

LUCAS COLLET DE SOUZA

AVALIAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA DE UM EDIFÍCIO SEGUNDO CRITÉRIOS
DE PRÉDIOS *VERDES*

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Porto Alegre
2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO TERMO-ENERGÉTICA DE UM EDIFÍCIO SEGUNDO CRITÉRIOS DE PRÉDIOS VERDES

LUCAS COLLET DE SOUZA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Volnei Borges
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2009

Em memória de meu avô,
Leonildo Collet.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, *Gema Collet e Albani Rubens Nunes de Souza*, pelo apoio que sempre me proporcionaram

ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Otto Beyer* que dispôs de seu tempo e com grande empenho auxiliou no desenvolvimento deste trabalho

aos meus tios, *João Carlos Collet, Adriana B. Collet e Alba Maria N. de Souza* pela acolhida durante esses anos

à minha irmã *Larissa Collet de Souza*, sempre presente.

“O desejo sincero e profundo do coração é sempre realizado;
em minha própria vida tenho sempre verificado a certeza disto.”

Mahatma Gandhi

SOUZA, L. C. **Avaliação Termo-Energética de um Edifício Segundo Critérios de Prédios Verdes**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais consome recursos naturais no mundo. Desde a extração da matéria-prima até a conclusão da obra, os edifícios utilizam grande parte da energia produzida no planeta. Durante sua vida útil o gasto com energia também é alto e há uma grande produção de lixo proveniente dos moradores e da realização de obras e reformas. Com o intuito de conter e reduzir esses problemas foram criados programas que visam à redução dos impactos da construção sobre a saúde humana e o meio ambiente através do uso eficiente da energia, água e outros recursos, os chamados prédios *verdes*. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um prédio energeticamente eficiente, segundo o programa de certificação *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), através da sua análise termo-energética. Com o auxílio do *software EnergyPlus*, as modificações realizadas no edifício proposto, como utilização de isolamento térmico nas paredes, acionamento automático das proteções solares internas, variação automática da potência do sistema de iluminação e a utilização de diferentes tipos de vidros são avaliadas para que consumo total do prédio seja reduzido. Para o caso apresentado neste trabalho a redução chegou a 41%.

PALAVRAS-CHAVES: Edifícios sustentáveis, eficiência termo-energética, *EnergyPlus*, simulação, consumo de energia elétrica, edifícios *verdes*.

SOUZA, L. C. **Avaliação Termo-Energética de um Edifício Segundo Critérios de Prédios Verdes**. 2009. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

The construction industry is one of the sectors that use more natural resources in the world. From the extraction of raw materials to the completion of the site project, the buildings use much of the energy produced on the planet. During its lifetime, spending on energy is also high and there is a large production of waste from the residents and the carrying out of construction and renovation. In order to contain and reduce these problems, programs were created aimed at reducing the impacts of construction on human health and the environment through the efficient use of energy, water and other resources, so-called *green* buildings. In this context, the objective of this work is to develop an energy-efficient building, according to the certification program Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), through its analysis of thermal energy. With the aid of EnergyPlus, modifications are made to the proposed building, using thermal insulation in the walls, automatic firing of internal solar protections, auto-ranging power of the lighting system and different types of glasses are evaluated so that total consumption in the building is reduced. For the case presented in this work the reduction was 41%.

KEYWORDS: Sustainable building, thermal energy efficiency, EnergyPlus, simulation, power consumption, *green* buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Modelo físico proposto para o novo Prédio da Engenharia Mecânica criado no software <i>Google SketchUp 7.1</i>	5
Figura 5.1 – Percentual de cada fator no consumo total de energia para o edifício <i>baseline</i>	9
Figura 5.2 – Percentual de cada fator no consumo total de energia para o prédio proposto	10
Figura 5.3 – Consumo mensal de energia do prédio proposto	11
Figura 5.4 – Comparação do consumo energético do prédio <i>baseline</i> e proposto	11
Figura 5.5 – Percentual de cada item avaliado no consumo total de energia para o edifício melhorado	14
Figura 5.6 – Comparação do consumo energético dos prédios melhorado e <i>baseline</i>	15
Figura A.1 – Planta baixa do primeiro e segundo pavimentos	17
Figura A.2 – Planta baixa do terceiro e quarto pavimentos.....	17
Figura A.3 – Planta baixa do auditório.....	17
Figura C.1 – Janelas 1 e 2, presentes no primeiro e segundo pavimentos.....	19
Figura C.2 – Janelas 3 e 4, presentes no terceiro e quarto pavimentos	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Resultados da simulação das quatro orientações do edifício <i>baseline</i>	9
Tabela 5.2 – Resultados da simulação do edifício proposto.....	10
Tabela 5.3 – Comparação do consumo de energia elétrica dos edifícios <i>baseline</i> e proposto .	12
Tabela 5.4 – Modificações realizadas para melhorar a eficiência energética	13
Tabela 5.5 – Resultados do edifício melhorado e a comparação com o edifício proposto	13
Tabela 5.6 – Comparação dos valores do consumo de energia elétrica dos edifícios <i>baseline</i> e melhorado	14
Tabela B.1 – <i>Schedule</i> ar-condicionado	18
Tabela B.2 – <i>Schedule</i> iluminação interna	18
Tabela B.3 – <i>Schedule</i> iluminação externa.....	18
Tabela B.4 – <i>Schedule</i> ocupação interna	18
Tabela A.1 – Propriedades dos elementos construtivos utilizados no edifício	20
Tabela A.2 – Propriedades termofísicas dos vidros	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	Ar seco
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BLAST	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
NC	<i>New Construction</i>
TRY	<i>Test Reference Year</i>
U.S.	<i>United States</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USGBC	<i>U.S. Green Building Council</i>
VA	Vapor d'água
VRV	<i>Variable Refrigerant Flow</i>
VRV	<i>Variable Refrigerant Volume</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

AC	Área condicionada	[m ²]
A_i	Área da superfície i	[m ²]
A_L	Área de infiltração	[cm ²]
AU	Área útil	[m ²]
COP	<i>Coefficient of Performance</i>	[]
c_p	Calor específico	[J/kg.K]
C_S	Coefficiente de chaminé	[(1/s) ² /(cm ⁴ .K)]
C_W	Coefficiente de vento	[(1/s) ² /{cm ⁴ .(m/s) ² }]
C_z	Calor Específico do ar da zona	[J/kg.K]
D	Direção do vento	[°]
e	Espessura	[mm]
h_i	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² .K]
k	Condutividade térmica	[W/m.K]
\dot{m}_i	Vazão mássica de ar da zona i	[kg/s]
\dot{m}_{inf}	Vazão mássica de ar de infiltração	[kg/s]
P	Pressão	[Pa]
\dot{Q}_i	Carga térmica interna convectiva da superfície i	[W]
\dot{Q}_{sys}	Taxa de troca de calor com o sistema de climatização	[W]
R	Resistência térmica	[m ² .K/W]
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco	[°C]
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido	[°C]
T_∞	Temperatura ambiente do ar exterior	[K]
T_{si}	Temperatura da superfície i	[K]
T_z	Temperatura média do ar da zona	[K]
U	Coefficiente U	[W/m ² .K]
$u_{máx}$	Velocidade máxima do vento	[m/s]
α_{solar}	Absortância solar	[]
$\alpha_{visível}$	Absortância visível	[]
ΔT	Amplitude da variação da temperatura de bulbo seco	[°C]
ΔT	Diferença entre a temperatura interna e externa	[K]
ε	Emissividade térmica	[]
$\rho_{solar, \perp}$	Reflexividade solar para uma incidência normal de luz na superfície	[]
$\rho_{visível, \perp}$	Reflexividade visível para uma incidência normal de luz na superfície	[]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
$\tau_{solar, \perp}$	Transmitância solar para uma incidência normal de luz na superfície	[]
$\tau_{visível, \perp}$	Transmitância visível para uma incidência normal de luz na superfície	[]
u	Velocidade do vento	[m/s]
W	Conteúdo de umidade	[kgVA/kgAS]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1. EDIFÍCIOS <i>VERDES</i> : NORMA E CERTIFICAÇÃO	1
2.1.1. EDIFÍCIOS VERDES	1
2.1.2. NORMA ASHRAE 90.1	2
2.1.3. LEED	2
2.1.4. PROGRAMA PROCEL EDIFICA	2
3. PROGRAMA SIMULADOR UTILIZADO	3
3.1. ARQUIVO DO MODELO FÍSICO DO EDIFÍCIO	3
3.2. ARQUIVO CLIMÁTICO	3
3.3. DIAS DE PROJETO	4
4. METODOLOGIA	4
4.1. EDIFÍCIO PROPOSTO	5
4.1.1. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	5
4.1.2. ZONAS TÉRMICAS	5
4.1.3. CARGAS TÉRMICAS INTERNAS	6
4.1.4. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR	7
4.2. EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA (<i>BASELINE</i>)	7
4.2.1. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	7
4.2.2. ZONAS TÉRMICAS	8
4.2.3. CARGAS TÉRMICAS INTERNAS	8
4.2.4. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR	8
4.3. SIMULAÇÕES	8
5. RESULTADOS E ANÁLISES	8
5.1. EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA	8
5.2. EDIFÍCIO PROPOSTO	10
5.3. COMPARAÇÃO ENTRE CONSUMO DO <i>BASELINE</i> E PROPOSTO	11
5.4. MELHORIA DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO PROPOSTO	12
6. CONCLUSÕES	15

REFERÊNCIAS	16
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	16
APÊNDICES	17
Apêndice A – Planta baixa do edifício	17
Apêndice B – <i>Schedules</i>	18
Apêndice C – Janelas	19
ANEXO – Propriedades dos Elementos Construtivos e dos vidros	20

1. INTRODUÇÃO

O estágio climático atual obriga a todos a pensarem de modo sustentável e isso está provocando mudanças na maneira de viver das pessoas. Uma das preocupações é a crescente demanda da sociedade por energia e as consequências que isso gera para o meio ambiente. Encontrar formas para reduzir o consumo de bens naturais está cada vez mais em pauta na maioria das profissões.

No ramo da construção civil, os edifícios são uns dos maiores consumidores de bens naturais, com isso engenheiros e arquitetos têm oportunidades para colocar em prática ações que reduzam o consumo de bens naturais. Conscientes dessa deficiência, instituições não governamentais criaram programas chamados prédios *verdes*, que tem como objetivo instituir padrões na construção civil para reduzir as emissões de carbono e utilizar fontes renováveis.

Em um futuro não muito distante todas as instituições nacionais relevantes deverão se enquadrar nos programas de sustentabilidade para edifícios. Sendo assim, projetar prédios *verdes* na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) é importante para dar início ao cumprimento dessas futuras regras, reduzir ao máximo o consumo energético total do edifício e torná-lo uma referência para os outros prédios.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é fazer a análise termo-energética de um edifício e atender aos pré-requisitos mínimos para certificação de prédios *verdes* segundo o programa *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED). Para conseguir a certificação, o edifício deve reduzir 10% ou mais o consumo total de energia elétrica em relação ao prédio de referência.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas informações sobre normas nacionais e internacionais de eficiência energética em edificações.

2.1. EDIFÍCIOS VERDES: NORMA E CERTIFICAÇÃO

O crescimento da população mundial proporcionou um aumento na demanda por bens e serviços, e, como consequência, a geração de poluição jamais vista até então. Um dos grandes responsáveis por estes descartes são os edifícios, considerados um dos maiores consumidores de matéria-prima e geradores de resíduos.

Para minimizar tais situações foram criados o *U.S. Green Building Council* (USGBC) (1993) e o certificado *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) (1998) com o objetivo de promover a concepção e construção de edifícios ecologicamente responsáveis, rentáveis e com ambientes saudáveis para viver e trabalhar.

2.1.1. EDIFÍCIOS VERDES

Edifícios *verdes* ou *green buildings* são edificações totalmente planejadas nas quais é praticada a criação de estruturas e utilização de procedimentos que são ambientalmente responsáveis e eficientes no uso de recursos, com o intuito de reduzir os impactos sócio-ambientais. Isto é feito por meio de um processo que abrange o ciclo de vida completo das edificações.

Os edifícios *verdes* são desenvolvidos para reduzir todos os impactos da construção sobre a saúde humana e meio ambiente através do uso eficiente da energia, água e outros recursos, além de proteger a saúde dos ocupantes e melhorar a produtividade dos funcionários, reduzir o desperdício, poluição e degradação do ambiente.

2.1.2. NORMA ASHRAE 90.1

Com o propósito de “prover requisitos mínimos para o eficiente projeto energético de prédios” (ASHRAE 90.1, 2007), a norma ASHRAE 90.1 *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* contém orientações para instalações energeticamente eficientes em edifícios, com critérios base para certificação LEED. Revisada constantemente para atender o progresso tecnológico que vivemos, a Norma ASHRAE 90.1-2007 descreve sobre sistemas de ar-condicionado, iluminação, envoltória do edifício e orientações para melhoria das operações dos sistemas.

2.1.3. LEED

Com base na Norma ASHRAE 90.1 o LEED é um programa de certificação por pontuação criado para definir um edifício *verde* através do estabelecimento de um padrão comum de medição.

Desenvolvido pelo USGBC e baseado na ASHRAE 90.1-2007, o LEED versão 3.0 possui programas específicos para diferentes condições: prédios existentes, interiores comerciais, casas, consultórios médicos, lojas, novas construções, desenvolvimento de bairros, escolas e interiores e envoltória.

No caso do presente trabalho, para projetar uma das proposições do novo prédio do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), utiliza-se o programa para Novas Construções (NC).

O LEED consiste em um programa de certificação por pontuação, onde os pontos são obtidos à medida que são atendidas exigências quanto ao local de construção da edificação, eficiência no uso da água, no consumo de energia, adoção de materiais e recursos, na qualidade do ambiente interno, em inovações de projeto e na priorização do emprego de matéria-prima regional.

Neste trabalho o foco está na otimização do uso da energia, portanto o item a ser explorado é Energia e Atmosfera.

O critério mínimo de nivelamento exigido para avaliação de um edifício pelo LEED é o cumprimento de uma série de pré-requisitos. Satisfeitos todos, passa-se à etapa de classificação de desempenho, em que créditos são computados conforme a redução com os gastos totais do edifício.

A categoria Energia e Atmosfera possui três pré-requisitos e seis créditos. O presente trabalho possui como meta atender ao pré-requisito 2, opção 1. O objetivo do pré-requisito 2 é estabelecer um nível mínimo de eficiência energética para a edificação e sistemas propostos, para reduzir os impactos ambientais e econômicos associados ao uso excessivo de energia. Para isso, adotou-se a opção um, que consiste em simular toda a edificação e demonstrar que o projeto proposto reduz 10% ou mais o consumo de energia elétrica em relação ao edifício de referência.

2.1.4. PROGRAMA PROCEL EDIFICA

O Programa de Eficiência Energética em Edificações (Procel EDIFICA) é um plano nacional lançado em 2003, e possui o propósito de incentivar o uso racional de energia através de diretrizes técnicas e, assim, classificar o edifício de acordo com o seu nível de eficiência energética.

Baseado em normas nacionais e internacionais, o Procel EDIFICA possui caráter voluntário para edificações novas e existentes, e a partir de 2013 tornar-se-á obrigatório para edificações novas, caso do presente trabalho.

Desenvolvido em conjunto, pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) e o Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, o programa brasileiro de eficiência energética em edificações tem o objetivo de “criar condições para etiquetagem voluntária do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos” (Procel EDIFICA, 2008) e aplica-se apenas para edificações que possuam 500 m², pelo menos, de área útil e/ou tensão de abastecimento maior ou igual a 2,3 kV.

A etiquetagem é obtida avaliando-se a envoltória da edificação, o sistema de iluminação e o sistema de condicionamento de ar.

3. PROGRAMA SIMULADOR UTILIZADO

A simulação computacional de edificações está sendo cada vez mais utilizada para obter dados sobre o comportamento térmico de construções e, assim, ajudar no desenvolvimento do projeto do prédio.

A ferramenta computacional utilizada para a simulação do edifício foi o *EnergyPlus* versão 4.0. *EnergyPlus* é um *software* para simulação do consumo energético e comportamento térmico de edificações. Desenvolvido e distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), é escrito em linguagem FORTRAN 90 e foi criado para substituir os programas BLAST e DOE-2, os quais possuíam problemas com a linguagem de programação (versões antigas do FORTRAN), problemas para alteração de dados de entrada e dificuldade de mantê-los atualizados com o avanço das tecnologias.

Com o intuito de obter dados mais próximos da realidade para o edifício simulado, o *EnergyPlus* calcula as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento necessárias para manter o conforto térmico do ambiente, o consumo de energia dos equipamentos do prédio e o comportamento termo-energético da construção.

Para realizar a simulação, o *EnergyPlus* necessita de uma série de dados de entrada que descrevem o edifício, como o padrão físico do prédio, dados climáticos da localidade na qual ele se encontra e dias de projeto da região da construção. Os dados do padrão físico do prédio são inseridos através do arquivo de dados de entrada IDF, com extensão *.idf* (*input data file*) e os dados climáticos da localidade são inseridos através do arquivo de dados climáticos, com extensão *.epw* (*energyplus weather file*).

3.1. ARQUIVO DO MODELO FÍSICO DO EDIFÍCIO

O arquivo do modelo físico dos edifícios (*baseline* e *proposto*) com extensão *.idf* foi criado através de um *plug-in* do *EnergyPlus* no *software* *Google SketchUp 7.1*, ferramenta disponibilizada gratuitamente na internet que possibilita a criação de modelos de edificações em três dimensões.

O modelo dos edifícios é elaborado no *Google SketchUp* e através do *plug-in* *OpenStudio* as informações físicas do prédio são transferidas e interpretadas pelo *EnergyPlus*. Assim, o *EnergyPlus* define todas as coordenadas dos vértices de cada superfície do prédio desenvolvido.

3.2. ARQUIVO CLIMÁTICO

O arquivo climático utilizado para o presente trabalho foi obtido através do LABEEE [2009]. Arquivos climáticos reúnem informações de 8.760 horas de uma série de dados mete-

orológicos para cada localização geográfica na forma de ano climático TRY (*Test Reference Year*).

A composição do arquivo climático de cada localidade é feita com a avaliação dos dados meteorológicos por um período de, pelo menos, 10 anos. Os doze meses que melhor representam o clima da localidade medida compõem o arquivo climático.

Com o arquivo climático específico para a cidade de Porto Alegre o consumo de energia elétrica da edificação (condicionamento de ar, sistema de iluminação e equipamentos elétricos) é obtido pelo *EnergyPlus* no período pré-definido pelo usuário, os chamados *run periods*.

3.3. DIAS DE PROJETO

Para dimensionar o sistema de HVAC da edificação utilizam-se dias de projeto de verão e inverno definidos pela ASHRAE [2009]. Dias de projetos são os dias que o sistema de condicionamento de ar solicita mais potência de resfriamento (verão) e aquecimento (inverno).

O método utilizado pela ASHRAE para assegurar que o sistema de ar-condicionado tenha um bom rendimento é simular dias de projetos estatísticos com ocorrências cumulativas anuais de 0,4% das 8.760 horas do ano para o verão e 99,6% para o inverno. Isto significa que o sistema de condicionamento de ar será incapaz de conservar a temperatura de projeto do ambiente em no máximo 0,4% das horas totais do ano no verão. No caso inverno, o sistema de ar-condicionado não será capaz de manter a temperatura de acordo com a definida no termostato em mais do que 99,6% das horas totais do ano.

Os dias de verão escolhidos para trabalhar foram 21, 22 e 23 de janeiro, para diferenciar o uso de T_{bs} , T_{bu} e W (conteúdo de umidade). Janeiro foi escolhido por ser o mês mais quente em média no verão. Já para o inverno optou-se pelo dia 21 de julho.

4. METODOLOGIA

O edifício objeto do estudo é uma proposta para o novo prédio do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS que deverá ser construído no Campus do Vale.

Com o propósito de torná-lo energeticamente eficiente, fez-se simulações através do *EnergyPlus* modificando os elementos construtivos que compõe o edifício para atender ao pré-requisito 2, opção 1, da parte Energia e Atmosfera do programa de certificação LEED.

Para enquadrar-se como prédio *verde* deve-se comparar o novo edifício da Engenharia Mecânica com o *baseline*, que é uma construção de referência, energeticamente eficiente e executada totalmente de acordo com a Norma ASHRAE *Standard* 90.1-2007. De acordo com o Apêndice G da ASHRAE 90.1, o prédio proposto e o *baseline* devem ser simulados com o mesmo programa de simulação, os mesmos dados climáticos e a mesma tarifa de energia elétrica.

A certificação é obtida se o novo prédio reduzir em no mínimo 10% o custo do consumo por energia elétrica em relação ao *baseline*. Para obter essa redução são feitas modificações em componentes arquitetônicos e não arquitetônicos do prédio: tipo e cor de telha, isolamento da laje da cobertura, composição e cores das paredes (internas e externas), efeito da composição dos entre-pisos, tamanho das janelas, tipos de vidros, proteção solar interna e externa, alteração no coeficiente de performance (COP) do sistema de ar-condicionado e variação da potência do sistema de iluminação (*dimerização*).

Os resultados extraídos do *software EnergyPlus* para comparar os edifícios proposto e *baseline* são consumo do sistema de condicionamento de ar (resfriamento, aquecimento, ventiladores, bombas e torres de resfriamento), consumo elétrico interno do prédio (equipamentos elétricos e iluminação interna), consumo total do edifício (consumo elétrico interno, consumo

do sistema de ar-condicionado e iluminação externa) e total de horas que a carga térmica do ambiente não é atendida.

4.1. EDIFÍCIO PROPOSTO

Baseado na arquitetura do prédio atual da Engenharia Mecânica, o edifício proposto possui quatro andares, sendo os dois primeiros salas de aula e os dois últimos salas de professores. Na parte central do prédio existe um *hall* de entrada com pé-direito duplo e um auditório. Na Figura 4.1 é apresentado o modelo físico do edifício proposto.

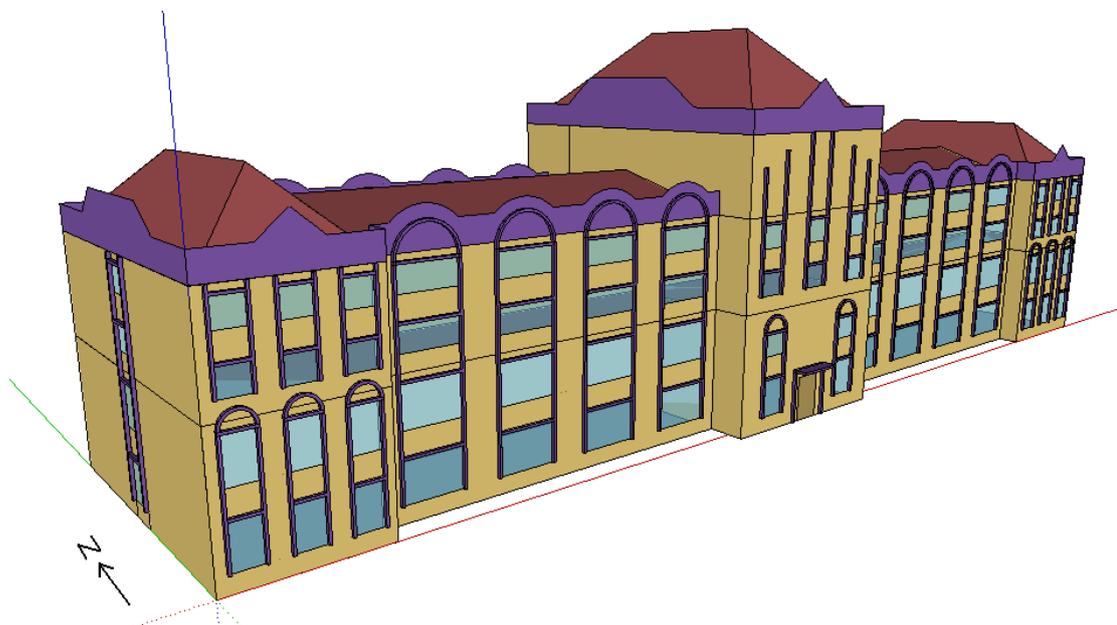


Figura 4.1 – Modelo físico proposto para o novo Prédio da Engenharia Mecânica criado no software Google SketchUp 7.1

A área total do edifício é igual a 6.134 m² e altura de 19 m. Nos dois primeiros andares o pé-direito possui 4 m e nos dois últimos 3 m. A fachada principal está direcionada para o sul. Observa-se na Figura 4.1 a existência de sombreamento no perímetro das janelas e na parte superior da edificação.

4.1.1. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Neste item, serão descritos os materiais que foram utilizados na composição dos elementos construtivos.

As paredes externas são compostas de tijolo furado (200 mm) e reboco dos dois lados (25 mm cada). As internas são de tijolo furado (100 mm) e reboco dos dois lados (25 mm cada). A laje de cobertura possui concreto leve (100 mm) e isolamento termo-acústico. O piso do térreo possui 300 mm de tijolo maciço mais 200 mm de concreto pesado. A composição dos entre-pisos é 100 mm de concreto leve mais forro rebaixado. Os vidros externos têm uma espessura de 3 mm.

As propriedades dos elementos construtivos são detalhadas no Anexo A.

4.1.2. ZONAS TÉRMICAS

Zona térmica é “um volume de ar à temperatura uniforme que possui um controle térmico independente” [Manual *EnergyPlus*, 2009].

A edificação é dividida em oito zonas térmicas, conforme a planta baixa dos pavimentos apresentada no Apêndice A. O primeiro e o segundo andares são compostos por zona sul oeste (12, ou seja, 1° e 2° andares), zona norte oeste (12), zona sul leste (12) e zona norte leste (12). O terceiro e o quarto andares possuem uma única zona na parte sul, chamada de zona sul (34, ou seja, 3° e 4° andares), e na parte norte outras duas, zona norte oeste (34) e zona norte leste (34). A última zona térmica é a do auditório. Os corredores, *hall* de entrada e *hall* do auditório não são climatizados.

A equação de balanço térmico utilizado pelo *EnergyPlus* envolve cada elemento da edificação (paredes, piso, forro e janelas), e sua solução integra o sistema de HVAC e a zona térmica. O balanço de energia é dado pela equação 4.1 abaixo [Manual *EnergyPlus*, 2009]:

$$C_Z \frac{dT_Z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_Z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_Z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z) + \dot{Q}_{sys} \quad (4.1)$$

onde $C_Z \frac{dT_Z}{dt}$ é a taxa de energia acumulada no volume de ar da zona térmica, em W, $\sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_i$ é a soma das cargas internas convectivas, em W, $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_Z)$ é a transferência de calor por convecção oriunda das superfícies da zona térmica, em W, $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_Z)$ é o somatório das taxas de calor por troca de ar com outras zonas, em W, $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_Z)$ é a transferência de calor devido à infiltração de ar externo na zona, em W e \dot{Q}_{sys} é a taxa de troca de calor com o sistema de climatização.

4.1.3. CARGAS TÉRMICAS INTERNAS

As cargas térmicas internas são calores liberados no interior do ambiente, destacando-se pessoas, lâmpadas e equipamentos elétricos.

A ocupação de pessoas possui uma densidade média de 0,65 pessoas/m² nas salas de aula, 0,1 pessoa/m² nas salas dos professores e 0,65 pessoas/m² no auditório [ASHRAE, 2007]. Considera-se que cada uma desenvolva uma atividade de escritório, dissipando 130 W cada [Manual *EnergyPlus*, 2009] com fração radiante de 50%. O *Schedule* de ocupação de pessoas pode ser visto no Apêndice B.

O sistema de iluminação possui uma taxa média de dissipação de calor de 15 W/m² de área de piso para as salas de aula e 12 W/m² para as salas dos professores. Nos corredores a taxa considerada é de 6 W/m² e no auditório de 14 W/m² [ASHRAE, 2007]. Para todas essas zonas a fração radiante é 37% e a fração visível 18%. O *Schedule* de iluminação pode ser visto no Apêndice B.

No caso dos equipamentos elétricos considerou-se uma taxa de dissipação de calor de 10,8 W/m² para as salas dos professores [ASHRAE, 2007]. Esse valor foi encontrado considerando um computador por pessoa, operando por 30 minutos e outros 30 minutos no modo de economia de energia, todos com uma impressora. Já para as salas de aula a potência total é de 1.885 W por zona térmica (um computador e um retroprojetor por sala), com fração radiante de 20%. A programação para o funcionamento dos equipamentos elétricos é igual ao *Schedule* ocupação de pessoas (Apêndice B).

As infiltrações foram calculadas de acordo com a Norma ASHRAE. Consideraram-se as frestas das janelas das zonas climatizadas. A vazão de ar Q , em m³/s, é dada por:

$$Q = \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_S \Delta T + C_W u^2} \quad (4.2)$$

onde A_L é a área de infiltração, em cm^2 , C_S é o coeficiente de chaminé, em $(\text{l/s})^2/(\text{cm}^4 \cdot \text{K})$, ΔT diferença entre a temperatura interna e externa, em K, C_W coeficiente de vento, em $(\text{l/s})^2/[\text{cm}^4 \cdot (\text{m/s})^2]$ e u a velocidade do vento, em m/s.

Como o edifício é composto por quatro tamanhos de janelas (Apêndice C), as áreas de infiltração são 114 cm^2 para a janela 1, 54 cm^2 para a janela 2, 66 cm^2 para a janela 3 e 31 cm^2 para a janela 4. Cada zona térmica possui 14 janelas, com exceção da zona sul (34) que possui 34 janelas.

4.1.4. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

O sistema de ar-condicionado é do tipo VRF (*Variable Refrigerant Flow*) ou VRV (*Variable Refrigerant Volume*). São sistemas modernos e eficientes, semelhantes ao tipo *split*, porém para uma unidade externa (condensador) existem várias unidades internas (evaporador) e o compressor varia o fluxo de fluido refrigerante de cada evaporador, de acordo com a carga térmica que o aparelho deve atender. No caso de aquecimento, o sistema inverte o sentido de trabalho, o chamado ciclo reverso.

A programação de funcionamento do sistema de condicionamento de ar é das 7 h às 22 h para dias de semana, das 8 h às 13 h nos sábados, domingos e feriados o sistema não opera. A temperatura programada para o verão é 25°C e para o inverno é 22°C .

Utilizou-se uma diferença de pressão de 354 Pa, para equipamentos VRV marca DAIKIN de potências que variam de 3.806 W até 11.596 W (13.000 Btu/h até 39.600 Btu/h). O COP para resfriamento é igual a 3,22 e para aquecimento é igual a 3,98 [DAIKIN, 2006].

4.2. EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA (*BASELINE*)

O edifício de referência ou *baseline* é desenvolvido de acordo com as especificações do apêndice G da Norma ASHRAE 90.1-2007.

As dimensões do prédio *baseline* devem ser as mesmas do prédio proposto, porém com as seguintes alterações: superfícies opacas (laje, paredes e piso) com resistência térmica mínima especificada pela ASHRAE 90.1, fachadas sem sombreamentos, a relação área envidraçada e área bruta de parede deve ser no máximo 40%, as janelas não devem possuir repartições e sombreamento interno, o sistema de ar-condicionado é composto por resfriadores de líquido com condensação a água, *fan-coils*, bombas de água e torres de resfriamento.

O desempenho do edifício *baseline* é obtido simulando-o em quatro orientações, ou seja, seu comportamento é analisado simulando o edifício com a orientação original e rotacionado 90° , 180° e 270° . Com isso, faz-se uma média das quatro simulações para obter o consumo energético do prédio.

4.2.1. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Neste item, os elementos construtivos que compõe o edifício *baseline* são descritos.

As superfícies opacas são dimensionadas para ter um coeficiente U estabelecido pela Norma ASHRAE 90.1-2007. O coeficiente U, em $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$, é dado por:

$$U = \frac{1}{\sum R} \quad (4.3)$$

onde $\sum R$ é o somatório das resistências térmicas dos elementos construtivos, em $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

O coeficiente U das paredes internas e externas do edifício de referência deve ser igual a $0,705 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$. A composição dessas superfícies é reboco (25 mm), duas placas de gesso acar-

tonado (16 mm cada) e isolamento de lã de vidro (38,1 mm). A laje de cobertura é composta por isolamento de lã de vidro (22,5 mm), concreto leve (100 mm), uma estrutura metálica e possui um coeficiente U igual a 1,240 W/m².K. Os entre-pisos são compostos por carpete (10 mm), concreto leve (100 mm), lã de vidro (74,3 mm) e possuem um coeficiente U igual a 0,390 W/m².K. O piso térreo do edifício possui 150 mm de concreto e 17,7 mm de lã de vidro. Neste caso, o somatório das resistências térmicas da equação 4.1 leva em consideração a resistência térmica de 500 mm de solo.

Os vidros externos têm uma espessura de 3 mm e um coeficiente U igual a 4,26 W/m².K [ASHRAE 90.1, 2007].

4.2.2. ZONAS TÉRMICAS

As zonas térmicas do edifício *baseline* possuem o mesmo projeto e configurações das zonas térmicas do edifício proposto.

4.2.3. CARGAS TÉRMICAS INTERNAS

As cargas térmicas internas (sistema de iluminação, ocupação interna e equipamentos elétricos) do edifício base são equivalentes às do edifício proposto.

4.2.4. SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

O sistema de condicionamento de ar utilizado é do tipo expansão indireta, com um resfriador de líquido (*chiller*), COP igual a 4,45 [ASHRAE, 2007], condensação a água, *fan-coils* e caixas motorizadas de vazão de ar variável. O aquecimento é feito por resistências elétricas. Utilizam-se motobombas para a água gelada (circuito primário e secundário) e para a água de condensação.

4.3. SIMULAÇÕES

A primeira parte do presente trabalho é avaliar se o custo energético total do edifício proposto é 10%, pelo menos, menor que o custo do consumo imposto pelo edifício de referência, atendendo, assim, ao pré-requisito 2, opção 1, do programa de certificação LEED. Caso contrário, serão feitas modificações em elementos internos e parâmetros construtivos do edifício proposto para que a demanda por energia elétrica seja reduzida. Para isso, simula-se o prédio proposto e comparam-se os resultados com os do prédio de referência.

Avalia-se, também, o total de horas em que a temperatura das zonas térmicas não satisfaz a temperatura programada de resfriamento e aquecimento. A soma destas horas não deve ser maior que 300 horas no ano para toda a edificação [ASHRAE, 2007].

A segunda parte é fazer mudanças em alguns parâmetros da edificação para atingir níveis de desempenho energético maiores que o estabelecido pela primeira parte. Assim, são obtidos créditos, pontos extras creditados de acordo com percentual de energia economizado.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo apresenta-se uma análise dos resultados obtidos pelas simulações.

5.1. EDIFÍCIO DE REFERÊNCIA

Neste item faz-se a análise das simulações de quatro rotações do edifício de referência (0°, 90°, 180° e 270°) sobre a orientação original proposta.

Os resultados do consumo energético médio anual do prédio, em kWh, podem ser vistos na Tabela 5.1. O consumo do ar-condicionado (HVAC) é a soma dos consumos de Resfriamento, Aquecimento, Ventiladores, Bombas e Torre de Resfriamento. A soma dos consumos de Equipamentos Internos, Iluminação Interna e Iluminação Externa representa o consumo da Edificação. O Consumo Total do edifício é a soma do Edifício e HVAC.

Tabela 5.1 – Resultados da simulação das quatro orientações do edifício *baseline*

Consumo anual [KWh]	<i>Baseline</i> 0°	<i>Baseline</i> 90°	<i>Baseline</i> 180°	<i>Baseline</i> 270°	Média
Resfriamento	124741,3	138051,0	125524,8	138323,9	131660,3
Aquecimento	48395,8	45211,9	49521,7	45215,8	47086,3
Ventiladores	48242,4	49855,2	48659,1	50302,1	49264,7
Bombas	44033,2	49105,6	44221,5	49357,3	46679,4
Torre de Resfriamento	1917,1	2006,0	1929,9	1992,6	1961,4
HVAC	267329,8	284229,7	269857,0	285191,7	276652,1
Equipamentos Internos	73403,8	73403,8	73403,8	73403,8	73403,8
Iluminação Interna	180190,5	180190,5	180190,5	180190,5	180190,5
Iluminação Externa	5699,2	5699,2	5699,2	5699,2	5699,2
Edificação	259293,5	259293,5	259293,5	259293,5	259293,5
Consumo Total	526623,3	543523,2	529150,5	544485,2	535945,5
Consumo anual/m² [kWh/m².ano]	85,9	88,6	86,3	88,8	87,4

Avaliando-se o item Consumo Total da Tabela 5.1, os edifícios que possuem os piores desempenhos energéticos são *baseline* 90° e *baseline* 270°, pois as maiores fachadas estão voltadas para leste-oeste. Os consumos energéticos dos Equipamentos Internos, Iluminação Interna e Externa possuem o mesmo valor, pois as cargas internas e o sistema de iluminação são os mesmos para as quatro edificações.

O consumo anual/m² mostra de uma maneira mais clara o consumo de energia elétrica em cada metro quadrado do prédio durante um ano.

A Figura 5.1 ilustra o percentual de cada item avaliado para o edifício de referência.

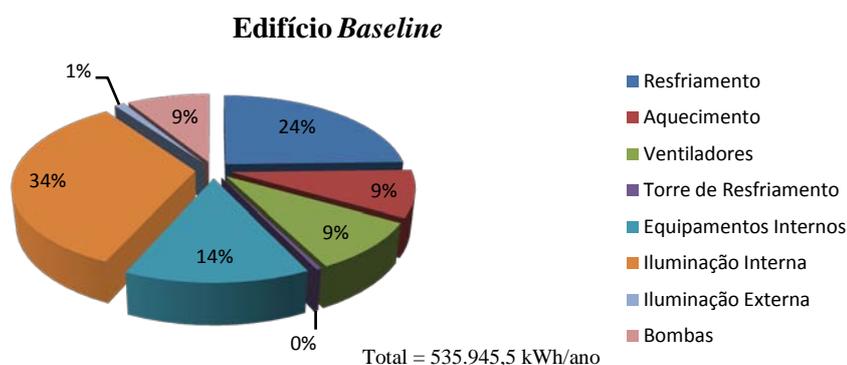


Figura 5.1 – Percentual de cada fator no consumo total de energia para o edifício *baseline*

Verifica-se, através da Figura 5.1, que o item que apresenta maior consumo energético é a Iluminação Interna, seguido pelo consumo de Resfriamento.

O total de horas em que a temperatura dos ambientes não satisfaz a temperatura programada do edifício base são 275,2 horas; 31,1 para aquecimento e 244,1 para resfriamento. Estes valores são uma média das quatro configurações do *baseline*, e atendem a Norma ASHRAE 90.1.

5.2. EDIFÍCIO PROPOSTO

Os resultados do consumo energético anual do edifício proposto, em kWh, são apresentados na Tabela 5.2. O item HVAC representa o gasto com Resfriamento, Aquecimento e Ventiladores. O gasto de energia dos Equipamentos Internos, Iluminação Interna e Externa é representado no item Edificação. O Consumo Total é a soma dos itens HVAC e Edificação.

Tabela 5.2 – Resultados da simulação do edifício proposto

Item	Consumo anual [kWh]
Resfriamento	97968,1
Aquecimento	27227,9
Ventiladores	41237,1
Bombas	0
Torre de Resfriamento	0
HVAC	166433,1
Equipamentos Internos	73403,8
Iluminação Interna	180190,5
Iluminação Externa	5699,2
Edificação	259293,5
Consumo Total	425726,5
Consumo anual/m² [kWh/m².ano]	69,4

Como o sistema de condicionamento de ar do prédio proposto é do tipo VRF, os itens torre de resfriamento e bombas não possuem valores, pois são necessários somente no caso do sistema de condicionamento de ar do prédio de referência.

A Figura 5.2 mostra o percentual de cada item avaliado para o edifício proposto.

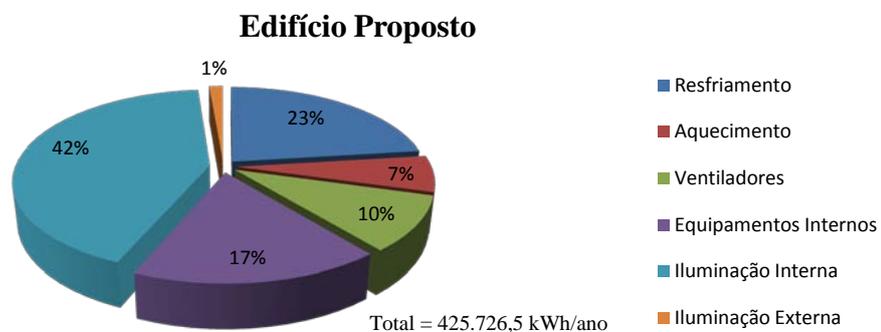


Figura 5.2 – Percentual de cada fator no consumo total de energia para o prédio proposto

Analisando-se a Figura 5.2, nota-se que o sistema de iluminação interna é responsável por 42% do consumo total da edificação.

O comportamento do consumo energético mensal de cada um dos itens avaliados é apresentado no gráfico da Figura 5.3.

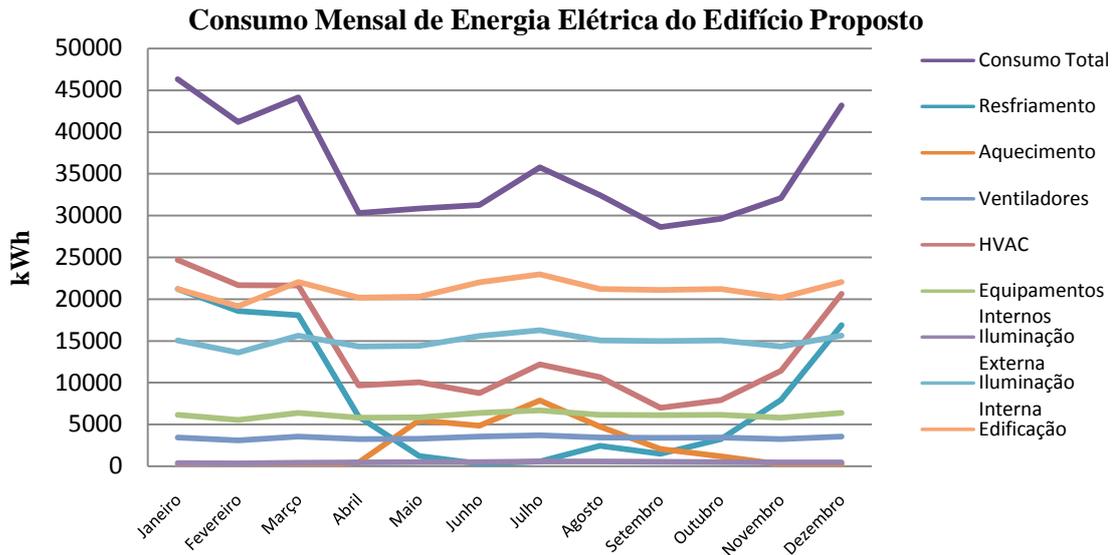


Figura 5.3 – Consumo mensal de energia do prédio proposto

Observa-se, na Figura 5.3, que o consumo é maior nos meses de dezembro a março devido ao uso do ar-condicionado (resfriamento). Nos meses de abril a outubro o consumo elétrico devido ao aquecimento aumenta, e o consumo de resfriamento reduz consideravelmente. Os gastos referentes aos Equipamentos Internos e Iluminação Interna e Externa têm uma pequena variação devido ao tempo que permanecem ligados. Por exemplo, no inverno o tempo de acionamento do sistema de Iluminação Externa é maior que no verão.

O total de horas em que a temperatura das zonas térmicas não satisfaz a temperatura programada do prédio proposto é 135,4 horas (98,7 horas para aquecimento e 36,7 para resfriamento), menor que às 300 horas possíveis estipuladas pela ASHRAE 90.1.

5.3. COMPARAÇÃO ENTRE CONSUMO DO BASELINE E PROPOSTO

Realizadas as simulações dos dois edifícios, comparam-se os resultados obtidos para verificar se o edifício proposto atende ao pré-requisito 2 do programa de certificação LEED. A Figura 5.4 traz a comparação, entre os dois edifícios (*baseline* e proposto), do consumo energético de cada item estudado.

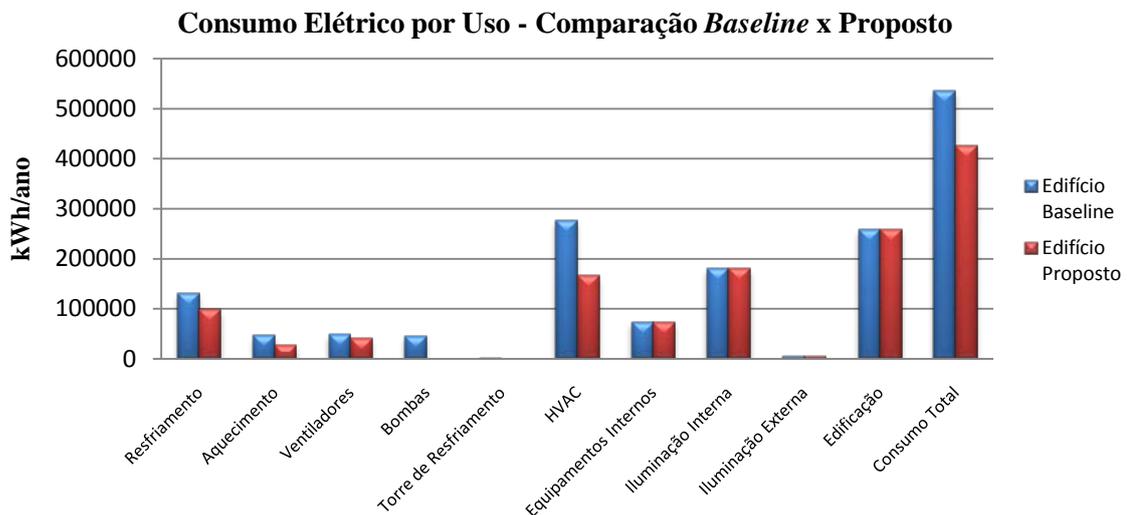


Figura 5.4 – Comparação do consumo energético do prédio *baseline* e proposto

Analisando-se a Figura 5.4, nota-se que o consumo de energia elétrica anual dos Equipamentos Internos e Iluminação Interna e Externa são iguais nos dois edifícios. Isso porque as potências instaladas de ambas as edificações são iguais, modeladas segundo dados da Norma ASHRAE 90.1.

O gasto de energia com resfriamento no prédio proposto é menor que no de referência devido à eficiência do sistema de ar-condicionado. No caso do aquecimento, o sistema do edifício *baseline* consome mais, pois possui aquecimento por resistência elétrica, menos eficiente que o ciclo reverso (caso do sistema de aquecimento do edifício proposto). Para ventiladores, o edifício base gasta mais, pois a pressão dos *fan-coils* é maior que a pressão dos *splits VRV/VRF*, além da existência das caixas VAV motorizadas. O prédio *baseline* possui, também, bombas e torre de resfriamento, que o prédio proposto não tem.

O item Edificação possui o mesmo valor nos dois edifícios, pois as potências dos Equipamentos Internos, Iluminação Interna e Externa são as mesmas.

Nota-se que o Consumo Total do edifício base é bem maior que o proposto. Essa análise é detalhada na Tabela 5.3. O item HVAC representa o gasto de Resfriamento, Aquecimento, Ventiladores, Bombas e Torre de Resfriamento. O gasto de energia dos Equipamentos Internos, Iluminação Interna e Iluminação Externa é representado no item Edificação. O Consumo Total é a soma dos itens HVAC e Edificação.

Tabela 5.3 – Comparação do consumo de energia elétrica dos edifícios *baseline* e proposto

Item	Consumo anual [kWh] (Edifício <i>Baseline</i>)	Consumo anual [kWh] (Edifício Proposto)	Economia
Resfriamento	131660,3	97968,1	26%
Aquecimento	47086,3	27227,9	42%
Ventiladores	49264,7	41237,1	16%
Bombas	46679,4	0	100%
Torre de Resfriamento	1961,4	0	100%
HVAC	276652,1	166433,1	27%
Equipamentos Internos	73403,8	73403,8	0%
Iluminação Interna	180190,5	180190,5	0%
Iluminação Externa	5699,2	5699,2	0%
Edificação	259293,5	259293,5	0%
Consumo Total	535945,5	425726,5	21%
Consumo anual/m ² [kWh/m ² .ano]	87,4	69,4	21%

Analisando-se a linha do Consumo Total da Tabela 5.3, verifica-se que a economia de energia do prédio proposto comparado com o *baseline* é de 21%. Portanto, demonstrou-se uma redução de mais de 10% dos custos energéticos associados ao projeto, comparando-se com o prédio base.

5.4. MELHORIA DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DO EDIFÍCIO PROPOSTO

A segunda parte do presente trabalho é alcançar níveis maiores de eficiência energética do que os especificados pelo pré-requisito 2 do LEED.

As modificações realizadas para melhorar o desempenho do edifício proposto são detalhadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Modificações realizadas para melhorar a eficiência energética

Item	Característica	Edifício Proposto	Edifício Melhorado
Vidro	Espessura (mm)	3	6
	Transmitância Solar	0,85	0,11
	Condutividade Térmica (W/m.K)	0,9	0,9
Proteção Interna	Acionamento Automático	não	sim
	Espessura (mm)	5	5
	Transmitância Solar	0,4	0,1
	Refletância Solar	0,5	0,5
	Condutividade Térmica (W/m.K)	0,1	0,1
Superfícies Opacas (paredes externas e internas, piso, entre-pisos e forro)	Cor	média	clara
	Absortância Solar	0,5	0,3
	Isolamento	não	sim*
<i>Dimerização</i>		não	sim

* lâ de vidro (condutividade térmica 0,036 W/m.K e espessura 20 mm).

As janelas do edifício melhorado possuem proteções internas com acionamento automático. O *setpoint* de operação é igual a 600 W/m², ou seja, os anteparos são fechados quando a incidência solar ultrapassa 600 W/m² no plano da janela, e abertos quando a mesma está abaixo do *setpoint*.

A *dimerização* é um sistema que controla a potência das lâmpadas num processo inversamente proporcional a luminosidade no ambiente, ou seja, reduz de forma gradual a potência da lâmpada quando a incidência solar no ambiente aumenta. Os sensores possuem *setpoint* igual a 500 lux, à 80 cm do piso, em dois pontos na sala.

Os resultados do consumo energético do prédio aperfeiçoado são apresentados na Tabela 5.5. O item HVAC representa o gasto de Resfriamento, Aquecimento e Ventiladores. O gasto de energia dos Equipamentos Internos, Iluminação Interna e Iluminação Externa é representado no item Edificação. O Consumo Total é a soma dos itens HVAC e Edificação. Faz-se, também, uma comparação entre o consumo do edifício proposto e o edifício melhorado para avaliar a economia determinada pelas modificações realizadas no prédio.

Tabela 5.5 – Resultados do edifício melhorado e a comparação com o edifício proposto

Item	Consumo anual [kWh] (Edifício Proposto)	Consumo anual [kWh] (Edifício Melhorado)	Economia
Resfriamento	97968,1	62391,7	36%
Aquecimento	27227,9	27750,2	-2%
Ventiladores	41237,1	28432,9	31%
HVAC	166433,1	118574,8	29%
Equipamentos Internos	73403,8	73403,8	0%
Iluminação Interna	180190,5	120720,0	33%
Iluminação Externa	5699,2	5699,2	0%
Edificação	259293,5	199823,0	23%
Consumo Total	425726,5	318397,7	25%
Consumo anual/m ² [kWh/m ² .ano]	69,4	51,9	25%

Nota-se, através da Tabela 5.5, que as modificações realizadas no edifício proposto possibilitaram uma economia total de energia de 25%. O consumo do sistema de iluminação reduziu por causa da *dimerização*, haja vista que a configuração do sistema de iluminação é igual para todas as edificações. O menor consumo de energia nas lâmpadas diminuiu a carga térmica interna, e consequentemente o consumo do ar-condicionado.

A Figura 5.5 ilustra o percentual de energia gasto por cada item avaliado no consumo total de energia da edificação melhorada.

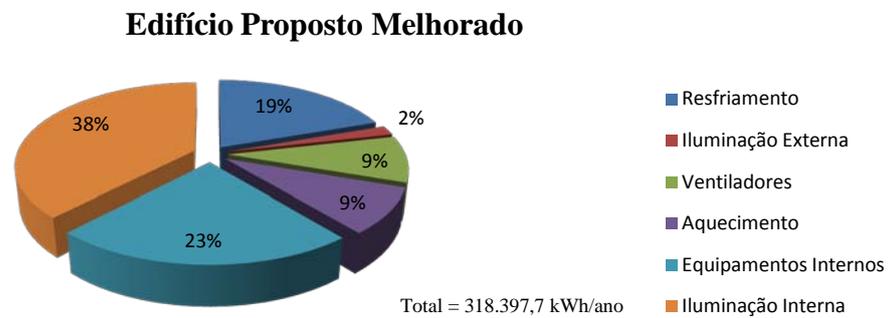


Figura 5.5 – Percentual de cada item avaliado no consumo total de energia para o edifício melhorado

O gráfico da Figura 5.5 mostra que houve uma melhor distribuição do consumo entre os elementos consumidores do prédio melhorado.

Para obtenção de créditos, segundo o crédito 1 do LEED, compara-se o consumo do prédio melhorado com o consumo do edifício *baseline*. Essa análise é detalhada na Tabela 5.6. O item HVAC representa o gasto de Resfriamento, Aquecimento, Ventiladores, Bombas e Torre de Resfriamento. O gasto de energia dos Equipamentos Internos, Iluminação Interna e Iluminação Externa é representado no item Edificação. O Consumo Total é a soma dos itens HVAC e Edificação.

Tabela 5.6 – Comparação dos valores do consumo de energia elétrica dos edifícios *baseline* e melhorado

Item	Consumo anual [kWh] (Edifício <i>Baseline</i>)	Consumo anual [kWh] (Edifício Melhorado)	Economia
Resfriamento	131660,3	62391,7	53%
Aquecimento	47086,3	27750,2	41%
Ventiladores	49264,7	28432,9	42%
Bombas	46679,4	0	100%
Torre de Resfriamento	1961,4	0	100%
HVAC	276652,1	118574,8	57%
Equipamentos Internos	73403,8	73403,8	0%
Iluminação Interna	180190,5	120720,0	33%
Iluminação Externa	5699,2	5699,2	0%
Edificação	259293,5	199823,0	23%
Consumo Total	535945,5	318397,7	41%
Consumo anual/m ² [kWh/m ² .ano]	87,4	51,9	41%

A Tabela 5.6 mostra que o consumo energético do prédio melhorado é menor, em relação ao prédio base, em todos os itens avaliados, salvo equipamentos e iluminação externa.

A redução do consumo total de energia elétrica do prédio melhorado é 41%. Esse aperfeiçoamento no desempenho energético do edifício faz com que sejam creditados 15 pontos para a certificação, segundo crédito 1, opção 1, do programa de certificação LEED.

No gráfico da Figura 5.6 comparam-se os consumos de energia elétrica do prédio *baseline* e o prédio melhorado.

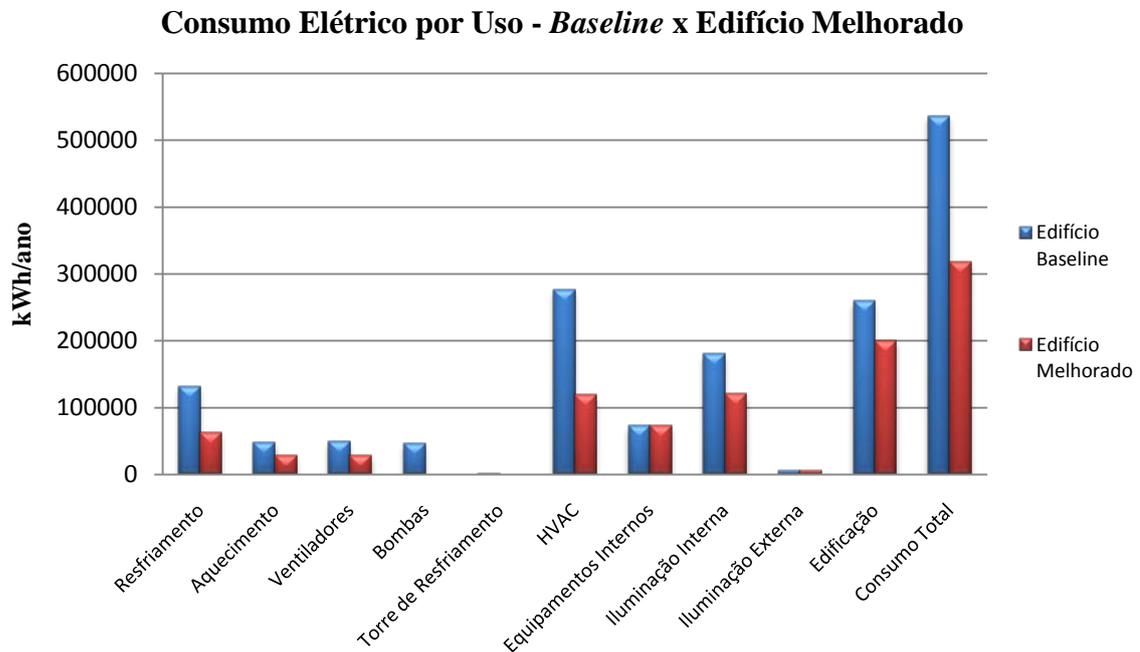


Figura 5.6 – Comparação do consumo energético dos prédios melhorado e *baseline*

O total de horas em que a temperatura das zonas térmicas não satisfaz a temperatura programada do prédio melhorado é 171,7 horas (101,5 horas para aquecimento e 70,2 para resfriamento), menor que às 300 horas possíveis estipuladas pela ASHRAE 90.1.

6. CONCLUSÕES

A simulação computacional mostra-se uma potente ferramenta para o estudo de edificações, possibilitando melhorias no projeto e promovendo, assim, vantagem econômica que se estende por toda a vida útil da construção. Com o *software EnergyPlus* é possível fazer mudanças no edifício e avaliar a influência que se gera sobre o consumo energético em escala anual.

O item do LEED responsável pela mais alta pontuação do programa são os sistemas que visam à eficiência energética do edifício. Fazendo-se um bom planejamento da orientação da edificação, avaliando-se os aspectos arquitetônicos, utilizando-se materiais apropriados e equipamentos modernos e eficientes é possível reduzir o gasto com energia elétrica.

Realizando-se a análise termo-energética do edifício proposto, o consumo energético total reduziu 41%, tornando-o energeticamente eficiente. Todas as alterações foram feitas com materiais e tecnologias existentes, como isolamento térmico nas paredes e forro, vidros mais espessos, proteções internas com acionamento automático e sistema de controle de iluminação.

As sugestões para continuidade do trabalho são a adequação do edifício para os outros pré-requisitos e créditos do LEED e a análise da viabilidade econômica da certificação do prédio proposto.

REFERÊNCIAS

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., **Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**, SI Edition. Atlanta, USA, 2007.

DAIKIN. **Engineering Data VRV III, Heat Pump**. ED 34 - 645B, Daikin Industries. Japão, 2006.

ENERGYPLUS. *EnergyPlus Input and Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*, Version 3.0., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2008.

ENERGYPLUS. Software. Disponível em <http://www.energyplus.gov>. Acesso em 29/07/2009.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br>. Acesso em 02/10/2009.

PROCEL EDIFICA, Programa de Eficiência Energética em Edificações. **Regulamentação para Etiquetagem Voluntária do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**. Florianópolis, 2008.

USGBC, U.S. Green Building Council. **LEED 2009 for New Construction and Major Renovations Rating System**. Washington, USA, 2008. Disponível em <http://www.usgbc.org/leed>. Acesso em 29/09/2009.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Beyer, P. O..**Conforto Térmico**. Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2002.

Beyer, P. O..**Refrigeração**. Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2003.

Carvalho, R. O. de, 2009.“**Avaliação do Custo Energético Anual de uma Edificação Comercial Utilizando um Software de Simulação**”, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, DEMEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 30p.

INCROPERA, Frank P.; DEWIT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

Marangoni, R. C., 2007. “**Avaliação de Edificação para Desenvolvimento Sustentável Edifícios Verdes**”, Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 56p.

Pereira, F. L., 2005.“**Determinação Computacional da Influência de Parâmetros Físicos no Comportamento Termoenergético de uma Edificação**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 178p.

APÊNDICE B – SCHEDULES

Conforme citado no capítulo 4 (pág. 6), os *schedules* de ar-condicionado, ocupação interna, iluminação externa e interna são mostrados nas Tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4.

Tabela B.1 – *Schedule* ar-condicionado

Período	Dias da Semana	Sábado	Domingo e Feriado
00:00 às 07:00	0%	0%	0%
07:00 às 13:00	100%	100%	0%
13:00 às 19:00	100%	0%	0%
19:00 às 00:00	100%	0%	0%

Tabela B.4 – *Schedule* ocupação interna

Período	Dias da Semana	Sábado	Domingo e Feriado
00:00 às 07:00	0%	0%	0%
07:00 às 08:00	5%	10%	0%
08:00 às 09:00	75%	10%	0%
09:00 às 12:00	90%	10%	0%
12:00 às 15:00	80%	0%	0%
15:00 às 16:00	45%	0%	0%
16:00 às 17:00	15%	0%	0%
17:00 às 18:00	5%	0%	0%
19:00 às 20:00	15%	0%	0%
20:00 às 21:00	20%	0%	0%
21:00 às 22:00	10%	0%	0%
22:00 às 00:00	0%	0%	0%

Tabela B.2 – *Schedule* iluminação interna

Período	Dias da Semana	Sábado	Domingo e Feriado
00:00 às 07:00	2%	2%	2%
07:00 às 08:00	30%	5%	2%
08:00 às 09:00	85%	15%	2%
09:00 às 12:00	95%	15%	5%
12:00 às 15:00	80%	5%	5%
15:00 às 16:00	70%	5%	5%
16:00 às 18:00	50%	2%	2%
18:00 às 21:00	35%	2%	2%
21:00 às 22:00	30%	2%	2%
22:00 às 00:00	2%	2%	2%

Tabela B.3 – *Schedule* iluminação externa

Época do Ano	Período	Dias da Semana	Sábado	Domingo e Feriado
21/12 a 21/03	05:00 às 19:00	0%	0%	0%
	19:00 às 05:00	100%	100%	100%
22/03 a 20/06	06:00 às 18:00	0%	0%	0%
	18:00 às 06:00	100%	100%	100%
21/06 a 21/09	07:00 às 17:00	0%	0%	0%
	17:00 às 07:00	100%	100%	100%
22/09 a 20/12	06:00 às 18:00	0%	0%	0%
	18:00 às 06:00	100%	100%	100%

APÊNDICE C – JANELAS

Este apêndice mostra a configuração e dimensão das janelas utilizadas no edifício.

A Figura C.1 mostra as janelas presentes no primeiro e segundo pavimentos. As aberturas possuem altura de 2,5 m, divididas horizontalmente em três partes, duas faixas de basculantes de 1 x 0,72 m cada e uma parte fixa de 0,5 x 0,72 m. A janela 2 também é utilizada no *hall* de entrada do edifício.

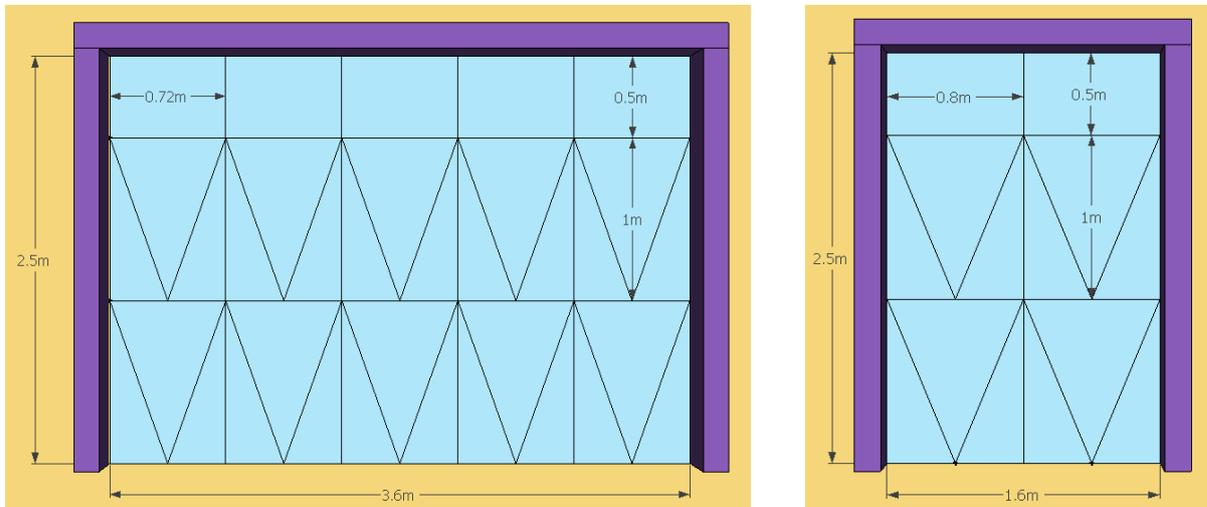


Figura C.1 – Janelas 1 e 2, presentes no primeiro e segundo pavimentos

A Figura C.2 ilustra as janelas presentes no terceiro e quarto pavimentos. A altura das aberturas é 1,5 m, divididas horizontalmente em duas partes, basculantes de 1 x 0,72 m e outra parte fixa de 0,5 x 0,72 m.

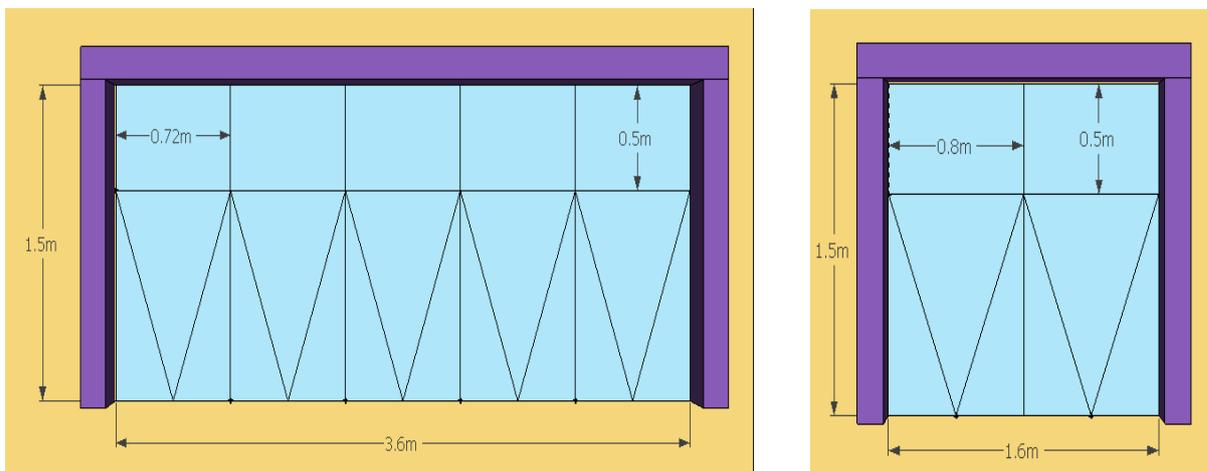


Figura C.2 – Janelas 3 e 4, presentes no terceiro e quarto pavimentos

As basculantes são do tipo maxi-ar. Todos os vidros são claros com as propriedades termofísicas apresentadas na Tabela A.2 do anexo.

ANEXO – PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS E DOS VIDROS

Neste anexo são detalhados os materiais utilizados no edifício, conforme citado no capítulo 4 (pág. 5). Os valores apresentados na Tabela A.1 foram extraídos do Manual *Energy-Plus*, 2009.

Tabela A.1 – Propriedades dos elementos construtivos utilizados no edifício

Material	k	ρ	c_p	ε	α_{solar}	$\alpha_{visível}$
Tijolo Furado	0,89	1960	790	0,9	0,6	0,6
Tijolo Maciço	1,9	2100	800	0,9	0,7	0,7
Reboco	0,72	1856	840	0,9	0,5*	0,5*
Concreto para Forro	1,5	1280	840	0,9	0,6	0,6
Concreto	0,53	1280	840	0,9	0,7	0,7
Concreto Pesado para Piso	1,95	2240	900	0,9	0,7	0,7
Carpete	0,06	288	1380	0,9	0,7	0,7
Isolamento Lã de Vidro	0,036	140	960	0,9	0,3	0,3
Gesso Acartonado	0,58	800	1090	0,9	0,7	0,7
Telha	0,58	1900	1000	0,9	0,3	0,3

* prédio proposto e *baseline*.

onde k é a condutividade térmica, em W/m.K, ρ é a massa específica, em kg/m³, c_p é o calor específico, em J/kg.K, ε é a emissividade térmica, α_{solar} é a absorptância solar do material, $\alpha_{visível}$ é a absorptância visível do material.

Tabela A.2 – Propriedades termofísicas dos vidros

Propriedade Termofísica	Edifício Proposto e <i>Baseline</i>	Edifício Melhorado
e	3	6
$\tau_{solar, \perp}$	0,837	0,11
$\rho_{solar f, \perp}$	0,075	0,27
$\rho_{solar b, \perp}$	0,075	0,43
$\tau_{visível, \perp}$	0,898	0,14
$\rho_{visível f, \perp}$	0,081	0,31
$\rho_{visível b, \perp}$	0,081	0,35
K	0,9	0,9

onde e é a espessura do vidro, em mm, $\tau_{solar, \perp}$ é a transmitância solar para uma incidência normal de luz na superfície, $\rho_{solar f, \perp}$ é a refletividade solar para uma incidência normal de luz na parte externa da superfície, $\rho_{solar b, \perp}$ é a refletividade solar para uma incidência normal de luz na parte interna da superfície, $\tau_{visível, \perp}$ é a transmitância visível para uma incidência normal de luz na superfície, $\rho_{visível f, \perp}$ é a refletividade visível para uma incidência normal de luz na parte externa da superfície, $\rho_{visível b, \perp}$ é a refletividade visível para uma incidência normal de luz na parte interna da superfície e K é a condutividade térmica, em W/m.K.