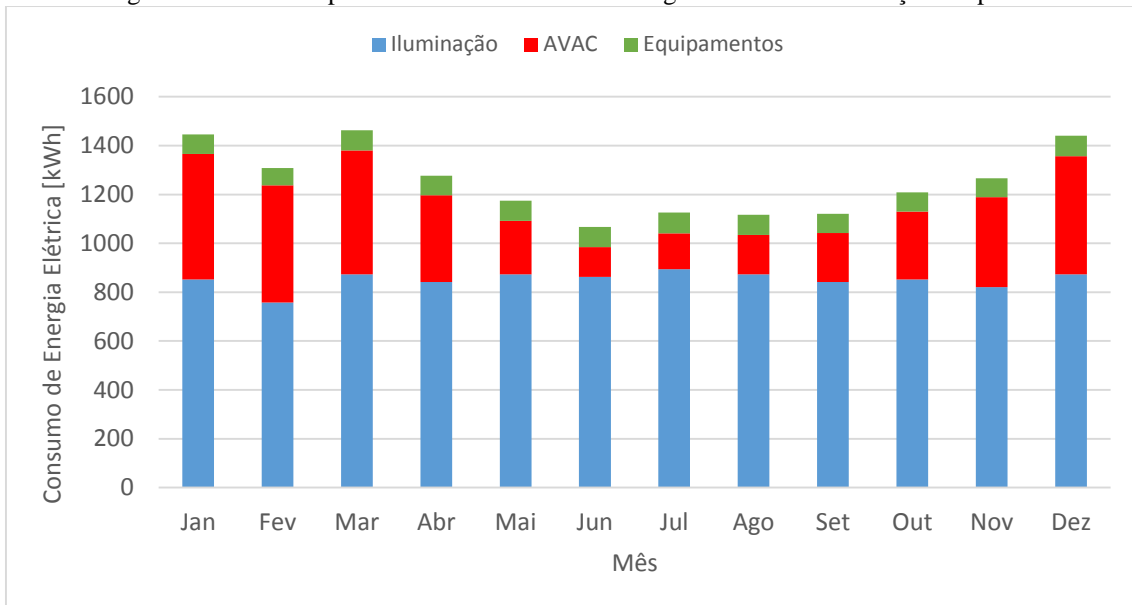
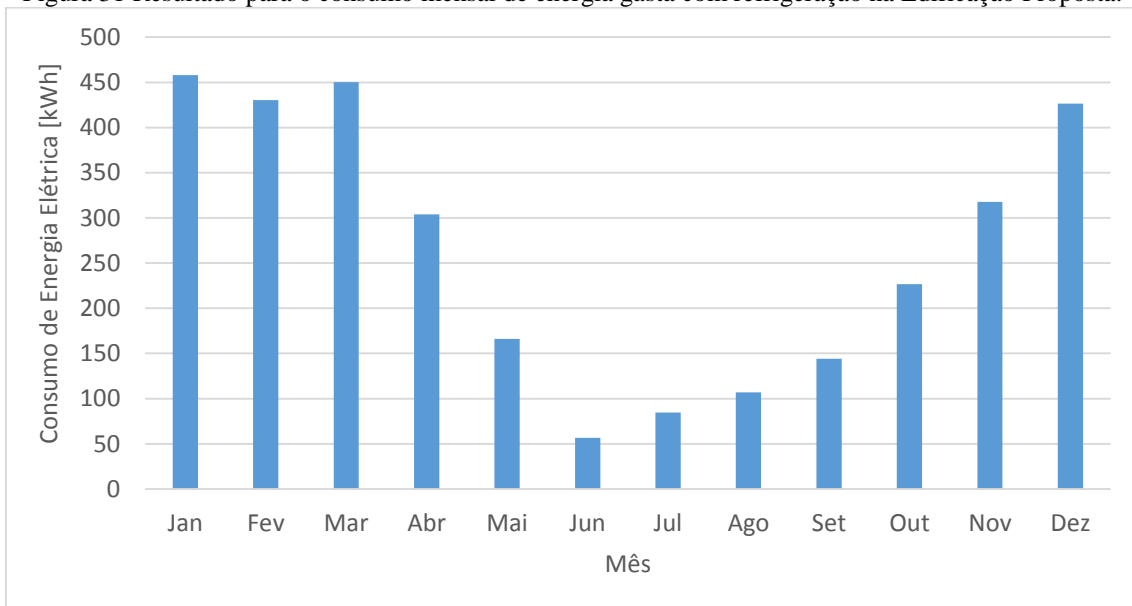


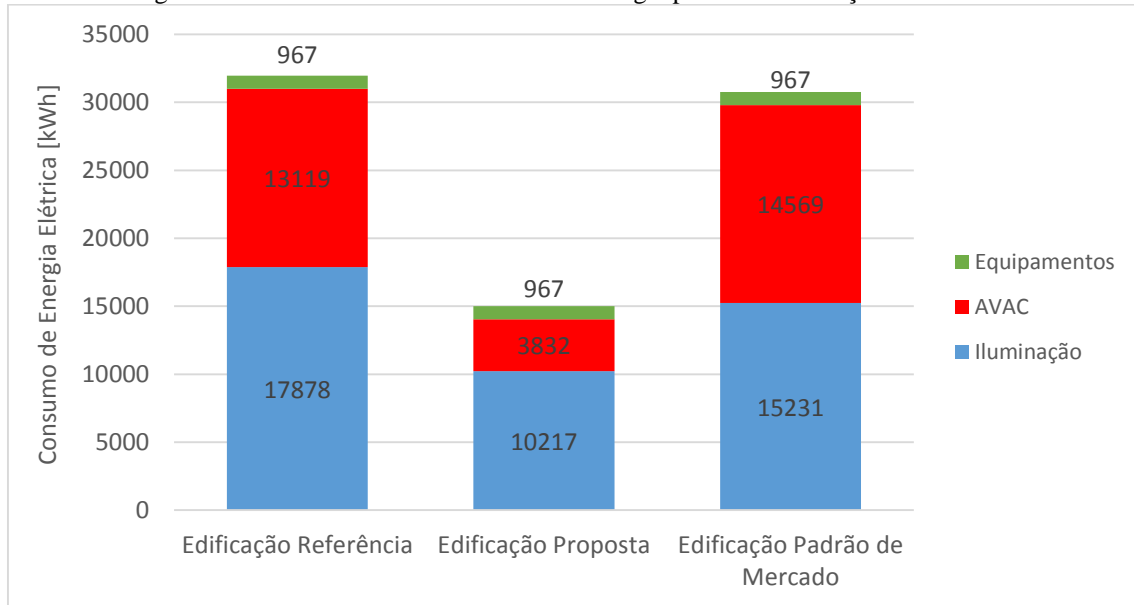
Figura 31 Resultado para o consumo mensal de energia gasta com refrigeração na Edificação Proposta.



#### 4.5 SIMULAÇÃO 5: EDIFICAÇÃO PADRÃO DE MERCADO

A Figura 32 apresenta o resultado do consumo anual de energia para as 3 edificações estudadas, subdividindo-o entre os usos finais.

Figura 32 Resultado do consumo anual de energia para as 3 edificações em estudo.



Percebe-se que o desempenho energético da Edificação Padrão de Mercado se mostrou similar à Edificação Referência (o consumo anual de energia foi apenas 4% menor na Edificação Padrão de Mercado). Essa similaridade entre a Edificação Padrão de Mercado e a Edificação Referência mostra que a norma ASHRAE 90.1 (2007) estabelece uma boa referência para quantificar a redução proporcionada por medidas de eficiência energética. Percebe-se, também, que os projetos desenvolvidos na Edificação Proposta resultaram em um consumo anual 53% menor que o da Edificação Padrão de Mercado.

A Figura 33 mostra o consumo mensal de energia elétrica em um ano, subdividida entre os usos finais, para a Edificação Padrão de Mercado. Percebe-se o mesmo comportamento observado nas demais simulações, onde o consumo do sistema de AVAC é superior nos meses quentes de verão.

A Figura 34 mostra o consumo do sistema de AVAC, subdividido em ventilação, aquecimento e refrigeração, para as três edificações em estudo. Percebe-se que, diferentemente da Edificação Referência (onde o maior consumo estava nos ventiladores), na Edificação Padrão de Mercado o maior consumo se encontrou na refrigeração. Esse fato deve-se à alta pressão de ventiladores presente no sistema de AVAC da Edificação Referência, que não existe no sistema empregado na Edificação Padrão de Mercado.

Além disso, o consumo superior de refrigeração se deve ao fato de que o COP utilizado no sistema da Edificação Padrão de Mercado é 15% (2,9 contra 3,28) menor

que o utilizado no sistema da Edificação Referência. Também, o fato de que foi utilizada telha metálica simples (sem isolamento térmico) na cobertura da Edificação Padrão de Mercado, fez com que a demanda de refrigeração devido ao aquecimento dos ambientes internos pela radiação solar fosse elevada.

Figura 33 Resultado do consumo mensal de energia elétrica para a Edificação Padrão de Mercado.

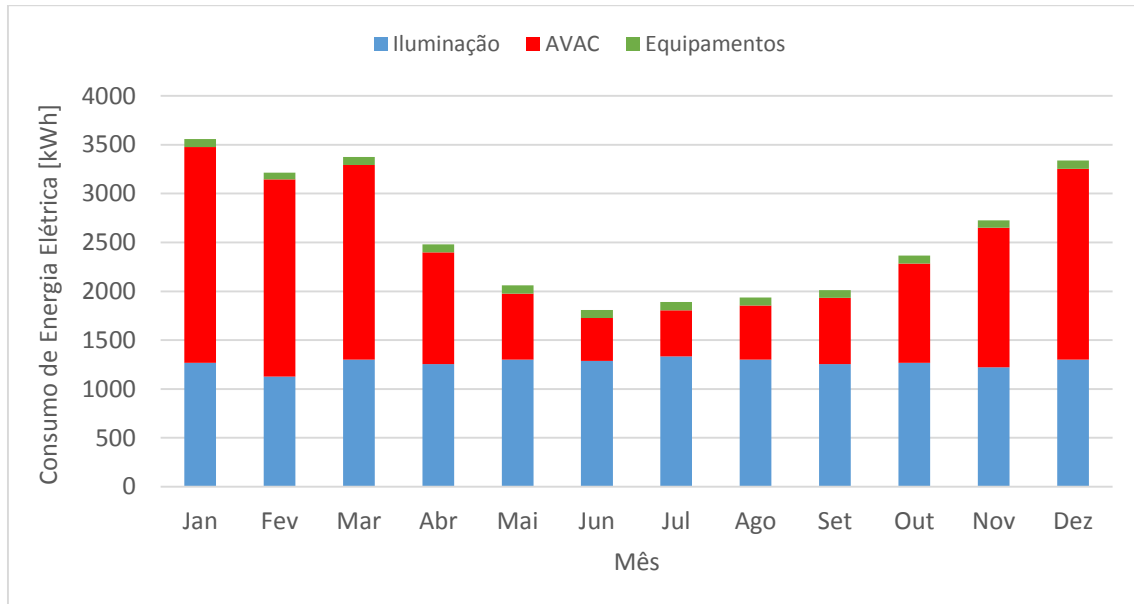
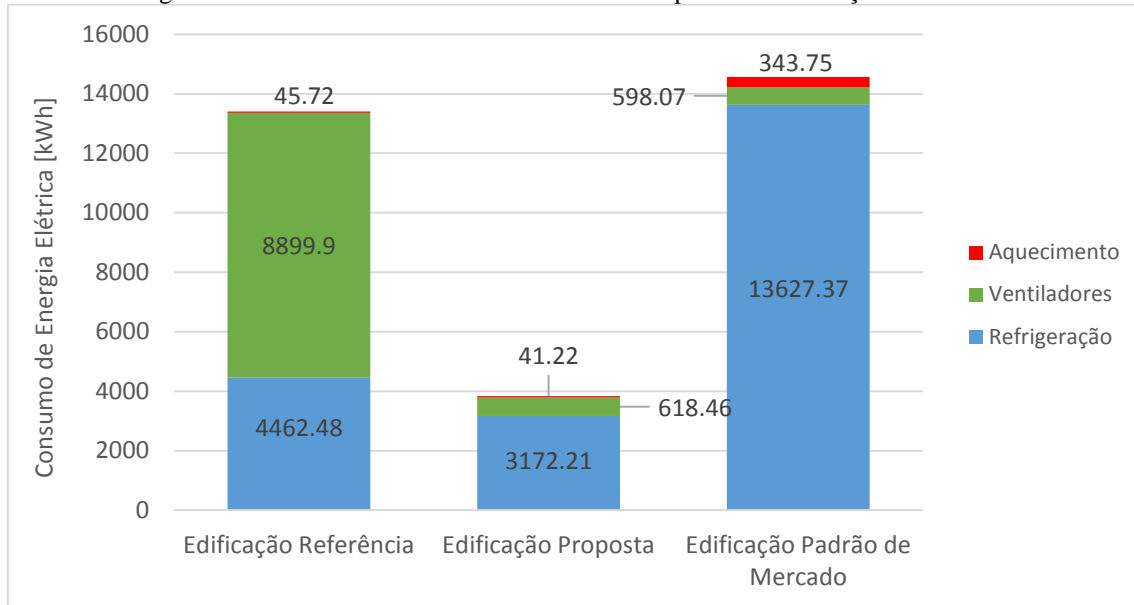


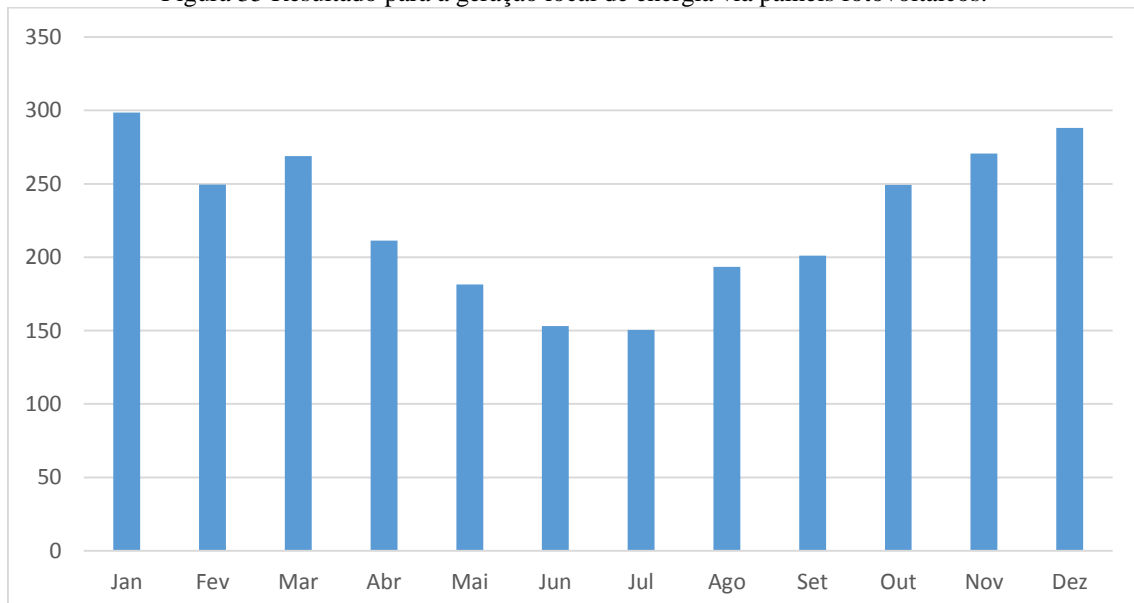
Figura 34 Resultado do consumo anual de AVAC para as 3 edificações do estudo.



#### 4.6 SIMULAÇÃO 6: GERAÇÃO LOCAL DE ENERGIA COM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Ao adicionar os painéis fotovoltaicos à simulação da Edificação Proposta, para a geração mensal de energia local obteve-se como resultado os valores apresentados na Figura 35.

Figura 35 Resultado para a geração local de energia via painéis fotovoltaicos.



Nota-se que a produção foi superior nos meses de verão, devido à maior incidência solar nesses meses. Totalizou-se uma geração local de energia com valor igual a 2715,5 kWh; além disso, o valor médio de produção mensal foi igual a 226,3

kWh. A Figura 36 apresenta o consumo de energia mensal da Edificação Proposta ao lado da produção de energia local, possibilitando avaliar a representatividade dessa produção. A Tabela 21 apresenta a porcentagem do consumo de energia que foi produzido pelos painéis fotovoltaicos ao longo dos 12 meses.

Figura 36 Consumo versus geração mensal de energia elétrica para a Edificação Proposta.

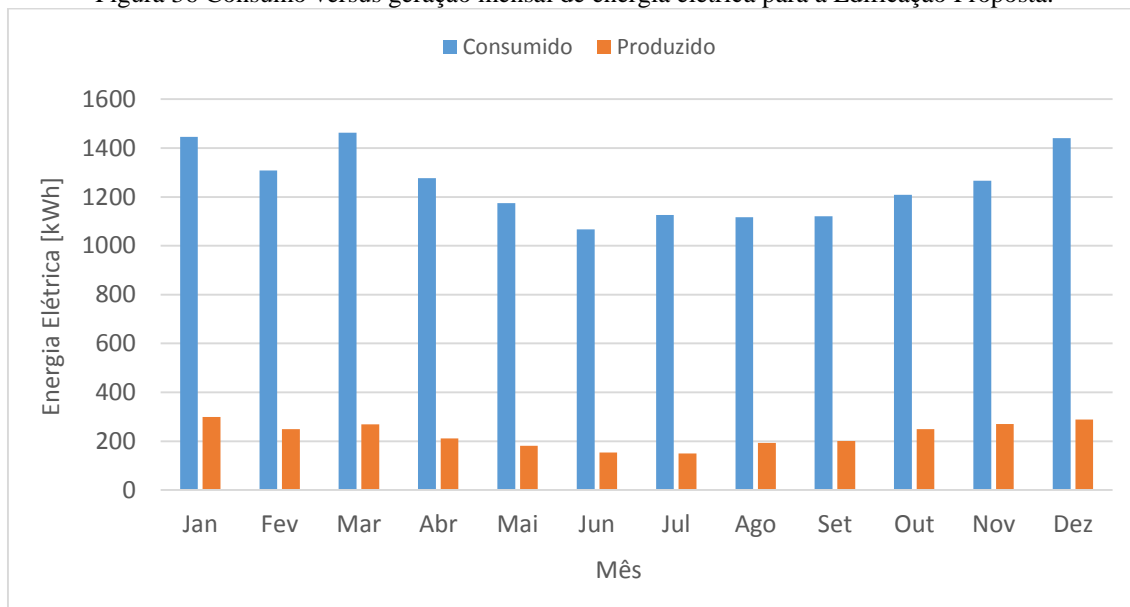


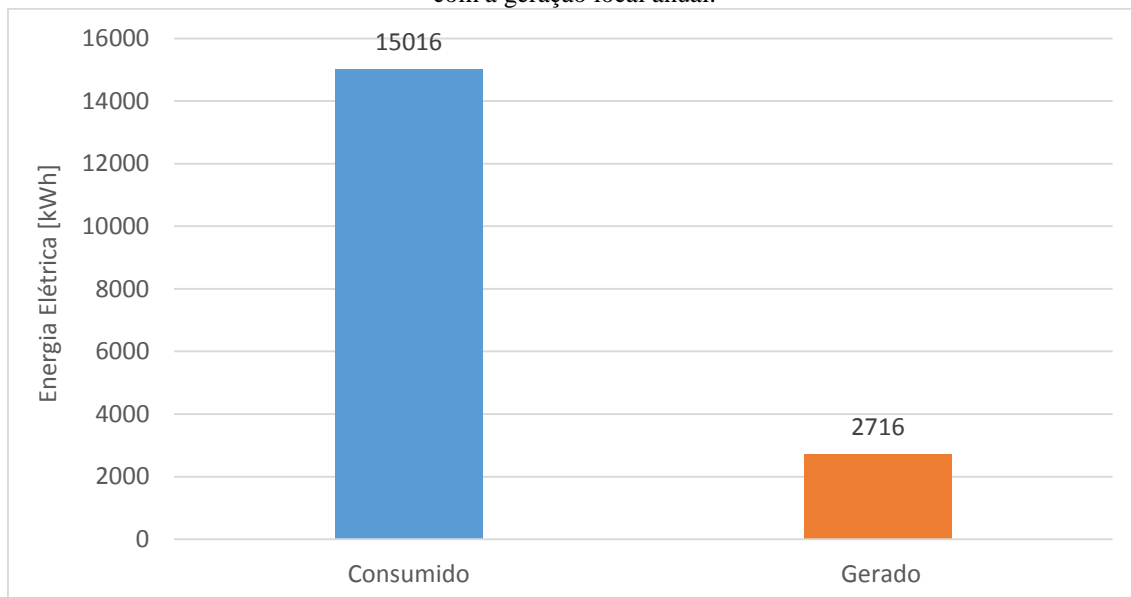
Tabela 21 Representatividade da geração local mensal no consumo mensal de energia elétrica para a Edificação Proposta.

Mês	Representatividade
Janeiro	21%
Fevereiro	19%
Março	18%
Abril	17%
Maio	15%
Junho	14%
Julho	13%
Agosto	17%
Setembro	18%
Outubro	21%
Novembro	21%
Dezembro	20%

A Figura 37 apresenta o consumo anual de energia elétrica ao lado da produção anual de energia elétrica. Nota-se que 18% do consumo anual de energia elétrica foi

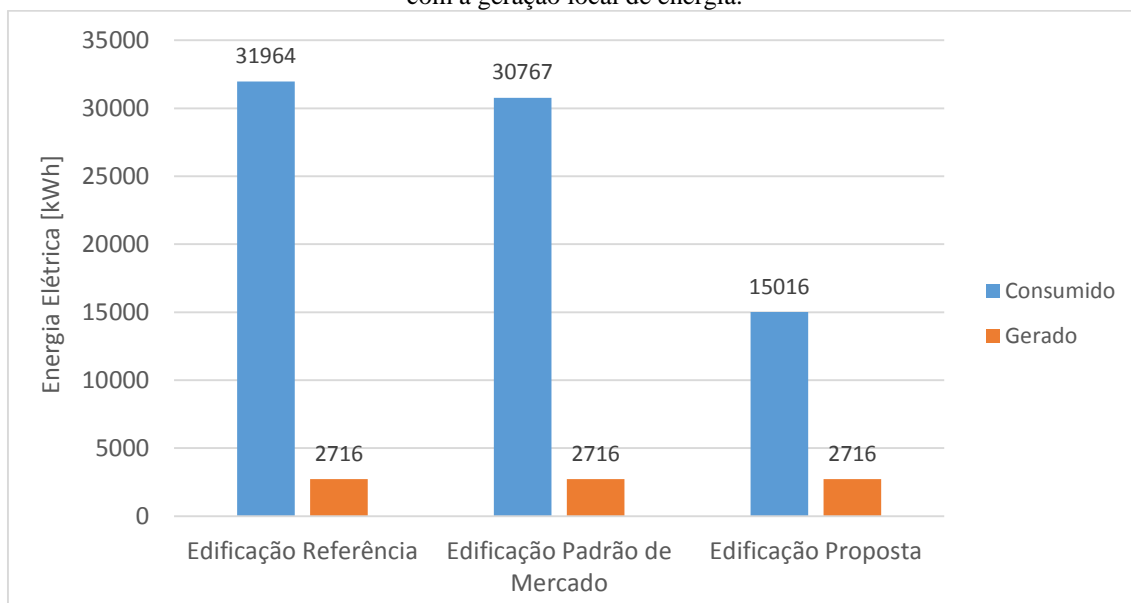
fornecido pelo sistema de geração local. Com esse valor, obteve-se todos os 7 pontos de geração local de energia possíveis para a obtenção da certificação LEED.

Figura 37 Resultado para o consumo anual de energia elétrica da Edificação Proposta em comparação com a geração local anual.



A Figura 38 apresenta os consumos anuais das 3 edificações em estudo, ao lado da geração local de energia anual.

Figura 38 Resultado para os consumos anuais de energia das 3 edificações do estudo, em comparação com a geração local de energia.



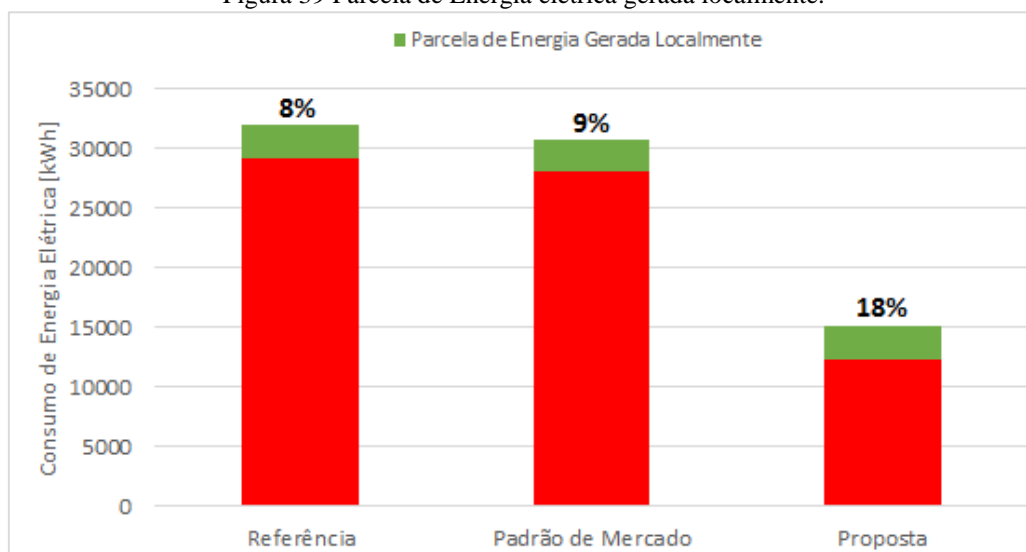
Percebe-se que a representatividade desse consumo é muito menor nas edificações Referência e Padrão de Mercado, onde as medidas de eficiência energética

não foram aplicadas. A parcela do consumo que é produzido pela geração local, em cada edificação, é apresentada na Tabela 22 e na Figura 39.

Tabela 22 Parcela do consumo de energia anual que é suprido pela geração local nos três cenários.

Edificação	Parcela
Referência	8%
Padrão de Mercado	9%
Proposta	18%

Figura 39 Parcela de Energia elétrica gerada localmente.



Outra análise que é possível realizar é avaliar qual o acréscimo de área de painéis fotovoltaicos seria necessário nas edificações referência e padrão de mercado para se obter os mesmos 18% da edificação proposta. Para a edificação padrão de mercado, seria necessário dobrar a capacidade do sistema, ou seja, utilizar dezesseis ao invés de 8 painéis, considerando que eles produzissem o mesmo que os oito primeiros. No caso da edificação referência, não bastaria dobrar o sistema, seria necessário um sistema com aproximadamente dezessete painéis. A Tabela 23 apresenta esse resultado.

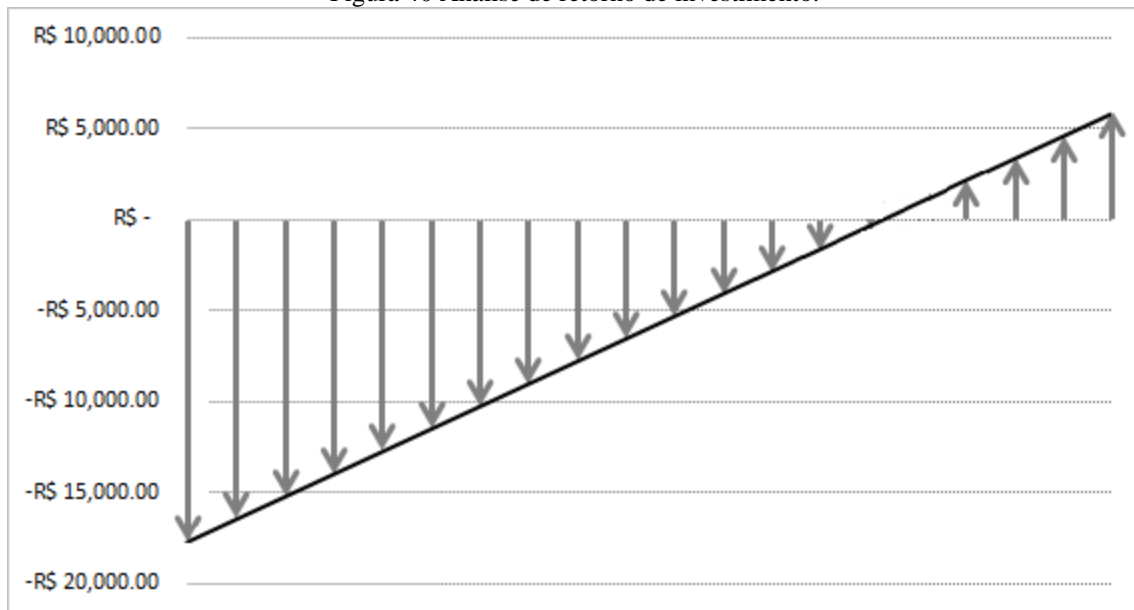
Tabela 23 Análise de número de painéis.

Edificação	Parcela de energia gerada via painéis fotovoltaicos	Número de painéis necessários
Referência	18% (5754 kWh)	17
Padrão de Mercado	18% (5538 kWh)	16
Proposta	18% (2716 kWh)	8



Considerando o custo médio de instalação de um sistema fotovoltaico de 1kWp em uma edificação comercial como R\$ 9000,00; além disso, a tarifa média de energia elétrica na cidade de Itajaí é de 0,455 R\$/kWh (CELESC, 2015). Sendo assim, é possível realizar uma análise de retorno de investimento (*payback* simples) considerando a economia de energia. A Figura 40 apresenta o resultado da análise de retorno de investimento.

Figura 40 Análise de retorno de investimento.



Com um investimento inicial de R\$17.640,00 e uma economia anual de R\$1.237,00 o tempo de *payback* é de 14,26 anos.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que medidas de eficiência energética, aplicadas à uma edificação comercial, são capazes de reduzir significativamente o consumo de energia elétrica. Verificou-se também, que a certificação LEED aplicada à essa tipologia de edificação estimula a melhoria no desempenho energético das edificações. Ainda, conclui-se que a aplicação de medidas de conservação de energia é capaz de aumentar a parcela do consumo de energia elétrica que é fornecido via painéis fotovoltaicos, reduzindo a demanda da rede. Sendo assim, o desempenho energético de edificações mostrou possuir um potencial significativo na redução de impactos associados ao aumento de demanda de energia elétrica, logo, se faz necessário atentar-se ao fator desempenho energético, ainda no desenvolvimento dos projetos da edificação.

Como sugestão para um trabalho futuro, propõem-se utilizar os procedimentos estabelecidos pelo protocolo IPMVP (*International Performance Measurement and Verification Protocol*) para verificar a redução no consumo de energia elétrica resultante das medidas de eficiência energética. Nesse procedimento utilizam-se medições durante o período de operação da edificação em estudo para calibrar a simulação e comparar resultados. Sugere-se utilizar a Opção D (*Whole Building Calibrated Simulation*) do IPMVP, em conjunto com a ASHRAE *Guideline 14: Measurement of Energy and Demand Savings*.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 90.1-2007: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. 2007.

BARBOSA F.V. **Gestão Remota de Iluminação Pública**. 23013. 64 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Universidade Cidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BEYER, P.O. **Apostila de Conforto Térmico**. DEMEC/UFRGS. Porto Alegre, 2011.

CLIQUE ARQUITETURA. **Portal clique arquitetura**. Disponível em: < <http://http://www.cliquearquitetura.com.br>>. Acesso em: 9 junho 2015.

DOE - DEPARTMENT OF ENERGY. **Energy Efficiency Trends in Residential and Commercial Buildings**. Oct. 2008.

DOE - DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus**. v. 7.0. 2015.

DOE - DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPlus**. v. 8.3. 2015.

DOE - DEPARTMENT OF ENERGY. **LegacyOpenStudio 1.0.11**. 2011.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, Brasil. 2013.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro, Brasil. 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro, Brasil. 2014b.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Ano VIII, Nº 88. Rio de Janeiro, Brasil. *Jan.* 2015.

GBA - GREEN BUILDING ALLIANCE. **LEED Rating System**. Disponível em: < <https://www.go-gba.org>>. Acesso em: 9 junho 2015.

GBCBRASIL – GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. **GBCBrasil – Construindo um futuro sustentável**. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br>>. Acesso em: 9 junho 2015.

GELINKSI G. **Vidros refletivos para o controle da luz e do calor**. Revista Finestra. Ed. nº 38. 2014.

GIACOBBO J. **Estudos de caso comparativos entre normas de iluminação: NBR 5413 e NBR ISSO 8995-1**. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GOOGLE. **SketchUp 8**. Ferramenta computacional. 2010.

GTES - GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, mar., 2014.

IBE - INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA. **[Alta do índice de preços ao consumidor semanal]**. Rio de Janeiro, Brasil. Mar. 2015

HEMA/ES – INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Prova de concurso para analista de meio ambiente – Área: engenharia mecânica**. 2007.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Programa Brasileiro de Etiquetagem: Selo PROCEL**. 2014.  
INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. Paris, França. 2015.

LAMBERTS R.; DUTRA L.; PEREIRA F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª Ed. 2005.

LG ELECTRONICS. **Catálogo comercial**. São Paulo, Brasil. 2015.

MENDES, N. *et al.* **Uso de Instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil**. Brasil. 2005.

MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. **Mercado, física e processamento de células solares**. Metalurgia e Materiais, v. 61, n. 557, 2005.

OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático**. Osasco, SP, 2007.

PIETZSCH D. A. **Dimensionamento de um sistema ar condicionado e análise energética para um prédio**. 2012. 28 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PROCEL. **Manual prático de ar condicionado**. Rio de Janeiro, Brasil. 2011.

REAL SOLAR. **Energia renovável do Brasil**. Rio Grande do Norte, Brasil. Disponível em: <<http://www.real-watt.com.br/>>. Acesso em: 10 junho 2015.

RUPP R. F. **Dimensionamento de área de janela em edificações comerciais: integração da iluminação natural com a artificial e utilização da ventilação híbrida**. 2011. 214 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

SAMLEX AMERICA INC. **SAMLEXSOLAR Learning Center**. Disponível em: < <http://www.samlexsolar.com> >. Acesso em: 9 junho 2015.

VIA ARTÍSTICA. **VA Casa na Praia**. Disponível em: < <http://viaartistica.com/casa-na-praia.html>>. Acesso em: 9 junho 2015.

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL OF SUSTAINBLE DEVELOPMENT. **Eficiência Energética em Edificações**: Realidades empresariais e oportunidades. Lisboa, Portugal. 2009.

WESTPAHL F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. 2007. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.