Rodrigo de Castro Dantas Cavalcante

Simulação energética para análise da arquitetura de edifícios de escritório além da comprovação de conformidade com códigos de desempenho

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientador: Prof. Dr. Ualfrido Del Carlo

São Paulo

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E-MAIL: rcdc81@gmail.com

Cavalcante, Rodrigo de Castro Dantas

C376s Simulação energética para análise da arquitetura de edifícios de escritório além da comprovação de conformidade com códigos de desempenho / Rodrigo de Castro Dantas Cavalcante. São Paulo: 2010.

135 p.: il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) - FAUUSP.

Orientador: Ualfrido Del Carlo

1. Energia – Desempenho 2. Energia – Simulação computacional 3. Edifícios de escritórios – São Paulo 4. Programa EnergyPlus I.Título

CDU 043:620.9

Dedicatória

À equipe do Laboratório de conforto ambiental e eficiência energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Agradecimentos

Ao professor Ualfrido Del Carlo, pela atenção dispensada e pelo apoio, fundamental para a conclusão da dissertação.

Às professoras Marcia Peinado Alucci e Joana Carla Soares Gonçalves, pela confiança e pelas críticas à pesquisa.

Aos colegas e amigos Fernando Simon Westphal, Ricardo Antônio do Espírito Santo Gomes, Thais Aya Hassan Inatomi, Helena Kraszczuk e Letícia de Oliveira Neves, pela companhia e pelo conhecimento compartilhado.

Ao Centro de Tecnologia de Edificações, pela oportunidade de trabalhar com simulação computacional de desempenho térmico e energético de edifícios.

Aos pesquisadores, alunos e demais professores do laboratório que de alguma maneira contribuíram para o meu desenvolvimento.

À minha família, pelo amor e cuidado.

À minha esposa, pela compreensão e força em todos os momentos.

Resumo

Cavalcante, Rodrigo de Castro Dantas. Simulação energética para análise da arquitetura de edifícios de escritório além da comprovação de conformidade com códigos de desempenho. 135 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

No Brasil e em São Paulo, a ASHRAE Standard 90.1 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings ganhou rápida aceitação nos últimos anos. A norma é referenciada pelo sistema de certificação Leadership in Energy and Environmental Design - LEED para estabelecer padrões mínimos de desempenho energético. Apesar do desenvolvimento de atividade de consultoria para comprovação de conformidade com esse código, a consultoria tem se limitado a intervir no projeto de arquitetura após sua concepção. A fim de investigar a influência da arquitetura no desempenho de edifícios de escritório e justificar a consultoria desde as primeiras etapas do projeto, o desempenho de uma série de modelos é estimado com auxílio da ferramenta de simulação computacional EnergyPlus. As alternativas avaliadas incluem diferentes percentagens de área de fachada envidraçada, propriedades ópticas e térmicas dos fechamentos transparentes, persianas automatizadas, orientação do edifício e proporções do pavimento tipo. Os resultados comprovaram a influência da arquitetura no desempenho energético de edifícios de escritório. Portanto, as decisões tomadas durante a fase de concepção do projeto têm impacto considerável no desempenho final do edifício e, apesar do tempo e dos esforços necessários, devem ser estudadas.

Palavras-chave: simulação energética, envoltória do edifício, programa EnergyPlus.

Abstract

Cavalcante, Rodrigo de Castro Dantas. Building performance simulation for analysis of the architecture of office buildings beyond code compliance checking. 135 p. Dissertation (Master). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

In Brazil and Sao Paulo, ASHRAE Standard 90.1 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings has rapidly gained acceptance in recent years. The standard is referred by the Leadership in Energy and Environmental Design - LEED rating system to set minimum energy performance levels. Although consulting activity was developed to demonstrate compliance to the code, it has been limited to intervene in the architectural design after its conception. With the aim of investigating the influence of architecture on the performance of office buildings and justify the consultancy since early design stages, the performance of a set of models is estimated using EnergyPlus computer simulation tool. The assessed alternatives include different Window-to-Wall Ratios - WWR, optical and thermal properties of glazing systems, automated roller shades, building orientation and proportions of typical floors. The results confirmed the influence of architecture on the energy performance of office buildings. Therefore, decisions taken during early design stages have considerable impact on the final performance of buildings and, despite the time and effort involved, should be studied.

Keywords: energy simulation, building envelope, EnergyPlus software.

Lista de figuras

Figuras 1. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #1

Figuras 2. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #2

Figuras 3. Planta e modelo espacial de pavimento tipo do Proposed Building para o estudo de caso #3

Figuras 4. Planta e modelo espacial de pavimento tipo Proposed Building para o estudo de caso #4

Figuras 5. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #5

Figuras 6. Planta e modelo espacial de pavimentos tipo Proposed Building para o estudo de caso #6

Figuras 7. Planta e modelo espacial de pavimentos tipo do Proposed Building para o estudo de caso #7

Figuras 8. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #8

Figuras 9. Planta e modelo espacial de pavimentos tipo do Proposed Building para o estudo de caso #9

Figuras 10. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #10

Figura 11 Módulos do EnergyPlus. Fonte: LBNL (2007)

Figura 12 Esquema de simulação integrada do programa. Fonte: LBNL (2007)

Figura 13 Interação dos circuitos do sistema de climatização. Fonte: LBNL (2007)

Figuras 14a a 14e Contribuições da luz difusa para a iluminância interna. Fonte: Winkelman e Selkowitz (1985)

Figuras 14f a 14j Contribuições da luz direta para a iluminância interna. Fonte: Winkelman e Selkowitz (1985)

Figuras 15a a 15e Contribuições da luz direta e difusa para a iluminância interna em caso com persiana translúcida. Fonte: Winkelman e Selkowitz (1985)

Figura 16 Temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa do ar externo (UR) para as 8760 horas do arquivo climático do ano típico da cidade de São Paulo

Figura 17. Zoneamento térmico dos modelos com core central

Figura 18. Zoneamento térmico dos modelos com core lateral

Figura 19. Zoneamento térmico dos modelos com átrio

Figuras 20a a 20e. Padrões de uso e de ocupação

Figura 21. Gráfico comparativo de consumo anual de energia de todos os modelos

Figura 22 Comparação entre custo anual dos modelos (Baseline) com o custo de seus modelos de referência

Figura 23. Gráfico comparativo de consumo anual de energia para modelos Baseline

Figura 24. Gráfico comparativo de consumo anual de energia para modelos com vidro com fator solar de 25% e sem aproveitamento de iluminação natural

Figura 25. Gráfico comparativo de consumo anual de energia para modelos com vidro com fator solar de 25% e com dimerização das luminárias próximas ás fachadas

Figura 26. Planta e modelo espacial da alternativa com core central “CC5_0” e WWR de 40%

Figura 27. Consumo anual de energia para variações do modelo com core central "CC5_0"

Figura 28. Planta e modelo espacial da alternativa com core lateral “CL3_90” e WWR de 40%

Figura 29. Planta e modelo espacial da alternativa com core central “CC3_135” e WWR de 65%

Figura 30. Planta e modelo espacial da alternativa com core central “CC3_90” e WWR de 40%

Figura 31. Planta e modelo espacial da alternativa com core lateral “CL9_225” e WWR de 65%

Figura 32. Planta e modelo espacial da alternativa com átrio “A1_0” e WWR de 40%

Lista de tabelas

Tabela 1. Características do estudo de caso #1

Tabela 2. Características do estudo de caso #2

Tabela 3. Características do estudo de caso #3

Tabela 4. Características do estudo de caso #4

Tabela 5. Características do estudo de caso #5

Tabela 6. Características do estudo de caso #6

Tabela 7. Características do estudo de caso #7

Tabela 8. Características do estudo de caso #8

Tabela 9. Características do estudo de caso #9

Tabela 10. Características do estudo de caso #10

Tabela 11. Propriedades ópticas e térmicas do vidro do Baseline Buildng para São Paulo e de vidros simples monolíticos ou laminados utilizados nas simulações. Fonte: Window 5, LBNL.

Tabela 12. Propriedades ópticas e térmicas de opções de vidro duplo com câmara de ar

Tabela 13. Propriedades da persiana. Fonte: Diretório Data Sets, EnergyPlus.

Tabela14. Cargas internas

Tabela 15. Faixas de temperatura operativa ótimas. Fonte: ISO 7730 – 1994

Tabela 16. Desempenho dos modelos com ‘CC3_135” e “CL3_90” para simulações com vidro com fator solar de 25% e sem aproveitamento da iluminação natural

Tabela 17. Desempenho dos modelos com “CL9_225”, “CC3_90” e “A1_0” para simulações com vidro com fator solar de 25% e dimerização das luminárias próximas às fachadas

Tabela 18. Desempenho das variações do modelo “CC5_0” que resultaram no menor e no maior custo anual de energia (sem aproveitamento da iluminação natural)

Tabela 19. Desempenho das variações do modelo “CC5_0” que resultaram no menor e no maior custo anual de energia (com dimerização das luminárias próximas às fachadas)

Tabela 20. Desempenho das variações dos modelos “CL3_90” e “CC3_135” (sem aproveitamento da iluminação natural)

Tabela 21. Desempenho das variações dos modelos “CC3_90”, “CL9_225” e “CA1_0” (com dimerização das luminárias próximas às fachadas)

Lista de siglas e de abreviaturas

ANSI - American National Standard Institute

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc.

CIE – Comission International d'Éclairage

COP – Coefficent of Performance ou coeficiente de desempenho

CTE – Centro de Tecnologia de Edificações

DOE – United States Department of Energy

IBPSA – International Building Performance Simulation Association

IESNA - Illuminating Engineering Society of North America

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Ambiental

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design

LEED CS – LEED for Core and Shell

LPD – Lighting Power Density ou densidade de potência instalada em iluminação

PVB – Polivinil butiral

TMY - Test Meteorological Year

USGBC - United States Green Building Council

UPS - Uninterruptible Power Supply ou fonte de alimentação ininterrupta

VAV – Variable Air Volume ou volume de vazão de ar variável

VRF – Variable Refrigerant Flow ou volume de refrigerante variável

WWR – Window-to-Wall Ratio ou percentagem de área de fechamentos translúcidos de fachada

Sumário

1 Introdução 16
1.1 Apresentação do problema 17
1.2 Objeto da pesquisa 18
1.2 Objetivos da pesquisa 18
1.2.1 Objetivo geral 18
1.2.2 Objetivos específicos 18
1.3 Hipóteses de contorno 18
1.4 Recursos e restrições 19
1.5 Materiais e método 19
1.5.1 Justificativa do método adotado 20
1.6 Estrutura da dissertação 20
2 Simulação de desempenho energético de edifícios 22
2.1 Ferramentas de simulação computacional 22
2.2 Estado da arte em simulação para tomada de decisão de projeto 24
3 Códigos de desempenho energético de edifícios 33
3.1 ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2007 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings 33
3.1.1 Envoltória do edifício 34
3.1.2 Aquecimento, ventilação e condicionamento de ar 36
3.1.3 Serviço de aquecimento de água 38
3.1.4 Sistema elétrico 39
3.1.5 Iluminação 39
3.1.6 Outros equipamentos 41
3.1.7 Seção 11 (Energy Cost Budget) 41
3.1.8 Apêndice G (Performance Rating) 43
3.2 Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos 45
4 Quadro de referência 46
4.1 Sistema voluntário de certificação LEED 46
4.1.1 Pré-requisito de desempenho energético mínimo EAp2 47
4.1.2 Crédito de desempenho energético EAc1 49

4.2 Estudos de caso 49
4.2.1 Estudo de caso 1 49
4.2.2 Estudo de caso 2 52
4.2.3 Estudo de caso 3 55
4.2.4 Estudo de caso 4 61
4.2.5 Estudo de caso 5 64
4.2.6 Estudo de caso 6 67
4.2.7 Estudo de caso 7 70
4.2.8 Estudo de caso 8 74
4.2.9 Estudo de caso 9 77
4.2.10 Estudo de caso 10 81
5 Método de trabalho 86
5.1 O EnergyPlus 86
5.1.1 Visão geral do programa 86
5.1.2 Modelo de céu e cálculo das iluminâncias internas 90
5.2 Modelos 92
5.2.1 Arquivo climático 93
5.2.2 Morfologia dos modelos 94
5.2.3 Propriedades térmicas dos materiais 98
5.2.5 Sistema de condicionamento de ar 100
5.2.6 Cargas internas 100
5.2.7 Conforto térmico dos usuários 101
5.2.8 Padrões de uso 102
5.2.9 Tarifas 106
6 Resultados 107
6.1 Análise comparativa entre diferentes morfologias 107
6.2 Análise comparativa entre variações de envoltória para um mesmo modelo 115
6.3 Análise comparativa entre diferentes morfologias com variações de envoltória 117
7 Considerações finais 122
Referências bibliográficas 127
Bibliografia consultada 133

1 Introdução

Segundo Rogers e Gumuchdjian (1997), as cidades são responsáveis por cerca de três quartos do consumo mundial de energia, a extensão de sua pegada ecológica, ou área além dos limites físicos da cidade e da qual ela depende, cobre praticamente toda a superfície do globo, e a chave para um desenvolvimento sustentável, definido como o esforço contínuo em integrar os três pilares do bem-estar social, prosperidade econômica e proteção do meio ambiente para o benefício das gerações presentes e futuras, estaria em modelos de cidades densas, compactas e livres de periferias de adensamento rarefeito. Embora Lovelock (2006) e outros cientistas contestem a possibilidade de sermos sustentáveis com desenvolvimento, cidades densas podem ser planejadas para serem mais eficientes energeticamente, consumindo e poluindo menos.

Na escala do edifício, os sistemas de avaliação da sustentabilidade na construção civil estabeleceram indicadores de impacto das atividades de obra e de consumo de água, de materiais e de energia. Segundo dados do Green Building Council Brasil, há no país, aproximadamente uma centena de projetos registrados no United States Green Building Council - USGBC. Embora a demanda por edifícios com menor impacto ambiental esteja vinculada ao diferencial competitivo associado à idéia de responsabilidade com o uso racional de recursos, projetos desenvolvidos para comprovação de conformidade com códigos de desempenho apresentarão menor consumo quando em fase de operação se comparados com outras construções do mesmo período.

A fim de investigar a influência da arquitetura no desempenho de edifícios de escritório condicionados artificialmente e justificar a consultoria de eficiência energética desde a

concepção arquitetônica do projeto, o desempenho de uma série de modelos é estimado com auxílio de ferramenta específica simulação computacional.

1.1 Apresentação do problema

No Brasil e em São Paulo, a ASHRAE Standard 90.1-2007 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, norma referenciada pelo sistema de certificação voluntário Leadership in Energy and Environmental Design - LEED para análise do desempenho energético de edifícios, é o código de desempenho cuja aceitação mais cresceu nos últimos anos.

Com relação à arquitetura, a atividade de consultoria para comprovação de conformidade a esse código tem se limitado a intervir no projeto após sua concepção. Isso porque o interesse pela certificação é maior que pela redução do consumo de energia e as economias alcançadas não conseguem sensibilizar investidores, gerenciadores ou outros interessados. Também porque são poucos os profissionais com conhecimento técnico suficiente de desempenho energético de edifícios, razão de não perceberem o potencial do projeto como definidor de estratégias para redução do consumo e custo de energia. Além disso, segundo os procedimentos descritos no apêndice G da norma, para avaliar o desempenho energético esperado para um edifício, os modelos referentes ao edifício a ser avaliado e ao edifício de referência possuem as mesmas proporções. Apesar de avaliar as propriedades térmicas da envoltória, incluindo dispositivos de proteção solar como brises-soleil ou persianas automatizadas, e sua orientação, porque ambos os modelos possuem mesma geometria, a metodologia não bonifica ou penaliza adequadamente projetos como, por exemplo, com átrio central e com ambientes com pouca profundidade, para aproveitamento de iluminação natural, ou com core localizado junto à fachada com

maior incidência de radiação solar, para redução dos ganhos de carga térmica pelos fechamentos translúcidos e consequente redução do consumo de energia para resfriamento.

1.2 Objeto da pesquisa

O objeto da pesquisa é o desempenho energético de estratégias de projeto associadas à envoltória de edifícios de escritório condicionados artificialmente.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal da pesquisa é identificar o potencial de estratégias de eficiência energética associadas à envoltória na redução do consumo e do custo de energia.

1.2.2 Objetivos específicos

As alternativas a serem analisadas incluem percentagem de área de fachada envidraçada - WWR, propriedades ópticas e térmicas dos fechamentos transparentes, aplicação de persianas automatizadas como dispositivos de proteção solar, orientação e proporções da arquitetura do pavimento tipo.

1.3 Hipóteses de contorno

Para demonstração dos objetivos da dissertação, são analisadas variações do pavimento tipo de edifícios de escritório condicionados artificialmente e projetados para serem certificados LEED. Desse modo, não é considerado o consumo de cargas condominiais como de iluminação de garagem e externa, elevadores, bombas de recalque de água, equipamentos de tomada de áreas comuns, exaustão de garagem e de escritório, pressurização de escadas e ventiladores para tomada de ar externo.

1.4 Recursos e restrições

Para embasamento teórico, é feito levantamento de dissertações, teses, artigos de periódicos e normas técnicas pertinentes ao tema de estudo. Também são de fácil acesso os projetos de arquitetura, de sistemas de condicionamento de ar e de iluminação analisados para atividade de consultoria de eficiência energética.

A ferramenta de simulação energética utilizada é de uso gratuito e está disponível em <www.energyplus.gov>. As vantagens do EnergyPlus residem em sua estrutura modular e no fato de seu algoritmo ser de domínio público (LBNL, 2007), permitindo o desenvolvimento de cada módulo por pesquisadores sem que esses tenham que necessariamente dominar toda a ferramenta.

Devido ao elevado número de possíveis combinações de características arquitetônicas relacionadas à envoltória do edifício, há limitação do número de modelos a serem avaliados.

1.5 Materiais e método

A pesquisa inicia-se a partir de atividade de simulação de eficiência energética de edifícios, quando é identificada limitação das decisões de projeto orientadas pela consultoria. Nessa etapa, o embasamento teórico é necessário não apenas para conhecimento do estado da arte em ferramentas de simulação de desempenho térmico e energético de edifícios, como para identificar estudos semelhantes, dedicados à envoltória do edifício e em especial, ao projeto de arquitetura. Dado o problema a ser resolvido, os objetivos do trabalho são delimitados conforme recursos disponíveis e restrições.

Identificadas as variáveis do sistema, ou seja, as características da envoltória a serem analisadas, incluindo padrões arquitetônicos, os objetos concretos, representados pelos projetos, são reduzidos a objetos modelo por meio de descrições textuais, quantitativas e conceituais, passíveis de investigação (Bunge, 1974).

Conforme descrito anteriormente, as alternativas de projeto a serem analisadas são: WWR, propriedades ópticas e térmicas dos fechamentos transparentes, aplicação de persianas automatizadas como dispositivos de proteção solar, orientação e proporções da arquitetura do pavimento tipo. De posse dos objetos modelo, os resultados de desempenho de cada proposta, medidos em consumo e custo de energia, são facilmente obtidos. Por fim, após análise crítica dos resultados, as hipóteses comprovadas podem ser tomadas para prever fenômenos semelhantes presentes em projetos de edifícios de escritório.

1.5.1 Justificativa do método adotado

A respeito da pesquisa em arquitetura e urbanismo, “a abordagem tende a ser holística quando comparada a outras áreas do conhecimento, pois o fenômeno arquitetônico e urbanístico depende disso para a compreensão da sua totalidade e a compreensão das interações entre as partes que o compõem” (Serra, 2006). Apesar do caráter científico da pesquisa e do método empregado para descrever os fenômenos físicos, bem como formular hipóteses para explicá-los, os cenários escolhidos para análise não prescindem de esforço de dedução, resultado da experiência do autor como arquiteto.

1.6 Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo da dissertação apresenta o problema a ser estudado, o objeto da pesquisa, objetivos, hipótese de contorno, recursos, restrições, materiais, método e

justificativa do método adotado. O segundo, de embasamento teórico, discute trabalhos recentes sobre o uso de ferramentas de simulação de desempenho energético de edifícios e introduz a dificuldade de aplicação dessas ferramentas para tomada de decisão de projetos. O terceiro capítulo apresenta a ASHRAE Standard 90.1-2007 e o RTQ-C, Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos, código de desempenho brasileiro em caráter voluntário e vigente desde julho de 2009. O quarto capítulo apresenta quadro de referência de edifícios que estão em busca da certificação LEED e resultados da atividade de consultoria desenvolvida como orientação para o desenvolvimento dos projetos. O quinto capítulo, método de trabalho, apresenta de maneira sucinta a ferramenta de simulação utilizada, as características dos modelos simulados e a forma de apresentação dos resultados. O capítulo seguinte apresenta os resultados obtidos e o último, seguido das referências bibliográficas, as considerações finais do trabalho.

2 Simulação de desempenho energético de edifícios

2.1 Ferramentas de simulação computacional

Para Clark (2004), a ferramenta de simulação representa uma mudança de paradigma no processo de concepção do projeto, tornando-o melhor e mais rápido e reduzindo custos. Partilhando da mesma idéia, Malkawi e Augenbroe (2004) afirmam que a simulação é responsável por acelerar o processo de concepção do projeto ao permitir análise de diferentes soluções. Embora seu uso por projetistas deva ser incentivado, Waltz (1999) alerta para necessidade de conhecimento da ferramenta de simulação e do edifício a ser modelado e de análise crítica dos resultados. Outra observação importante é que a simulação não é capaz de prever os dados finais de desempenho energético do edifício, mas indicar diferenças entre cenários distintos. Quando possível comparar resultados da simulação com dados medidos, recomenda observar os seguintes parâmetros para avaliar resultados: 5% de precisão no consumo anual de energia do edifício; perfil de consumo de energia para doze meses do ano; padrões de uso e ocupação de um dia útil; consumo de energia por uso final.

Jan Hansen (2008) defende o uso de ferramentas de simulação para resolver problemas multidisciplinares, em oposição a ferramentas tradicionais de projeto. Contudo, alerta para a necessidade de o usuário saber identificar quando utilizá-la. Segundo ele, a simulação não contribui para o desenvolvimento do projeto quando:

- O problema pode ser resolvido por meio de uma simples análise, baseada no senso comum;
- O problema pode ser resolvido analiticamente;
- Experimentos podem ser mais facilmente conduzidos;

- O custo decorrente das simulações excede possíveis ganhos;
- O projeto não dispõe de recursos suficientes;
- Não há tempo suficiente para que os resultados obtidos possam ser aproveitados;
- Os dados de entrada não estão disponíveis;
- O modelo de simulação não pode ser verificado ou validado;
- As expectativas com os resultados não forem suficientes;
- O comportamento do modelo é complexo ao ponto de não poder ser definido.

O site institucional do DOE, disponível em <www.energy.gov>, mantém diretório com lista de 365 softwares de simulação organizados por área de aplicação, incluindo análise de desempenho de edifícios e códigos normativos, entre outros, identificados quando de uso gratuito. Por sua vez, a seção com ferramentas de simulação de desempenho de edifícios está organizada em softwares de análise energética, de cálculo de carga térmica, para análises de energias renováveis, de retrofit e de ciclo de vida de materiais. As seguintes ferramentas de simulação de desempenho térmico e energético de edifícios estão listadas no site como de uso gratuito: Building Design Advisor, Building Energy Modelling and Simulation, CHP Capacity Optimizer, Czech National Calculation Tool, Demand Response Quick Assessment Tool, Design Advisor, DeST, Easy EnergyPlus, EE4 CBIP, EE4 CODE, EnergyPlus, ESP-r, Green Building Studio, HAMLab, HEED, Home Energy Saver, HOMER, HOT2 XP, HOT2000, ISE, ParaSol, SOLAR-5, SolArch, SolarShoeBox, SPARK, TOP Energy, VIPWEB e WISE.

Relatório técnico de Crawley et al. (2005) apresenta análise comparativa ao que considera as 20 principais ferramentas de simulação de desempenho térmico e energético de edifícios, sendo elas: BLAST, Bsim, DeST, DOE-2.1E, ECOTECT, Ener-Win, Energy Express, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IDA ICE, IES <VE>, HAP, HEED, Power Domus, SUNREL, Tas, TRACE e TRNSYS. A análise baseia-se em informações fornecidas pelos desenvolvedores dos programas nas seguintes categorias: características de modelagem; zonas térmicas; envoltória do edifício; insolação e iluminação natural; infiltração, ventilação e fluxo de ar entre zonas; sistemas de energia renovável, sistemas elétricos e equipamentos; sistemas de condicionamento de ar; equipamentos de condicionamento de ar; emissões associadas ao consumo de energia; análise econômica; disponibilidade de dados climáticos; relatório de dados de saída; validação e interface de usuários, compatibilidade com outros programas e disponibilidade. Como resultado, apresentam um quadro de referência com o potencial de cada ferramenta. Embora reconheçam não terem conseguido identificar o nível de detalhamento de cada módulo de simulação das ferramentas, os autores alertam para o uso de uma única ferramenta quando é possível ser mais produtivo utilizando-se várias.

2.2 Estado da arte em simulação para tomada de decisão de projeto

A falta de conhecimento técnico de arquitetos e engenheiros para o desenvolvimento de projetos de edifícios eficientes energeticamente explica-se pelo fato de as disciplinas serem recentes. Segundo Pedrini (2003), a bioclimatologia data da década de 50, a pesquisa em projeto teve seu apogeu no final da década de 60, as estratégias de baixo consumo de energia surgiram na década de 70 e as análises paramétricas com o advento dos computadores pessoais, na década de 80.

Para entender como decisões para melhoria do desempenho energético de edifícios de escritório são tomadas e as razões pelas quais ferramentas de simulação não são populares entre os arquitetos, Pedrini e Szokolay (2005) aplicaram questionário a um grupo de estudantes de arquitetura em nível de pós-graduação, professores universitários de arquitetura, arquitetos com especialização em sustainable environmental design e arquitetos renomados. Os questionários compreendem dezoito perguntas referentes a métodos utilizados durante o projeto, como método intuitivo, o qual enfatiza a experiência e é muito comum na atividade de projeto; “pensamento lateral”, alternativa ao pensamento científico linear associado à busca de diferentes maneiras de resolver problemas; ao que chama de teste de hipóteses, com grande potencial para uso de ferramentas de simulação, como o uso de modelos a serem avaliados; pensamento racional ou científico, baseado em análises anteriores ao projeto, como estudos paramétricos; e uso de diagramas, gráficos ou modelos matemáticos. Para cada etapa de projeto, pergunta-se a importância que o arquiteto dá, numa escala de 1 a 5, para cada método. Os resultados mostraram que o método intuitivo está entre os mais utilizados em todas as fases de projeto. Todos os grupos concordam com a necessidade de uma maior integração entre profissionais à medida que o projeto desenvolve-se; que, com exceção dos arquitetos renomados, o uso do pensamento racional ou científico faz-se necessário quanto mais desenvolvido o projeto; e que, com exceção dos professores, o método intuitivo torna-se menos importante com o desenvolvimento do projeto. De todos os métodos, os menos utilizados são, em todas as fases de projeto e para todos os grupos, diagramas, gráficos ou modelos matemáticos. Segundo autores, a rejeição no uso de tais métodos e de outros, como rules-of-thumb ou princípios de projeto, é um forte argumento para explicar o pouco uso de ferramentas de simulação entre arquitetos.

A partir dos resultados, Pedrini (2003) lista algumas recomendações para o desenvolvimento de ferramentas mais adequadas para análise do projeto em suas primeiras fases:

- Otimização de valores default ou padrão, como rotinas de ocupação, características dos sistemas de climatização e propriedades de componentes construtivos;
- Uso de valores default padronizados regionalmente, o que torna os parâmetros compatíveis com as realidades locais;
- Classificação dos dados de saída de acordo com códigos de desempenho locais;
- O sistema CAD deveria ser orientado para uso como ferramenta de esboço de projeto. Em vez de precisa, a modelagem geométrica poderia enfatizar a flexibilidade de dados de entrada;
- Análise paramétrica automática, a fim de identificar soluções ótimas sem a necessidade de modelagem para cada variação e
- Checklist de estratégias de baixo consumo de energia para guiar análises paramétricas.

No Brasil, pesquisa semelhante realizada por Maciel (2006) buscou identificar os motivos de a maioria dos arquitetos não trabalhar com conceitos bioclimáticos e qual o nível de conhecimento de física das edificações necessário para sua efetiva aplicação no projeto de arquitetura. Os resultados encontrados apontaram para a necessidade de aprendizado de conceitos básicos de propriedades térmicas dos materiais,

transferência de calor, diferença de pressão do ar e geometria da insolação. A pouca aplicação do ensino técnico na atividade de projeto em atelier nas escolas de arquitetura seria, segundo a autora, o principal motivo.

Para Holst (2003), apesar do crescente uso de ferramentas de simulação para o projeto de edifícios, seu potencial raramente é esgotado. Segundo ele, projetistas geralmente deduzem diferentes parâmetros de projeto e então refazem as simulações sem a certeza de que os valores utilizados implicam necessariamente em melhorias para o projeto. Em seu artigo, descreve procedimento para identificar a melhor solução de projeto da envoltória de edifícios com respeito ao consumo de energia e à qualidade ambiental dos espaços internos, o que atende a necessidade de análise paramétrica automática levantada por Pedrini (2003). O pograma GenOpt, desenvolvido por Holst (2003) e disponível em <http://gundog.lbl.gov/GO/>, identifica os valores de parâmetros de projeto de interesse do usuário, sendo compatível com qualquer ferramenta de simulação que lê dados de entrada e fornece dados de saída em formato de texto.

Ghisi e Tinker (2001) investigam a relação de consumo de energia para iluminação e resfriamento em edifícios de escritório em sete cidades brasileiras e identificam percentagens ótimas de fechamento translúcido de fachada para cada modelo, considerando razões entre largura e comprimento do ambiente analista de 2:1, 3:2, 1:1, 2:3 e 1:2, WWR entre zero e 100%, com incrementos de 10%, orientações N, E, S e W e diferentes valores de densidade de potência instalada em iluminação - LPD, conforme fator de forma da zona térmica. Dentre as características dos modelos simulados temos WWR acima de 70%, vidro claro e valores de LPD entre 14,5 W/m^2 e 22 W/m^2. Embora esses parâmetros não estejam de acordo com o observado nos edifícios apresentados como referência no capítulo 4, os resultados encontrados

resumem o desempenho esperado para os modelos, como; 1. Ambientes estreitos apresentaram maior consumo de energia; 2. Os menores consumos por área de piso foram verificados em ambientes mais profundos; e 3. Quanto mais profundo o ambiente e menor sua abertura, maior seu WWR ideal.

Outros a realizarem estudos paramétricos foram Chvatal et al. (2003) e Gololov e Yezioro (2007). Os primeiros realizaram simulações considerando o clima de três cidades portuguesas e chegaram a uma conclusão interessante para edifícios de escritório: devido às elevadas cargas internas, a envoltória não deve ser muito insulada. Os últimos desenvolveram algoritmo para tomada de decisões em projeto por meio de análise de múltiplos critérios.

Com o objetivo de fornecer informações úteis para o projeto e habilitar o usuário de ferramentas de simulação a prever incertezas devido à imprecisão dos dados de entrada, Hopfe et al. (2007) apresentam estudo de caso de avaliação de simulações de desempenho por meio de um edifício hipotético. A análise de sensibilidade é realizada para análise de influência na demanda de energia e no conforto térmico, a partir de sete dados de entrada, cobrindo diferentes categorias de incertezas:

- Parâmetros físicos, como espessura e propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos;
- Parâmetros de projeto, como tipo de fechamento translúcido e de sistema de climatização e
- Condições de contorno, como infiltração e dados climáticos. Como conclusão, alguns parâmetros apresentaram certo padrão de influência no modelo, sinalizando possível simplificação de análises posteriores.

A análise de sensibilidade para a demanda de energia revelou a taxa de infiltração, as cargas internas e a orientação do modelo como os parâmetros de maior influência. A análise de sensibilidade de conforto térmico revelou o fator solar dos fechamentos translúcidos, WWR e a massa do edifício como parâmetros com maior influência no desconforto para ao frio, nessa ordem; ao passo que, para o calor, os parâmetros de maior influência foram, respectivamente, cargas internas, fator solar dos fechamentos translúcidos e WWR. A análise de sensibilidade para a orientação explica-se pelo fato de o modelo de edifício utilizado apresentar aberturas apenas em uma das fachadas.

Defendendo a mesma tese, Struck e Hensen (2007) afirmam que a atividade de simulação é extensivamente utilizada para comprovação de conformidade com códigos de desempenho de edifícios e que seu potencial como ferramenta de tomada de decisão em projetos é pouco explorada. Segundo eles, as decisões tomadas durante a fase de concepção do projeto têm um impacto considerável no desempenho final do edifício e por isso devem ser estudadas apesar do tempo e dos esforços necessários. Utilizam dois métodos de análise de incertezas e sensibilidade: o método de Morris e o de Monte Carlo. O primeiro, descreve a importância de uma variável individual sobre um indicador de desempenho, descrita por seu valor médio e desvio padrão. Para o segundo método, a importância de uma variável está associada à correlação entre ela e o indicador de desempenho. Os resultados de ambos os métodos apontaram grande sensibilidade do modelo a variações de WWR, seguida de variações das propriedades dos fechamentos translúcidos.

Westphal e Lamberts (2005) apresentam metodologia de calibração de modelos de simulação de desempenho energético de edifícios por meio da definição dos parâmetros que mais afetam o consumo de energia por uso final. Uma vez que para

dados de entrada com pouca ou nenhuma influência nos resultados podem ser assumidos valores default, reduz-se o tempo da modelagem para simulação, principal argumento dado por projetistas para justificar o não uso da ferramenta. A metodologia de calibração é descrita em seis etapas distintas:

- Ajuste das cargas e dos padrões de uso de iluminação e de equipamentos de tomada;
- Simulação para dias de projeto, ou seja, dias representativos dos extremos de temperatura adotados no dimensionamento dos sistemas de condicionamento de ar;
- Análise de sensibilidade dos dados de entrada quanto às perdas e ganhos de calor;
- Ajuste dos dados de entrada com considerável influência nos resultados;
- Simulação para as 8760 horas de um ano e
- Ajustes finais.

Para resultados de consumo mensal diferindo em mais de 20% ou anual em mais de 5% dos dados medidos, recomenda retorno à análise de sensibilidade.

Como alternativa à simulação de desempenho energético de edifícios, alguns países desenvolveram normas baseadas em métodos prescritivos, como a regulamentação israelense para edifícios de escritório apresentada por Shaviv et al. (2005). Os autores reconhecem as restrições do método, o qual não permite identificar uma solução ótima, mas defendem seu uso por auxiliar na escolha de um grande número de soluções.

Além das técnicas de análise de incertezas e sensibilidade sobre modelos computacionais como metodologia de apoio no processo de calibração, Westphal e Lamberts (2007) propõem, para cada modelo arquitetônico e arquivo climático analisado, equações para estimar o consumo anual de energia elétrica a partir de 15 parâmetros que descrevem a edificação. Sobre o modelo de simulação detalhada, a densidade de cargas internas, os padrões de uso e o coeficiente de desempenho - COP do sistema de condicionamento de ar foram identificados como os parâmetros de maior impacto no consumo final de energia. Com relação à envoltória do edifício, o parâmetro identificado como de maior influência foi o fator solar dos vidros, seguido de pé-direito do pavimento tipo, WWR, dispositivos de proteção solar externos e espessura dos fechamentos translúcidos, dado importante para a transmitância térmica dos mesmos.

A partir do resultado de simulações paramétricas conduzidas para 54 variações de morfologia de um mesmo volume, três valores de WWR e quatro orientações, Pessenlehner e Mahdalavi (2003) avaliam a confiabilidade de indicadores de compacidade. Embora reconheçam a utilidade de indicadores desse tipo, os quais são adotados como parte de métodos prescritivos por alguns códigos de desempenho energético de edifícios, afirmam que tais indicadores aparentemente não são capazes de capturar morfologias específicas, podendo comprometer os resultados.

O regulamento técnico de qualidade do nível de eficiência energética do PROCEL/ INMETRO também propõe método prescritivo apoiado em equações como alternativa à simulação computacional. As equações do regulamento foram produzidas por Carlo (2009) para sua tese de doutoramento. Contudo, a autora reconhece que as equações apresentam limitações quanto a seu uso, uma vez que o intervalo utilizado para análise

do fator de forma não representa todas as edificações existentes. Uma outra limitação das equações refere-se ao fator solar dos vidros, muito superiores ao especificado para edifícios de melhor desempenho energético.

3 Códigos de desempenho energético de edifícios

3.1 ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2007 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings

A norma 90.1-2004, co-patrocinada pela Illuminating Engineering Society of North America – IESNA, foi formulada pela ASHRAE sob processo conduzido pelo American National Standard Institute – ANSI. Originalmente publicada em 1975, teve edições revisadas em 1980, em 1989 e em 1999, quando o conselho de diretores da ASHRAE votou por uma atualização contínua a fim de adequá-la à evolução da tecnologia. A partir da edição de 2001 da norma, uma revisão é lançada a cada três anos, a qual incorpora addenda e errata das versões anteriores. A norma estabelece requisitos mínimos para o projeto e a construção de edifícios eficientes energeticamente e critérios para determinação de conformidade com esses requisitos, sendo aplicável a novas construções e a seus sistemas, a ampliações de construções existentes e a seus sistemas e a alterações de sistemas e de equipamentos de edifícios existentes, excetuados residências unifamiliares, residências multifamiliares com três ou menos pavimentos acima do solo, construções manufaturadas, construções que não façam uso de eletricidade ou de combustíveis fósseis e equipamentos e porções dos sistemas do edifício que utilizem energia para fins industriais, de manufatura ou de processos comerciais.

A norma está organizada em 12 seções e em quatro apêndices. As seções 5 a 10 apresentam critérios de cumprimento obrigatório referentes à envoltória do edifício, a sistemas de aquecimento, ventilação e de condicionamento de ar, ao aquecimento de água, a sistemas de distribuição de energia, à iluminação e a outros equipamentos. Também estão incluídas opções prescritivas e de compensação. A seção 11, chamada

de Energy Cost Budget, descreve metodologia alternativa, a ser utilizada para casos em que não é possível atendimento aos critérios prescritivos. Os apêndices A a D fornecem informações como por exemplo propriedades físicas de componentes construtivos e zoneamento climático. Além desses, há os apêndices E e F, que compreendem dados de instituições e grupos de pesquisa, outras normas e lista de addenda da versão de 2004, e o apêndice G, chamado Performance Rating, o qual apresenta metodologia para avaliação de desempenho energético de edifícios que excedem os requisitos da norma. A seguir, resumo das seções 5 a 10 e dos procedimentos para simulação descritos na seção 11 e no apêndice G.

3.1.1 Envoltória do edifício

A envoltória do edifício é um dos fatores mais importantes a serem considerados no projeto de edifícios eficientes energeticamente (ASHRAE, 2004). Embora não consuma energia, está relacionada aos ganhos de carga térmica pela cobertura e pelas fachadas e a uma maior solicitação do sistema de condicionamento de ar, resultando em maior consumo e maiores custos de energia. Além disso, afeta a temperatura das superfícies internas, as quais influenciam as condições ambientais e o conforto térmico dos ocupantes. Por outro lado, fechamentos translúcidos podem contribuir para redução do consumo de energia para iluminação.

Para o projeto da envoltória do edifício devem ser levadas em consideração cargas térmicas externas à edificação e internas, bem como possibilidade de aproveitamento de iluminação natural. Cargas externas incluem ganhos de calor por radiação solar, perdas pelas superfícies externas e infiltração de ar; cargas internas, ganhos de calor de pessoas, de equipamentos e de iluminação. Assim, o balanço térmico será função da magnitude da carga térmica interna, das trocas de calor pelos fechamentos da

envoltória e pela tomada de ar externo. Um projeto eficiente energeticamente deve prever aproveitamento de iluminação natural e controle dos ganhos de calor. Para redução do consumo de energia com condicionamento de ar, dependendo das condições climáticas, pode-se recorrer à tomada de ar exterior sem que esse seja resfriado. Para dias quentes, outra estratégia é o resfriamento da construção por ventilação noturna, de modo a reduzir consumo com resfriamento no dia seguinte.

Os itens de atendimento obrigatório, que devem ser satisfeitos em todos os casos, são requisitos de isolamento térmico dos fechamentos externos e de controle de infiltração, incluindo de portas e janelas.

A opção prescritiva consiste em limites de propriedades térmicas dos fechamentos da envoltória e percentagens de área de abertura envidraçada para diferentes zonas climáticas de um total de oito. Para as cidades brasileiras apenas duas zonas climáticas são atribuídas. As cidades de Belém, Fortaleza, Recife, Rio de Janeiro e Salvador são listadas no apêndice B como pertencendo à zona 1; as cidades de Brasília, Porto Alegre e São Paulo, à zona climática 2.

Alternativa que oferece maior flexibilidade ao projeto, a opção de compensação deve ser utilizada em casos em que não é possível atender todos limites estabelecidos pela opção prescritiva e não há interesse em realizar simulação de desempenho energético do edifício. Segundo a opção de compensação, o desempenho térmico de um componente construtivo pode não satisfazer os critérios da opção prescritiva desde que outros componentes apresentem um desempenho melhor que o exigido. A metodologia para a opção de compensação é descrita no apêndice C da norma. Contudo, por exigir levantamento de dados de área e propriedades físicas de cada componente construtivo e para cada orientação, é de difícil aplicação.

3.1.2 Aquecimento, ventilação e condicionamento de ar

Sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar respondem por grande parcela do uso final de energia de edifícios cobertos pela norma. Um sistema não é eficiente energeticamente apenas porque possui equipamentos eficientes, e sim porque a distribuição dos fluxos de ar e sua operação contribuem para a eficiência do conjunto. Quando mal projetados, podem apresentar custo de energia em dobro se comparados com opções eficientes (ASHRAE, 2004). Para os edifícios apresentados como estudos de caso, representam segundo ou terceiro maior consumo de energia, depois de equipamentos e iluminação, respectivamente.

A seção referente à climatização estabelece padrões mínimos de eficiência para diferentes equipamentos. A abordagem simplificada é uma alternativa para construções de um ou dois pavimentos, com área construída inferior a 2.322 m^2, localizadas em zonas climáticas 2 a 8 e cujos sistemas possuam capacidade de até 223 kW cada.

Os itens de atendimento obrigatório aplicam-se a todos os sistemas e equipamentos mecânicos para aquecimento, ventilação e condicionamento de ar, incluindo alterações no sistema de edifícios existentes. São eles:

- Eficiências mínimas para unidades condensadoras, bombas de calor, chillers, equipamentos compactos, fornos e unidades de aquecimento, caldeiras e equipamentos como torres de resfriamento ou condensadores de ar;
- A carga térmica para aquecimento ou resfriamento utilizada para dimensionamento dos sistemas deve ter sido estimada de acordo com normas ou manuais de engenharia;

- Automação para acionamento ou desligamento do sistema de condicionamento de ar, incluindo, entre outros, critérios específicos para termostatos, como localização, área de atendimento e controle; controle de acionamento otimizado de insuflação de ar para determinadas vazões; dampers motorizados nos shafts de escadas e de elevadores, capazes de serem desligados automaticamente durante operação do edifício e interligados para abrirem quando solicitado pelos sistemas de detecção de fumaça, e dampers motorizados para desligamento automático da tomada de ar externo e da exaustão quando sistemas ou o espaço não estão sendo usados; e automação de ventiladores a partir de determinada potência;
- Isolamento térmico de tubulações, dutos e plenuns e
- Controle de estanqueidade de dutos e plenuns.

A opção prescritiva lista uma série de requisitos, entre os quais:

- Economizadores de ar e de água de sistemas de resfriamento;
- Controle de ineficiências relativas a aquecimento e resfriamento simultâneos, como de mistura de ar de suprimento, comum em zonas atendidas por mesmo um equipamento, de mudança de modo de operação de água quente para água fria ou vice-versa e de resfriamento e aquecimento em desumidificadores;
- Critérios para dimensionamento da potência de ventiladores;
- Critérios para dimensionamento da potência de bombas;
- Critérios de operação de ventiladores de equipamentos de rejeição de calor como condensadores de ar, torres de resfriamento abertas e torres de

resfriamento de circuito fechado, para controle da temperatura da água de saída e da água de condensação.

- Eficiência mínima de recuperadores de calor;
- Critérios para coifas de cozinha e de exaustão de fumaça;
- Uso de sistemas de aquecimento do tipo painel radiante em espaços não fechados e
- Limitação no uso de dutos de desvio de gás quente, utilizados para evitar congelamento da serpentina.

3.1.3 Serviço de aquecimento de água

Para alguns usos de edifício, o serviço de aquecimento de água pode representar parcela significativa do consumo de energia, como hotéis, por exemplo. Os requisitos descritos na norma incluem, mas não se limitam à produção e distribuição de água quente em sanitários, duchas, lavanderias, cozinhas, piscinas e spas, e unidades de edifícios residenciais e de hotéis. Para redução do consumo de energia com aquecimento de água, a norma apresenta algumas estratégias de projeto, como aquecimento solar, especificação de dispositivos de restrição de fluxo de água e isolamento térmico em tanques e tubulações. São itens de atendimento obrigatório:

- Dimensionamento do sistema para carga térmica calculada de acordo com manual do fabricante ou normas e manuais de engenharia;
- Eficiência mínima de caldeiras de aquecimento de água para consumo, aquecedores de piscinas e tanques de armazenamento de água quente;
- Isolamento térmico de tubulação de distribuição de água quente;

- Controles de temperatura;
- Acesso fácil a interruptores de aquecimento de água de piscina e
- Para sistemas em que a água não recircula, sifão nas tubulações verticais de entrada e de saída de água o mais próximo possível dos tanques de armazenamento.
- Os requisitos da opção prescritiva limitam-se a condições específicas para sistemas de aquecimento de água que servem para condicionamento de espaços e aquecimento de água.

3.1.4 Sistema elétrico

Para o sistema elétrico, há apenas itens de atendimento obrigatório: dimensionamento de condutores para limites máximos de queda de tensão, as built e manuais de operação e de manutenção. Os limites de queda de tensão são de 2% para condutores alimentadores e de 3% para condutores do circuito de distribuição, considerando a carga de projeto. Os requisitos colaboram para a economia de energia de duas maneiras. Requisitos de queda de tensão limitam as perdas de potência ao longo do sistema de distribuição de energia e documentação como desenhos as built e manuais auxiliam as equipes de manutenção na compreensão do sistema.

3.1.5 Iluminação

O consumo com iluminação varia consideravelmente entre os edifícios. Para os projetos apresentados como estudos de caso, correspondem a um quinto até a um terço do uso final.

Para uma iluminação eficiente energeticamente deve-se recorrer a equipamentos eficientes e a controles. A norma busca fomentar o uso de equipamentos de iluminação e práticas de projeto eficientes energeticamente por meio de limites de densidade de potência instalada em iluminação – LPD para espaços internos e externos. Além disso, prevê automação para desligamento de luminárias quando não são necessárias. Os requisitos da norma não se aplicam à decoração, em caso de sistemas à gás, à iluminação de emergência e de unidades residenciais, e quando necessária por motivos de segurança ou de saúde. Os itens de atendimento obrigatório incluem:

- Para edificações com mais de 465 m^2, desligamento automático programado ou por sensor de presença;
- Número mínimo de interruptores por ambiente ou área de abrangência;
- Desligamento automático da iluminação externa controlado por sensor de iluminância;
- Compartilhamento de reatores por lâmpadas fluorescentes tubulares com mais de 30 W e sob mesmo controle;
- Eficiência mínima de 60 lm/W para as luminárias de iluminação externa com mais de 100 W cada;
- Limite de potência instalada em iluminação para as áreas externas de 5% superior ao somatório das potências permitidas para cada área, considerando que para algumas aplicações, como iluminação de fachadas, os limites individuais devem ser respeitados.

Além dos itens obrigatórios, há o método de cálculo de potência instalada em iluminação permitida para os espaços internos e uma alternativa de cálculo refinado, chamada Space-by-Space. Para o primeiro, determina-se a potência total permitida a partir do limite de densidade de potência instalada segundo uso principal da edificação e área. Para o método Space-by-Space, a potência total permitida é calculada a partir dos limites de LPD para cada ambiente.

3.1.6 Outros equipamentos

A seção 10 da norma aplica-se a motores, para os quais níveis mínimos de eficiência são exigidos, segundo potência, tipo e número de pólos, salvo algumas exceções. A preocupação com o desempenho energético dos motores está no interesse em reduzir ineficiências, as quais não apenas resultam em um maior consumo de energia direto, como, a exemplo dos ventiladores, em maior consumo de energia para resfriamento devido ao calor dissipado.

3.1.7 Seção 11 (Energy Cost Budget)

Conforme explicado anteriormente, a metodologia descrita na seção 11 constitui alternativa quando do não cumprimento dos itens não obrigatórios das seções anteriores, exceto para edifícios sem sistemas mecânicos ou projetos para os quais aqueles não estão previstos.

Para atendimento à norma, o modelo referente ao edifício a ser avaliado, chamado de Proposed Building Design, deve apresentar estimativa de custo anual de energia, chamada Design Energy Cost, igual ou inferior ao custo, ou Energy Cost Budget, do modelo de comparação, chamado Budget Building Design. Nota informativa enfatiza que os resultados de Design Energy Cost aplicam-se apenas para determinação de

conformidade com a norma, não podendo ser tomados como dados de custo do edifício quando em operação, uma vez que são esperadas variações de ocupação, de padrões de uso, de clima e de tarifas de energia. O programa de simulação deve considerar:

- Um mínimo de 1.400 horas por ano;
- Diferentes padrões de uso, para dias de semana, sábados, domingos e feriados;
- O fenômeno de inércia térmica;
- Dez ou mais zonas térmicas;
- Curvas de desempenho em carga parcial de equipamentos mecânicos;
- Capacidade e eficiência de equipamentos mecânicos para aquecimento e resfriamento;
- Economizadores de água e de ar com controles integrados e
- As características do modelo Budget Building Design especificadas segundo a norma.

Segundo o procedimento descrito na seção 11, ambos modelos devem ser simulados pelo mesmo programa computacional e com mesmos arquivo climático, padrões de uso e de ocupação, tarifas e cargas de processo. O modelo referente ao edifício sendo avaliado deve ser estabelecido a partir de suas características reais ou, quando em fase de projeto, segundo documentos de projeto. Quando não prevista em projeto, determinada característica do edifício deve ser modelada como no modelo de comparação, exceto para serviço de água quente. O modelo de comparação, chamado Budget Building Design, deve possuir as mesmas características do Proposed Building Design, exceto para:

- Propriedades térmicas da envoltória do edifício, função do tipo de elemento construtivo, ou WWR do Proposed Building Design diferentes dos apresentados na seção prescritiva. Para o WWR do projeto acima de 50%, adota-se esse valor para o Budget Building Design;
- Densidade de potência instalada em iluminação do Proposed Building Design diferente da apresentada na seção prescritiva;
- Sistemas de condicionamento de ar, que devem seguir dados de tabelas específicas apresentadas na norma.

3.1.8 Apêndice G (Performance Rating)

O apêndice G deve ser utilizado para análise de projetos cujo desempenho excede os requisitos da norma. Igualmente à metodologia descrita na seção Energy Cost Budget, os resultados das simulações não podem ser tomados como dados que o edifício irá apresentar quando em fase de operação.

No apêndice G, o modelo referente ao edifício a ser avaliado é chamado de Proposed Building e o modelo de comparação de Baseline Building. O programa de simulação deve ser capaz de modelar o que é exigido pela seção 11, com exceção do número de horas por ano, a saber, 8.760.

Igualmente, ambos modelos devem ser simulados pelo mesmo programa computacional e com mesmos arquivo climático, padrões de uso e de ocupação, tarifas e cargas de processo. O modelo referente ao edifício sendo avaliado deve ser estabelecido a partir de suas características reais ou, quando em fase de projeto, segundo documentos de projeto. Quando não prevista em projeto, determinada característica do edifício deve ser modelada como no modelo de comparação, exceto

para serviço de água quente. O modelo de comparação, chamado Baseline Building, deve possuir as mesmas características do Proposed Building, exceto para:

- Propriedades térmicas da envoltória do edifício ou percentagens de aberturas translúcidas. O modelo de comparação deve ser modelado com cobertura isolada termicamente, paredes externas como steel-framed, pisos como steel-joist e WWR com 40% ou igual ao de projeto, qual dos dois for o menor;
- Quando o modelo do Proposed Building possuir proteções solares fixas, como brises-soleil, ou móveis e automatizadas, como persianas. O modelo Baseline Building não apenas deve ser modelado sem quaisquer dispositivos de proteção solar, como o edifício não pode fazer sombreamento sobre si mesmo;
- Orientação de projeto. Para o modelo Baseline Building, o custo estimado de energia deve ser obtido a partir da média dos custos de quatro modelos, sendo um para orientação de projeto e outros três, com orientação variando em 90o, 180° e 270°;
- Densidade de potência instalada em iluminação do Proposed Building diferente da apresentada na seção prescritiva;
- Sistemas de condicionamento de ar, que devem seguir dados de tabelas específicas apresentadas na norma, função do uso e número de pavimentos, fonte de energia e capacidade solicitada para aquecimento e resfriamento. Além disso, a pressão estática dos ventiladores de insuflação, de retorno e de exaustão é calculada em função da vazão máxima determinada em tabela.

3.2 Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos

O regulamento técnico de qualidade do nível de eficiência energética do PROCEL/ INMETRO, vigente desde julho de 2009, apresenta método para classificação de edifícios comerciais, de serviços e públicos quanto à eficiência energética em cinco categorias: A, B, C, D, e E, sendo o nível A o mais eficiente e o E o menos eficiente. Apesar de possuir caráter voluntário, passará a ser obrigatório em prazo a ser definido.

Além de menos abrangente que o LEED, pois não aborda itens como materiais com conteúdo reciclado e baixa energia incorporada e qualidade do ar interno, as diferenças do regulamento técnico brasileiro são a possibilidade de etiqueta parcial do edifício, pois permite avaliação do conjunto ou de apenas da arquitetura e do sistema de iluminação ou da arquitetura e do sistema de condicionamento ar; o método prescritivo apoiado em equações como alternativa à simulação computacional; e nível de exigência inferior. Para certificação de um empreendimento na versão atual do LEED, é necessária estimativa de redução no custo anual de energia igual ou superior a 10% em relação ao edifício de referência que atende às exigências mínimas da ASHRAE Std. 90-1 de 2007. Para determinação da eficiência dos equipamentos de condicionamento de ar, o regulamento técnico brasileiro utiliza a ASHRAE Std. 90.1 de 2004 para os níveis A e B, a norma de 1999 para o nível C e a de 1989 para o nível D. Devido a essas diferenças, as maiores contribuições do regulamento técnico brasileiro são a possibilidade de análise sem ferramenta de simulação e o caráter obrigatório em um futuro próximo.

4 Quadro de referência

Este capítulo apresenta dez estudos de caso, tomados como referência para o desenvolvimento dos modelos apresentados no quinto capítulo. Os dez projetos, nove para São Paulo e um para o Rio de Janeiro, encontram-se em diferentes fases de desenvolvimento, desde o anteprojeto de arquitetura até os projetos executivos compatibilizados.

Para todos os casos houve consultoria, desenvolvida pelo Centro de Tecnologia de Edificações – CTE, para orientar o desenvolvimento dos projetos em conformidade com o LEED. Para melhor entendimento do sistema de certificação, esse é apresentado de maneira sucinta.

4.1 Sistema voluntário de certificação LEED

Os sistemas de avaliação ambiental baseiam-se em indicadores de desempenho. O LEED considera aspectos de implantação do empreendimento, de uso racional da água, de gestão de materiais, de eficiência energética do edifício e de qualidade ambiental, incluindo qualidade do ar e conforto térmico e luminoso dos ocupantes.

O sistema de pontuação para edifícios do tipo Core and Shell aplica-se para casos cujo gerenciador tem controle sobre o projeto e a construção, incluindo sistemas mecânicos, elétricos e hidráulicos, mas não sobre os espaços a serem locados, desde que pelo menos 50% da área a ser locada não seja de um único dono, o que é comum para edifícios de escritório. Para a versão 3.0, lançada em 2009, os níveis de certificação são os seguintes:

- Certified: 40 a 49 pontos

- Silver: 50 a 59 pontos
- Gold: 60 a 79 pontos
- Platinum: acima de 79 pontos

A pontuação está relacionada ao número de itens atendidos, os quais estão distribuídos em pré-requisitos, que devem ser cumpridos obrigatoriamente, e créditos.

4.1.1 Pré-requisito de desempenho energético mínimo EAp2

O pré-requisito de desempenho energético mínimo EAp2 tem como objetivo reduzir os impactos ambientais e econômicos associados ao uso excessivo de energia. Para comprovação de atendimento, há duas opções. A primeira delas é demonstrar 10% de economia em custo anual com energia quando o edifício é comparado a um modelo de referência. A segunda, para projetos com densidades de ocupação específicas e área de até 9.290 m2, deve-se demonstrar atendimento de itens prescritivos de normas referenciadas.

Para comprovação da primeira opção, o edifício de comparação, chamado Baseline Building, deve ser modelado de acordo com os procedimentos descritos no apêndice G da norma ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2007 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings e o desempenho energético de ambos, Baseline Building e edifício a ser avaliado, devem ser analisados com auxílio de ferramenta específica de simulação. Além disso, para atendimento ao pré-requisito, devem ser cumpridas exigências dos itens obrigatórios descritos nas seções 5 a 10 da norma ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2007.

Para fins de certificação, o valor default para cargas de processo do Baseline Building é de 25% do seu custo com energia. Caso as cargas de processo do edifício a ser avaliado sejam inferiores aos 25% do uso final de energia do edifício de referência, as informações submetidas para análise devem incluir documentos que comprovem que os dados de entrada considerados nas simulações de ambos os modelos são apropriados.

Cargas de processo compreendem equipamentos em geral, como de escritório, elevadores, escadas rolantes, equipamentos de cozinha, de lavanderia, sistema de iluminação tratado como exceção, como de segurança e hospitalar, não se limitando a esses exemplos. As cargas que não são consideradas de processo incluem de sistema de iluminação, como para iluminação interna, de garagem e externa, de sistemas de condicionamento, incluindo aquecimento, resfriamento, ventiladores, bombas, exaustão de sanitários, ventilação de garagem e exaustão de cozinha, e aquecimento de água, entre outros.

Para a versão anterior, LEED CS 2.0, o pré-requisito de desempenho mínimo de energia exige cumprimento dos itens obrigatórios e das opções prescritivas da norma ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2004, ou seja, o projeto buscando certificação deve apresentar estimativa de custo anual com energia igual ou superior à do modelo de comparação. Em casos de impossibilidade de atendimento às opções prescritivas, a simulação computacional para avaliação do desempenho energético do edifício é conduzida segundo procedimentos descritos na seção 11. Para projetos registrados na versão LEED CS 2.0 após 28 de junho de 2007, embora tenham sido mantidas as exigências para cumprimento do pré-requisito mínimo de energia EAp2, para o crédito EAc1, referente à pontuação dada para casos de desempenho energético acima do

mínimo exigido pela ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2004, foi definida como item de atendimento obrigatório economia de 14% em relação ao modelo de comparação.

4.1.2 Crédito de desempenho energético EAc1

O crédito EAc1 confere pontos para os projetos que demonstram economia em custo anual de energia igual ou superior a 12% quando comparados com o modelo de comparação. A economia é analisada sobre o custo anual de energia para incentivar estratégias de eficiência energética que contribuam para a redução da demanda. Para 12% são dados três pontos; para 14%, quatro; até 21 pontos, para economias iguais ou superiores a 48%. Para a versão LEED CS 2.0, eram dados um e dois pontos para economias de 10,5% e 14%, respectivamente. Conforme descrito anteriormente, após 28 de junho de 2007, o crédito EAc1 passou a exigir economia de 14%, para a qual eram dados dois pontos.

4.2 Estudos de caso

4.2.1 Estudo de caso 1

O primeiro estudo de caso é um empreendimento de torre de escritórios projetado para São Paulo. Para as primeiras simulações, foi modelado apenas o pavimento tipo. O modelo Proposed Building apresenta WWR de 47,7%, sistema de condicionamento de ar tipo expansão direta com condensação a ar e vazão de ar constante nas evaporadoras. Devido à falta de informações do projeto, foi adotado o COP de 3,3 W/W para as condensadoras do sistema VRF. Por não ter sido especificado, o vidro utilizado nas simulações possui as mesmas as propriedades ópticas e térmicas do vidro do modelo do Baseline Building, bem como o LPD, de 12 W/ m^2. O resultado das primeiras simulações apresentou valor estimado de custo anual com energia para o modelo

Proposed Building 2,7% superior ao do modelo de comparação. O sistema de condicionamento de ar do modelo Baseline Building foi modelado com central de água gelada com dois chillers parafuso de igual capacidade e COP de 4,9 W/W.

Para identificar estratégias de eficiência energética para o projeto, outros modelos foram simulados, com alternativas de vidro, redução de área envidraçada e valores de LPD de e 12 W/ m^2 10 W/ m^2. Para a primeira alternativa simulada, optou-se por reduzir o WWR e por manter as demais características do modelo do projeto, o que resultou em um custo anual muito próximo do custo do modelo do Baseline Building. Contudo, dado que o vidro do modelo de comparação resulta em elevado desempenho energético para o edifício, para as demais alternativas foram feitas simulações com alguns vidros disponíveis no mercado, laminados e duplos com câmara de ar, com valores de fator solar entre 25% e 40% para os laminados e de 21% e 26% para o vidro duplo com câmara de ar.

Análise do sistema de condicionamento demonstrou aumento de 0,97% no custo anual com energia elétrica em relação ao sistema do modelo de comparação, o que indica que, para esse projeto, o sistema apresenta praticamente o mesmo desempenho de uma central de água gelada com chillers parafuso. Para o Proposed Building com WWR de 40%, vidro duplo com câmara de ar e coating de baixa emissividade e LPD de 10 W/ m^2, a economia alcançada foi de 6,4%. Para possibilitar a certificação, foram sugeridas análises de sistema VRF com condensação a água e de diferentes áreas de fechamento translúcido para as fachadas.

Para avaliar a economia relativa ao sistema VRF com condensação a água, sugerido para atendimento ao pré-requisito EAp2, foram simulados quatro modelos, um com a orientação real do projeto e outros três, segundo procedimento para o Baseline

Building, todos com as mesmas características do modelo de comparação, exceto pelo sistema de condicionamento de ar. Os resultados demonstraram economia de 13,1%. Para o Proposed Building com WWR de 50%, LPD de 9,3 W/m^2 para os escritórios e vidro duplo com câmara de ar disponível no mercado, os resultados apresentaram economia de 12,3%. A partir dos resultados, foram sugeridos vidros que resultem em bom desempenho energético para o projeto, alternativas como dimerização das luminárias próximas às fachadas, dispositivos para proteção solar e redução do WWR. A figura 1 apresenta planta e modelo espacial do Proposed Building; a tabela 1, suas principais características. Para todas as plantas, o desenho está alinhado ao norte geográfico.

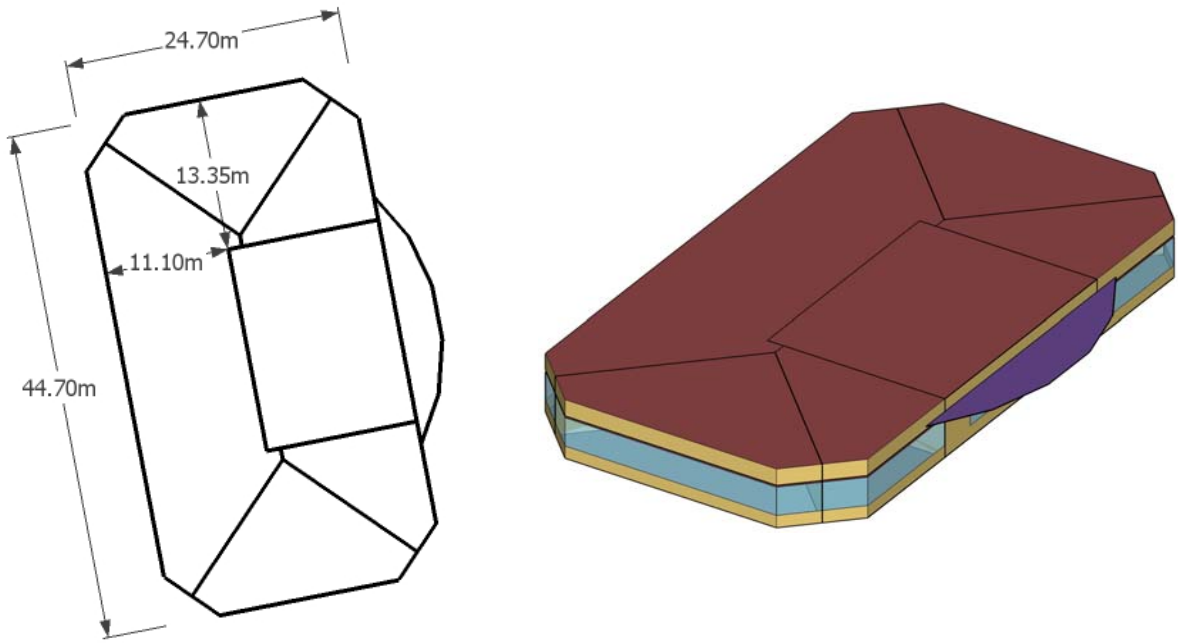


Figura 1. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #1

Tabela 1. Características do estudo de caso #1

Localização São Paulo (23°37' S e 46 ^{O} 39' W)		
Número de pavimentos 14		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	1,68 a 5,97	21 a 40
Paredes	0,705	-
Observações: o projeto possui WWR de 47,66%, não tendo sido definidos os vidros.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 11.524 m^2		
Observações: sistema de condicionamento de ar tipo expansão direta com condensação a água com VRV e vazão de ar constante nas evaporadoras. Devido à falta de informações do projeto, foi adotado COP de 3,3 W/W para condensadoras e evaporadoras do sistema VRF.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	9,3 (estimado)	
Core	14,0	
Observações: para as áreas de escritório, foi estimado LPD de 9,3 W/m^2		

4.2.2 Estudo de caso 2

O segundo estudo de caso contou com simulação após definidos anteprojetos de arquitetura e de condicionamento de ar. Para uma primeira análise, foram modelados os pavimentos tipo com quatro zonas térmicas, sendo uma para o core, não condicionado, compreendendo escadas, circulação, elevadores e sanitários. Para os espaços de escritório, outras três zonas térmicas, todas condicionadas. É importante ressaltar que, para o projeto de arquitetura desse estudo de caso, desenvolvido por escritório com contato anterior com a certificação LEED, houve preocupação com o

desempenho da envoltória do edifício, o que pode ser facilmente percebido pelo fato de o core ter sido projetado para a fachada com maior exposição à radiação solar (N-NW) e terem sido projetados brises horizontais nas fachadas E-NE e W-SW. Com relação ao sistema de condicionamento de ar, o anteprojeto previa sistema tipo expansão direta com VRF e condensação a ar. Para iluminação das áreas de escritório, alternativas com 12 W/ m^2 e 10 W/ m^2.

Para avaliar a orientação de projeto, um modelo da geometria e orientação do Proposed Building, sem brises-soleil e com WWR e vidros do Baseline Building apresentou custo com energia superior em apenas 0,2%. Análises paramétricas resultaram em economia de 5,1% para a redução de LPD, seguida de 2,4% para os brises e 0,7% para vidro insulado com fator solar de 21% e transmitância térmica de 1,68 W/ m^2 K. E modelo com vidro insulado com fator solar de 26% e transmitância térmica de 1,65 W/ m^2 K resultou em custo com energia superior em 1,2%. O cenário idealizado para o Proposed Building, com LPD de 10 W/ m^2, WWR de projeto (58%) e com o vidro que resultou no melhor desempenho energético para o edifício, apresentou estimativa de economia anual no custo de energia de 8,2%, inferior à meta de 14% do pré-requisito EAp2. Como recomendações para o desenvolvimento dos projetos, foram sugeridas dimerização das luminárias próximas às fachadas e melhorias para o sistema de condicionamento de ar.

Com o desenvolvimento dos projetos, outras simulações foram conduzidas. Para essas, foram modelados os cinco subsolos, térreo, mezanino do térreo, pavimento balcão e pavimentos primeiro a décimo quinto, sendo um pavimento tipo para os subsolos quinto a segundo e outro para os pavimentos segundo a décimo quarto. Para

os ambientes de escritório, as zonas térmicas foram modeladas de acordo com posição e vazão das evaporadoras.

Revisados dados de WWR do projeto (54% para o pavimento tipo), vazão de ar das evaporadoras, pressão estática dos ventiladores, COP do sistema de condicionamento de ar (3,8 W/W) e LPD (26% inferior quando comparado com o Baseline Building), o modelo Proposed Building foi simulado com quatro alternativas de vidro, com fatores solar entre 32% e 35%. Os resultados indicaram economias de até 17%. A figura 2 apresenta planta e modelo espacial do pavimento tipo do Proposed Building; a tabela 2, suas principais características.

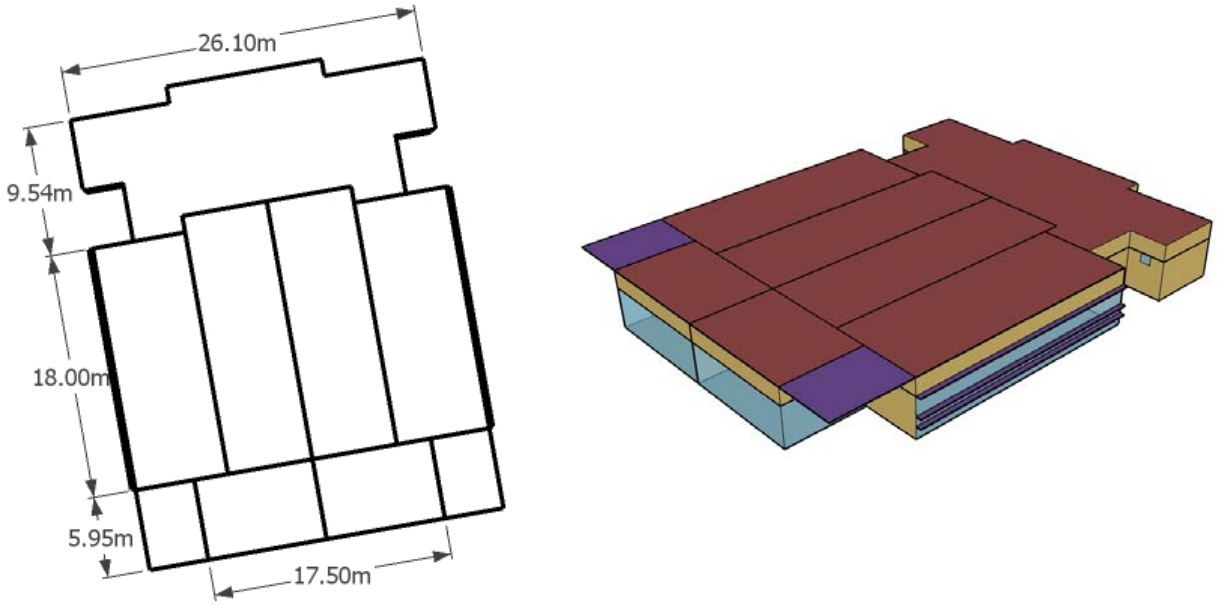


Figura 2. Planta e modelo espacial do pavimento tipo do Proposed Building para o estudo de caso #2

Tabela 2. Características do estudo de caso #2

Localização São Paulo (23°37' S e 46° 39' W)		
Número de pavimentos 5 subsolos, térreo, mezanino, balcão e 16 pavimentos tipo		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	6,01	32 a 35
Paredes	0,705	-
Observações: houve preocupação com o desempenho da envoltória do edifício, o que pode ser facilmente percebido pelo fato de o core ter sido projetado para a fachada com maior exposição à radiação solar (N-NW) e terem sido projetados brises horizontais nas fachadas E-NE e W-SW. O pavimento tipo apresenta WWR de 54%, não tendo sido definida opção dentre os vidros analisados.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 9.380 m^2		
Observações: sistema tipo de expansão direta com condensação a ar, VRF e vazão de ar constante nas evaporadoras, sendo adotado COP igual a 3,8 W/W para as condensadoras do sistema VRF.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	variável	
Core	variável	
Observações: a potência total instalada em cada zona do modelo do projeto foi calculada com base no projeto disponível. A densidade de potência varia de ambiente para ambiente. No total, a potência instalada no projeto é 26% inferior ao limite definido pela ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2004.		

4.2.3 Estudo de caso 3

Para o terceiro estudo de caso, a atividade de consultoria iniciou-se imediatamente após desenvolvimento do anteprojeto de arquitetura. Longitudinalmente, o edifício está orientado para E-NE e W-SW e, nessa etapa do projeto, apresentava WWR de 60%, não havendo sido definidos os vidros. Devido à falta de informações para simulação, os

projetistas foram orientados com relação à metodologia descrita no apêndice G e ao objetivo de 14% de economia estimada em custo de energia para viabilizar a certificação. Com base em resultados de outras simulações realizadas para edifícios de mesmo uso, foi sugerida meta inicial de redução nos consumos de iluminação e condicionamento de ar em 22%. Também foram recomendadas as estratégias:

- Redução de WWR das fachadas para valores próximos a 40%;
- Especificação de vidros com fator solar que resultem em elevado desempenho energético para o edifício;
- Estudo de dimensionamento dos dispositivos de proteção solar fixos previstos;
- Aplicação de isolante térmico de lã de rocha ou lã de vidro em substituição à chapa metálica que compões a shadow box da viga de borda;
- Redução da potência instalada em iluminação nos ambientes de escritórios.

Para as primeiras simulações de desempenho térmico e energético do edifício, sua envoltória foi analisada. Os pavimentos tipo foram modelados em cinco zonas térmicas, sendo uma para a área de core e quatro para as áreas de escritório, todas condicionadas, das quais duas perimetrais e duas internas. O WWR de projeto foi corrigido para 58,5 % e o Proposed Building foi simulado com o sistema de condicionamento de ar do modelo de referência, LPD de 12 W/ m^2 e 50 mm de isolante térmico nas paredes externas. Também foram consideradas alternativas com WWR de 40% e LPD de 10 W/ m^2. Para essas simulações, foram analisados quatro vidros, sendo dois deles informados pela arquitetura. Dos quatro vidros, o vidro laminado possui fator solar de 36% e os demais, todos duplos com câmara de ar, valores de 24%, 26% e 31%. Os resultados indicaram que as alternativas com vidros sugeridos

pela arquitetura apresentaram pior resultado. Embora um deles apresentasse fator solar de 26%, sua baixa transmitância térmica (1,66 W/ m^2K) contribuiu para acúmulo de calor nos ambientes, uma vez que dificulta perdas de calor para o exterior. Uma redução de LPD em 17% resultou em economia de 5,1% e para WWR de projeto, o vidro insulado com fator solar de 24% apresentou o melhor resultado. Além disso, foram testadas alternativas com WWR de 40% e LPD de 12 W/ m^2 e 10 W/ m^2, que resultaram em economias de 1,4% e 7,6%. Como conclusão, foi sugerida revisão das simulações de modo a incorporar características do projeto de condicionamento de ar.

Para análises seguintes a geometria dos pavimentos tipo foi refeita de modo a aproximar o modelo simulado ao projeto. Como todos os pavimentos diferem em área entre si, foram considerados dois pavimentos tipo para as áreas de escritório. Também foram incorporados:

- Subsolos, térreo e mezaninos;
- Sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta, com volume de refrigerante variável, condensação a água, torres de resfriamento de duas velocidades e distribuição de ar por meio de evaporadoras dutadas com insuflação de ar constante, conforme projeto;
- Recuperador de calor na tomada de ar externo, conforme projeto;
- Estratégia de sensores de CO_2 modulando a vazão de ar externo em função da ocupação;
- Ventilação noturna e
- LPD de 13 W/ m^2, conforme projeto.

As alternativas simuladas consideraram alterações no projeto de iluminação, no dimensionamento dos brises e nos vidros, sendo utilizados laminados de elevado desempenho sugeridos também para outros projetos. Os resultados apontaram para estimativa de custo anual de energia do modelo Proposed Building 4,1% acima da estimativa para o Baseline Building. Com redução do LPD em 23% (10 W/ m^2), a economia alcançada passou a 4,7%. Para o modelo com LPD de 10 W/ m^2, os brises com o dobro da projeção prevista pelo projeto de arquitetura contribuíram para economia de 7,4% e dois vidros com fator solar de 29%, contribuíram para economias de 7,4% e 7,1%.

Dados os resultados e para viabilizar a certificação, decidiu-se por inscrever o projeto na versão 3 do LEED, cujo pré-requisito EAp2 exige economia de 10%. Posteriormente, a partir de solicitação do cliente, foram incorporados ao modelo dados de carga e demanda de:

- Ventiladores para tomada de ar externo;
- Exaustão de estacionamento;
- Elevadores sociais e de serviço;
- Iluminação de elevadores;
- Iluminação externa;
- Equipamentos para pressurização de escadas e
- Bombas de irrigação.

Reduzida projeção dos brises, por opção da arquitetura, ajustado LPD das áreas de escritório para 8,9 W/ m^2 e incorporadas ao projeto estratégias de frenagem

regenerativa para elevadores da zona alta e antecipação de chamada, sensores de presença nos estacionamentos para acionamento da iluminação e sensores de CO_2 modulando a vazão de ar externo em função da ocupação, e vidro laminado solicitado para análise pela arquitetura, com fator solar de 40%, os resultados apontaram para economia de 10,1%. Após compatibilização dos projetos, foram analisados mais cinco vidros, todos laminados, com fatores solar entre 36% e 38%. Os resultados mostraram economias entre 11,1% e 11,5%. A figura 3 apresenta planta e modelo espacial do pavimento tipo do Proposed Building. A tabela 3, suas principais características.

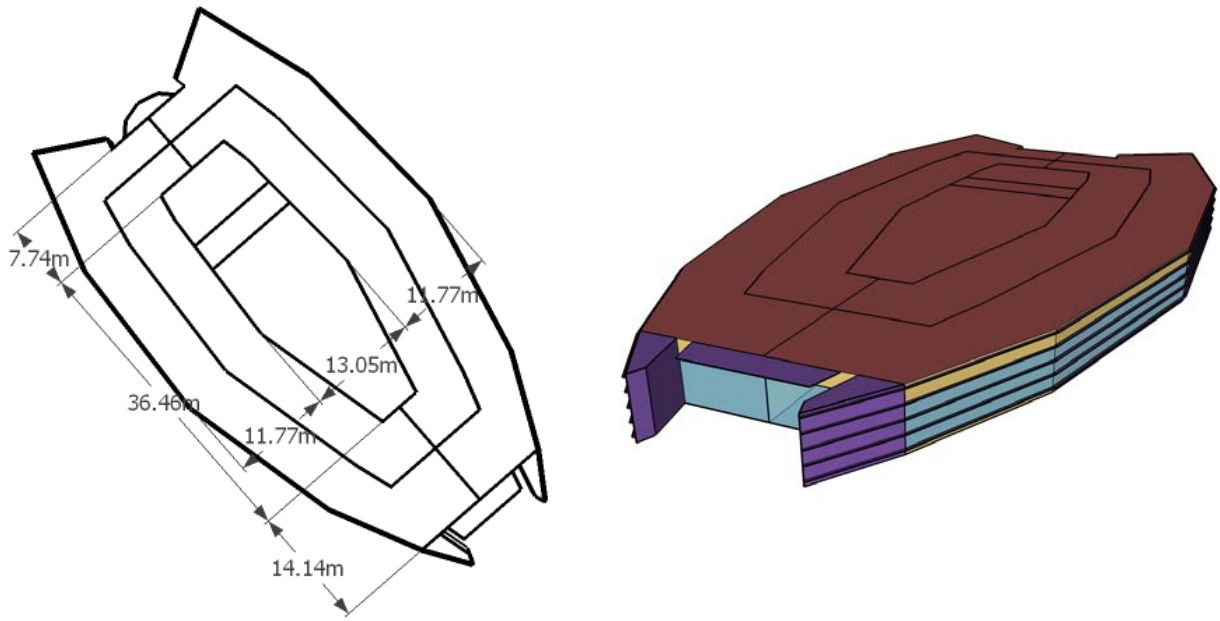


Figura 3. Planta e modelo espacial de pavimento tipo do Proposed Building para o estudo de caso #3

Tabela 3. Características do estudo de caso #3

Localização São Paulo (23°37’ S e 46° 39’ W)		
Número de pavimentos 5 subsolos, térreo, mezanino, pavimento técnico e outros 18 pavimentos		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	2,3 a 5,3	36 a 40
Paredes	0,705	-
Observações: várias opções de vidro foram simuladas, todas contribuindo para atendimento da meta de 10% de economia anual em custo de energia. O modelo final do Proposed Building apresenta WWR de 63% para o pavimento tipo e brises horizontais com 20 cm de projeção.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 28.974 m^2		
Observações: sistema de expansão direta com VRF, condensação a água, COP 4,07 W/W e distribuição de ar por meio de evaporadoras dutadas com vazão de ar insuflado constante.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	8,9	
Core	variável	
Observações: a potência total instalada em cada zona térmica do modelo do projeto foi calculada com base no projeto disponível. A densidade de potência varia de ambiente para ambiente. No total, a potência instalada no projeto é 26% inferior ao limite definido pela ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2007.		

4.2.4 Estudo de caso 4

A consultoria para o quarto estudo de caso iniciou-se com solicitação de informações para caracterização do sistema de condicionamento de ar e dos materiais de fachada, incluindo o vidro em frente às vigas de borda. Além de dados referentes ao sistema de condicionamento de ar, foram pedidos dados considerados para seu projeto, como densidade de potência de equipamentos e de iluminação e ocupação.

Para a primeira simulação, foram considerados três pavimentos da torre, sendo dois para o pavimento acima do térreo e a cobertura e um terceiro para os 14 pavimentos tipo. Nessa etapa, cada pavimento foi modelado com apenas cinco zonas, sendo uma para a área de core e as demais para diferentes orientações. O Proposed Building foi simulado com WWR de 70%, central de água gelada com três chillers centrífugos de igual capacidade e fan-coils com caixas VAV, ambas características de projeto, e vidro com fator solar de 34% e LPD de 12 W/ m^2, ambos estimados. Os resultados foram de custo anual 15,7% superior ao do Baseline Building. Também foi simulada alternativa com vidro com fator solar de 29% e de economia estimada para termoacumulação no sistema de condicionamento de ar. Os resultados foram de economia de 0,1% e 13,6%, respectivamente. Dada a meta de 14%, foram sugeridas outras estratégias, a serem somadas às últimas: diminuição do WWR, chillers com COP elevado e redução de LPD.

Para as análises seguintes foram realizadas simulações paramétricas com o objetivo de avaliar diferentes características da envoltória. Os resultados demonstraram que opção com dry-wall, WWR de 40%, vidro insulado e LPD de 10 W/ m^2 apresentaram a maior economia. Como conclusão, foi enfatizada necessidade de especificação de

sistema de condicionamento mais eficiente em conjunto com envoltória com bom desempenho energético e redução de LPD.

Após desenvolvimento dos projetos, foram modelados todos os ambientes, incluindo os cinco subsolos, o térreo e os pavimentos segundo a décimo nono, sendo que os escritórios foram modelados com zonas internas e perimetrais. Os custos com energia estimados resultaram em economia de 13,8 % para o vidro que resultou no melhor desempenho energético para o edifício e de 12,4% para o outro vidro. Nessa etapa da consultoria, o projeto possuía as seguintes características:

- WWR de 60% (redução de 14,3% com relação ao projeto anterior);
- Centrífugas acionadas por variador de freqüência;
- Recuperador de calor na tomada do ar externo;
- Sensores de CO_2 modulando a tomada de ar externo em função da ocupação e
- Duas opções de vidro “virtuais”, uma desejável (fator solar de 25%) e outra aceitável (fator solar de 30%).

Uma vez que as simulações anteriores não demonstraram atendimento ao pré-requisito EAp2, para viabilização da certificação foram analisadas outros modelos, incluindo alternativas com WWR de 50% e elevadores com frenagem regenerativa. Para modelo com WWR de 60%, economia de elevadores e vidro desejável (fator solar de 25%), conseguiu-se 14,2%. Diminuindo a área de fechamento translúcido das fachadas para 50%, a economia estimada para o Proposed Building foi de 14,9%.

Como conclusão, foi definida necessidade de redução do WWR para 50% ou vidro com fator solar muito próximo a 25%, valor adotado para o Baseline Building. Para

simulação final e preparação de documentação a ser enviada para o USGBC, devem ser definidos WWR e vidro e incluídos dados de carga e demanda de demais equipamentos, incluindo cargas de processo.

A figura 4 apresenta planta e modelo espacial do pavimento tipo do Proposed Building; a tabela 4, suas principais características.

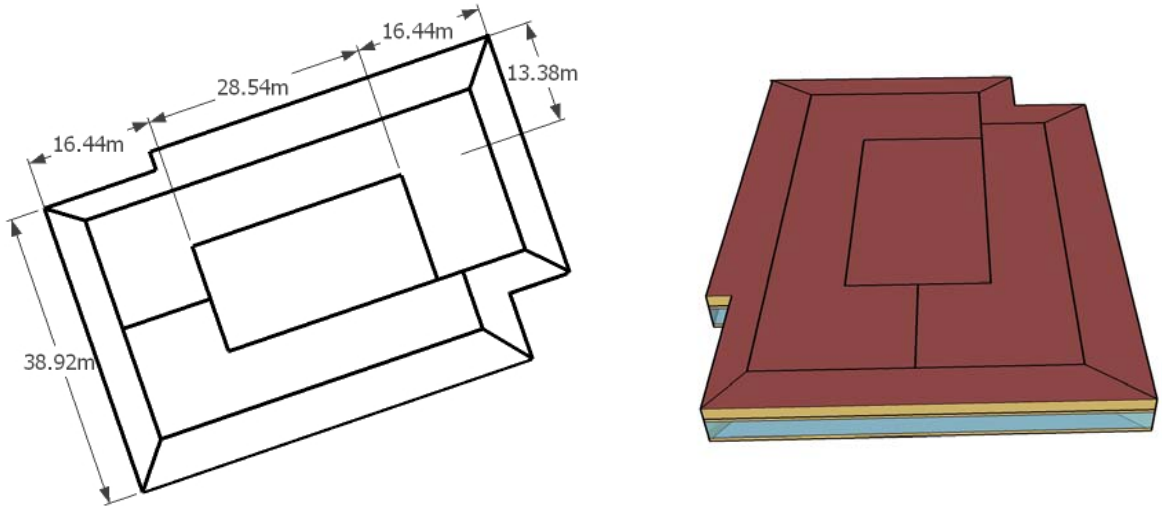


Figura 4. Planta e modelo espacial de pavimento tipo do Proposed Building para o estudo de caso #4

Tabela 4. Características do estudo de caso #4

Localização São Paulo (23°37' S e 46° 39' W)		
Número de pavimentos 5 subsolos, térreo e outros 18 pavimentos		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	4,16	25 e 30
Paredes	0,705	-
Observações: a última versão do projeto de arquitetura apresenta WWR de 60%. Contudo, os resultados das simulações indicaram necessidade de redução para 50%. A simulação final deverá ser revisada para inclusão de dados do vidro, a ser definido pela consultoria de vidro e caixilharia.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 35.219 m^2		
Observações: sistema de água gelada com chillers com COP 6,1 W/W, torres de resfriamento de duas velocidades, circuito primário variável, bombas de água gelada e de condensação inter-travadas para cada chiller e distribuição de ar por meio de caixas VAV.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	variável	
Core	variável	
Observações: a potência total instalada em cada zona do modelo do projeto foi calculada com base no projeto disponível. A densidade de potência varia de ambiente para ambiente. Para os ambientes internos, a potência instalada no projeto é 10,96% inferior ao limite definido pela norma ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2004.		

4.2.5 Estudo de caso 5

Para o quinto estudo de caso, registrado na versão 2.0 do LEED CS, a meta de economia para atendimento ao pré-requisito de desempenho energético mínimo é de 14%.

Para as primeiras simulações para consultoria de eficiência energética, foram considerados apenas os quinze pavimentos tipo. Nessa etapa, os projetos de arquitetura e de sistema de condicionamento encontravam-se avançados e, diferentemente da maioria dos projetos, para a primeira simulação foram solicitadas análises de cinco tipos de vidro. Devido ao projeto de iluminação não ter sido iniciado, os modelos referentes ao Proposed Building foram simulados com limites de potência instalada em iluminação definidos pela norma ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2004 foram reduzidos em 16,7%.

Como diferencial em relação ao modelo Baseline Building, o modelo do projeto possui:

- Os terraços previstos no projeto, que funcionam como dispositivos de proteção solar fixos;
- Vidros com fator solar entre 25% e 32%;
- Paredes externas de concreto;
- Potência instalada em iluminação de 10 W/ m^2 para as áreas de escritório;
- Sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta com condensação a ar, VRF, capacidade nominal e vazão de ar segundo projeto, coeficiente de desempenho – COP para as condensadoras do sistema VRF igual a 3,5 W/W e pressão estática de 100 Pa para os ventiladores das evaporadoras.

Devido ao WWR do projeto inferior a 40%, ambos os modelos foram simulados com WWR de projeto (34%).

Com relação à envoltória do edifício, vale ressaltar que, além do reduzido WWR, dos vidros com fator solar igual ou próximos aos do Baseline Building (25%) e do

sombreamento devido aos terraços, a área de core encontra-se adjacente à fachada norte, que devido à orientação é bastante exposta à radiação solar.

Dadas opções de vidro simuladas, as economias alcançadas foram de 19,4% a 20,3%, o que qualifica o projeto para atendimento do pré-requisito EAp2. Embora o projeto apresente reduzido WWR e orientação adequada, a redução do LPD e a pressão estática dos ventiladores colaboraram para os resultados alcançados.

Para as próximas análises deverão ser considerados demais pavimentos e dados de carga e de demanda de iluminação externa, de ventiladores de garagem, de elevadores, de exaustão de escritórios e de pressurização de escadas, entre outros. Com a inserção dessas cargas no modelo, a parcela comum a ambos os modelos, Baseline Building e Proposed Building, relativa à cargas de processo, incluindo equipamentos de escritório, a economia tende a baixar. A figura 5 apresenta planta e modelo espacial do Proposed Building; a tabela 5, suas características.

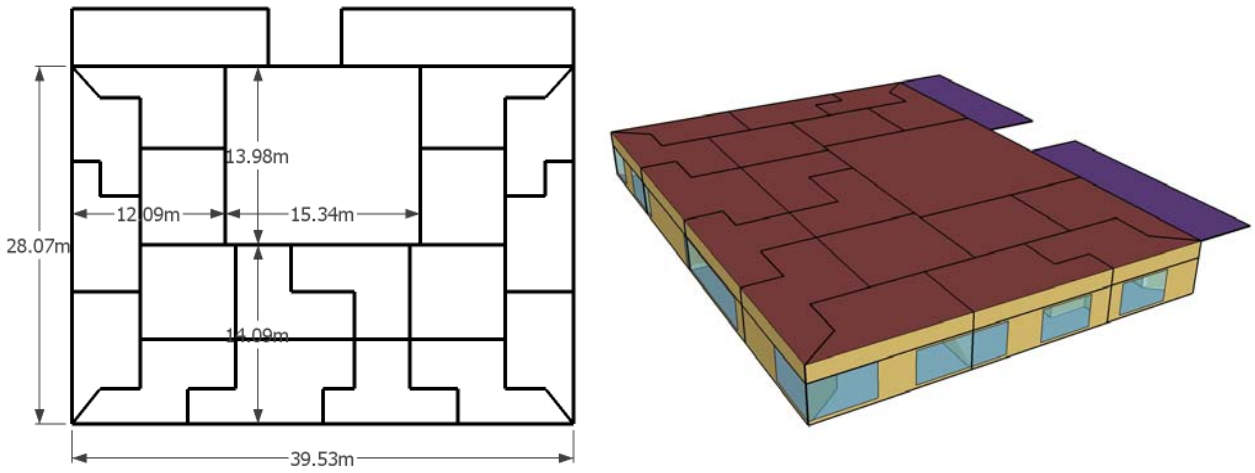


Figura 5. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #5

Tabela 5. Características do estudo de caso #5

Localização São Paulo (23°37' S e 46° 39' W)		
Número de pavimentos 15		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	5,93 a 6,01	25 a 32
Paredes	3,79	-
Observações: o projeto apresenta WWR de 34,5% para o pavimento tipo, vidros com fator solar entre 25% e 32%, sombreamento devido aos terraços e a área de core adjacente a fachada com grande exposição à radiação solar.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 13.426 m^2		
Observações: sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta com condensação a ar, VRF, capacidade nominal e vazão de ar segundo projeto, COP para as combinações de condensadoras e evaporadoras do sistema VRF igual a 3,5 W/W e pressão estática dos ventiladores de 100 Pa.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	10,0	
Core	5,0	
Observações: para iluminação, foram adotados valores de 10 W/ m^2, estimados para os limites de potência instalada em iluminação definidos pela norma ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2004 reduzidos em 16,7%. Com desenvolvimento do projeto de iluminação, os valores devem ser revisados.		

4.2.6 Estudo de caso 6

A meta de economia para o sexto estudo de caso é que o projeto apresente custo igual ou inferior ao modelo de comparação. Como o edifício compreende um shopping mall e uma torre de escritórios, com sistemas de condicionamento de ar distintos, as

simulações foram conduzidas separadamente. Aqui, são apresentados apenas resultados referentes à torre de escritórios.

Havendo duas opções de altura para as torres, para o modelo com coeficiente de aproveitamento menor, foram modelados os pavimentos sexto, o pavimento tipo do sétimo ao décimo e outro do décimo primeiro ao décimo nono. Para a segunda opção, o pavimento tipo superior foi multiplicado de modo a representar o coeficiente de aproveitamento maior.

Devido ao fato de os projetos estarem desenvolvidos, para as primeiras simulações foram considerados dados de carga e de demanda de pressurização de escadas, de elevadores e de escadas rolantes, de UPS, de iluminação de rota de fuga, de vigia e externa, e de bombas de água pluvial, de reúso e de irrigação.

Para comprovação de atendimento ao pré-requisito EAp2, a simulação foi conduzida segundo metodologia descrita na seção 11. Para obtenção de pontos no crédito EAc1, o apêndice G. As principais diferenças entre os modelos Energy Cost Budget e Baseline Building dizem respeito ao WWR, à distribuição de área envidraçada pelas fachadas, ao fator solar do vidro e ao sistema de condicionamento de ar. Para a torre, as envoltórias dos modelos Energy Cost Budget e Baseline Building diferem entre si quanto ao fator solar e quanto ao WWR, tendo o modelo da seção 11 WWR de 50% e o do apêndice G, WWR de 40%. Não tendo sido especificados vidros, foram consideradas propriedades ópticas e térmicas de vidros de outros projetos, com fatores solar de 30%, 38% e 39%. Adotada metodologia da seção 11, a torre de escritórios apresentou economia de 0,9% para menor coeficiente de aproveitamento e de 2,7% para projeto com coeficiente de aproveitamento maior.

Para identificar possibilidade de obtenção de pontos no EAc1, foi simulada opção de chillers de absorção e elétricos em paralelo, resultando em economia de 9% para a torre com coeficiente de aproveitamento menor e de 8,7 % para opção com mais pavimentos. A figura 6 apresenta plantas e modelo espacial do Proposed Building; a tabela 6, suas características. As plantas e o modelo espacial referem-se aos pavimentos tipo que mais se repetem.

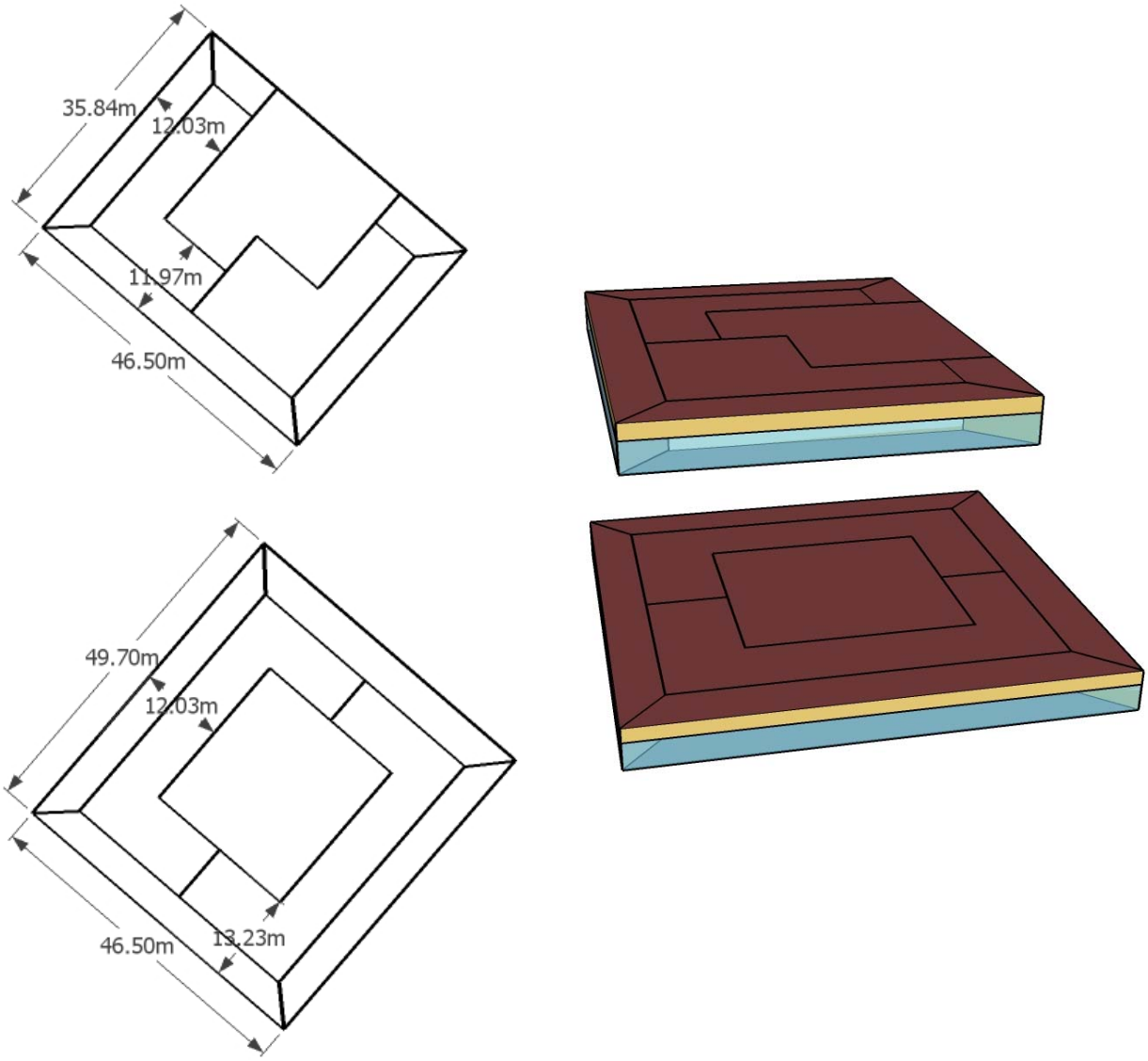


Figura 6. Plantas e modelo espacial de pavimentos tipo Proposed Building para o estudo de caso #6

Tabela 6. Características do estudo de caso #6

Localização São Paulo (23°37' S e 46 ^{O} 39' W)		
Número de pavimentos 14 (CA=4) ou 24 (CA=6)		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	5,8	30, 38 e 39
Paredes	0,705	-
Observações: A torre, com WWR de 59% está bem orientada, uma vez que para os pavimentos tipo superiores a área de core encontra-se adjacente à fachada N-NE.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 18.218 m^2 para CA=4 e 35.072 m^2 para CA = 6		
Observações: central de água gelada com chillers de absorção e elétricos em série, circuito primário de vazão constante e secundário variável, torres de resfriamento de circuito fechado, distribuição de ar por meio de caixas VAV, tomada de ar externo em função da ocupação por meio de sensores de CO_2 e recuperador de calor na tomada de ar externo.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritórios	8,5	

4.2.7 Estudo de caso 7

O sétimo estudo de caso compreende duas torres de escritório, shopping mall, centro de convenções, academia e seis pavimentos de estacionamento. Para esse projeto, a consultoria deu-se em dois momentos. Primeiramente, após desenvolvimento dos projetos de arquitetura e de iluminação, os projetistas foram orientados com relação à meta original de 14% de economia e aos procedimentos descritos no apêndice G e utilizados para as simulações de desempenho energético do complexo. Nessa fase,

análise de uma das torres resultou em 13,3% de economia. Para esse modelo foram considerados:

- Peitoril aparente;
- Sistema de condicionamento de ar tipo expansão direta com VRF e condensação a água;
- LPD de 10 W/ m^2 para as áreas de escritório e
- Aproveitamento de iluminação natural por meio de dimerização.

Contudo, com a retomada das simulações para orientação final e documentação de conformidade com o pré-requisito de desempenho energético mínimo EAp2, foram verificados valores de LPD superiores aos estabelecidos como meta e muito próximos dos definidos pela seção prescritiva da norma ANSI/ASHRAE/IESNA 90.1-2004. Nessa fase, um modelo com todos os ambientes apresentou economia de 11,8%. Esse resultado considerou:

- WWR de 53% para o pavimento tipo;
- Vidro com falor solar de 27%;
- Sistema de condicionamento de ar tipo expansão direta com VRF e condensação a água;
- Sensores de CO para exaustão de ar das garagens, posteriormente descartado;
- Redução de potência instalada de equipamentos de exaustão de ar dos sanitários;

- Sensores de presença nas garagens e outras áreas comuns para desligamento da iluminação
- LPD com redução de 3,5% para as áreas de escritório e de 11,7% para as áreas externas;
- Aproveitamento de iluminação natural por meio de dimerização;
- Elevadores com frenagem regenerativa na zona alta e antecipação de chamadas.

O mesmo modelo com 17% de redução em LPD e sem dimerização resultou em economia de 12,9%; com dimerização, em 14,4%.

Finalmente, após revisão do projeto de iluminação, com redução do LPD para 11,5 W/ m^2 nas áreas de escritório, adoção de persianas automatizadas e especificação dos vidros, a economia alcançada foi de 12%, exigindo que o projeto fosse registrado na versão LEED 2009. A figura 7 apresenta planta e modelo espacial do pavimento tipo mais representativo do Proposed Building; a tabela 7, suas características.

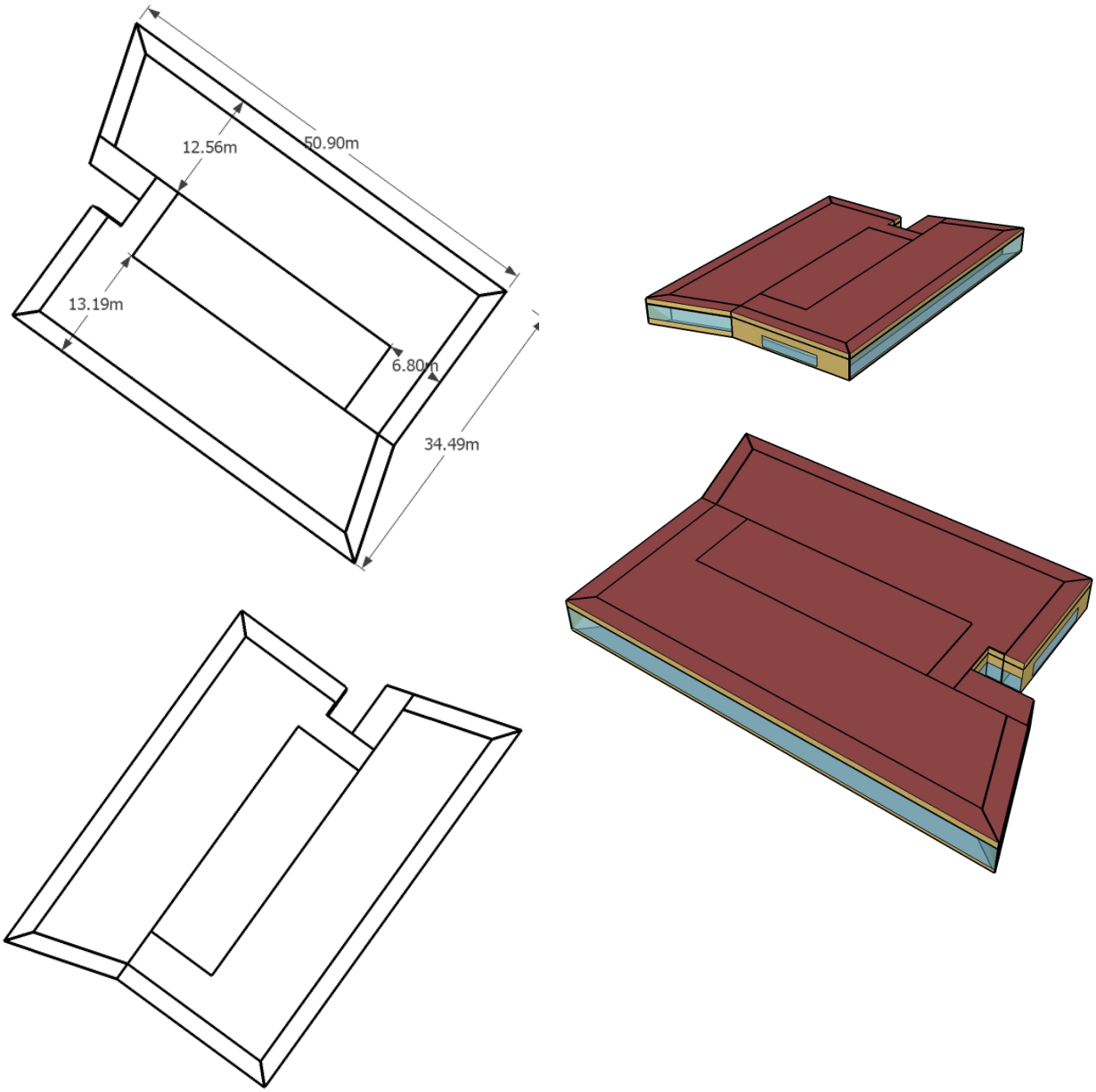


Figura 7. Planta e modelo espacial de pavimentos tipo do Proposed Building para o estudo de caso #7

Tabela 7. Características do estudo de caso #7

Localização São Paulo (23°37' S e 46 ^{O} 39' W)		
Número de pavimentos 5 pavimentos, sendo 3 subsolos, e 27 pavimentos de escritório		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	6,0	35
Paredes	0,727	-
Observações: O projeto apresenta WWR de 53% para o pavimento tipo e WWR de 44,7% para todo o empreendimento. Com relação à orientação solar, pode-se dizer que as torres não têm a pior orientação: uma delas tem suas maiores fachadas orientadas para NE e SW e a outra, para NW e SE. Os vidros especificados para as torres possuem fator solar de 35% e os terraços funcionam como brises.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 74.171 m^2		
Observações: para as torres, foram projetados sistemas de expansão direta com VRF, condensação a água, COP igual a 4,43 W/W e distribuição de ar por com vazão constante.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	11,5	
Core	variável	
Observações: o projeto de iluminação revisado apresenta para 11,5 W/ m^2 para as áreas de escritório.		

4.2.8 Estudo de caso 8

Para o oitavo estudo de caso, a atividade de consultoria iniciou-se com o anteprojeto de arquitetura desenvolvido. Devido à falta de informações referentes aos demais projetos, a primeira simulação foi realizada com o intuito de avaliar as características da envoltória do edifício e uma possível redução em iluminação. A partir dos resultados

obtidos foi possível definir estratégias para que seja alcançada economia de 14%, exigência para projetos registrados na versão LEED CS 2.0 após 28 de junho de 2007.

Para o modelo Baseline Building, adota-se sistema de água gelada com dois chillers parafusos, com eficiência em função da capacidade solicitada, circuito primário constante e secundário variável e distribuição de ar nos ambientes por meio de caixas de volume de ar variável. Para iluminação, 12 W/m^2 para as áreas de escritório. Para as análises, ambos modelos, Baseline Building e Proposed Building, foram simulados com as mesmas características, incluindo de orientação solar, de LPD e de sistema de condicionamento de ar.

A fim de avaliar o WWR previsto para o pavimento tipo, dois modelos com as características do Baseline Building foram simulados, tendo um deles WWR de 40%, conforme procedimentos descritos no apêndice G, e o outro 45%. O mesmo foi feito para iluminação e para duas opções de vidro laminado, que embora não tenham sido especificados, foram analisadas com o intuito de orientar o consultor. Em seguida, foi simulado modelo com as características testadas anteriormente: redução de LPD, vidro que apresentou o melhor desempenho energético para o edifício e WWR. Os resultados indicaram economias de 6,03% para o modelo com LPD de 10 W/m^2 e de 0,34% para o modelo com vidro laminado com PVB verde e fator solar de 25%. As alternativas com vidro laminado com PVB incolor e fator solar de 27% e com WWR de 45% apresentaram, respectivamente, custos anuais com energia superiores em 0,02% e em 0,73% quando comparadas com os custos do modelo Baseline Building. Para o modelo com as características testadas anteriormente e sistema de condicionamento de ar igual ao do Baseline Building, a economia alcançada foi de 4,9%. Com base nos resultados dessa primeira análise técnica e para meta de 14% de economia com custo

de energia, o projetista do sistema de condicionamento de ar foi orientado a desenvolver projeto de modo a alcançar economias superiores a 26%, apenas com condicionamento de ar.

Posteriormente, foi analisado sistema de insuflação de ar pelo piso, previsto para o edifício e ainda não projetado. Para modelo Baseline Building com insuflação de ar pelo piso, a economia foi de 7,8%. Para modelo Proposed Building com central de água gelada, a economia alcançada foi de 13,7%. A figura 8 apresenta planta e modelo espacial do Proposed Building; a tabela 8, suas características.

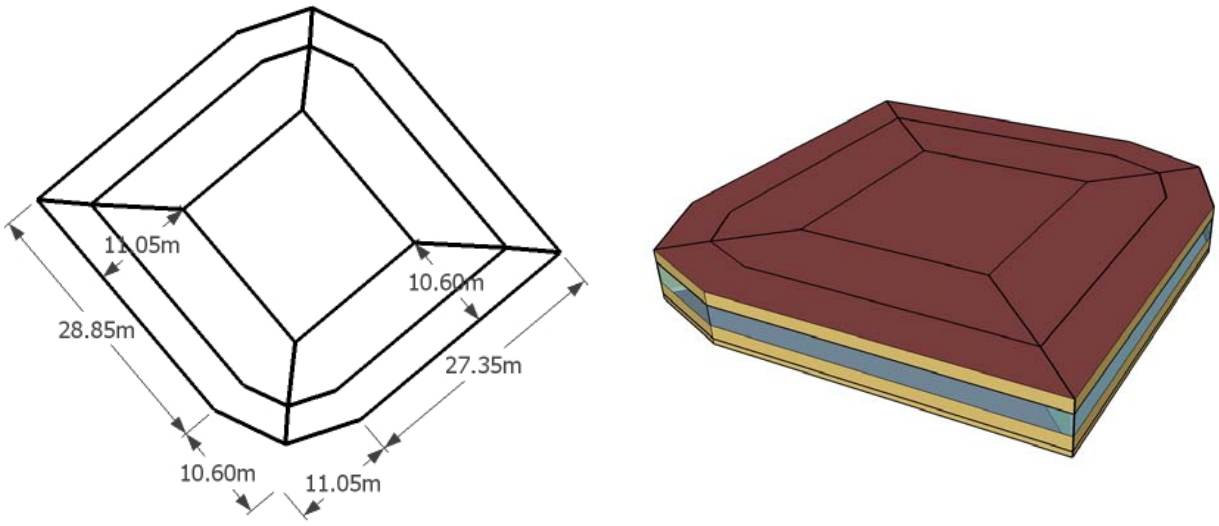


Figura 8. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #8

Tabela 8. Características do estudo de caso #8

Localização São Paulo (23°37' S e 46° 39' W)		
Número de pavimentos 14		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	5,89	25 e 27
Paredes	0,705	-
Observações: o edifício apresenta WWR reduzido, próximo aos 40% do Baseline Building, e embora não se possa dizer que esteja mal orientado com relação à insolação, uma vez que o pavimento tipo do mesmo apresenta quatro fachadas iguais, essas poderiam ter diferentes áreas de fechamento translúcido. O vidro simulado resulta em bom desempenho energético para o projeto, mas outras simulações deverão ser conduzidas com opções sugeridas pelo consultor de vidro.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 16.063 m^2		
Observações: será adotada insuflação de ar pelo piso (UFAD) mas os projetos ainda não foram desenvolvidos. Para as análises de desempenho da envoltória e de possível redução de LPD, adota-se sistema do Baseline Building.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	10,0	
Core	5,4	
Observações: para ambientes de escritório, foi estimada meta de 10,0 W/ m^2. Para core, somatório dos limites de LPD definidos no apêndice G para o Baseline Building.		

4.2.9 Estudo de caso 9

Para o nono estudo de caso, a atividade de consultoria iniciou-se com projetos de arquitetura, de condicionamento de ar e de iluminação desenvolvidos. Além disso, os projetistas já possuíam algum conhecimento com relação à metodologia descrita no apêndice G. Dos dados de entrada considerados para as simulações, apenas os

referentes ao vidro não correspondem aos do projeto. Segundo a consultoria de vidros e caixilharia, deverá ser especificado vidro temperado verde de 10 mm de espessura e coeficiente de sombreamento de no máximo 0,35. Nesse caso, foram utilizadas propriedades ópticas e térmicas de vidro com fator solar dentro dos limites definidos, no caso, de 27%. Devido ao estágio avançado dos projetos, para a simulação inicial foram considerados dados de carga e de demanda de:

- Exaustão de garagens;
- Pressurização de escadas;
- UPS;
- Elevadores sociais;
- Elevadores de serviço;
- Elevadores de garagem;
- Iluminação de rota de fuga;
- Iluminação de elevadores;
- Bombas de águas servidas;
- Bombas de recalque do sistema de condicionamento de ar;
- Ventiladores de exaustão dos escritórios;
- Ventiladores de tomada de ar externo para os escritórios;
- Iluminação externa
- Iluminação de vigia e

- Iluminação de garagens.

Para os dados de exaustão de garagens e de ventiladores, foram adotados valores de projeto, sendo os demais estimados. Para os equipamentos descritos acima, ambos modelos, Baseline Building e Proposed Building, devem ser modelados com os mesmos dados de carga e de demanda, com exceção de ventiladores e salvo quando adotada estratégia específica para conservação de energia, como frenagem regenerativa de elevadores. Para as cargas referentes a ventiladores, essas diferem entre modelos devido ao controle de vazão do ar de exaustão e de renovação por meio de sensores de CO_2 previsto para o projeto. Para iluminação externa, foi considerada redução de 10% com base em experiência de outros projetos. O resultado apresentado foi uma economia próxima aos 14% exigidos. A figura 9 apresenta planta e modelo espacial dos pavimentos tipo mais representativos do Proposed Building; a tabela 9, suas características.

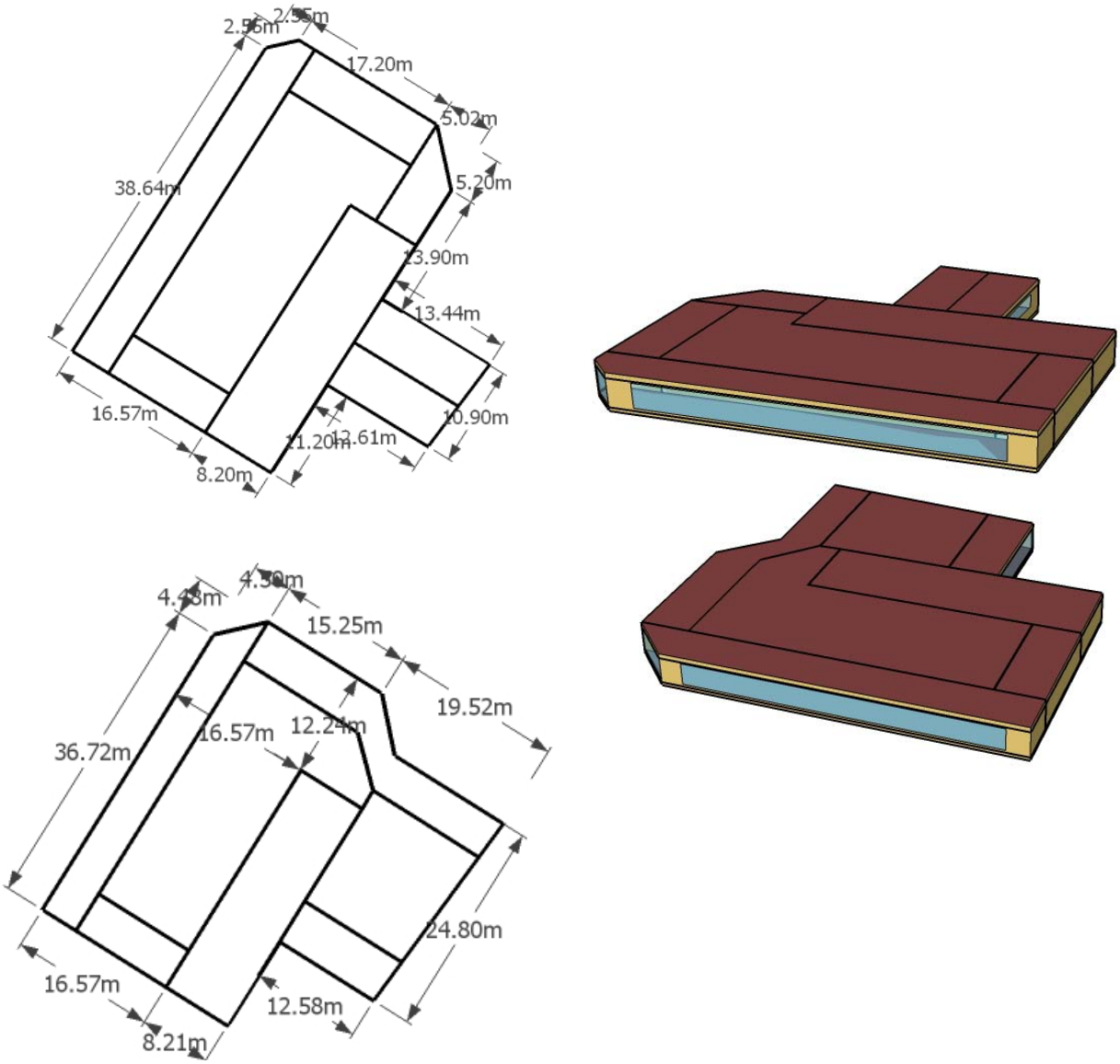


Figura 9. Planta e modelo espacial de pavimentos tipo do Proposed Building para o estudo de caso #9

Tabela 9. Características do estudo de caso #9

Localização Rio de Janeiro (22 ^{O}54' S e 43 ^{O}10' W)		
Número de pavimentos 16		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	5,8	27
Paredes	1,062	-
Observações: embora o edifício apresente a pior orientação, sua envoltória apresenta WWR de 46,0 %, próxima ao do modelo Baseline Building, e vidros com bom desempenho energético, que deverão ser substituídos por vidros a serem especificados pela consultoria competente.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 15.470 m^2		
Observações: sistema de condicionamento de ar de expansão direta com unidades compactas (self-contained) e condensação a água, COP igual a 4,72 W/W, sistema insuflação de ar pelo piso (UFAD) com temperatura de insuflação de ar a 16°C, torres de condensação abertas com ventiladores centrífugos e recuperador de calor (rodas entálpicas) e self na tomada de ar externo do 3° ao 18° pavimentos.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	10,5	
Core	10,2	
Observações: o projeto adota potência instalada de 10,5 W/m^2 nas áreas de escritório e de 10,2 W/m^2 para o core, a serem revisados conforme desenvolvimento do projeto de iluminação.		

4.2.10 Estudo de caso 10

Para o décimo estudo de caso, a atividade de consultoria iniciou-se imediatamente após desenvolvimento do anteprojeto de arquitetura. Devido à falta de informações para simulação, os projetistas foram orientados com relação à metodologia descrita no apêndice G e ao objetivo de 10% de economia estimada em custo de energia para

viabilizar a certificação. Com base em resultados de outras simulações realizadas para edifícios de mesmo uso, foram sugeridas metas iniciais de 12,5% de redução no consumo de iluminação e de 18% no consumo com condicionamento de ar. Também foram recomendadas as estratégias:

- Aplicação de isolante térmico nas vigas de borda;
- Vidro com fator solar próximo a 30%, caso o projeto não fosse alterado de modo a apresentar WWR próximo ao do Baseline Building;
- Sombreamento das fachadas por meio de brises ou persianas automatizadas.
- Condensadoras com COP elevado;
- Variação da tomada de ar externo por meio de sensores de CO_2;
- Redução da potência instalada em iluminação de garagens e de áreas externas;
- Sensores de presença nas garagens e outras áreas comuns para desligamento da iluminação e
- Dimerização da iluminação artificial próxima às fachadas com sensores de iluminância.

Para as simulações foram solicitadas aos projetistas informações referentes ao pavimento tipo:

- Propriedades ópticas e térmicas dos vidros;
- Especificação de condensadoras e evaporadoras;
- Estimativa de LPD por ambiente e

- Confirmação das estratégias de eficiência energética a serem consideradas.

Com relação à arquitetura, foram disponibilizadas duas opções de vidro reflexivo. Para o vidro serigrafado, previsto em projeto, não foram informados dados para análise. Os dados de potência instalada em iluminação para as áreas de escritório revelaram valor médio de 6,7 W/m^2, muito inferior ao praticado em outros projetos. O projetista de condicionamento de ar não apresentou desenhos técnicos, mas informou capacidade nominal e vazão das evaporadoras tipo cassete do sistema de expansão, bem como zoneamento térmico previsto. Para a primeira simulação, foram adotados dados de vidro serigrafado de outro projeto e 10,5 W/m^2 de potência instalada em iluminação para as áreas de escritório, conforme havia sido estabelecido como meta no início da consultoria. Para o vidro com melhor desempenho, foram alcançadas reduções de 26,1% e 20,5% em condicionamento de ar e em iluminação e economia de 18,2%. Para as próximas análises, os modelos serão refinados segundo desenvolvimento dos projetos. A figura 10 apresenta planta e modelo espacial do Proposed Building; a tabela 10, suas características.

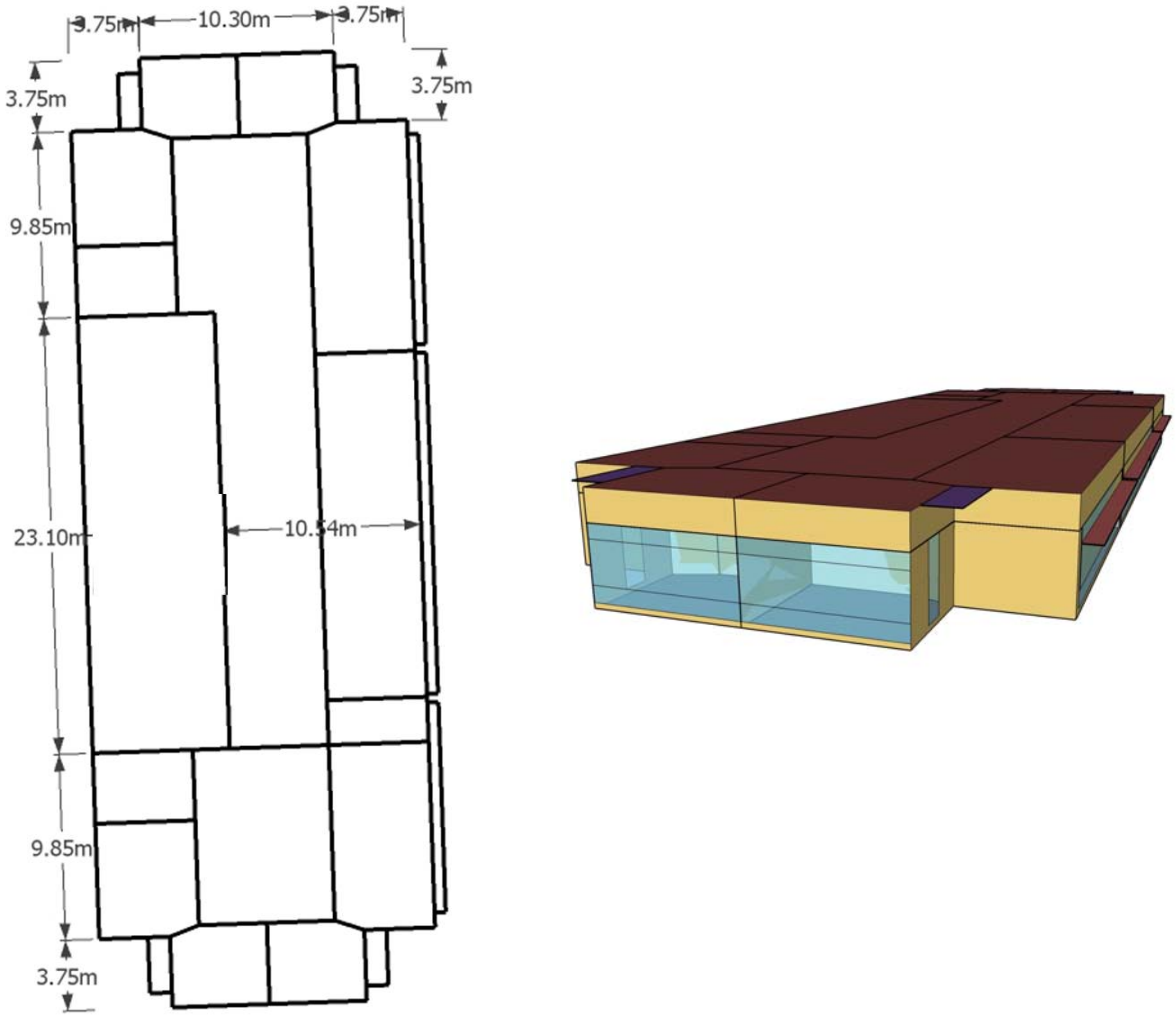


Figura 10. Planta e modelo espacial do Proposed Building para o estudo de caso #10

Tabela 10. Características do estudo de caso #10

Localização São Paulo (23°37’ S e 46 ^{O} 39’ W)		
Número de pavimentos 12		
Envoltória		
Superfície	Transmitância térmica - U (W/ m^2 K)	Fator solar (%)
Janelas	4,65 a 5,97	39 a 47
Paredes	1,062	-
Observações: a envoltória apresenta WWR de 68,25 %, sendo computados fechamentos opacos das áreas condicionadas do pavimento tipo e do plenum. Os dispositivos de proteção solar fixos na fachada E-NE, com maior área envidraçada, funcionam como estratégia para redução de ganhos de carga térmica por radiação solar, bem como o posicionamento do core na fachada oeste e orientação do edifício na direção N-NW/S-SE.		
Sistema de condicionamento de ar		
Área condicionada total: 8.057 m^2		
Observações: sistema de expansão direta tipo split, com evaporadoras semi-embutidas no forro, VRF, vazão de ar constante nas evaporadoras e condensação a ar, sendo adotado COP, igual a 3 W/W para as combinações de condensadoras e evaporadoras do sistema VRF e pressão estática dos ventiladores de 30 Pa.		
Iluminação		
Ambiente	Potência instalada em iluminação (W/ m^2)	
Escritório	10,5	
Core	5,5	
Observações: O projeto adota potência instalada de 10,5 W/m^2 nas áreas condicionadas, prateleiras de luz na fachada E-NE e dimerização das luminárias. Foram adotados sensores de iluminância próximos a dois metros das fachadas e a 80 cm de altura. Para o nível de iluminância de referência, adotou-se 500 lux. Com aumento da disponibilidade de luz natural, as luminárias são dimerizadas linearmente da potência total à mínima potência instalada, expressa como fração da potência total. Igualmente, para o controle dos níveis de iluminância, é definido valor mínimo proveniente das luminárias, abaixo do qual o sistema de iluminação é desligado.		

5 Método de trabalho

5.1 O EnergyPlus

5.1.1 Visão geral do programa

A ferramenta de simulação EnergyPlus, atualmente na versão 4.0.0.024, tem origem nos programas BLAST e DOE-2, lançados com o objetivo de auxiliar no dimensionamento de sistemas de climatização, na análises de desempenho energético de edifícios e em estudos de retrofit. Como os últimos, a partir de um modelo da construção e de seus sistemas, o programa EnergyPlus realiza cálculo da carga térmica necessária para manter limites pré-determinados de temperatura, bem como cálculo de consumo de energia dos sistemas principal e secundário de condicionamento de ar e de outros, como de iluminação e de equipamentos de tomada.

O programa compreende vários módulos que trabalham em conjunto para calcular a capacidade requerida para aquecimento e resfriamento utilizando diferentes sistemas e fontes de energia, segundo determinadas rotinas de operação e sob diferentes condições ambientais. Seus componentes principais são o gerenciador dos módulos de balanço térmico de superfícies e de massa e o gerenciador do módulo dos sistemas do edifício. A figura 11 ilustra os módulos do EnergyPlus.

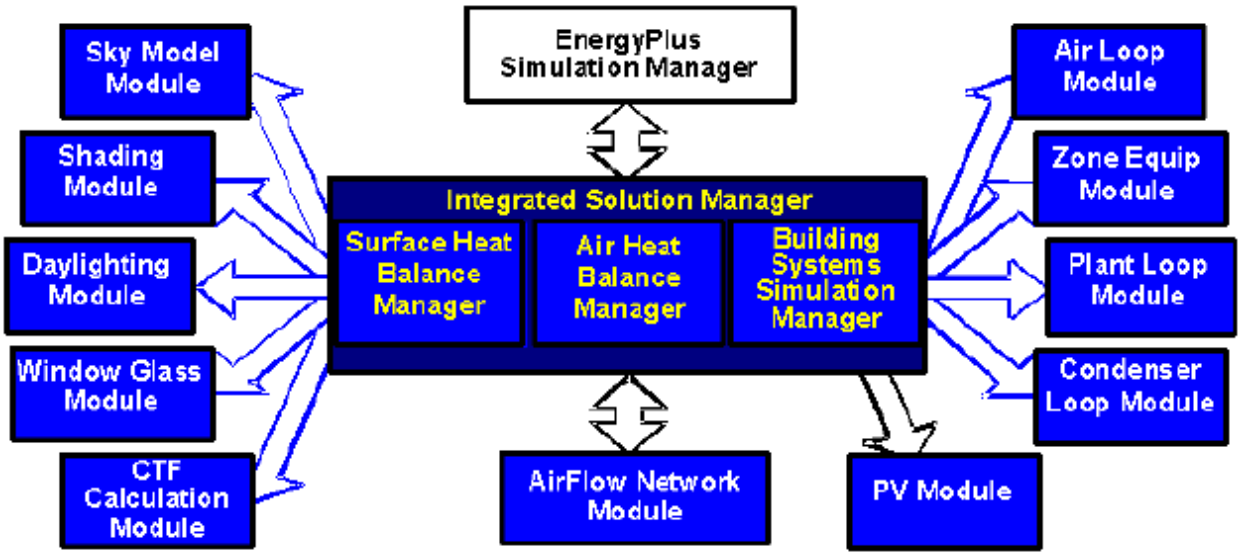


Figura 11 Módulos do EnergyPlus. Fonte: LBNL (2007)

O gerenciador de simulação dos sistemas do edifício faz a comunicação entre os módulos de balanço térmico e os vários módulos e circuitos do sistema de condicionamento de ar, como serpentinas, unidades de aquecimento, unidades de resfriamento, bombas, ventiladores e outros equipamentos. Os circuitos de ar e de água do sistema climatização são a partes centrais do gerenciador da simulação dos sistemas do edifício. O módulo de balanço térmico de superfície simula balanços térmicos internos e externos e efeitos de condução, de convecção, de radiação e de transferência de massa. O módulo de balanço de massa trabalha com fluxos de ar de ventilação, de exaustão e de infiltração, considerando a massa térmica das zonas e os ganhos de calor por convecção. Diferentemente dos programas anteriores, que realizam cálculo de carga térmica e simulam os sistemas e a planta de maneira sequencial, o EnergyPlus o faz de maneira integrada.

A simulação seqüencial inicia-se com o balanço térmico de uma zona, atualizando as condições ambientais dessa e determinando as cargas para resfriamento e aquecimento. Essa informação é utilizada pela simulação do balanço de massa para determinar a resposta do sistema, a qual não afeta as condições ambientais da zona, podendo assim, conduzir a resultados fisicamente incorretos. O mesmo problema pode ocorrer entre os sistemas e da planta, quando simulados sequencialmente.

Para integrar a simulação do sistema de distribuição de ar com a simulação das zonas, foi desenvolvido um método para modelar o circuito de ar e suas interações com as zonas por controles de temperatura e por diferenças de temperatura do ar da zona e do ar insuflado. O mesmo foi feito para integrar a simulação da planta à dos sistemas. A simulação realizada pelo EnergyPlus pode ser representada como uma série de elementos conectados por circuitos, conforme ilustrado pela figura 12.

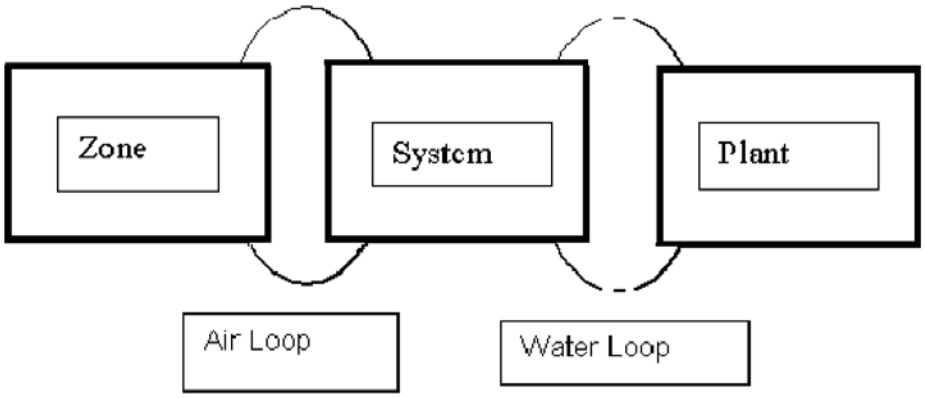


Figura 12 Esquema de simulação integrada do programa. Fonte: LBNL (2007)

Os circuitos do sistema de condicionamento de ar são divididos em lado de suprimento e lado de demanda, conforme figura 13.

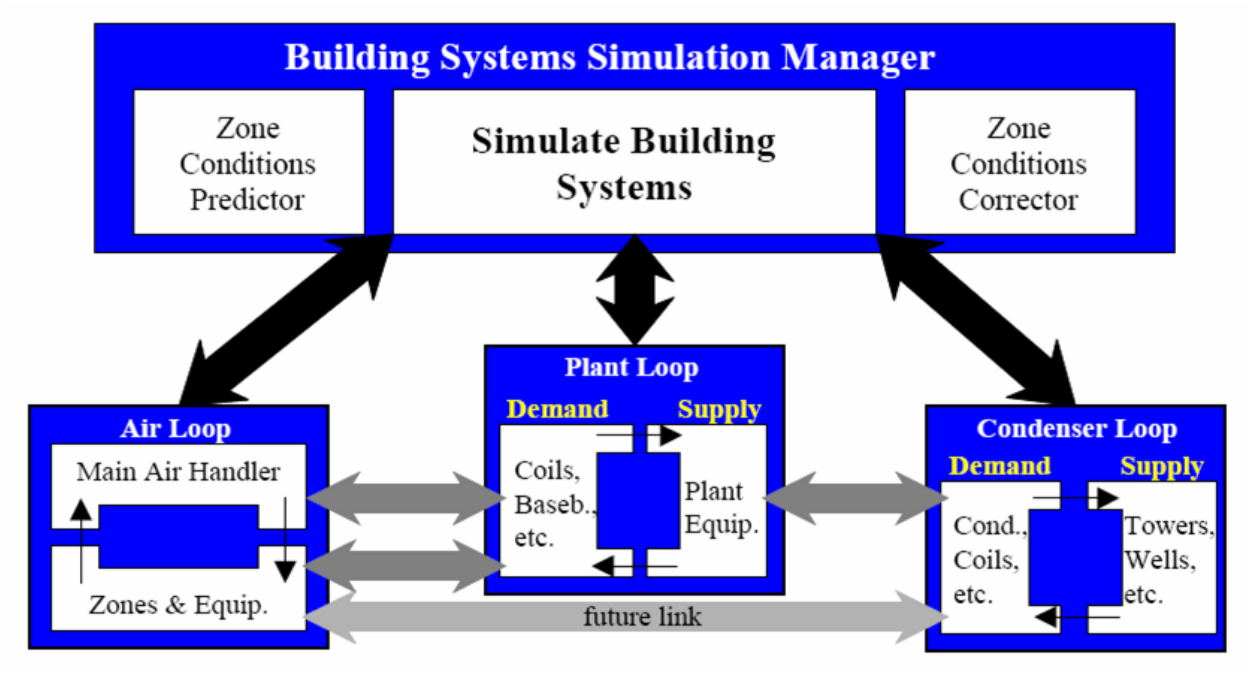


Figura 13 Interação dos circuitos do sistema de climatização. Fonte: LBNL (2007)

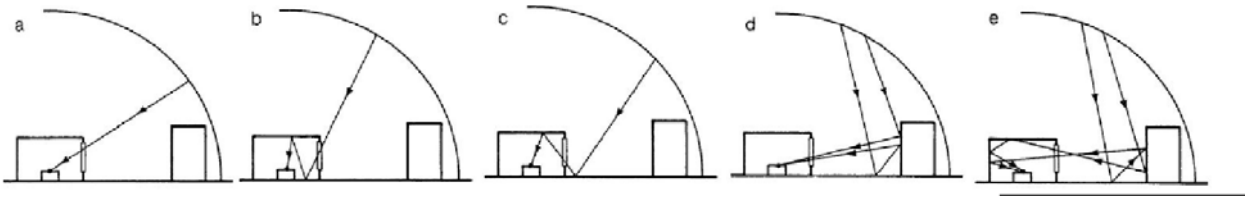
O lado da demanda da planta contém equipamento, como serpentinas, que demanda fluido refrigerado do lado do suprimento da planta. O lado de suprimento da planta, por sua vez, contém equipamento, como chillers, que atende à solicitação de carga térmica do lado da demanda. O lado da demanda da planta conecta-se ao circuito de ar e o lado do suprimento, ao circuito de água de condensação.

O lado da demanda do circuito de água de condensação recebe o calor rejeitado pelo lado de suprimento do circuito da planta, e por sua vez, demanda fluido refrigerado pelo lado do suprimento de seu circuito. O lado do suprimento do circuito de água de condensação contém equipamento como torres de resfriamento.

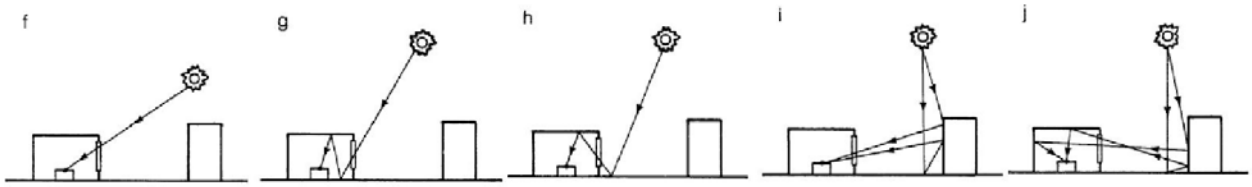
5.1.2 Modelo de céu e cálculo das iluminâncias internas

Para a distribuição de luminâncias do céu, o programa utiliza uma sobreposição de quatro céus padrão desenvolvidos pela CIE e abordagem de céu dinâmico desenvolvida por Perez et al. (1990) a partir de dados empíricos. O algoritmo para cálculo das iluminâncias internas, que utiliza o arquivo climático utilizado nas simulações, é o mesmo do DOE-2, descrito em Winkelman (1983) e em Winkelman e Selkowitz (1985).

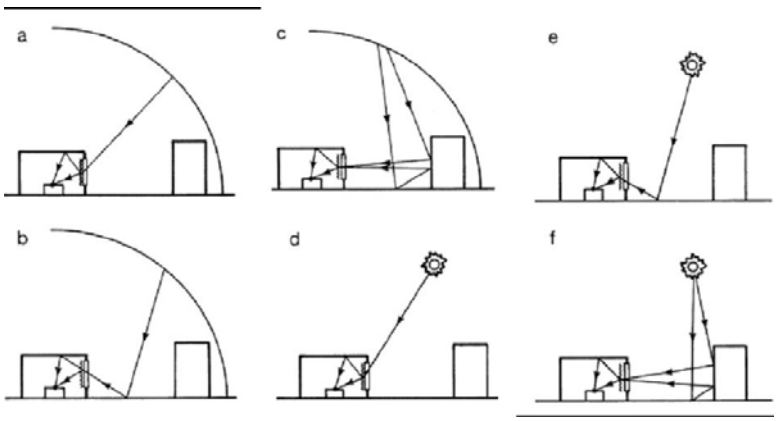
Segundo Winkelman e Selkowitz, para cada espaço iluminado naturalmente, o algoritmo conta com um pré-processador que calcula um conjunto de fatores de luz diurna para uma série de vinte de posições do sol, cobrindo o intervalo de altitudes e azimutes de um ano, para a latitude em que se situa o edifício. Esses fatores, utilizados na simulação horária anual, relacionam níveis de iluminância e de ofuscamento no ambiente à distribuição de luminâncias do céu, dimensões, posição e orientação das aberturas, transmitância luminosa dos fechamentos, refletância luminosa das superfícies internas, dispositivos de controle solar e obstruções externas. Assim, as iluminâncias internas são calculadas a partir da contribuição da luz difusa, proveniente diretamente da abóbada celeste ou refletida por superfícies externas, e da luz direta do sol, também podendo atingir os fechamentos transparentes diretamente ou por reflexão. As figuras 14a a 14e ilustram, esquematicamente, os vários caminhos que a luz difusa pode percorrer até atingir o plano de trabalho; as figuras 14f a 14j, trajetos similares percorridos pela luz do sol; e as figuras 15a a 15f, para situação em que as aberturas são cobertas por persiana translúcida.



Figuras 14a a 14e Contribuições da luz difusa para a iluminância interna. Fonte: Winkelman e Selkowitz (1985)



Figuras 14f a 14j Contribuições da luz direta para a iluminância interna. Fonte: Winkelman e Selkowitz (1985)



Figuras 15a a 15e Contribuições da luz direta e difusa para a iluminância interna em caso com persiana translúcida. Fonte: Winkelman e Selkowitz (1985)

Os autores realizaram validação do algoritmo por meio de análise de sensibilidade de parâmetros de projeto sob diferentes condições de céu, como por exemplo, influência das aberturas, e de comparação dos resultados de iluminância obtidos com os de outro

programa e de medições realizadas com modelos em escala reduzida. Encontraram diferenças nos resultados inferiores a 15%, exceto para pontos muito próximos das aberturas ou muito distantes. Devido ao método de fluxo dividido, usado para resolver as reflexões internas, para pontos distantes das aberturas, as iluminâncias calculadas são superestimadas. De acordo com o manual de engenharia do EnergyPlus, o algoritmo não é recomendado para modelos em que a profundidade do ambiente a partir das aberturas é pelo menos o triplo do pé-direito.

Recentemente, a fim de avaliar o algoritmo de iluminação natural do EnergyPlus, Ramos (2008) compara os resultados de iluminância interna com os obtidos por outros dois programas e os de iluminância externa com registros de estação de medição de iluminação natural. Para pontos afastados das aberturas, encontra a mesma deficiência apontada por Winkelman e Selkowitz (1985).

5.2 Modelos

A partir das morfologias dos estudos de caso, especialmente os de número 4 e 6 a 8, um conjunto de 27 modelos foram construídos, representado três grupos de edificações: com core central, com core lateral, adjacente a uma das fachadas, e com átrio. A necessidade de variações para cada grupo decorre das proporções levantadas nos estudos de caso para comprimento e largura do pavimento tipo e altura do pé-direito e profundidade do ambiente. Nesta seção são apresentados parâmetros utilizados nas simulações de desempenho energético dos modelos, como arquivo climático, propriedades térmicas de materiais, incluindo vidros e persiana, utilizada em alguns modelos para controle de ofuscamento, sistema de condicionamento de ar, cargas internas, padrões de uso e tarifas.

5.2.1 Arquivo climático

Para os modelos simulados, foi utilizado arquivo climático para a cidade de São Paulo, formato Test Meteorological Year – TMY, com dados de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, pressão atmosférica, ventos, radiação solar e nebulosidade. Diferentemente do arquivo Test Reference Year – TRY, ou ano climático de referência, construído a partir de metodologia baseada na eliminação de anos cujos dados contêm temperaturas médias mensais extremas, o arquivo TMY é uma compilação de dados de meses sem extremos de temperatura, de diferentes anos. O gráfico da figura 16 ilustra as variações horárias de temperatura de bulbo seco e de umidade relativa do ar para as 8760 horas do ano.

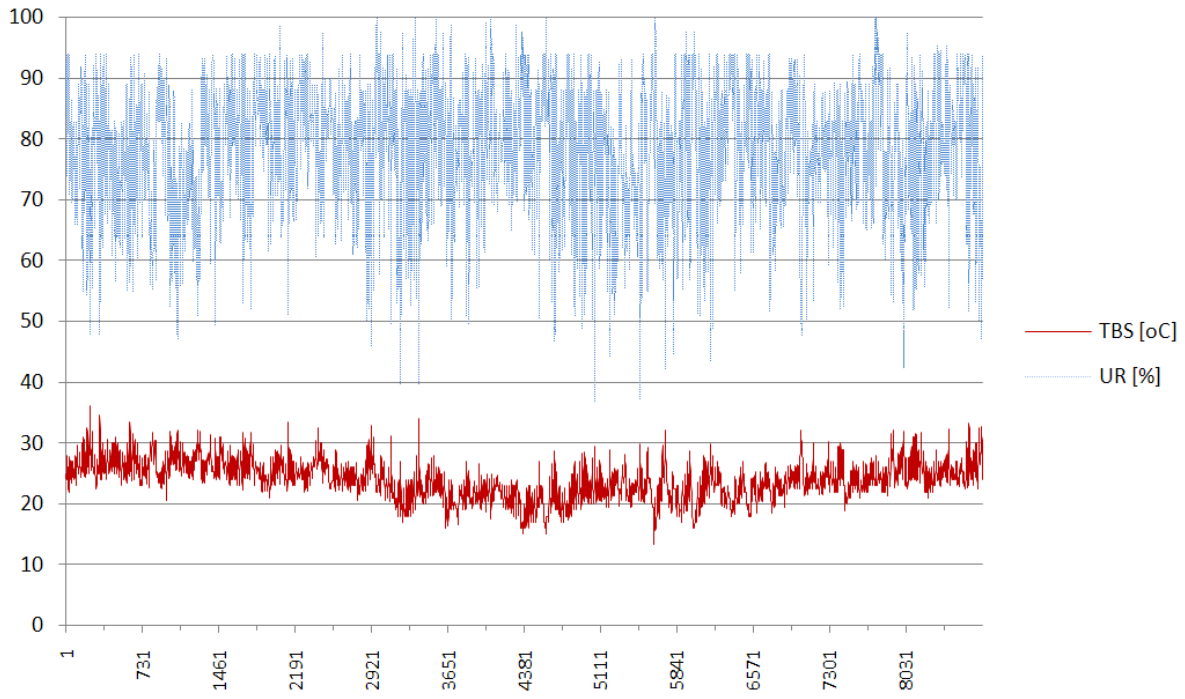


Figura 16 Temperatura de bulbo seco (TBS) e umidade relativa do ar externo (UR) para as 8760 horas do arquivo climático do ano típico da cidade de São Paulo.

Para o arquivo climático utilizado, uma análise da frequencia de ocorrência das temperaturas de bulbo seco entre às 8h e às 20h revela que em 40% do tempo, a temperatura externa está abaixo de 24ºC; em 30% do tempo está entre 20ºC e 24º C, e o restante, acima de 24º.Os dados do dia de projeto para dimensionamento do sistema de condicionamento de ar foram selecionados conforme metodologia definida pela ASHRAE.

5.2.2 Morfologia dos modelos

As figuras 17 a 19 apresentam, de maneira esquemática, os 27 modelos utilizados nas simulações. As áreas cinza claro dizem respeito aos ambientes condicionados; as áreas cinza médio representam as áreas não condicionadas, como elevadores e caixas de escada. Os modelos com core central foram nomeados com “CC”, os modelos com core lateral, “CL”, e os modelos com átrio, “CA”. Considerando a figura 17, que representa do zoneamento térmico dos edifícios com core central, as figuras CC1, CC4 e CC7 representam edifícios em que a largura e o comprimento do pavimento tipo são iguais. As figuras CC2, CC5 e CC8 representam edifícios que apresentam proporção de comprimento e largura de 5:4 e os modelos CC3, CC6 e CC9, edifícios cuja razão encontrada é de 3:2. Para representar as proporções entre altura do pé-direito e profundidade dos ambientes, os modelos CC1 a CC3 representam edifícios cuja razão altura e profundidade é de 1:4,25, os modelos CC4 a CC6, edifícios cuja razão é de 1:4,5, e os modelos CC7 a CC9, edifícios cuja razão é de 1:4,75. O número que segue a nomenclatura dos modelos, “0”, no caso da figura 17, diz respeito à rotação dos modelos. Os de número CC1, CC4 e CC7 foram rotacionados apenas uma vez, em 45º, pois possuem planta quadrada. Os demais modelos da figura 17 foram rotacionados três vezes, a cada 45º. O modelo CC9, por exemplo, pode apresentar

nove diferentes nomenclaturas, conforme orientação: CC9_0, CC9_45, CC9_90, e CC9_135.

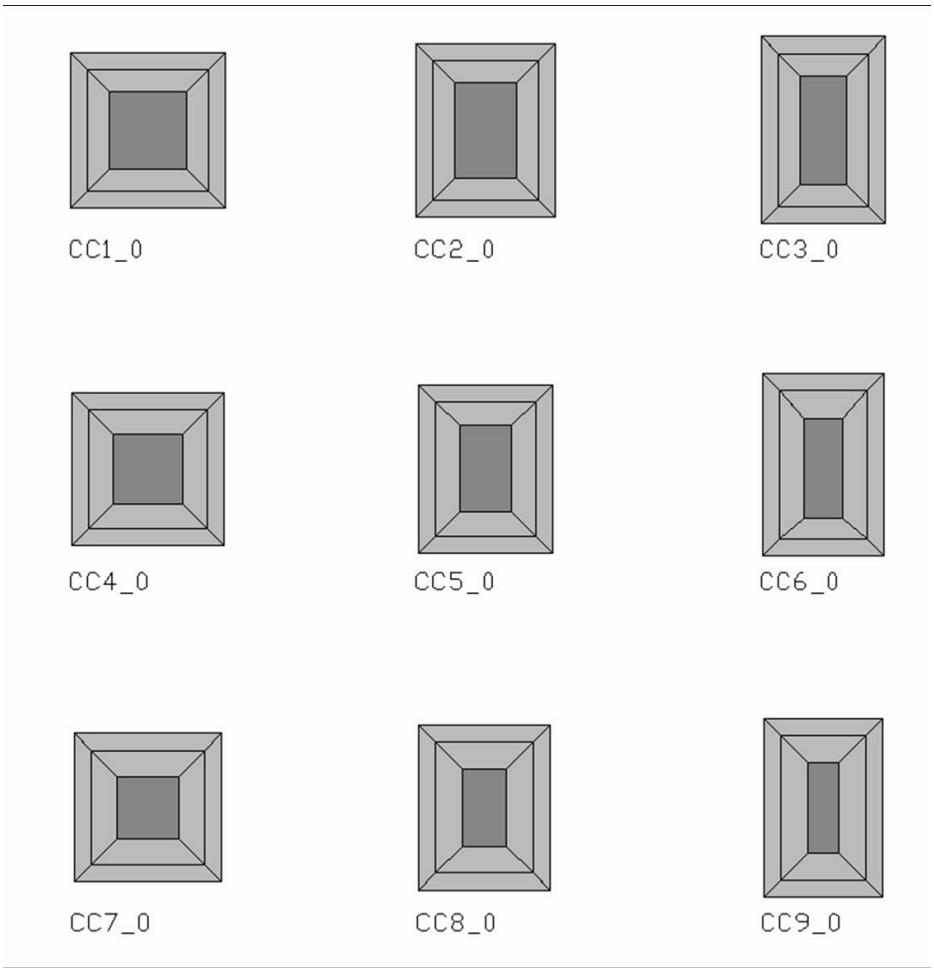


Figura 17. Zoneamento térmico dos modelos com core central

A figura 18 apresenta os modelos de edifício com core lateral. Seguindo o mesmo princípio adotado para os modelos da figura 17, todos os modelos são rotacionados de forma a avaliar a influência da orientação no desempenho energético dos edifícios. Assim, todos esses modelos são rotacionados sete vezes, somando ao todo, oito diferentes orientações.

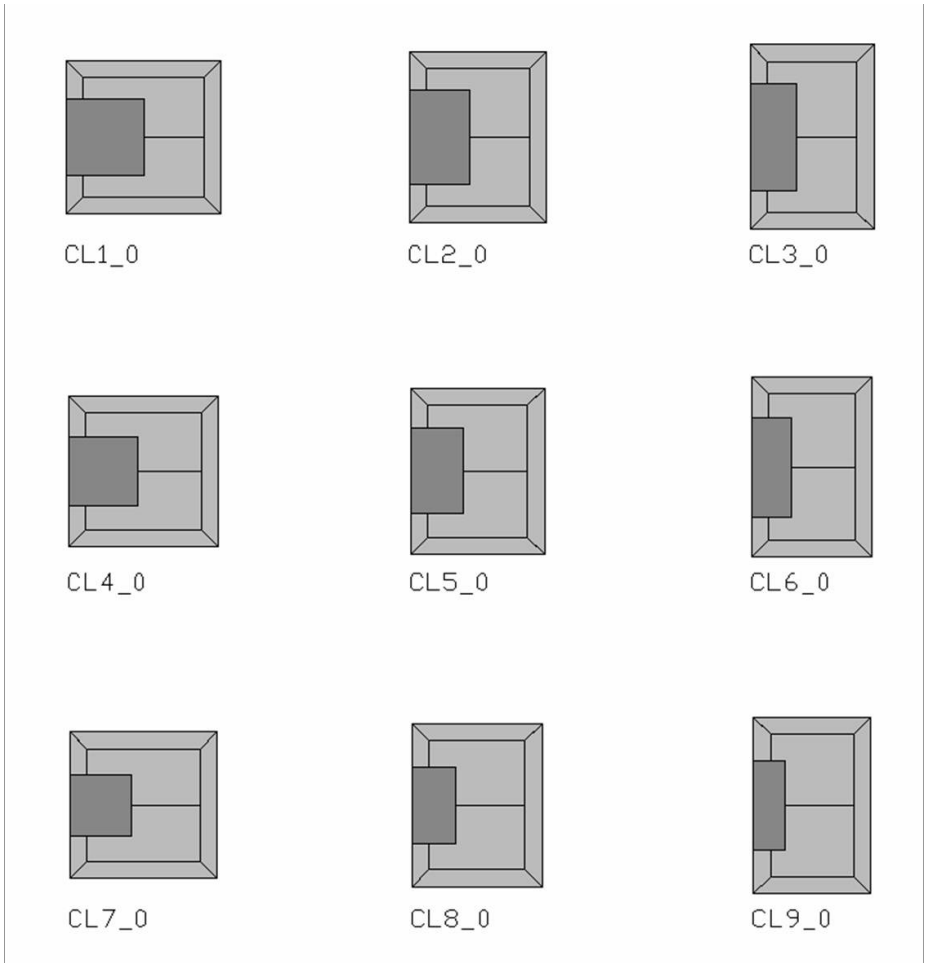


Figura 18. Zoneamento térmico dos modelos com core lateral

A figura 19 representa os modelos de edifícios com átrio. Devido à sua simetria, são rotacionados três vezes cada, perfazendo quatro orientações para cada modelo.

Quanto à altura das zonas térmicas, os modelos foram construídos com 2,7m de altura para o pavimento tipo e 1,3 m de altura para o plenum. O limite superior dos fechamentos translúcidos foi fixado a 2,65m de altura, com variação do peitoril conforme o WWR. As zonas periféricas foram modeladas com 5m de profundidade, não apenas para simular o comportamento dos ambientes mais expostos à radiação solar, conforme metodologia descrita no apêndice G da ASHRAE, quando o projeto de

condicionamento de ar não foi desenvolvido, como para evitar possíveis erros nos resultados, uma vez que, para parte dos modelos, é considerada redução do consumo de iluminação por meio de sensores de iluminância para dimerização de luminárias.

Para os modelos que possuem sensores próximos à fachada, foi considerada distância de uma vez e meia a altura das aberturas, ou seja, a 3,975m de distância e a 80cm de altura, correspondendo ao plano de trabalho. Para os níveis de iluminância abaixo dos quais as luminárias são dimerizadas linearmente da potência total mínima à potência instalada, foram adotados valores de 500 lux para todos os sensores.

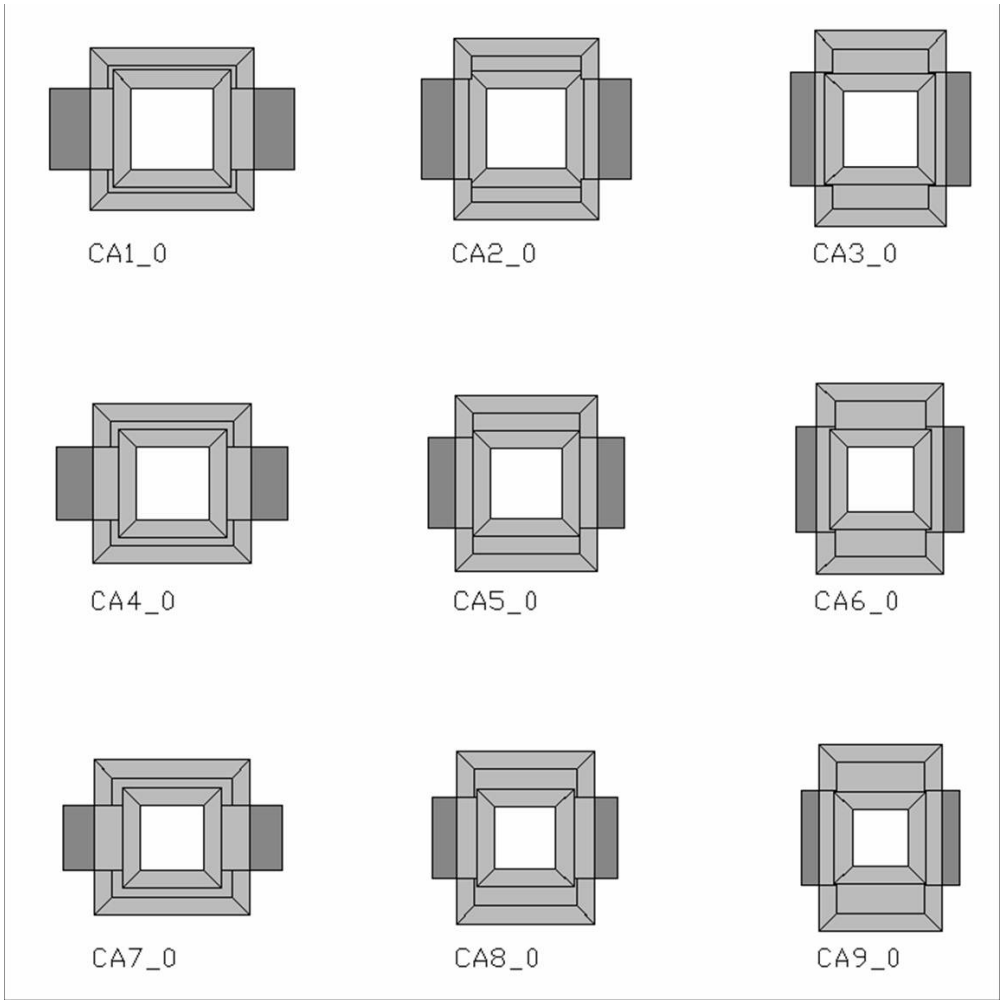


Figura 19. Zoneamento térmico dos modelos com átrio

5.2.3 Propriedades térmicas dos materiais

Com relação às propriedades térmicas dos materiais, apenas os fechamentos translúcidos diferem do especificado para o modelo Baseline Building da ASHRAE 90.1, zona climática 2 (São Paulo). As tabelas 11 e 12 os dados utilizados.

Tabela 11. Propriedades ópticas e térmicas do vidro do Baseline Buildng para São Paulo e de vidros simples monolíticos ou laminados utilizados nas simulações. Fonte: Window 5, LBNL.

Nome	Baseline	Stopray Galaxy (Glaverbel SA)	SunGuard HS SuperNeutral 51 on ExtraClear (Guardian Europe)	SGG COOL-LITE KS 147 6mm (Saint-Gobain)	SGG BIOCLEAN COOL-LITE SKN 165 6mm (Saint-Gobain)	Stratobel Energy N (P4) 44.2 (Glaverbel SA)	ClimaGuard 71/38 Low-E inside 9/16" clr HP lam (Guardian)
Cor	-	verde	verde	verde	verde	verde	verde
Espessura (mm)	-	6	6	6	6	8	14
Transmitância à radiação solar	-	0,179	0,252	0,270	0,302	0,373	0,298
Refletância à radiação solar (pos.1)	-	0,323	0,399	0,597	0,357	0,436	0,210
Refletância à radiação solar (pos.2)	-	0,463	0,559	0,459	0,498	0,237	0,323
Transmitância à radiação visível	0,135	0,439	0,535	0,473	0,646	0,770	0,674
Refletância à radiação visível (pos. 1)	-	0,146	0,129	0,400	0,145	0,060	0,102
Refletância à radiação visível (pos. 2)	-	0,133	0,220	0,421	0,127	0,068	0,098
Emissividade (pos. 1)	-	0,842	0,840	0,036	0,837	0,840	0,840
Emissividade (pos. 2)	-	0,043	0,031	0,837	0,037	0,034	0,840
Condutividade (W/m.K)	-	0,851	1,000	1,000	1,000	0,75	0,852
Fator solar (%)	25	25	30	32	35	40	45
Transmitância térmica (W/ m^2 K)	3,974	3,235	3,205	5,655	3,224	3,149	5,470

Tabela 12. Propriedades ópticas e térmicas de opções de vidro duplo com câmara de ar. Fonte: diversos.

Nome	Galaxy on clearvision (Glaverbel)	Vidro Claro 6mm	Cebrace SKN6#2 (Cebrace)	Cebrace Verde Escuro 6mm	6mm Guardian Crystal Gray VRE 67 #2 (Viracon)	Vidro Claro 6mm
Cor	-	claro	-	verde	cinza	claro
Espessura (mm)	6	6	6	6	6	6
Transmitância à radiação solar	0,179	0,809	0,270	0,336	0,300	0,809
Refletância à radiação solar (pos.1)	0,323	0,072	0,355	0,051	0,170	0,079
Refletância à radiação solar (pos.2)	0,463	0,072	0,469	0,051	0,150	0,079
Transmitância à radiação visível	0,439	0,888	0,556	0,063	0,528	0,888
Refletância à radiação visível (pos. 1)	0,146	0,079	0,151	0,063	0,200	0,072
Refletância à radiação visível (pos. 2)	0,133	0,079	0,148	0,063	0,101	0,072
Emissividade (pos. 1)	0,842	0,840	0,840	0,840	0,840	0,840
Emissividade (pos. 2)	0,043	0,840	0,030	0,840	0,057	0,840
Condutividade (W/m.K)	1	1	1	1	1	0,9
Fator solar (%)	21		26		32	
Transmitância térmica (W/ m^2 K)	1,667		1,639		1,686	

Para as persianas, utilizadas para controle de ofuscamento nos modelos apresentados na tabela 21, foi utilizado dado de biblioteca do EnergyPus, que está de acordo com o documentado pelo Handbook Fundamentals da ASHRAE (2005). A tabela 13 lista as propriedades térmicas e os dados utilizados para as persianas.

Tabela 13. Propriedades da persiana. Fonte: Diretório Data Sets, EnergyPlus.	
Nome	MEDIUM REFLECT - LOW TRANS SHADE
Transmitância à radiação solar	0,1
Refletância à radiação solar	0,5
Transmitância à radiação visível	0,1
Refletância à radiação visível	0,5
Emissividade	0,9
Transmitância térmica (W/ m^2 K)	0
Espessura (mm)	5,0
Condutividade (W/m.K)	0,1

5.2.5 Sistema de condicionamento de ar

Para o condiconamento de ar nos modelos, foi utilizado sistema de expansão indireta tipo central de água gelada com um chiller parafuso, conforme metodolgia apresentada para o Baseline Building. Embora representados geometricamente por um único pavimento tipo, todos os modelos possuem sete pavimentos, sem influência de radiação na cobertura. A área condicionada de todos os modelos é a mesma, aproximadamente 11.122,4m^2. Para as curvas de desempenho do chiller, foram utilizados dados do modelo Trane RTHB, de capacidade de referência de 1051 kW (299 TR) e COP de 5,05 W/W, disponibilizados no diretório Data Sets do EnergyPlus.

5.2.6 Cargas internas

Para os dados de ocupação e de densidade instalada de equipamentos e de iluminação, foram adotados os valores da tabela 14. Embora os modelos não apresentem a mesma área para os ambientes não condicionados, o número de pessoas nesses ambiente, bem como os valores de LPD, foram fixados.

Tabela 14. Cargas internas

	Escritórios	Core
Ocupação	10 m²/pessoa	20/ pavimento
LPD	12,0 W/m²	2140 W/ pavimento
Carga de equipamentos	16,0 W/m²	0 W/m²

5.2.7 Conforto térmico dos usuários

Fechamentos translúcidos permitem a entrada de luz natural no edifício e consequentemente, redução no consumo de energia para iluminação. Em contrapartida, grandes áreas de fechamento translúcido também podem permitir perdas ou ganhos excessivos de calor, que influem no consumo de energia para aquecimento ou resfriamento. Poirazis e Blomsterberg (2005) defendem que a definição das características da envoltória do edifício é fundamental para o bom desempenho energético do mesmo e a qualidade ambiental de seus espaços, influenciando diretamente na temperatura operativa, sobretudo nas áreas próximas às fachadas. Em seu estudo, concluem que a orientação de um ambiente é determinante da temperatura operativa, sobretudo para casos de grandes áreas de fachada envidraçada.

Seguindo metodologia da ASHRAE, o sistema de condicionamento dos modelos foi dimensionado para não ultrapassar 300 horas de carga térmica não atendida. Para considerar o efeito da diferença de temperatura radiante entre os ambientes e os fechamentos da envoltória, para o cálculo do limite de horas não atendidas foram utilizados os limites de temperatura operativa descritos na ISSO 7730. Para desconforto geral para calor, foram utilizados limites aceitáveis de 23,0 ^{O}C a 26,0 ^{O}C, conforme apresentado na tabela 15.

Tabela 15. Faixas de temperatura operativa ótimas. Fonte: ISO 7730 - 1994.

	Vestimenta	clo	TO ótima	Limites de TO para 10% de insatisfeitos
Inverno	Calças compridas pesadas, camisa de manga comprida e paletó	1,0	22,0 ^{O}C	22,0 ^{O}C a 23,5 ^{O}C
Verão	Calças compridas leves e camisa de manga curta	0.5	24,5 ^{O}C	23,0 ^{O}C a 26,0 ^{O}C

5.2.8 Padrões de uso

As figuras 20a a 20 e apresentam os dados de padrões de ocupação, de acionamento de luminárias e de equipamentos e de período de disponibilidade do sistema de condicionamento de ar.

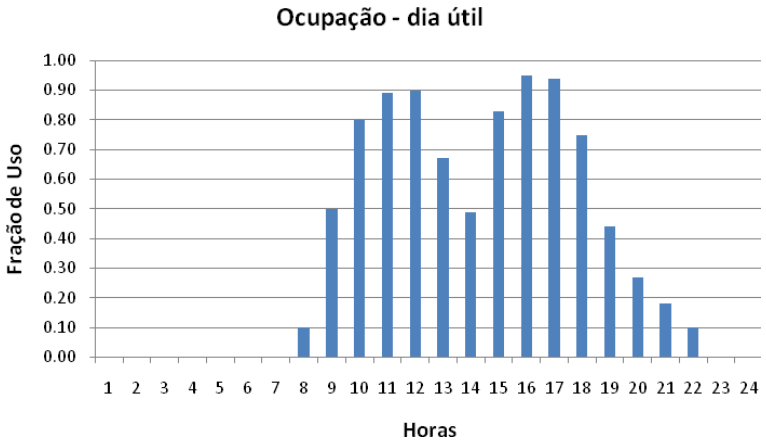
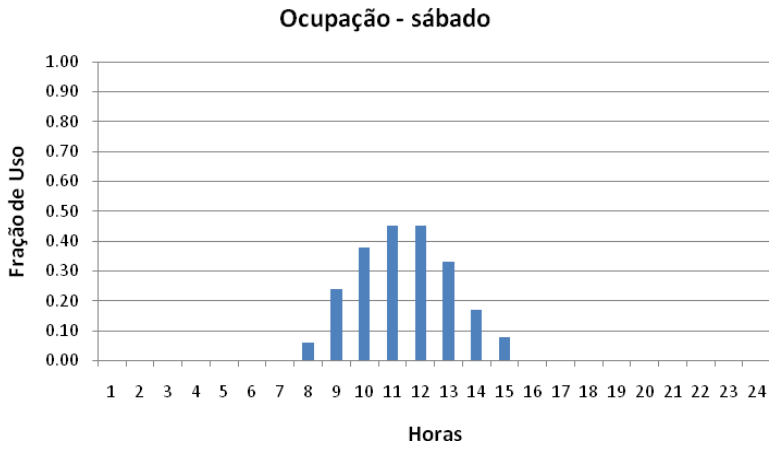
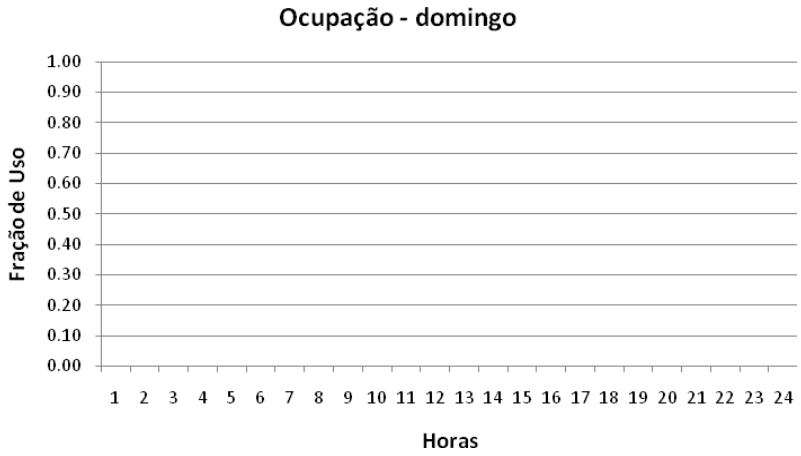


Figura 20a. Padrão de ocupação para dias úteis.





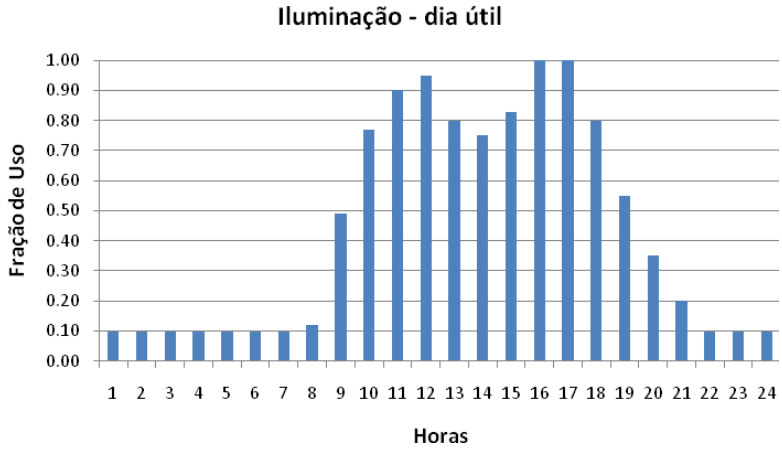
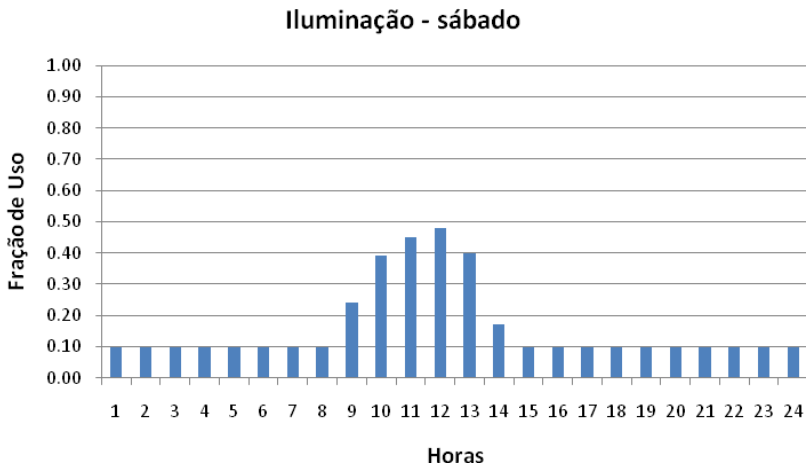
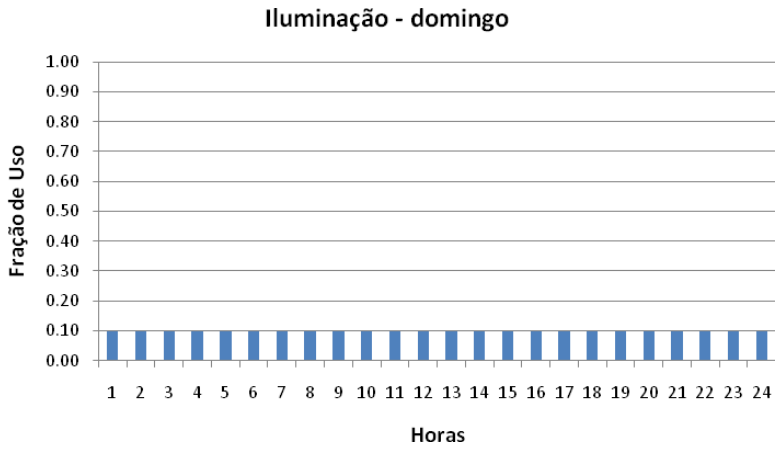


Figura 20b. Padrões de ocupação para final de sema e de operação da iluminação para dias úteis.





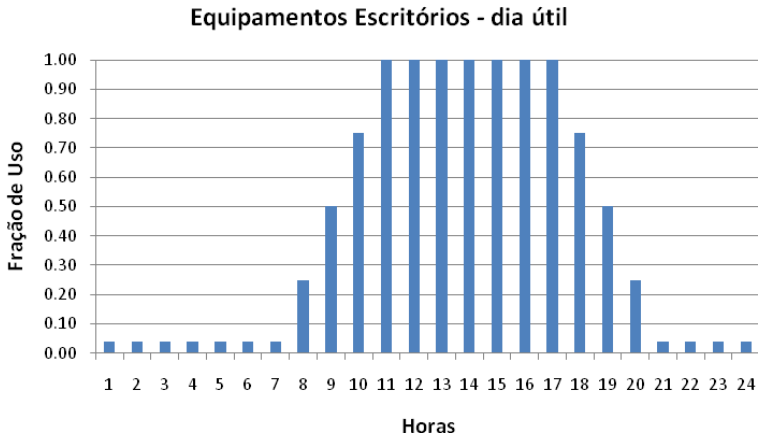
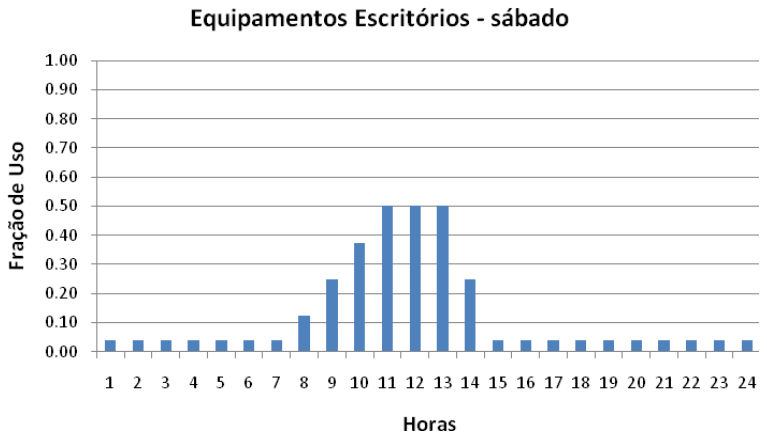
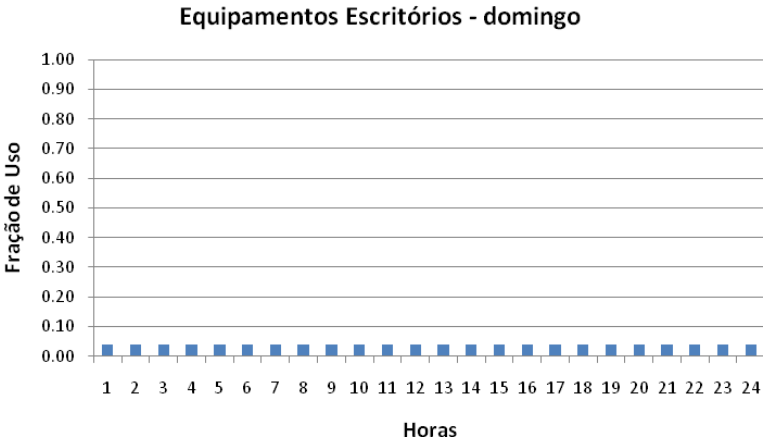


Figura 20c. Padrões de operação da iluminação para finais de semana e padrão de operação de equipamentos para dias úteis.





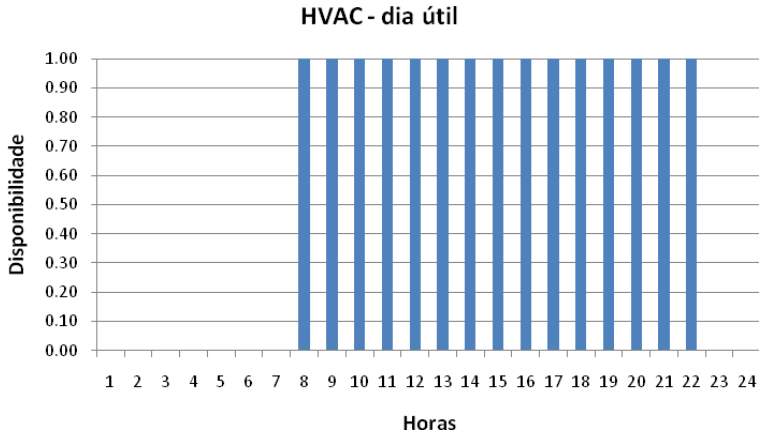
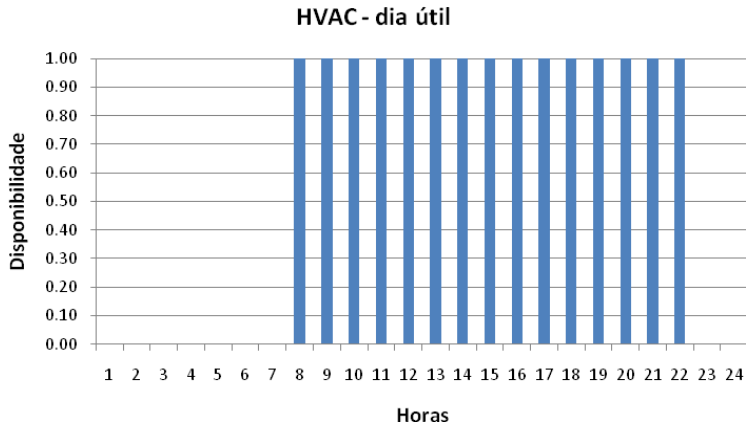


Figura 20d. Padrões de operação de equipamentos para finais de semana e período de disponibilidade do sistema de condicionamento de ar para dias úteis.



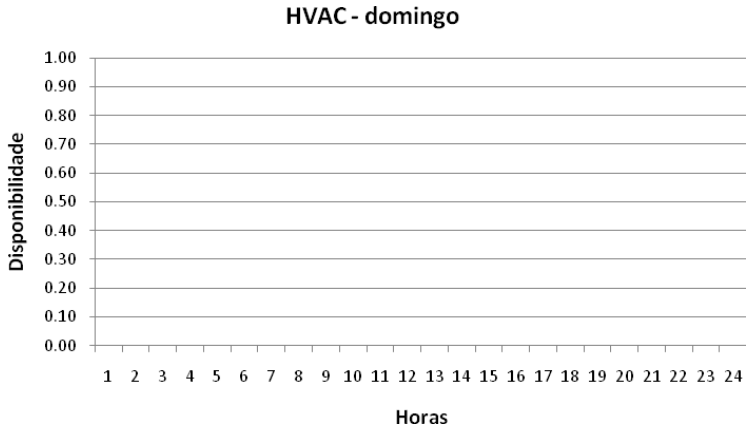


Figura 20e. Períodos de disponibilidade do sistema de condicionamento de ar para finais de semana.

5.2.9 Tarifas

Para estimar os resultados em custo anual de energia, foram utilizadas tarifas dos grupos A3a (30 kV a 44 kV) e A4 (2,3 kV a 25 kV), estruturas horossazonais verde e azul. Os dados foram obtidos no site da concessionária AES Eletropaulo, em <www.eletropaulo.com.br>, acessado em 22/11/2009.

6 Resultados

O capítulo de resultados divide-se em três seções. A primeira apresenta os resultados obtidos de análise comparativa entre as morfologias das figuras 17 a 19, incluindo variações de cada modelo referentes às orientações. A segunda seção apresenta resultados de análise comparativa entre as variações de envoltória para um mesmo modelo. A fim de avaliar o impacto de diferentes opções de vidros e de três percentagens de WWR, o modelo de edifício tipo core central “CC5_0” foi utilizado. A terceira e última seção do capítulo combina os resultados das duas primeiras: nela, tomam-se os modelos que apresentaram pior e melhor desempenho energética nas duas análises anteriores.

6.1 Análise comparativa entre diferentes morfologias

Para comparar o desempenho das morfologias apresentadas, três grupos de simulação foram conduzidos. Para o primeiro, os edifícios foram modelados como Baseline Building, atendendo os procedimentos descritos no apêndice G da ASHRAE para zona climática 2 (São Paulo). Para essas análises, foi utilizado valor de WWR de 40%.

O segundo grupo de simulações difere do primeiro por utilizar vidro com fator solar disponível no mercado e por permitir que a ferramenta de simulação avalie o sombreamento do edifício nele mesmo.

O terceiro grupo de simulações difere do segundo por apresentar sensores de iluminância nos ambientes próximos às fachadas.

Os resultados encontrados são apresentados de forma gráfica nas figuras 21 a 25. A figura 25 apresenta resultados de consumo anual de energia em MWh no eixo das ordenadas para cada grupo simulado. Os resultados indicam que os modelos de

edifícios Baseline Building apresentam melhor desempenho que os modelos com fechamentos com fator solar de 25% e sem sensores de iluminância, o que comprova que as propriedades do vidro do Baseline Building não condizem com dados de vidros reais. Com relação ao desempenhos dos modelos com aproveitamento de iluminação natural, as economias eram esperadas.

A figura 22 apresenta resultados de custo anual de energia de cada modelo do primeiro grupo (Baseline Building) comparados com os resultados obtidos pelas médias de custo anual de energia desses mesmos modelos com outros três, rotacionando o modelo origina em 90º, 180º e 270º, conforme metodologia do apêndice G. Ou seja, os resultados de desempenho dos modelos “ Baseline Building” do primeiro grupo foram comparados com os resultados de seus próprios modelos de referência.

No eixo das ordenadas temos escala de custo anual de energia considerando a tarifa de menor valor para as quatro orientações. Nas abscissas, todos os modelos simulados, considerando orientações de 45º em 45º. Os pontos azuis representam o custo anual de energia de cada modelo “Baseline Building” do primeiro grupo e os pontos em vermelho, a diferença em custo anual de energia para cada modelo quando comparado com seu próprio modelo de referência. O interessante desse gráfico é o fato de os modelos com átrio, que apresentaram o pior desempenho, ao serem avaliados com relação à orientação de projeto conforme metodologia da ASHRAE, apresentam muitos casos bem avaliados. Em contrapartida, os modelos que apresentaram o melhor desempenho, modelos com core lateral, apresentam, em média, mais casos mal avaliados que bem avaliados.

As figuras 23 a 25 apresentam os resultados para os três grupos de simulação, separadamente.

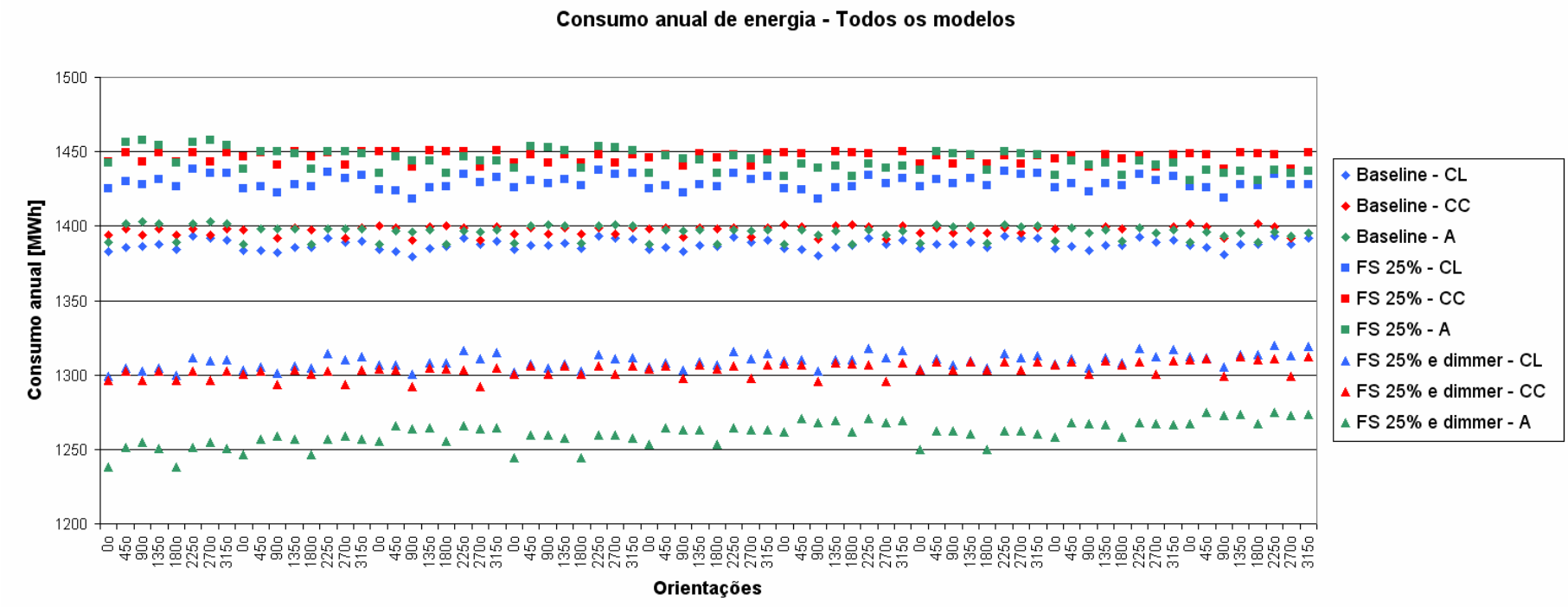


Figura 21. Gráfico comparativo de consumo anual de energia de todos os modelos

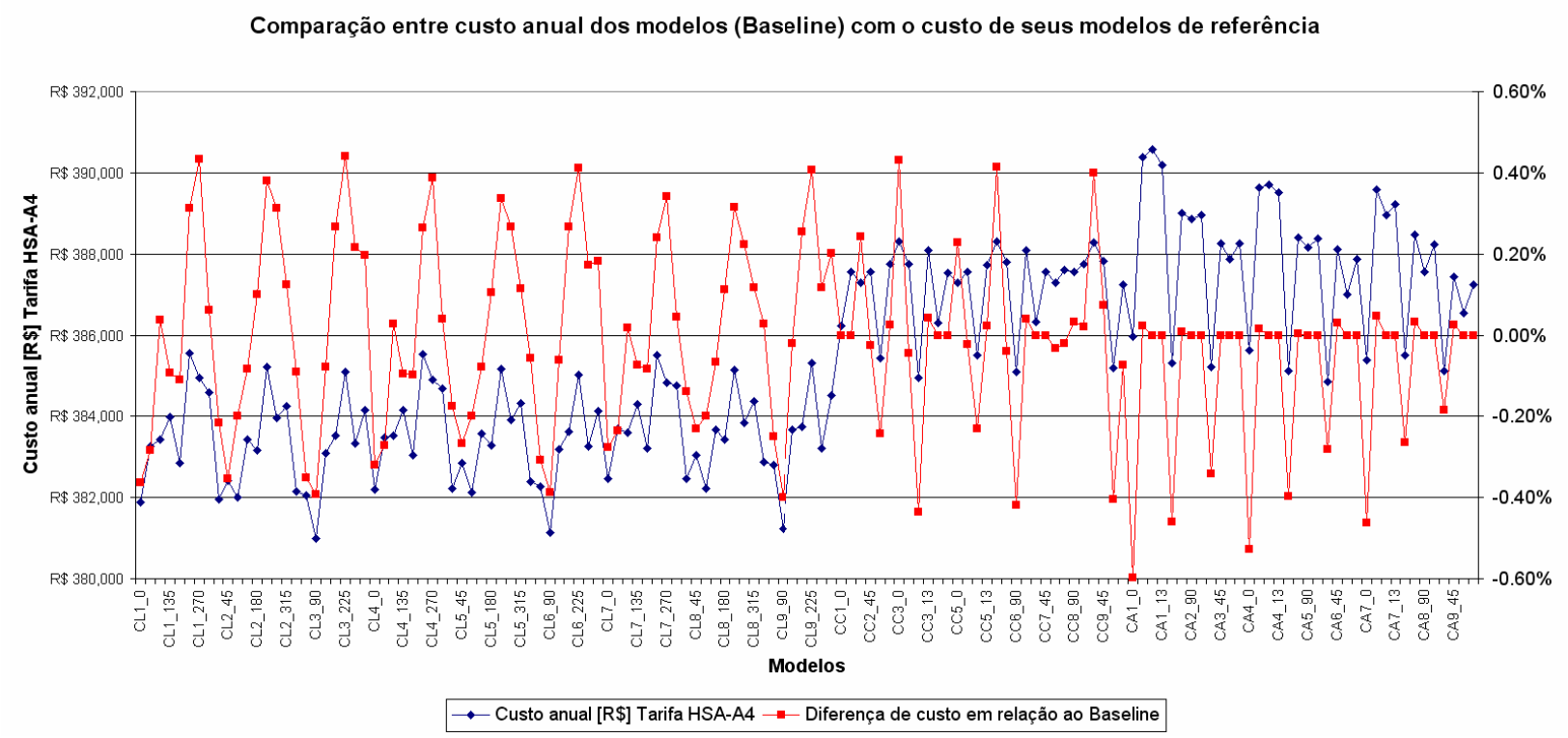


Figura 22 Comparação entre custo anual dos modelos (Baseline) com o custo de seus modelos de referência

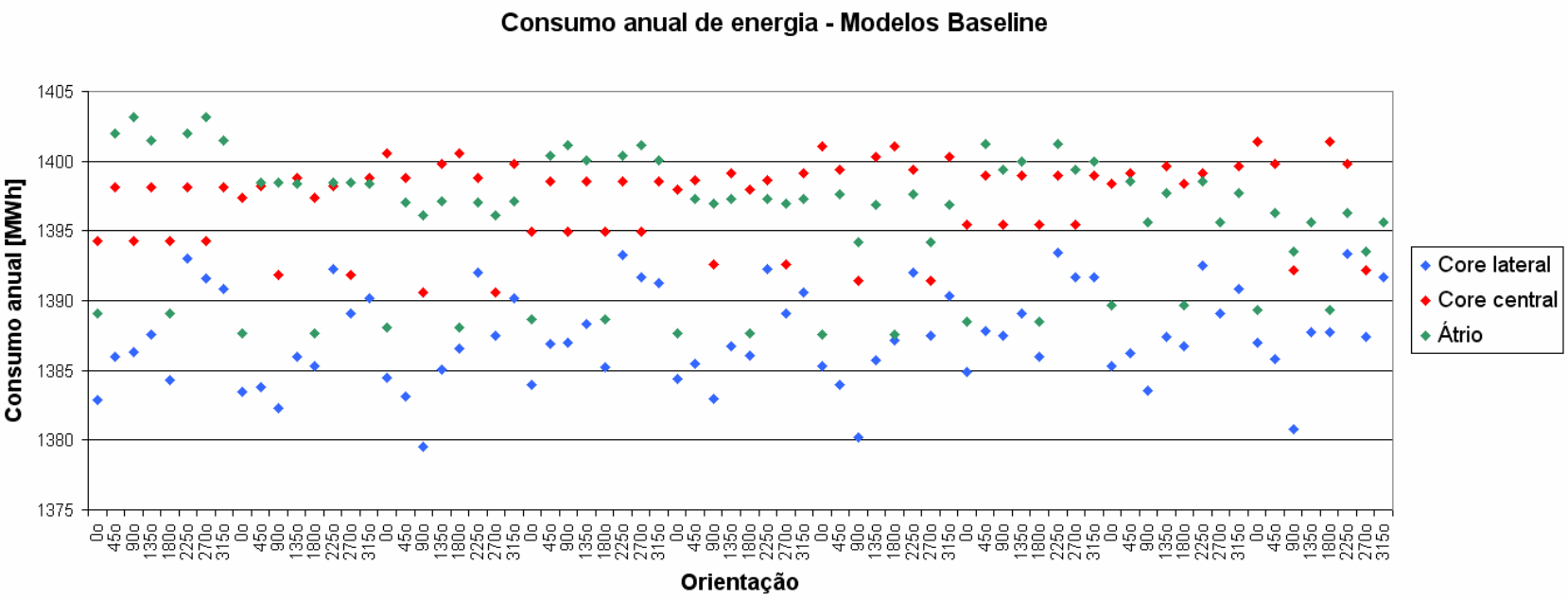


Figura 23. Gráfico comparativo de consumo anual de energia para modelos Baseline

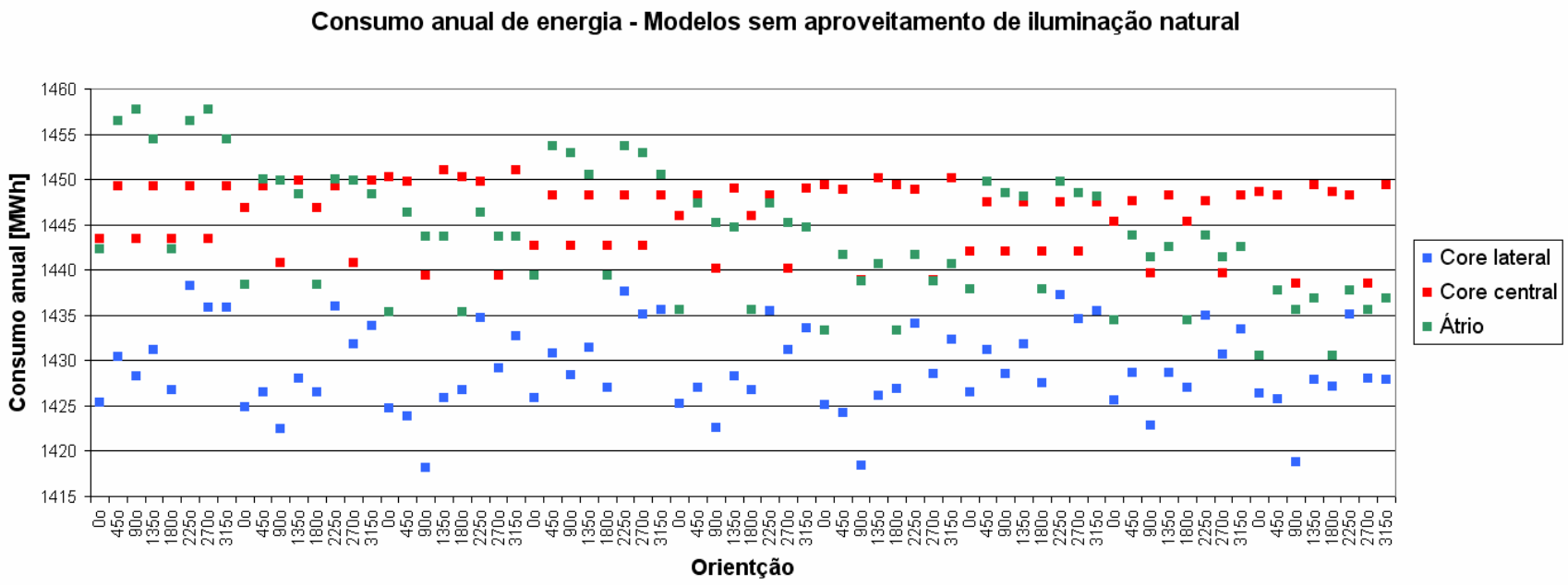


Figura 24. Gráfico comparativo de consumo anual de energia para modelos com vidro com fator solar de 25% e sem aproveitamento de iluminação natural

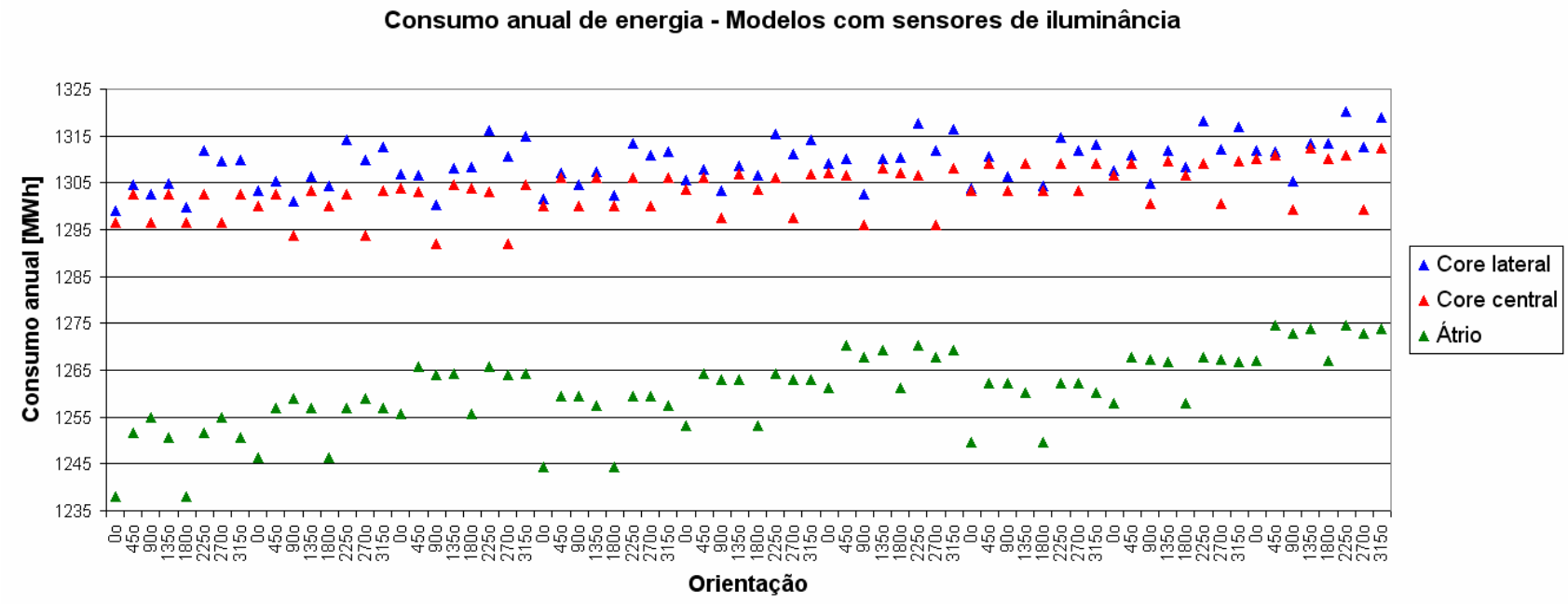


Figura 25. Gráfico comparativo de consumo anual de energia para modelos com vidro com fator solar de 25% e com dimerização das luminárias próximas ás fachadas

Dos resultados apresentados no gráfico 24, os modelos que apresentaram o pior e o melhor desempenho foram, respectivamente, os modelos “CC3_135” e “CL3_90”. A diferença de custo anual de energia do último em relação ao primeiro é de aproximadamente 1,8%, conforme tabela 16. É interressante notar que essa diferença é de cerca de duas a três vezes o encontrado nos estudos de caso apresentados no capítulo 4.

Tabela 16. Desempenho dos modelos com ‘CC3_135” e “CL3_90” para simulações com vidro com fator solar de 25% e sem aproveitamento da iluminação natural

Modelo	Consumo anual [MWh]	Custo anual [R$]	Diferença de custo com relação ao modelo CC3_135
CC3_135	1.379	338.072,00	-
CL3_90	1.401	344.378,00	**-1,8%**

Dos resultados apresentados no gráfico 25, os modelos que apresentaram o pior e o melhor desempenho foram, respectivamente, “CL9_225”, e “CA1_0”. A diferença de custo anual de energia do último em relação ao primeiro é de aproximadamente 4,6%, conforme tabela 17. Dos resultados apresentados no gráfico 25 e na tabela 17, é importante enfatizar que, para projetos de torres de escritório definidos em função dos limites do lote e dos recuos, os ganhos com iluminação advindos de uma boa arquitetura não chegam a 2% de custo anual de energia, diferença entre os modelos “CL9_225”, “CC3_90”.

Tabela 17. Desempenho dos modelos com “CL9_225”, “CC3_90” e “A1_0” para simulações com vidro com fator solar de 25% e dimerização das luminárias próximas às fachadas

Modelo	Consumo anual [MWh]	Custo anual [R$]	Diferença de custo com relação ao modelo CL9_225
CL9_225	1.320	328.320,00	-
CC3_90	1.292	323.074,00	**-1,6%**
CA1_0	1.238	313.377,00	**-4,6%**

6.2 Análise comparativa entre variações de envoltória para um mesmo modelo

As simulações desta seção buscam quantificar possíveis diferenças de desempenho do projeto de arquitetura quanto à envoltória do edifício. Para isso, o modelo “CC5”, foi analisado. O modelo sofreu alterações de modo a apresentar três diferentes valores de WWR e oito opções de vidro, para situações sem e com sensores de iluminância. A figura 26 apresenta planta e modelo espacial das alternativas com WWR de 40%.

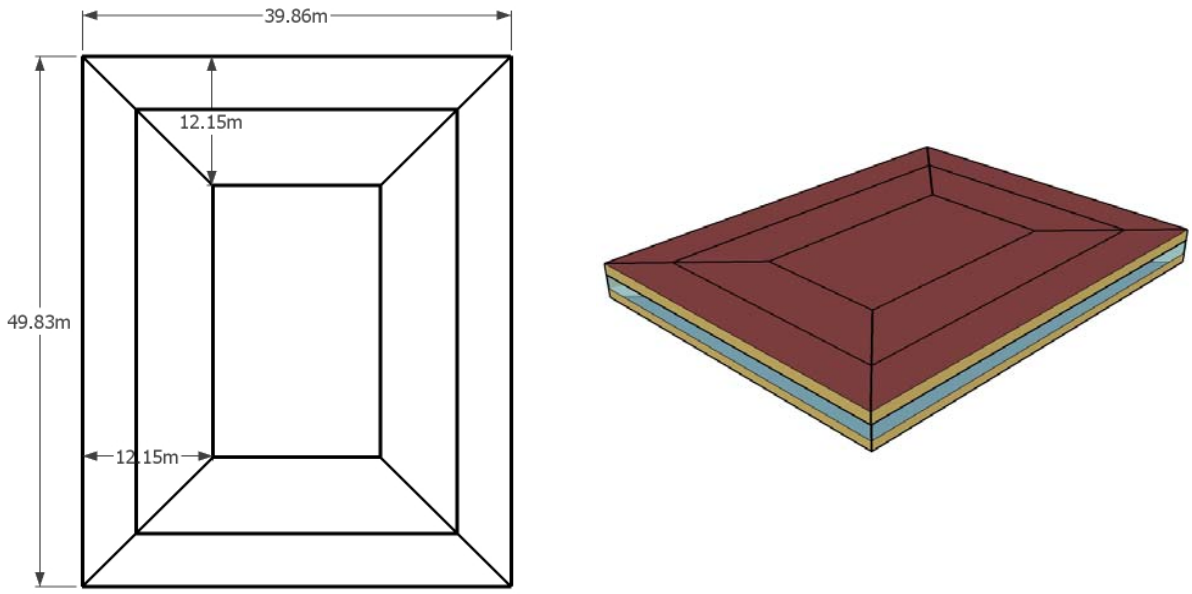


Figura 26. Planta e modelo espacial da alternativa com core central “CC5_0” e WWR de 40%

O gráfico da figura 27 apresenta resultados para as 48 simulações. Os vidros analisados são os apresentados anteriormente. As maiores diferenças foram achadas entre os grupos sem e com dimerização de luminárias, seguido das diferentes alternativas de vidro para os fechamentos e das variações no WWR. Vale ressaltar que o vidro duplo com câmara de ar, de fator solar de 32%, e o vidro laminado de fator solar também de 32%, apesar de possuírem mesma transmissão luminosa, tiveram desempenho diferentes. O vidro laminado apresentou melhor desempenho. Uma explicação para isso é o fato de o vidro duplo possuir transmitância térmica de 1,686 W/ m^2 K, muito inferior à da opção de laminado de mesmo fator solar, com 5,470 W/ m^2 K. Em horários do ano em que a temperatura interna é superior à externa, a opção de vidro duplo com câmara de ar perde calor para o exterior mais lentamente que a opção de vidro laminado, comprometendo o desempenho energético do edifício.

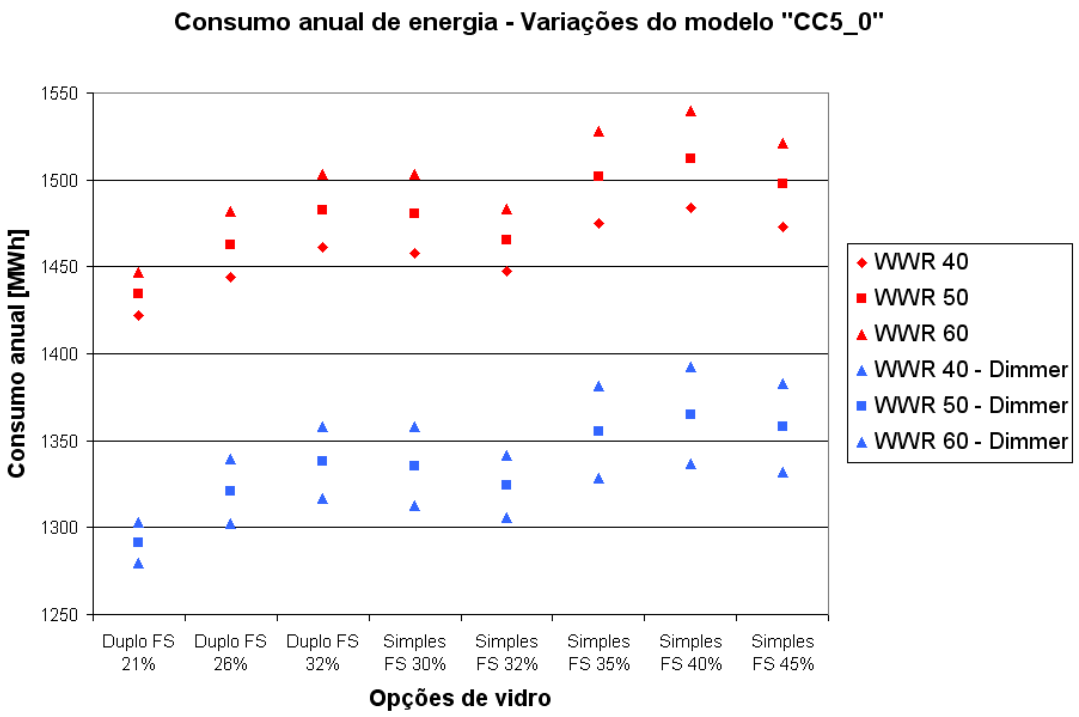


Figura 27. Consumo anual de energia para variações do modelo com core central "CC5_0"

Dos resultados apresentados na tabela 18, os modelos que apresentaram o pior e o melhor desempenho foram, respectivamente, o com WWR de 60% e vidro com fator solar de 40% e o com WWR de 40% e vidro com fator solar de 21%. A diferença de custo anual de energia do último em relação ao primeiro é de aproximadamente 8,2%. Para grupo de simulações com sensores de iluminância dimerizando as luminárias, as economias encontradas apresentaram mesma ordem de grandeza (ver tabela 19).

Tabela 18. Desempenho das variações do modelo “CC5_0” que resultaram no menor e no maior custo anual de energia (sem aproveitamento da iluminação natural)

WWR	Vidro	Consumo anual [MWh]	Custo anual [R$]	Diferença de custo
60%	Simples, FS 40%	1.540	381.411,00	-
40%	Duplo, FS 21%	1.422	350.408,00	**-8,1 %**
40%	Simples, FS 32%	1.447	357.623,00	**-6,2%**

Tabela 19. Desempenho das variações do modelo “CC5_0” que resultaram no menor e no maior custo anual de energia (com dimerização das luminárias próximas às fachadas)

WWR	Vidro	Consumo anual [MWh]	Custo anual [R$]	Diferença de custo
60%	Simples, FS 40%	1.393	351.337,00	-
40%	Duplo, FS 21%	1.279	321.646,00	**-8,5 %**
40%	Simples, FS 32%	1.306	329.077,00	**-6,3 %**

6.3 Análise comparativa entre diferentes morfologias com variações de envoltória

Por fim, as simulações apresentadas nessa seção têm por objetivo quantificar, dentre as alternativas de morfologia e de envoltória, quais resultam em pior e melhor desempenho energético do edifício.

As figuras 28 e 29 correspondem aos modelos morfológicos que resultaram no melhor e no pior desempenho energético para o grupo de simulação sem sensores de iluminância. Variações na envoltória desses modelos apresentaram diferenças de até 11% em custo de energia, conforme apresentado na tabela 20.

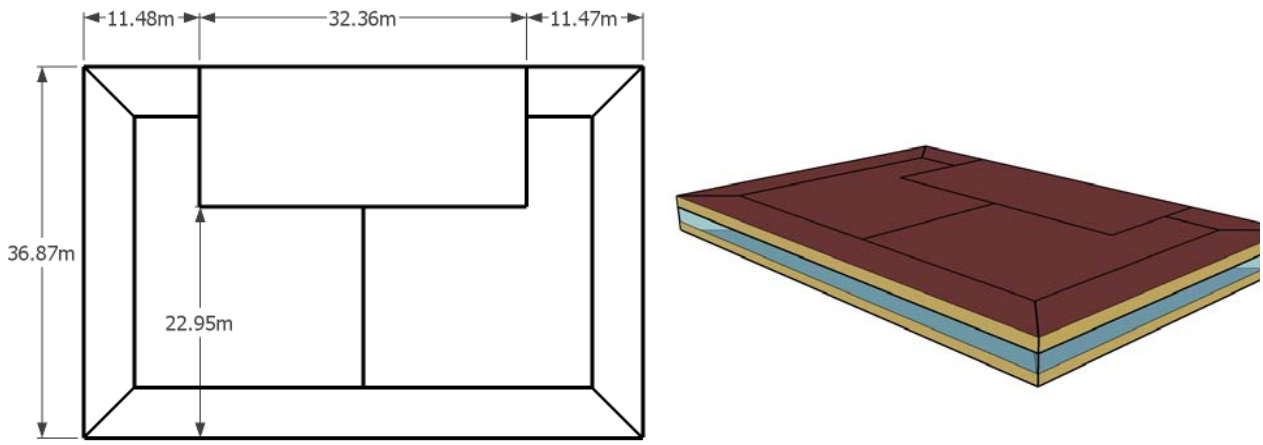


Figura 28. Planta e modelo espacial da alternativa com core lateral “CL3_90” e WWR de 40%

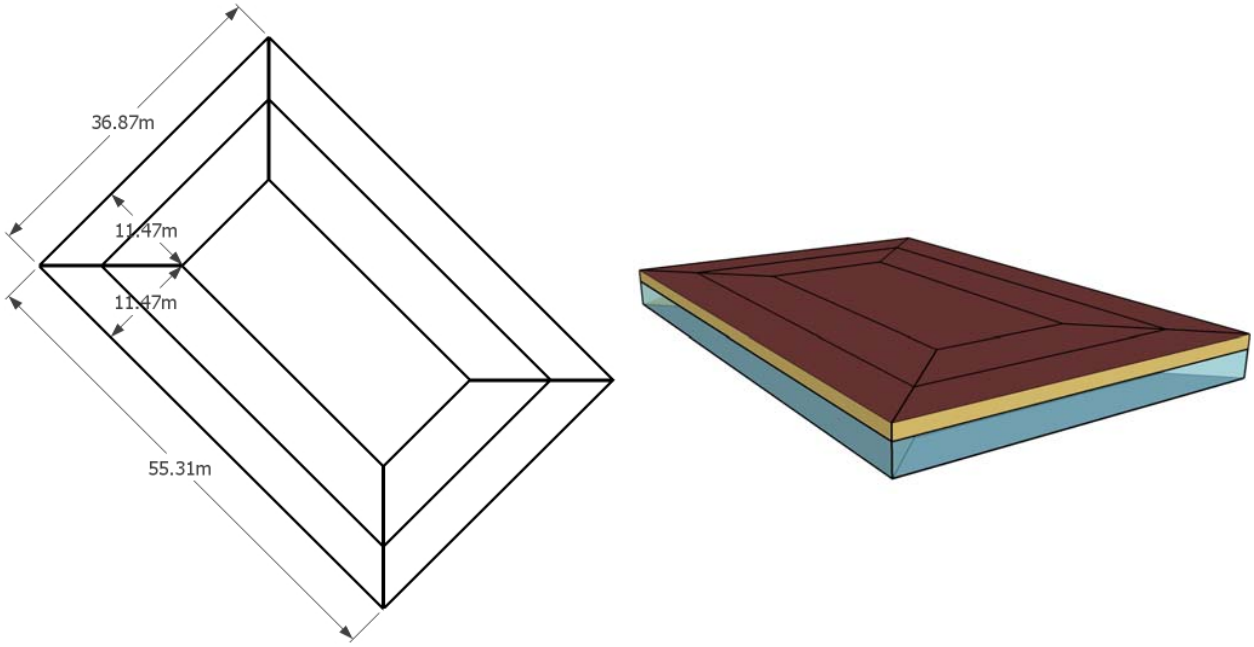


Figura 29. Planta e modelo espacial da alternativa com core central “CC3_135” e WWR de 65%

Tabela 20. Desempenho das variações dos modelos “CL3_90” e “CC3_135” (sem aproveitamento da iluminação natural)

Modelo	WWR	Fator solar	Consumo anual [MWh]	Custo anual [R$]	Diferença
CC3_135	65%	40%	1.563	387.872,00	-
CC3_135	60%	40%	1.549	384.181,00	**-1.0%**
CL3_90	65%	40%	1.502	371.947,00	**-4.1%**
CL3_90	60%	40%	1.491	369.139,00	**-4.8%**
CL3_90	40%	32%	1.419	349.550,00	**-9.9%**
CL3_90	40%	21%	1.401	345.087,00	**-11.0%**

Essa mesma análise conduzida para os modelos representados nas figuras 30 a 31 apresentou diferenças de até 13% (ver tabela 21). Os resultados apresentados comprovam que a arquitetura de edifícios de escritório pode contribuir indiretamente, por meio do aproveitamento da iluminação natural, para edifícios com melhor

desempenho energético. Dentre as morfologias de core central e de core lateral, as diferenças não chegaram a 10%. Comparando o pior caso com o melhor modelo com átrio, as diferenças alcançadas foram até 3,5% maiores.

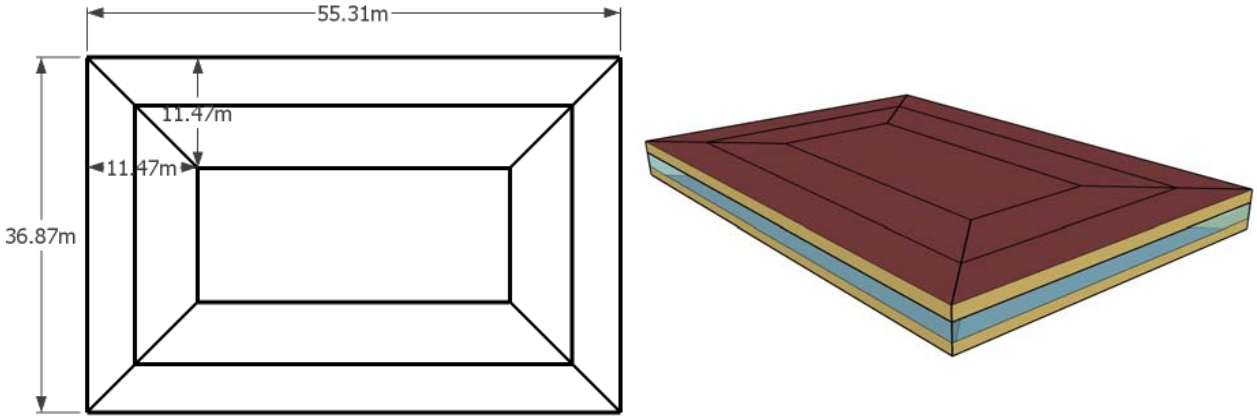


Figura 30. Planta e modelo espacial da alternativa com core central “CC3_90” e WWR de 40%

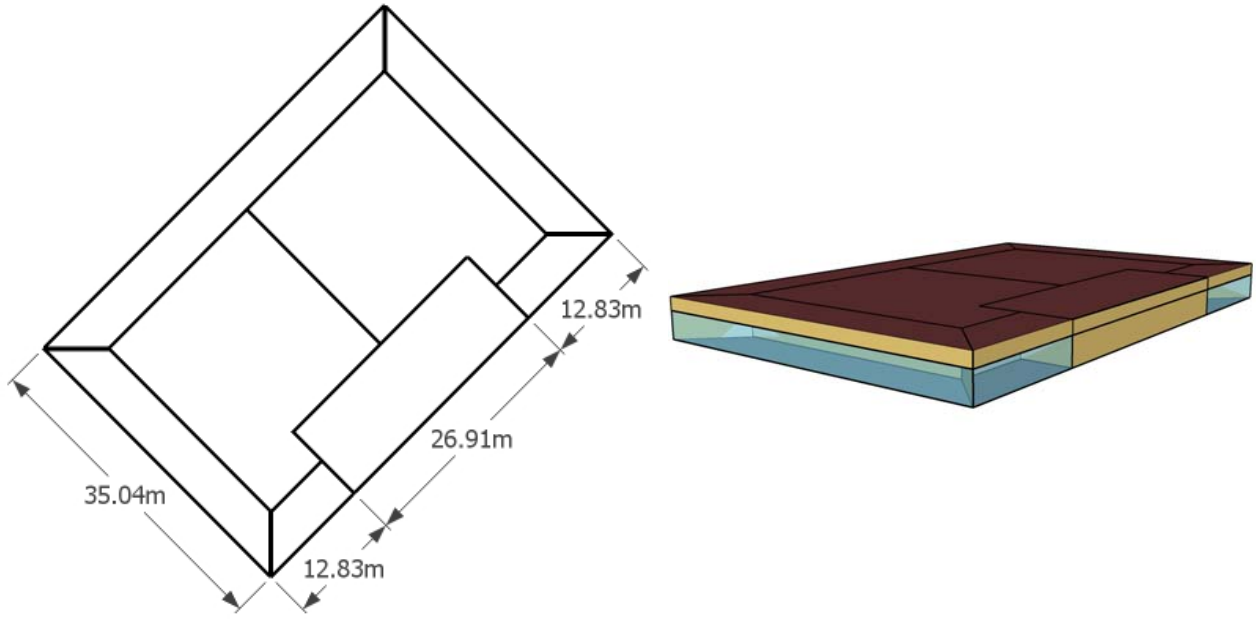


Figura 31. Planta e modelo espacial da alternativa com core lateral “CL9_225” e WWR de 65%

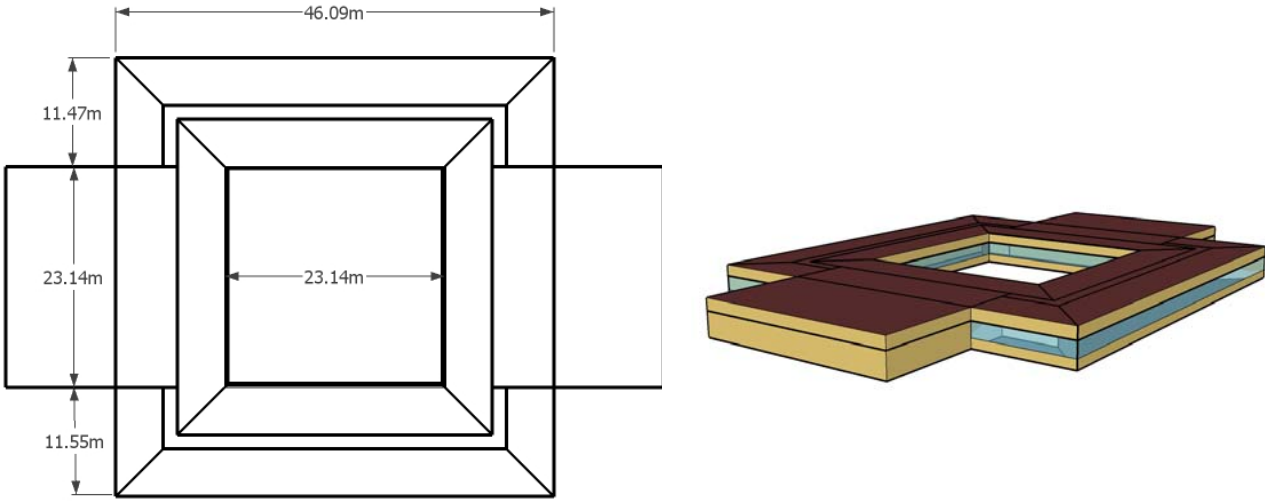


Figura 32. Planta e modelo espacial da alternativa com átrio “A1_0” e WWR de 40%

Tabela 21. Desempenho das variações dos modelos “CC3_90”, “CL9_225” e “CA1_0” (com dimerização das luminárias próximas às fachadas)

Modelo	WWR	Fator solar	Consumo anual [MWh]	Custo anual [R$]	Diferença
CL9_225	65%	40%	1.412	353.782,00	-
CC3_90	65%	40%	1.391	351.642,00	**-0.6%**
CL9_225	60%	40%	1.399	350.499,00	**-0.9%**
CC3_90	60%	40%	1.378	348.214,00	**-1.6%**
CC3_90	40%	32%	1.296	326.805,00	**-7.6%**
CC3_90	40%	21%	1.273	320.191,00	**-9.5%**
CA1_0	40%	32%	1.242	316.967,00	**-10.4%**
CA1_0	40%	21%	1.212	307.810,00	**-13.0%**

7 Considerações finais

O LEED não se propõe a esgotar todos os parâmetros de sustentabilidade de edifícios, mas apresenta um conjunto de indicadores de desempenho para serem tomados como referência. Apesar das críticas que tem recebido, o interesse no Brasil pela certificação tem exigido uma melhoria substancial dos projetos. No Brasil e em São Paulo, o guia de referência do sistema LEED tem funcionado como um checklist de boas práticas de projeto a serem seguidas pelos projetistas, conforme nível de certificação almejado. Contudo, falta a figura do projetista líder, responsável por ver todas as disciplinas de projeto de maneira integrada.

A consultoria de eficiência energética inicia-se com apresentação da metodologia descrita no apêndice G da ASHRAE Standard 90.1 e com definição de metas para cada disciplina. Devido ao elevado desempenho da envoltória do edifício de referência, contra o qual o projeto que se quer avaliar é comparado, para quase todos os casos é solicitado um projeto de arquitetura que resulte em desempenho igual ou muito próximo ao do modelo de referência. Desse modo, a economia mínima de custo de energia estimada para atendimento ao pré-requisito da certificação é alcançada por meio de sistemas de climatização e de iluminação mais eficientes. Tomando como referência os edifícios que buscam a certificação, equipamentos de escritório e de áreas comuns são responsáveis pela maior parcela do consumo de energia, cerca de 40% a 50% do uso final, seguidos dos sistemas de ventilação e de condicionamento de ar, com cerca de um terço, e de iluminação, que varia entre um quinto e um quarto do consumo.

Dentre as características arquitetônicas e tecnológicas dos edifícios projetados para atendimento às exigências da certificação, as mais comuns são especificação de vidros laminados de bom desempenho energético, projetos de sistemas de condicionamento

de ar com COP elevado, ventiladores de baixo consumo, recuperador de calor na tomada do ar externo, sensores de CO_2 modulando a tomada de ar externo em função da ocupação, sensores de presença para acionamento da iluminação em garagens e elevadores com antecipação de chamada e frenagem regenerativa.

Uma vez que o interesse pela certificação é maior que a preocupação ambiental, as economias esperadas não são muito superiores às exigidas para atendimento ao pré-requisito de energia. Para projetos registrados na versão LEED CS 2.0 até 28 de junho de 2007, é esperado um desempenho mínimo conforme norma ASHRAE Std. 90.1 de 2004. Para projetos registrados nessa mesma versão e após essa data, é esperada redução no custo anual de energia igual ou superior a 14%. Para projetos registrados na versão atual, de 2009, espera-se redução igual ou superior a 10%.

Apesar disso, para empreendimentos mais recentes, tem sido possível alterar o modo de operação dos sistemas de climatização ou inclusive seus equipamentos e a concepção do projeto, incluindo estratégia de ventilação noturna para resfriamento dos ambientes internos, reduzir a potência instalada em iluminação para até 9 W/m^2, fomentar estratégias como aproveitamento de iluminação natural e utilização de sensores de iluminância para dimerização de luminárias e auxiliar arquitetos na escolha de vidros com melhor desempenho energético, último item de arquitetura a ser definido. Conforme apresentado no quarto capítulo, houve projeto para o qual foi sugerida redução da percentagem de área translúcida de fachada e a mesma foi aceita. Em outros projetos, especialmente aqueles desenvolvidos por arquitetos com contato anterior com o LEED, percebe-se interesse com a orientação do edifício e com o uso de dispositivos de proteção solar fixos, havendo um projeto para o qual está sendo estudado dimensionamento de prateleira de luz.

Em São Paulo, são duas as maiores restrições do mercado imobiliário à melhoria de desempenho dos edifícios de escritório. A primeira diz respeito à arquitetura. Por serem desenvolvidos para atenderem a interesses comerciais, os projetos são, muitas vezes, definidos em função dos limites do lote e do recuos necessários. Além disso, de acordo com alguns dos arquitetos envolvidos com o projeto desses edifícios, estando os potenciais compradores ou locatários desses espaços interessados em grandes áreas de fachada envidraçada, não há interesse em redução das mesmas, muito menos em diferentes tratamentos, conforme orientação da fachada. Dito isso, fica fácil entender a dificuldade da consultoria em intervir no projeto da envoltória. A segunda restrição refere-se à disponibilidade quase imperativa de climatização para todos os dias do ano. Uma análise do clima do ano típico de São Paulo revela que, para o intervalo das 8h às 20h, a frequência de ocorrência de temperaturas abaixo de 24°C é de 70%, o que implica em sistema de condicionamento operando em carga parcial. Embora as cargas internas sejam elevadas devido à densidade de ocupação entre sete e dez metros quadrados por pessoa, um bom projeto de arquitetura pode tornar viável o condicionamento em modo misto como alternativa para aumento das economias de energia.

Por outro lado, há dois avanços ou mudanças mais significativas percebidas no projeto de arquitetura desses edifícios. O primeiro refere-se à escolha dos vidros em função de suas propriedades ópticas e térmicas. Embora para alguns empreendimentos no Brasil essa preocupação tenha sido anterior à procura pela certificação, essa prática esteve restrita a um reduzido número de consultores de fachada e não havia o uso de ferramentas de simulação computacional para quantificação dos resultados esperados. Além disso, a disponibilidade de dados técnicos para a análise energética do material é

uma conquista da consultoria. O segundo avanço significativo pode ser percebido no crescente interesse de alguns arquitetos com a orientação do edifício e com o correto dimensionamento de dispositivos de proteção solar. Não coincidentemente, são arquitetos que participaram previamente de algum projeto de edifício de escritório que também buscava a certificação LEED.

Conforme apresentado no sexto capítulo, a metodologia descrita no apêndice G da ASHRAE Std. 90.1 dá uma falsa impressão de o quanto a arquitetura pode contribuir para a eficiência energética dos edifícios. Ao comparar o desempenho da envoltória de um edifício com a de um edifício de referência, são considerados apenas suas propriedades térmicas, orientação das fachadas e dispositivos de proteção solar como brises-soleil ou persianas automatizadas. Porque os modelos referentes ao edifício a ser avaliado e ao edifício de referência possuem mesmas proporções, a metodologia não penaliza ou bonifica adequadamente o projeto de arquitetura. Projetos como, por exemplo, com planta quadrada e igual percentagem de área envidraçada nas quatro fachadas, são comparados contra modelos com mesmo zoneamento térmico e percentagem de área de fachada envidraçada igualmente distribuída para as quatro orientações.

Devido a essa metodologia, a limitação da consultoria na participação do desenvolvimento do projeto de arquitetura não compromete a avaliação do desempenho esperado para um edifício, sendo suficiente intervir apenas na percentagem de área de fachada envidraçada e na escolha dos vidros. Apesar disso, comprovada a influência da arquitetura no desempenho energético desses edifícios, as decisões tomadas durante a fase de concepção do projeto têm impacto considerável no desempenho final do edifício e, apesar do tempo e dos esforços necessários, devem

ser estudadas. Para os próximos anos, a perspectiva deve ser maior colaboração entre projetistas e consultores, desde os primeiros esboços do projeto.

Referências bibliográficas

ASHRAE. **62.1 User's Manual.** Atlanta: ANSI/ASHRAE, 2007.

_____. **90.1 User's Manual.** Atlanta: ANSI/ASHRAE/IESNA, 2007.

_____. **ASHRAE Standard 90.1-2007 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings.** ANSI/ASHRAE/IESNA: Atlanta, 2004.

_____. **Handbook of Fundamentals, 2005.** ASHRAE: Atlanta, 2005.

Benedetto, Gisele. **Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.** Dissertação de mestrado em arquitetura e urbanismo. Curso de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

DOE. **Building Energy Software Tools Directory.** Disponível em <apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory>. Acesso em 14 de junho de 2009.

BUNGE. **Teoria e realidade.** São Paulo: Perspectiva, 1974.

Carlo, Joyce. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação de eficiência energética do envoltório de edificações não residenciais.** Tese de doutorado em engenharia civil. Curso de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

Chvatal, Karin et al. **Analysis of envelope thermal behaviour through parametric studies.** Proceedings… Eindhoven: IBPSA, 2003, p.195-202.

Clark, Joe. **Energy Simulation in Building Design.** Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

Coelho, Gabriel; Ghisi, Enedir. **Correlação do consumo de energia com características construtivas e tipologias arquitetônicas de edifícios de escritório localizados em Florianópolis - SC.** Ouro Preto: Anais do IX Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 2007.

Crawley, Drury et al. **Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs.** Relatório técnico. United States Department of Energy, University of Strathclyde, University of Wisconsin, 2005.

Didoné, Evelise. **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/ SC.** Dissertação de mestrado em arquitetura e urbanismo. Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

Dutra, Luciano; Andrade, Suely. **Proteções solares e outras estratégias de sombreamento em edifícios públicos e comerciais de Florianópolis.** Ouro Preto: Anais do IX Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 2007.

Edwards, Brian; Hyett, Paul. **Rough Guide to Sustainability.** Londres: RIBA Publications, 2001 (tradução para espanhol de Sandra Sanmiguel Sousa, “Guia Básica de la Sostenibilidad”, Barcelona: Gustavo Gili, 2004).

Ghisi, Enedir; Tinker, John. **Optimising energy consumption in offices as a function of window area and room size.** Proceedings… Rio de Janeiro: IBPSA, 2001, p.1307-19314.

Gololov, Irena; Yezioro, Abraham. **A computer system for multi-criteria comparative evaluation of building envelopes.** Proceedings… Pequim: IBPSA, 2007, p.1895-1902.

Gottfried, David (ed.). **Sustainable Building Technical Manual: Green Building Design, Construction and Operations.** São Francisco: Public Technology Inc.

GBC Brasil. Página institucional Disponível em <www.gbcbrasil.org.br>. Acesso em 11 de junho de 2009.

Goulding, John et al. (ed.). **Energy conscious design: a primer for architects.** Bruxelas: Comission of the European Communities, 1992.

Hansen, Jan. **Building performance simulation in a changing environment.** In: IBPSA Brasil. Seminário Biuilding Performance Simulation for Design and Operation. Rio de Janeiro, 2008. Apresentação disponível em <www.labeee.ufsc.br/ibpsa-brasil/seminario_2008.html>. Acesso em 20 de junho de 2009.

Holst, Johnny. **Using whole building simulation models and optimizing procedures to optimize building envelope design with respect to energy consumption and indoor environment.** Proceedings… Eindhoven: IBPSA, 2003, p.507-514.

Hopfe, Christina et al. **Uncertainty and sensitivity analysis for detailed design support.** Proceedings… Pequim: IBPSA, 2007, p.1799-1804.

LBNL. **EnergyPlus Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations.** Berkeley: United States Department of Energy, 2008.

_____. **Getting Started with EnergyPlus. Basics Manual: Essential Information You Need about Running EnergyPlus.** Berkeley: United States Department of Energy, 2007.

_____. **Input Output Reference. The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output.** Berkeley: United States Department of Energy, 2008.

Lovelock, James. **The Revenge of Gaia.** Londres: Penguin, 2006.

Maciel, Alexandra. **Integração de conceitos bioclimáticos ao projeto arquitetônico.** Tese de doutorado em engenharia civil. Curso de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

Malkawi, Ali; Augenbroe, Godfried (ed.). **Advanced Building Simulation.** Nova Iorque: Taylor and Francis, 2004.

Melo, Ana Paula; Lamberts, Roberto. **O método de balançe térmico através de simulação computacional no programa EnergyPlus.** Florianópolis, 2008. Disponível em <www.technobuild.com.br>. Acesso em 14 de junho de 2009.

Pedrini, Aldomar**. Integration of low energy strategies to the early stages of design process of office buildings in warm climate.** Tese de doutorado em filosofia. Departamento de Arquitetura, the University of Queensland. Brisbane, 2003.

Pedrini, Aldomar; Szokolay, Steven. **The architects approach to the project of energy efficient office buildings in warm climate and the importance of design methods.** Proceedings… Montreal: IBPSA, 2005, p.937-944.

Perez, Richard et al. **Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance.** Solar Energy. 1990. v. 44, p. 271-289.

Pessenlehner, Werner; Mahdavi, Ardeshir. **Building morphology transparence and energy performance.** Proceedings… Eindhoven: IBPSA, 2003, p.1025-1032.

Poirazis, Harris; Blomsterberg, Åke. **Energy and thermal analysis of glazed office buildings using a dynamic energy simulation tool.** Proceedings… Montreal: IBPSA, 2005, p.945-952.

Ramos, Greici. **Análise da iluminação natural calculada por meio do programa EnergyPlus.** Dissertação de mestrado em engenharia civil. Curso de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

Reinhert, Christoph. **A simulation-based review of the ubiquitous window-head-height to daylit zone rule-of-thumb.** Proceedings… Montreal: IBPSA, 2005, p.1011-1018.

Rogers, Richard; Gumuchdjian, Philip. **Cities for a Small Planet.** Londres: Faber and Faber, 1997.

SERRA, Geraldo. **Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo.** São Paulo: Edusp, 2006.

Shaviv, E. et al. **A prescription method for the design of office buildings an energetic economic approach.** Proceedings… Montreal: IBPSA, 2005, p.1115-1122.

Struck, Christian; Hensen, Jan. **On supporting design decisions in conceptual design addressing specification uncertainties using performance simulation.** Proceedings… Pequim: IBPSA, 2007, p.1434-1439.

USGBC. **LEED-CS Version 2.0 Reference Guide.** Washington: USGBC, 2007.

_____. **LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction.** Washington: USGBC, 2009.

Waltz, James. **Computerized Building Energy Simulation Handbook.** Liburn: The Fairmont Press, 1999.

Westphal, Fernando. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais.** Tese de

doutorado em engenharia civil. Curso de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

Westphal, Fernando; Lamberts, Roberto. **Análise do impacto de variáveis arquitetônicas e cargas internas no consumo de energia em condicionamento de ar de edificações comerciais.** Ouro Preto: Anais do IX Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 2007.

_____. **Building Simulation Calibration Using Sensitivity Analysis.** Proceedings… Montreal: IBPSA, 2005, p.1331-1338.

Winkelman, F. **Daylighting Calculation in DOE-2.** LBNL Report LBL-11353. 1983.

Winkelman, F.; Selkowitz, S. **Daylighting simulation in DOE-2 Building Energy Analysis Program.** Energy and Buildings. 1985. v. 8, p.271-286.

Bibliografia consultada

ABNT. **NBR 16401-1 Instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários. Parte 1: projetos das instalações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 16401-2 Instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários. Parte 2: parâmetros de conforto térmico.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **NBR 16401-3 Instalações de ar-condicionado: sistemas centrais e unitários. Parte 3: qualidade do ar interior.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

_____. **ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** ANSI/ASHRAE: Atlanta, 2004.

_____. **ASHRAE Standard 62.1-2007 Ventilation for Acceptable Indoor Quality.** ANSI/ASHRAE: Atlanta, 2007.

Carlo, Joyce; Lamberts, Roberto. **O papel da volumetria no desempenho energético da edificação.** Ouro Preto: Anais do IX Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 2007.

Creder, Hélio. **Instalações de ar condicionado.** Rio de Janeiro: LTC, 2004.

Givoni, Baruch. **Passive and low energy cooling of buildings.** Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1994.

Haselbach, Liv. **The Engineering Guide to LEED – New Construction: Sustainable Construction for Engineers.** Nova Iorque: McGraw Hill, 2008.

Incropera, Frank e DeWitt, David. **Fundamentals of heat and mass transfer.** Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1996 (tradução para espanhol de Ricardo Cruz,

“Fundamentos de transferência de calor”, Cidade de México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1999).

INMETRO. **Etiquetagem de eficiência energética de edificações.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2009. Disponível em <www.inmetro.gov.br>. Acesso em 09 de novembro de 2009.

_____. **Manual de aplicação dos regulamentos: RTQ-C e RAC-C.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2009. Disponível em <www.inmetro.gov.br>. Acesso em 09 de novembro de 2009.

_____. **RAC-C Regulamento de avaliação da conformidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviço e públicos.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2009. Disponível em <www.inmetro.gov.br>. Acesso em 09 de novembro de 2009.

_____. **RTQ-C Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2009. Disponível em <www.inmetro.gov.br>. Acesso em 09 de novembro de 2009.

Lamberts, Roberto et al. **Regulamentação de etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos.** Ouro Preto: Anais do IX Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 2007.

Moore, Fuller. **Environmental control systems: heating, cooling, lighting.** Nova Iorque: McGraw Hill, 1993.

Olgyay, Victor. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism.** Princeton University Press, 1963 (tradução para espanhol de Josefina Frontado e Luis Clavet, “Arquitecture y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas”, Barcelona: Gustavo Gili, 1998).

Pirró, Lúcia. **O impacto das envolventes verticais no desempenho energético de edifícios de escritórios.** Tese de doutorado em arquitetura e urbanismo. Curso de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

Santana, Marina; Ghisi, Enedir. **Influência do percentual de área de janela na fachada e da absortância de paredes externas no consumo de energia de edifícios de escritório na cidade de Florianópolis - SC.** Ouro Preto: Anais do IX Encontro nacional de conforto no ambiente construído, 2007.

_____. **Simulação integrada de energia.** Apresentação oral proferida no I Encontro nacional sobre fachadas, disponível em <www.youtube.com>. Acesso em 10 de novembro de 2009.