



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**A influência do sombreamento do entorno na etiqueta
de eficiência energética de edifício comercial**

Luciana Oliveira Fernandes

**Campinas
2012**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

Luciana Oliveira Fernandes

**A influência do sombreamento do entorno na etiqueta
de eficiência energética de edifício comercial**

Dissertação apresentada à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Arquitetura e Construção

ORIENTADORA: Prof.^a Dr.^a Lucila Chebel Labaki

Campinas
2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

F391i	<p>Fernandes, Luciana Oliveira</p> <p>A influência do sombreamento do entorno na etiqueta de eficiência energética de edifício comercial / Luciana Oliveira Fernandes. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientador: Lucila Chebel Labaki. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.</p> <p>1. Eficiência Energética. 2. Iluminação natural. 3. Conforto térmico. I. Labaki, Lucila Chebel. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: The influence of surrounding shading on the labelling of energy efficiency of a commercial building

Palavras-chave em Inglês: Energy Efficiency, Daylighting, Thermal comfort

Área de concentração: Arquitetura e Construção

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Rosana Maria Caram, Fernando Simon Westphal

Data da defesa: 14-03-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO**

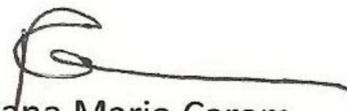
**A INFLUÊNCIA DO SOMBREAMENTO DO ENTORNO NA ETIQUETA DE
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFÍCIO COMERCIAL**

Luciana Oliveira Fernandes

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



**Prof. Dr. Lucila Chebel Labaki
Presidente e Orientador(a)/Unicamp**



**Prof. Dr. Rosana Maria Caram
USP**



**Prof. Dr. Fernando Simon Westphal
UFSC**

Campinas, 14 de Março de 2012

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram a procurar fazer o que gosto e nunca desistir nos momentos difíceis. Apesar da distância estão sempre ao meu lado.

Agradecimentos

Agradeço à Profa. Lucila por me adotar em sua equipe de trabalho, pelas oportunidades oferecidas e pelo seu companheirismo. Ao Prof. Tibiriçá que despertou meu interesse pela área de conforto ambiental e eficiência energética. Ao Prof. Fernando Westphal por me instigar a refletir durante nossas conversas em suas breves visitas à Unicamp. Aos meus amigos que me viram festejar e desesperar e sempre tinham palavras de incentivo. Aos colegas do LaCAF pelas animadas e proveitosas reuniões. À minha amiga Bel que me apoiou, acompanhou e incentivou no início deste trabalho. Ao Rafael, companheiro nas horas de trabalho e de lazer, pelos seus palpites azedos e por me fazer sorrir. Às minhas colegas de república pela paz proporcionada e festas organizadas nas horas certas. E finalmente à FAPESP por dar apoio financeiro a esta pesquisa.

Resumo

O elevado consumo de energia elétrica pelas edificações brasileiras e o potencial de conservação de energia motivou a criação do “Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações” – PROCEL Edifica – a fim de avaliar e classificar o nível de eficiência energética desses edifícios. A consideração do entorno ao avaliar o nível de eficiência energética de um edifício pelo método da simulação, segundo os “Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” (RTQ-C), é opcional. Contudo, pesquisas destacam a influência da geometria urbana no desempenho energético das edificações. Nesta pesquisa foi analisada a influência do entorno sobre o uso da iluminação natural e sobre a etiqueta de eficiência energética de uma edificação comercial, através da simulação computacional. Para isso um modelo hipotético foi simulado nos softwares *EnergyPlus* e *Daysim* sob diferentes configurações de entorno e três sistemas de iluminação artificial. O primeiro permanece ligado durante o período de ocupação, o segundo é acionado pelo usuário quando necessário e o terceiro é utilizado por usuários passivos, mas controlado por *dimmers*. A metodologia utilizada para avaliação do nível de eficiência do edifício se baseia na recomendação do RTQ-C que consiste em comparar o consumo de energia do edifício proposto com edifícios similares cujas características correspondem aos níveis de eficiência. Tomando como referência os modelos cuja iluminação artificial permanece acesa durante todo o período de ocupação, os modelos com sistema controlado por interruptor apresentou uma economia média de 71% no consumo com iluminação e 35% no consumo total. O sistema com *dimmers* resultou em uma economia média de 50% e 23% respectivamente. No caso estudado, ambos os sistemas permitiram elevar o nível de eficiência energética do edifício proposto.

Palavras-chave: eficiência energética, etiquetagem, sombreamento do entorno.

Abstract

The high energy consumption of Brazilian buildings and the potential of energy savings have stimulated the establishments of the “National Program for Energy Efficiency of Buildings” – PROCEL Edifica - which evaluates and classifies the level of energy efficiency of these buildings. The “Quality Technical Requirements for the Energy Efficiency Level of Commercial, Services and Public Buildings” (RTQ-C) considers the modeling of the surroundings of the building optional to evaluate its energy efficiency by computational simulation. Nevertheless, researches indicate that urban geometry influences the energy performance of buildings. In this research it was analyzed the influence of the surroundings on the use of daylight in a non-residential building and thereafter on its energy efficiency label by means of computer simulation. For this purpose, a theoretical model of a non-residential building was simulated using the softwares Energy Plus and Daysim with different surroundings and three distinct electric lighting systems. The first one remains active during working hours. The second is activated by the user when needed, and the last one is triggered by passive users but controlled by dimmers. The methodology to evaluate the level of energy efficiency is based on the RTQ-C by which the energy consumption of the proposed building must be compared with similar buildings whose technical features match different levels of efficiency. With reference to the first system, the system controlled by the user resulted in an average economy of 71% on lighting annual consumption and 35% on total annual consumption. The dimmer system had an average economy of 50% and 23% respectively. In this case, both of the systems allowed raising the level of energy efficiency of the theoretical model.

Keywords: energy efficiency, labeling, surrounding shading.

Lista de Símbolos e Siglas

ABCB = Australian Building Codes Board.

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Ângulo Horizontal de Sombreamento (AHS) = Ângulo formado entre dois planos verticais: o que contem a base da folha de vidro (ou material translúcido) e o plano formado pela extremidade mais distante da proteção solar vertical e a extremidade oposta da base da folha de vidro (ou material translúcido).

Ângulo Vertical de Sombreamento (AVS) = Ângulo formado entre dois planos: o plano vertical na base da folha de vidro (ou material translúcido) e o plano formado pela extremidade mais distante da proteção solar horizontal até a base da folha de vidro (ou material translúcido).

Área Condicionada (AC) (m²) = Área útil dos ambientes atendidos por sistema de condicionamento de ar.

Área Não Condicionada (ANC) (m²) = Área útil dos ambientes não condicionados de permanência prolongada, com comprovação de conforto conforme metodologia do RTQ-C.

Área da envoltória (A_{env}) (m²) = Soma das áreas das fachadas, empenas e cobertura, incluindo as aberturas.

Área de Permanência Prolongada (APP) (m²) = Área útil dos ambientes de ocupação contínua. Garagens e estacionamentos ou áreas de circulação não entram no cálculo.

Área de Permanência Transitória (APT) (m²) = Área útil dos ambientes de permanência transitória, desde que não condicionados. Garagens e estacionamentos não entram no cálculo.

Área de projeção da cobertura (A_{pcob}) (m^2) = Área da projeção horizontal da cobertura, incluindo terraços cobertos ou descobertos e excluindo beirais, marquises e coberturas sobre varandas - esta última, desde que fora do alinhamento do edifício.

Área de projeção do edifício (A_{pe}) (m^2) = Área de projeção média dos pavimentos, excluindo subsolos.

Área Total Construída (A_{tot}) (m^2) = Soma das áreas de piso dos ambientes fechados da construção, medidas externamente.

Área Útil (A_U) (m^2) = Área disponível para ocupação, medida entre as superfícies das paredes que delimitam o ambiente, excluindo garagens.

ASHRAE = American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

BCA = Building Code of Australia.

BECP = BuildingEnergy Codes Program.

BREEAM = Building Research Establishment Environmental Assessment Method.

CGIEE = Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética.

COP = Coefficient of Performance. Para a condição de resfriamento, segundo a ASHRAE 90.1, é a razão entre o calor removido do ambiente e a energia consumida, para um sistema completo de refrigeração ou uma porção específica deste sistema sob condições operacionais projetadas.

CT Edificações = Comissão Técnica coordenada pelo Inmetro responsável pelo processo de obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia.

Densidade de Potência de Iluminação (DPI) (W/m^2) = Razão entre o somatório da potência de lâmpadas e reatores e a área de um ambiente.

Densidade de Potência de Iluminação Limite (DPI_L) (W/m^2) = Limite máximo aceitável de DPI.

DOE = Department of Energy of the United States.

ENCE = Etiqueta Nacional de Conservação de Energia.

EPA = Environmental Protection Agency of the United States.

Equivalente Numérico (EqNumCA) = Número representativo da eficiência do sistema de condicionamento de ar.

Equivalente Numérico (EqNumDPI) = Número representativo da eficiência do sistema de iluminação.

Equivalente Numérico (EqNumEnv) = Número representativo da eficiência da envoltória do edifício.

Equivalente Numérico (EqNumV) = Número representativo do conforto dos ambientes não condicionados artificialmente.

Fator Altura (FA) = Razão entre a área de projeção da cobertura e a área total construída (A_{pcob}/A_{tot}), com exceção dos subsolos.

Fator de Forma (FF) = Razão entre a área da envoltória e o volume total da edificação (A_{env}/V_{tot}).

Fator Solar (FS) = Razão entre o ganho de calor que entra num ambiente através de uma abertura e a radiação solar incidente nesta mesma abertura. Inclui o calor radiante transmitido pelo vidro e a radiação solar absorvida, que é re-irradiada ou transmitida, por condução ou convecção, ao ambiente. O fator solar considerado será relativo a uma incidência de radiação solar ortogonal a abertura.

GT – Edificações = Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações.

IC_{env} = Indicador de Consumo da envoltória.

IECC = International Energy Conservation Code.

Inmetro = Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.

LEED = Leadership in Energy and Environmental Design.

Percentual de Área de Abertura na Fachada total (PAF_T) (%) = É calculado pela razão entre a soma das áreas de abertura envidraçada, ou com fechamento transparente ou translúcido, de cada fachada e a área total de fachada da edificação.

PMV = *Predicted Mean Vote* (Voto Médio Estimado).

PPD = *Predicted Percentage Dissatisfied* (Porcentagem Estimada de Insatisfeitos).

PROCEL = Programa Nacional de Conservação de Energia.

RTQ-C = Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.

ST – Edificações = Secretaria Técnica de Edificações.

Transmitância Térmica da Cobertura U_{cob} (W/(m²K)) = Transmitância térmica das coberturas do edifício.

Transmitância Térmica das Paredes (U_{par}) (W/(m²K)) = Transmitância térmica de paredes externas somente.

Volume Total da Edificação (V_{tot}) (m³) = Volume delimitado pelos fechamentos externos do edifício (fachadas e cobertura), com exceção de pátios internos descobertos.

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivo	5
3	Contextualização	7
3.1	Cidade, luz e calor	8
3.2	Iniciativas internacionais de eficiência energética em edificações.	13
3.2.1	Normas de eficiência energética.....	13
3.2.1.1	Estados Unidos	13
3.2.1.2	Europa	15
3.2.1.3	Austrália	16
3.2.2	Classificação da eficiência energética das edificações.....	18
3.3	Panorama nacional: consumo e normas de eficiência energética de edificações.....	20
3.4	Simulação computacional	34
4	Metodologia	39
4.1	Normas	43
4.2	Edifício estudado	44
4.3	Modelagem	52
4.3.1	Modelo para simulação termoenergética.....	58

4.3.2	Modelo para simulação da luz natural.....	65
4.4	Modelos de referência	71
5	Resultados e discussão	77
6	Conclusões	105
	Referências Bibliográficas	109
	Apêndice A.....	119
	Apêndice B.....	129
	Apêndice C.....	139
	Apêndice D	143

1 Introdução

O contínuo crescimento desordenado das cidades, motivado pela busca do homem por melhores oportunidades de vida, traz como conseqüência o alto consumo de energia com condicionamento artificial a fim de suprir a falta de qualidade ambiental e proporcionar conforto.

A consciência de que os recursos naturais são finitos aliada à disponibilidade de novas tecnologias permitem aos profissionais da área de arquitetura e urbanismo lançarem um novo olhar sobre as cidades, proporem soluções aos problemas existentes e, antes de tudo, planejarem melhor nossas cidades a fim de buscar a melhoria no desempenho energético das edificações.

Alguns autores tratam da importância de se estudar o desempenho energético de edifícios sob a ótica da escala urbana. Como afirmam Ratti *et al.* (2005) os estudos ainda são controversos e pouco explorados. Muitos modelos e técnicas de simulação do desempenho energético têm sido desenvolvidos, porém não consideram os fenômenos presentes na escala urbana que afetam o consumo energético dos edifícios.

De acordo com Santamouris (2001) a implantação de novas edificações na malha urbana gera impactos de ordem econômica, social e ambiental no seu entorno relacionados com os padrões de vida da sociedade. Entre os impactos de ordem ambiental está o acesso aos

recursos naturais disponíveis no local, sendo a iluminação natural e a insolação recursos passíveis de interferência através do ambiente construído pelo homem.

O uso da iluminação natural como estratégia de eficiência energética a fim de reduzir o uso da iluminação artificial deve ser feito com cuidado. Segundo Carlo *et al.* (2004), a prática resulta no conflito com os ganhos térmicos provenientes da radiação solar, sendo recomendável buscar o equilíbrio entre este recurso natural e os ganhos térmicos provenientes do mesmo.

No ano de 2009 o consumo final de energia elétrica dos setores residencial, comercial e público somados (47,6%) supera o consumo do setor industrial (43,7%) no Brasil (Brasil, 2010a). Nos edifícios comerciais e públicos a maior parte da energia é destinada ao funcionamento de equipamentos de condicionamento de ar, seguida pelo sistema de iluminação (Eletrobrás, 2009). Diante da atual situação de densa ocupação das grandes cidades e do alto consumo energético das edificações faz-se necessária uma reavaliação da ocupação urbana e do desempenho energético das mesmas.

Medidas incentivadoras do uso racional de energia elétrica vêm sendo aplicadas no Brasil a fim de contribuir com a redução do impacto ambiental através da eficiência energética de edifícios. Uma delas é o “Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL EDIFICA” instituído pela parceria Eletrobrás/PROCEL com o objetivo de avaliar e classificar o nível de eficiência energética desses edifícios.

Os “Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos” (RTQ-C) do Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE - prescrevem duas metodologias para avaliação da eficiência energética dos edifícios. Uma delas é a simulação computacional, na qual é necessário considerar parâmetros representativos da geometria e das propriedades termofísicas dos materiais constituintes da edificação, padrões de uso e ocupação da mesma, porém, considerar o sombreamento do entorno na simulação é opcional.

A avaliação da eficiência energética através da simulação termoenergética (como descreve o RTQ-C) integrada à simulação do aproveitamento da luz natural foi explorada no trabalho de Carlo e Lamberts (2010), demonstrando o consumo energético de um modelo de edifício de escritórios em diversas condições de sombreamento. Com os resultados obtidos comprovou-se que o sombreamento da edificação pelo entorno ou por dispositivos pode reduzir ou aumentar o consumo final de energia pelos sistemas de condicionamento de ar e de iluminação.

Baseado nas considerações sobre a influência da geometria urbana no consumo energético das edificações e motivado pelas iniciativas públicas em avaliar o nível de eficiência das edificações, este trabalho foi desenvolvido no sentido de quantificar o impacto causado pelo entorno sobre o nível de eficiência energética de uma edificação não residencial quanto a quesitos de iluminação através da simulação computacional integrada. O intuito é o de contribuir com uma avaliação de eficiência energética mais condizente à situação real de edifícios inseridos numa paisagem urbana verticalizada, muito comum em grandes cidades.

O trabalho está organizado como segue: em “Contextualização” são apresentados os trabalhos considerados fundamentais para o seu desenvolvimento. São estudos que relacionam conforto térmico, ocupação urbana e consumo energético, levantamento de dados do consumo energético nacional e usos finais de energia, além de trabalhos sobre o comportamento da luz natural e simulação computacional.

A metodologia apresenta o modelo hipotético desenvolvido, suas características e as variações do entorno para análise do aproveitamento de iluminação natural e a aplicação do RTQ-C para a avaliação da eficiência energética dos modelos. No capítulo sobre resultados e discussão os dados obtidos a partir das simulações são apresentados e discutidos, assim como as dificuldades encontradas. As conclusões apresentam uma visão geral da avaliação da eficiência energética a partir dos resultados obtidos e ainda acenos a trabalhos posteriores.



2 Objetivo

O trabalho tem como objetivo avaliar a influência do sombreamento do entorno sobre o consumo de energia elétrica de um modelo de edifício comercial com diferentes configurações de entorno dentro do contexto do Programa Brasileiro de Etiquetagem. Os objetivos específicos são:

- estimar o consumo final de energia elétrica considerando diferentes condições de entorno e de sistemas de iluminação artificial;
- avaliar a eficiência energética dos modelos a partir dos critérios estabelecidos pelos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e;
- verificar as condições de conforto térmico resultantes das diferentes combinações entre sistema de iluminação e disposição do entorno.



3 Contextualização

A presente pesquisa baseia-se em quatro temas abordados neste capítulo. Primeiramente, no item “Cidade, luz e calor” são referenciadas pesquisas sobre a influência da forma urbana no consumo de sistemas de condicionamento artificial e de iluminação e conseqüentemente na eficiência energética das edificações. Em seguida, em “Iniciativas internacionais de eficiência energética em edificações” são discutidas algumas experiências internacionais de incentivo às práticas de eficiência energética em edificações, suas normas e sistemas de classificação. Em “Panorama nacional: consumo e normas de eficiência energética de edificações” são apresentados os dados de consumo de eletricidade pelos setores da economia e seus usos finais, além das leis e normas atuais que regulamentam a eficiência energética dos edifícios.

Por fim, o item “Simulação Computacional”: uma ferramenta útil nos estágios iniciais de projeto de edifícios (porém ainda pouco dominada pelos profissionais da construção civil), que auxilia na tomada de decisões para adoção de estratégias e de sistemas energeticamente eficientes e nos processos de certificações de eficiência energética. São apresentados alguns recursos do programa de simulação termoenergética empregado nesta pesquisa, o *EnergyPlus*, muito utilizado para estimativa do consumo energético de edifícios devido à abrangência de seu escopo e por atender aos requisitos de norma específica para esse fim (Standard 90.1 – ASHRAE, 2007).

São descritas também algumas características do programa *Daysim* utilizado para a simulação dinâmica do comportamento da luz natural, a fim de complementar a simulação termoenergética, pois o *EnergyPlus* apresenta limitações para essa função.

3.1 Cidade, luz e calor

O desempenho térmico e energético de um edifício depende de variáveis presentes desde a escala de sua utilização até a configuração da malha urbana em que esta se insere e o clima local (Figura 3.1).

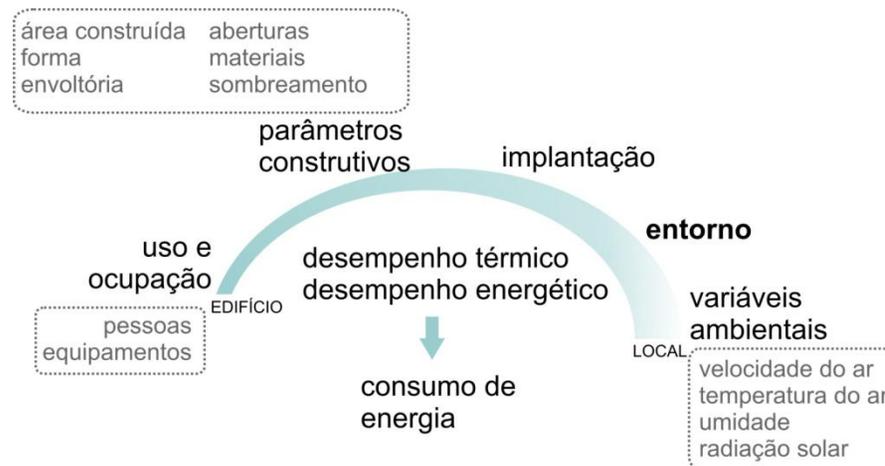


Figura 3.1 - Parâmetros que influenciam o desempenho das edificações

Na Figura 3.2 é apresentado um esquema das variáveis específicas de uma localidade e da interferência de construções vizinhas na disponibilidade de luz natural de um edifício (situação que, dependendo do local, pode ser favorável ou não ao aumento do seu consumo de energia).

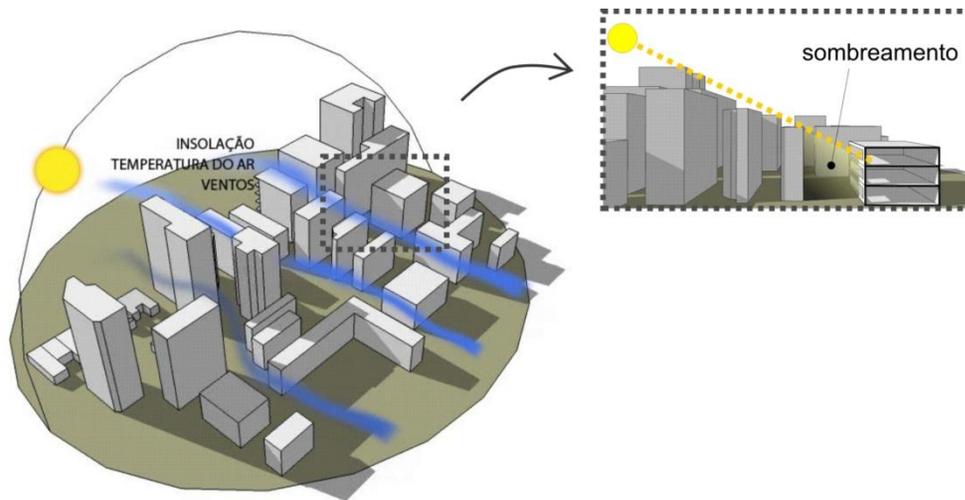


Figura 3.2 – Microclima urbano e sombreamento do entorno.

Segundo Givoni (1998) a estrutura da cidade, ao interagir com fatores meteorológicos, apresenta características climáticas específicas, resultando num microclima que se diferencia das condições climáticas encontradas nas zonas rurais circundantes. A configuração dos edifícios, das vias e a composição das superfícies somadas às variáveis meteorológicas afetam as condições internas ao ambiente construído e seu consumo de energia para atender às condições de conforto de seus usuários.

De acordo com Asimakopoulos *et al.* (2001) o controle deficiente do desenvolvimento da urbanização traz consequências consideráveis para o clima das cidades e a eficiência dos edifícios. Os autores relacionam o aumento da densidade e a perda de áreas verdes ao aumento da temperatura do ar nas áreas construídas, fenômeno muito estudado e conhecido por “ilhas de calor”.

Sobre esse fenômeno, Santamouris (1997) faz uma revisão de trabalhos realizados em áreas densamente construídas de diferentes países. Essas áreas apresentam temperatura do ar mais elevadas que outras menos adensadas e os fatores apontados pelos autores que contribuem para a ocorrência desse fenômeno podem ser naturais (clima, topografia, condições

meteorológicas e o próprio balanço térmico da área) e antropogênicos (morfologia urbana, tráfego de veículos e a própria atividade humana). O autor comprova esse efeito a partir de medições meteorológicas na cidade de Atenas, cujas áreas mais adensadas sem vegetação e de tráfego intenso requerem maior carga térmica para resfriamento.

Estudos como o de Williamson *et al.* (2009) comprovam também a existência das “ilhas de frio”, onde as temperaturas apresentaram-se menores do que as registradas nas áreas vizinhas. Em *canyons* urbanos profundos (maior altura das construções e menor largura da via), as ilhas de calor podem ocorrer com maior intensidade à noite, quando o calor armazenado pelas construções ao longo do dia é emitido para o exterior, enquanto que as “ilhas de frio” ocorrem durante o dia, quando as construções provocam sombreamento entre si e sobre as vias entre elas. A intensidade desses fenômenos está relacionada ao tipo de clima local.

A significativa contribuição do uso da iluminação natural à economia de energia e o problema da escassa disponibilidade desse recurso nas grandes cidades devido à intensa ocupação urbana e verticalização são assuntos tratados por Santamouris (2001). O autor relaciona a urbanização, o clima urbano e o consumo energético das edificações e defende que a disposição das edificações deve permitir um mínimo de acesso solar para facilitar o ganho de energia e fornecer luz diurna para o interior dos edifícios, reduzindo a necessidade de iluminação artificial e o consumo de energia.

Pesquisas demonstram os diversos fatores referentes à estrutura urbana e ao próprio edifício que interferem no desempenho energético deste. Nos países de clima frio, permitir a entrada da radiação solar é um recurso que além de proporcionar o aproveitamento da luminosidade para o ambiente interno, permite o aproveitamento da insolação para aquecimento do ambiente interno, proporcionando economia de energia com aquecimento ativo. Porém, esta é uma estratégia não compatível com a realidade de países de clima tropical como o Brasil.

A radiação solar é um fator externo à edificação cuja disponibilidade depende da configuração urbana (devido ao sombreamento ocasionado por construções vizinhas) e o seu aproveitamento, da caracterização do próprio edifício (como as propriedades dos materiais, aberturas para o exterior, geometria e dispositivos de sombreamento). Trabalhos nacionais sobre a relação entre as propriedades da envoltória, os ganhos de calor e o consumo de energia ressaltam a importância da radiação solar no consumo de energia, demandando seu estudo cauteloso durante a fase de projeto. Ao mesmo tempo em que proporciona iluminação natural ao longo do dia traz ganhos térmicos que podem ser indesejáveis em determinados períodos do ano acarretando no alto consumo de energia pelo sistema de condicionamento de ar.

A partir de modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA), Rocha (2007) identificou em edifícios residenciais que as variáveis: área de exposição de fachada, tempo de sombreamento e Fator de Visão do Céu (FVC) tem grande influência sobre o consumo de energia de uma edificação. Lima (2007) analisou variáveis arquitetônicas de modelos representativos de unidades hoteleiras como as propriedades da envoltória, porcentagem de abertura na fachada, orientação e sombreamento das aberturas. O autor chega à conclusão de que esta última contribui significativamente para a redução no consumo de energia.

A avaliação do desempenho de uma edificação pode ser realizada por métodos prescritivos ou de desempenho como demonstrado por Barbosa e Weiller (2008). Foram comparadas medições *in loco* e métodos de avaliação por parâmetros prescritivos e qualitativos do desempenho térmico de unidades habitacionais. Os parâmetros qualitativos, que consideram a influência do entorno (como topografia, orientação e sombreamento) representaram melhor as condições medidas do que os parâmetros prescritivos contidos nas normas NBR 15220 (Desempenho térmico de edificações) e o projeto de norma PNBR 02:136.01, atual NBR 15575 (Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos).

Em decorrência das constatações dos autores citados, a eficiência energética de uma edificação deve ser avaliada considerando não somente o edifício em si, mas também o lugar onde este se insere. Ratti *et al.* (2005) afirmam que a proposta de se trabalhar com o estudo e simulação considerando os fenômenos que acontecem na escala urbana é o início da melhoria do desempenho energético dos edifícios. Entretanto, reconhecem que os modelos e técnicas desenvolvidos nos últimos anos não consideram os fenômenos presentes na escala urbana.

Os autores demonstraram que esse tipo de análise é possível através da integração de modelos de elevação digital (DEMs), representando diferentes estruturas urbanas, e modelos computacionais de simulação termoenergética. A metodologia possibilitou estimar o consumo de energia de edificações comerciais localizadas em diversas partes das áreas estudadas, indicando que, no estudo de áreas urbanas, parâmetros morfológicos (como a relação entre volume e superfície construída) não são apropriados para estimar o consumo de energia, ao contrário da razão entre zona passiva (áreas com potencial para aproveitamento dos recursos naturais, como luz e vento) e não passiva.

As práticas de incentivo à eficiência energética das edificações podem ser divididas em regulamentação e classificação. Na regulamentação, as normas de eficiência energética estabelecem critérios mínimos a serem atendidos pela edificação desde as propriedades dos materiais e componentes construtivos até o desempenho ambiental e/ou energético. Os sistemas de classificação podem se basear no cumprimento às exigências prescritas nas normas ou na comparação entre o edifício proposto e outros similares de referência a partir de indicadores obtidos por medições ou simulação computacional.

3.2 Iniciativas internacionais de eficiência energética em edificações.

Este capítulo apresenta uma breve descrição da abrangência das normas de eficiência energética vigentes nos Estados Unidos, Europa e Austrália e os sistemas de classificação de eficiência utilizados por eles.

3.2.1 Normas de eficiência energética

3.2.1.1 Estados Unidos

A crise do petróleo na década de 70 levou vários países a tomarem medidas que favorecessem a redução do consumo de energia, como incentivos fiscais e a elaboração das primeiras normas de eficiência energética em edificações. A Lei de Política Energética de 1992 (1992 *Energy Policy Act*) dos Estados Unidos regulamenta que todos os estados deveriam atualizar seus códigos energéticos e adotar a norma vigente de energia, o Modelo de Código de Energia de 1992 (1992 *Model Energy Code*). Desde então foram desenvolvidos novos códigos de energia e em 1998 foi lançado o primeiro Código Internacional de Conservação de Energia (IECC).

De acordo com o Programa de Códigos Energéticos de Edifícios (BECP, 2012), desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), existem atualmente no setor privado duas bases primárias para os códigos de energia de edifícios e normas: o Código Internacional de Conservação de Energia (IECC) e a Standard 90.1 (ASHRAE, 2007). Os códigos energéticos são obrigatórios e especificam os requisitos construtivos e de desempenho das edificações. As normas são publicadas por organizações nacionais e não são obrigatórias, exceto a supracitada Standard 90.1. Antes de ser adotado pelos estados ou jurisdições locais, o IECC

passa por adaptações à realidade construtiva local e as metas de eficiência são revistas pelos estados, tudo com o apoio do BECP (IECC, 2012).

Existem ainda programas que apresentam requisitos além dos exigidos pelos códigos básicos de energia para os edifícios. Os escopos variam desde pequenos aumentos na observância ao IECC até programas mais abrangentes, como o LEED¹, porém, todos visando à eficiência energética de edificações. As jurisdições locais também desenvolvem seus próprios programas e códigos energéticos a partir dos já existentes, como no caso da cidade de Albuquerque e do estado do Colorado.

O IECC, base de todos esses códigos e programas, tem por objetivo a eficiência energética da envoltória e dos sistemas dos edifícios. A partir da classificação climática das regiões dos Estados Unidos são prescritos requisitos mínimos de isolamento e condutividade térmica dos componentes da envoltória e de desempenho dos sistemas de condicionamento de ar, de iluminação, de aquecimento de água, dos motores e equipamentos em geral.

A Standard 90.1 (ASHRAE, 2007), publicada inicialmente em 1975 e desde então continuamente revisada e atualizada, apresenta requisitos mínimos de eficiência energética para projetos de novos edifícios, partes destes (no que concerne à sua envoltória), sistemas (como de iluminação, e aquecimento de água) e equipamentos.

A norma apresenta o *Energy Cost Budget Method* (Método de Orçamento do Custo Energético - ECB), em que são comparados o modelo do edifício proposto e um modelo de referência a partir de parâmetros específicos de envoltória, iluminação, sistema de condicionamento de ar, aquecimento de água e cargas diversas como as requeridas por

1 Leadership in Energy and Environmental Design, norma de classificação de edifícios desenvolvida pelos membros do United States Green Building Council – USGBC

sistemas de ventilação de garagens, iluminação externa e bombas. Para o edifício que excede esses requisitos estabelecidos, existe o *Performance Rating Method* (Método de Classificação do Desempenho), com o qual é possível classificar seu nível eficiência.

3.2.1.2 Europa

O setor de edificações é responsável por 40% do consumo total de energia da União Europeia (European Union, 2010). No ano de 2002 foi estabelecida pelo Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia a *Directive 2002/91/EC* (European Union, 2002), um instrumento legislativo com o objetivo de melhorar o desempenho energético dos edifícios da Comunidade Europeia. Essas diretrizes foram atualizadas no ano de 2010 sob a denominação *Directive 2010/31/EU* (European Union, 2010), com o objetivo de reforçar e esclarecer os requisitos de desempenho energético.

As diretrizes estabelecem critérios gerais no sentido de incentivar a redução do consumo de energia e o aumento do uso de energia de fontes renováveis, levando em consideração condições climáticas locais, requisitos climáticos internos e a relação custo-benefício. Os critérios incluem uma estrutura comum para uma metodologia de cálculo do desempenho energético de edifícios, a aplicação de parâmetros mínimos de desempenho energético de edifícios novos ou existentes, certificação de edifícios e inspeção regular de *boilers* e sistemas de condicionamento de ar (European Union, 2002).

A metodologia a ser adotada deve ser própria para cada país ou região, contanto que esteja em conformidade com normas já estabelecidas e que, para o cálculo do desempenho energético, não seja considerado somente o período em que o aquecimento é necessário, mas o ano todo. Alguns aspectos que devem ser considerados na metodologia são: características térmicas do edifício (incluindo elementos internos), instalação dos sistemas de aquecimento, água quente, condicionamento de ar e iluminação, ventilação (natural e mecânica), projeto

(forma, posicionamento, orientação e clima), sistema solar passivo e dispositivos de sombreamento, condições climáticas do ambiente interno e cargas internas.

Cada Estado-Membro é responsável por estabelecer os requisitos de desempenho energético dos edifícios e de seus componentes. Estes devem ser definidos de forma que seja possível atingir um equilíbrio ótimo entre o investimento e a economia com custos de energia ao longo do ciclo de vida do edifício. Esses requisitos devem ser revistos periodicamente a fim de estarem em conformidade com os avanços técnicos. Uma metodologia comparativa para o cálculo dos requisitos mínimos de desempenho energético é definida pela Comissão Europeia.

A metodologia comparativa requer que os Estados-Membros definam edifícios de referência representativos de diferentes funções e localidades e condições climáticas internas e externas, definam medidas de eficiência energética, estimem o consumo final e de energia primária dos edifícios de referência com e sem as medidas de eficiência energética e calculem os custos dessas medidas durante o ciclo de vida dos edifícios de referência. Dessa forma é possível estabelecer a relação custo-benefício de diferentes níveis de desempenho.

Organismos de inspeção devem fazer uma seleção aleatória de uma amostra significativa dos certificados emitidos anualmente e submetê-los à verificação. Essa verificação consiste em conferir os dados fornecidos para a certificação e os resultados apresentados e pode incluir as recomendações feitas e visita ao edifício para conferir a conformidade entre as especificações do certificado e o edifício.

3.2.1.3 Austrália

Na Austrália utiliza-se o Código de Edificações da Austrália (BCA), considerada como uma norma de construção por todos os Estados e territórios australianos. O código tem por

objetivo possibilitar a obtenção de um padrão mínimo necessário de saúde, segurança e sustentabilidade eficientemente e a nível nacional (ABCB, 2012).

A Figura 3.3 ilustra como é feita a disposição hierárquica dos requisitos técnicos do código seguida de uma breve explicação de seus níveis.



Figura 3.3 - Hierarquia dos requisitos técnicos de desempenho do BCA.
Fonte: adaptado de ABCB (2012).

As orientações são divididas em dois níveis, o nível 1 com os objetivos do código e o nível 2 que descreve, de maneira geral, como se espera que um edifício satisfaça os objetivos da norma, como por exemplo, que a altura de um ambiente seja adequada para seu uso (ABCB, 2012).

Quanto à conformidade, o código apresenta no nível 3 os níveis de desempenho adequados de materiais, componentes, parâmetros de projeto e métodos construtivos para atender aos aspectos funcionais especificados. No nível 4 são estabelecidos os meios para atingir a conformidade com os requisitos de desempenho, e são sugeridos dois métodos a serem seguidos: as “Disposições *Deemed-to-Satisfy* (DTS)” e as “Soluções Alternativas”. No

primeiro método são dados exemplos de soluções, que não são obrigatórios, o que leva ao segundo método, que se aplica quando o edifício não apresenta as soluções descritas no primeiro. O projeto será aprovado se demonstrar que as soluções adotadas resultam em conformidade com os requisitos de desempenho.

As normas prescritivas, em geral, fornecem os requisitos mínimos, no nível da edificação, de propriedades da envoltória e dos sistemas instalados, o que significa que são restritas à caracterização do edifício como uma entidade isolada. Já os sistemas de classificação do nível de eficiência energética podem ir mais além, como considerar o custo de operação ao longo da vida útil da edificação ou comparar seu consumo com o de edifícios semelhantes (*benchmarking*).

3.2.2 Classificação da eficiência energética das edificações

É possível classificar o desempenho ambiental e/ou energético de edifícios eficientes na fase de projeto, de uso e até ao longo de seu ciclo de vida através do atendimento aos requisitos das normas ou da comparação com edifícios similares. Diversos países adotaram diferentes sistemas de avaliação e classificação de desempenho ambiental e/ou energético de edifícios. A classificação de edificações eficientes além de incentivar a adoção de práticas de conservação de energia e a escolha de edifícios que apresentem melhor desempenho energético e ambiental, também afeta a valorização dos imóveis e aumenta a competitividade no mercado da construção civil.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) juntamente com o DOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos) desenvolveram o programa “*Energy Star*”. Esse sistema classifica, através de métodos estatísticos, o desempenho energético dos edifícios em operação comparando-os com outros similares (*benchmarking*) a partir de uma base de dados nacional de aproximadamente 200.000 edifícios (Energy Star, 2012).

Dentre os sistemas de classificação existentes, o LEED é o mais popular entre os profissionais da construção civil, inclusive no Brasil, e propõe uma avaliação mais global da edificação, visando à sustentabilidade. Para isso, baseia-se na atribuição de pontos conforme o atendimento do edifício a determinados critérios e padrões pré-estabelecidos de práticas de projeto. O sistema ainda está em desenvolvimento para fornecer meios de se realizar uma avaliação mais completa.

O certificado do desempenho energético através da *Directive 2010/31/EU* utilizada pelos Estados-Membros da Comunidade Europeia deve conter os valores atuais e de referência de desempenho energético e recomendações de melhorias da relação custo x benefício, além de poder informar a variação de temperatura do ar interno atual e recomendada ou outros fatores climáticos relevantes.

No Reino Unido, utiliza-se o BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), lançado em 1990, e adaptado para utilização em outros países como a Holanda, Noruega, Espanha e Suécia. É um método de avaliação e classificação do desempenho ambiental dos edifícios pelo qual critérios relacionados à energia e ao meio ambiente são comparados com *benchmarks*². Muitos sistemas adotados por outros países utilizaram-no como base para o desenvolvimento de seus próprios métodos.

Na Austrália e Nova Zelândia utiliza-se o *Code Mark*, um sistema que avalia e certifica o edifício para garantir sua conformidade com os requisitos relevantes de desempenho descritos no BCA (Código de Edificações da Austrália). A avaliação pode ser feita através de diferentes métodos baseados, de maneira geral, na verificação através de cálculos analíticos, comparação

² Dados de referência de desempenho por edificações similares.

do projeto com o DTS (*Deemed-to-Satisfy*), avaliação ou relatórios de profissionais acreditados atestando a conformidade do projeto.

Os métodos de classificação da eficiência energética baseados somente nas normas prescritivas não levam em consideração os efeitos do entorno no consumo energético nem as condições internas de conforto que estão diretamente relacionadas ao consumo energético, como o uso da iluminação artificial no caso de sombreamento das fachadas.

A classificação baseada no desempenho do edifício representa melhor a situação real do edifício proposto, pois reflete seu padrão de ocupação e os efeitos indiretos do entorno resultantes da especificidade de sua implantação na malha urbana. Entretanto, é um sistema de difícil aplicação, pois é necessário que se tenha disponível um extenso banco de dados para realizar o *benchmarking*, ou seja, a comparação do edifício proposto com edifícios similares de referência.

No cenário atual somente os sistemas que incluem na sua classificação o desempenho ambiental da edificação se aproximam dessa questão, como o LEED, que pontua a qualidade ambiental interna conforme diversos requisitos de normas relacionadas à qualidade ambiental, incluindo conforto térmico – Standard 55 (ASHRAE 2004), incentivo à instalação de sistema de monitoramento das variáveis ambientais e aproveitamento da iluminação natural.

3.3 Panorama nacional: consumo e normas de eficiência energética de edificações.

O Balanço Energético Nacional, com base no ano de 2009, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (Brasil, 2010a), mostra que o consumo de energia elétrica pelos setores residencial, comercial e público aproxima-se dos 50% do total no país, como ilustra a Figura 3.4,

onde também é possível notar que o setor comercial é o terceiro maior consumidor de eletricidade.

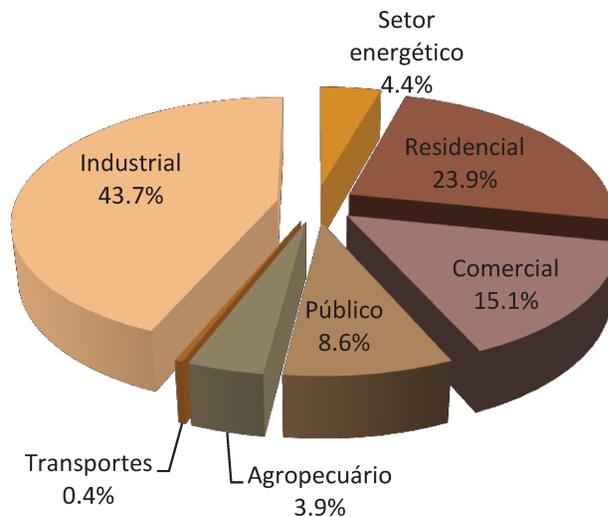


Figura 3.4 – Consumo de energia elétrica por setor econômico.
Fonte: Brasil (2010a).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (Brasil, 2012), o setor de edificações é um dos maiores consumidores de energia elétrica, sendo este responsável por 44% do consumo total. Essa energia é destinada principalmente para manutenção dos sistemas de condicionamento de ar (quase metade da energia total consumida) e iluminação de seus edifícios (Figura 3.5).

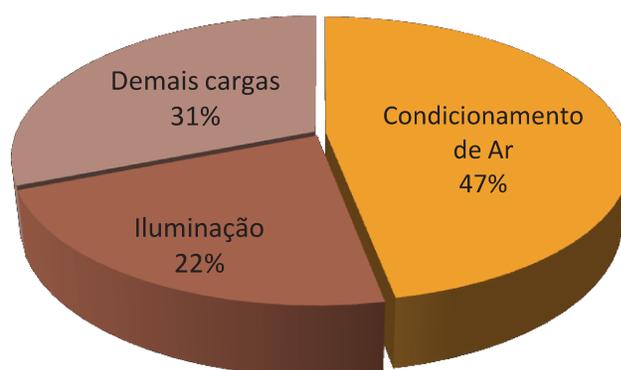


Figura 3.5 - Os principais usos finais de energia elétrica pelo setor comercial.
Fonte: Eletrobrás (2009).

Em 17 de Outubro de 2001 foi publicada a Lei nº 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia Elétrica, determinando que máquinas e aparelhos consumidores de energia tenham seus níveis máximos e mínimos de consumo estabelecidos com base em parâmetros técnicos, além de estabelecer que deverão ser desenvolvidos “mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no País” (Brasil, 2001b). Esta lei foi regulamentada pelo Decreto nº 4.059 no mesmo ano, pelo qual foi determinado que tais níveis deveriam ser estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica, incluindo de edificações (Brasil, 2001a).

A partir deste decreto foi instituído o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE responsável por constituir um Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País (GT – Edificações), que por sua vez, em 2005, criou a Secretaria Técnica de Edificações (ST – Edificações) responsável pelas questões técnicas que envolvem os indicadores de eficiência energética sendo coordenada pelo Programa PROCEL

Edifica (subprograma do PROCEL³ voltado para a eficiência energética aliada ao conforto ambiental de edificações). No mesmo ano, criou-se a CT Edificações – Comissão Técnica, coordenada pelo Inmetro responsável pelo processo de obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE).

Durante esse processo de estruturação, em 2003 o PROCEL Edifica lançou seu “Plano de Ação para Eficiência Energética” que posteriormente dá origem ao RTQ-C (Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos) publicado oficialmente em 17 de setembro de 2010 como Portaria nº372 do INMETRO⁴.

No RTQ-C encontram-se requisitos técnicos e métodos para avaliação e classificação da eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. Estes devem apresentar conformidade às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e constituir área mínima de 500 m² (ou a parcela não residencial acima de 500 m²) ou tensão de abastecimento maior ou igual a 2,3 kV. Os edifícios podem ser totalmente, parcialmente ou não condicionados.

As normas de eficiência energética brasileiras herdaram muitas características das normas dos Estados Unidos como o Zoneamento Bioclimático, limites de valores de propriedades de materiais e componentes construtivos da envoltória. O RTQ-C se refere aos seguintes manuais e normas prescritivas, de desempenho térmico do edifício e de conforto térmico que também foram utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa:

³ Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica criado em 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio e em 1991, transformado em Programa de Governo sob coordenação executiva da ELETROBRÁS. Seu objetivo é promover a eficiência do consumo e da produção de energia elétrica, com vistas à redução de custos e investimentos e a acabar com os desperdícios no país.

⁴ Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ASHRAE Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings

Para a avaliação da eficiência energética dos sistemas de iluminação, o RTQ-C baseou sua metodologia no método adotado por essa norma (Método da Área do Edifício e o Método das Atividades do Edifício). Foram utilizados também os valores limites de Densidade de Potência Instalada (DPI) para o nível A.

Suas tabelas de coeficiente de desempenho dos sistemas de condicionamento de ar servem de referência para o procedimento adotado pelo RTQ-C para classificação dos níveis de eficiência dos sistemas não regulamentados pelo INMETRO. A metodologia para a classificação do nível de eficiência energética baseia-se no Método de Orçamento do Custo Energético - ECB ao comparar o consumo total anual de energia do edifício proposto com o de um modelo de referência com características pré-estabelecidas.

ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

Especifica as condições de um ambiente necessárias para que uma porcentagem de seus usuários o aceite termicamente. Essas condições dependem de fatores individuais e ambientais: taxa metabólica, isolamento da vestimenta, temperatura do ar e temperatura radiante, velocidade do ar e umidade. As faixas de temperatura de conforto são obtidas a partir dos índices PMV e PPD (*Predicted Mean Vote* ou Voto Médio Estimado e *Predicted Percentage Dissatisfied* ou Porcentagem Estimada de Insatisfeitos).

Para orientação quanto ao dimensionamento dos sistemas de aquecimento e resfriamento, o RTQ-C sugere a utilização de manuais como o *ASHRAE Handbook of Fundamentals* ou normas como a NBR 16401 – Instalações de ar condicionado:

**NBR 16401-1: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1:
Projetos das instalações**

Fornecer orientações para que o projetista dimensione os sistemas de condicionamento de ar centrais ou unitários através de parâmetros básicos e requisitos mínimos de projeto e baseia-se em alguns dados do *ASHRAE Handbook - Fundamentals* 2005. Apresenta um método para elaborar o perfil climático do local para dimensionamento dos sistemas, especificação de projeto para dutos metálicos, dados de calor e umidade liberados por pessoas e equipamentos.

**NBR 16401-2: Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2:
Parâmetros de conforto térmico**

Também tem por base a *ASHRAE Handbook – Fundamentals* e complementa a NBR 16401-1 ao estabelecer parâmetros de projeto que proporcionem condições de conforto térmico para os ocupantes de espaços condicionados artificialmente. Descreve um método para medição e avaliação dos parâmetros ambientais.

NBR 5413: Iluminância de interiores

Norma recomendada pelo RTQ-C para determinação de níveis adequados de iluminância para execução de tarefas visuais em ambientes internos. Esses níveis estão diretamente relacionados à precisão da atividade, características das superfícies, e idade do observador.

NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.

O RTQ-C recomenda essa norma para cálculo da transmitância térmica dos materiais e componentes da envoltória (paredes e cobertura) e como referência de valores de absorvância das superfícies para verificação da conformidade com os pré-requisitos estabelecidos por ele para cada nível de eficiência.

NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

As equações para determinação do índice de consumo da envoltória utilizadas pelo método prescritivo do RTQ-C são específicas para cada uma das oito Zonas Bioclimáticas apresentadas na norma. Além do zoneamento, a norma propõe diretrizes construtivas para cada uma delas, valores das propriedades térmicas de alguns componentes construtivos que atendam às recomendações para habitações unifamiliares de interesse social para cada Zona Bioclimática.

Os requisitos técnicos do RTQ-C dividem-se em gerais e específicos. Aqueles se referem aos circuitos elétricos, aquecimento de água e elevadores, enquanto estes às propriedades dos materiais e componentes da envoltória (transmitância térmica, absorvância e fator solar) e à eficiência dos sistemas de iluminação (incluindo aproveitamento da iluminação natural) e condicionamento de ar. Os métodos de determinação da eficiência podem ser o prescritivo e o de simulação e a avaliação geral do edifício pode ser realizada com o método de simulação somente ou combinando-se ambos os métodos.

Somente no caso de ambientes de permanência prolongada não condicionados é necessária a comprovação, por simulação computacional, do percentual de horas ocupadas em que o conforto é atingido por ventilação natural. Uma das referências de intervalo de conforto pode ser a ASHRAE 55. Essa comprovação deveria ser exigida também para o caso dos ambientes condicionados para o qual é estabelecido somente que as horas não atendidas pelo sistema de condicionamento de ar não ultrapasse 25 horas mensais em cada mês que este sistema esteja em funcionamento.

A avaliação da eficiência dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar pode ser realizada para o edifício inteiro ou partes dele, como pavimentos ou conjuntos de salas, entretanto, a avaliação da envoltória deve ser feita para o edifício como um todo. Essa avaliação resulta numa etiqueta, a ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia -, na qual podem ser informados os níveis obtidos por cada sistema (quando avaliados separadamente) ou o nível obtido pelo edifício completo. Esse nível varia de “E” (menos eficiente) a “A” (mais eficiente).

No método prescritivo são avaliados separadamente a envoltória, o sistema de iluminação e o sistema de condicionado, além de permitir a inclusão de bonificações quando são adotadas estratégias que aumentem a eficiência energética do edifício. Para cada sistema avaliado (envoltória, iluminação e condicionamento de ar) são atribuídos equivalentes numéricos que são inseridos numa equação geral (3.1) que resultará numa pontuação correspondente ao nível de eficiência (Tabela 3.1). No caso da avaliação individual dos sistemas de iluminação de condicionamento de ar faz-se a correspondência do equivalente numérico de cada um com o nível de eficiência estabelecido pelo RTQ-C (Tabela 3.2).

$$\begin{aligned}
 PT = & 0,30 \times \left\{ \left[EqNumEnv \times \frac{AC}{AU} \right] + \left[\frac{APT}{AU} \times 5 + \frac{ANC}{AU} \times EqNumV \right] \right\} + 0,30 \\
 & \times [EqNumDPI] + 0,40 \\
 & \times \left\{ \left[EqNumCA \times \frac{AC}{AU} \right] + \left[\frac{APT}{AU} \times 5 + \frac{ANC}{AU} \times EqNumV \right] \right\} + b_0^1
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Onde,

EqNumEnv: equivalente numérico da envoltória;

EqNumDPI: equivalente numérico do sistema de iluminação;

EqNumCA: equivalente numérico do sistema de condicionamento de ar;

EqNumV: equivalente numérico de ambientes não condicionados e/ou ventilados naturalmente;

APT: área útil dos ambientes de permanência transitória não condicionados;

ANC: área útil dos ambientes não condicionados de permanência prolongada;

AC: área útil dos ambientes condicionados;

AU: área útil;

b : pontuação obtida pelas bonificações, que varia de zero a 1.

Tabela 3.1 - Níveis correspondentes à pontuação geral obtida.

Fonte: Brasil, 2010b.

A	B	C	D	E
≥ 4,5 a 5	≥ 3,5 a < 4,5	≥ 2,5 a < 3,5	≥ 1,5 a < 2,5	< 1,5

Tabela 3.2 - Equivalente numérico correspondente aos níveis de eficiência (EqNum).

Fonte: Brasil, 2010b.

A	B	C	D	E
5	4	3	2	1

O equivalente numérico da envoltória é obtido através do cálculo de seu Índice de Consumo (IC_{env}): uma equação específica para cada uma das oito Zonas Bioclimáticas do Brasil, de acordo com a área de projeção do edifício em que são considerados fatores geométricos, o Percentual de Abertura das Fachadas total (PAF_T) e o Fator Solar (FS) das aberturas. Como exemplo, o IC_{env} para a Zona Bioclimática 1 e área de projeção maior do que $500m^2$ é apresentado na equação (3.2):

$$\begin{aligned}
 IC_{env} = & 10,47 \times FA + 298,74 \times FF + 38,41 \times PAF_T - 1,11 & (3.2) \\
 & \times FS - 0,11 \times AVS + 0,24 \times AHS - 0,54 \\
 & \times PAF_T \times AHS + 47,53
 \end{aligned}$$

Onde,

IC_{env} : indicador de consumo da envoltória (adimensional);

FA: fator altura (A_{pcob}/A_{tot});

A_{pcob} : área de projeção da cobertura (m^2);

A_{tot} : área total construída (m^2).

O nível de eficiência do sistema de iluminação é determinado a partir da Densidade de Potência Instalada (DPI), medida em W/m^2 . O RTQ-C estabelece os níveis máximos de DPI por ambiente conforme a atividade nele desenvolvida - “Método das Atividades do Edifício” - ou pela área do edifício inteiro cuja atividade principal ocupa mais do que 30% de sua área, ou que apresente até três atividades principais - “Método da Área do Edifício”.

O nível de eficiência do sistema de condicionamento de ar corresponde ao nível que seus equipamentos obtiveram na avaliação do Inmetro. No caso de sistemas que não se enquadram nessa situação, a classificação é feita a partir de requisitos mínimos de eficiência para cada nível especificados com base na Standard 90.1 (ASHRAE, 2007).

O método da simulação computacional, apesar de ser uma simplificação da realidade, permite uma avaliação mais completa e representa melhor os fenômenos das trocas térmicas dentro do edifício e entre este e o meio externo, permitindo uma análise mais cuidadosa do seu desempenho energético. Os pré-requisitos do método de simulação trazem especificações quanto ao programa computacional a ser utilizado, o arquivo climático e a metodologia para modelagem da envoltória e dos sistemas do modelo real e de referência.

A avaliação é feita comparando-se cinco modelos: o que representa o edifício real e outros quatro de referência que representam o mesmo edifício com características concernentes aos níveis de eficiência A, B, C e D. Algumas propriedades do modelo de referência são definidas através do método prescritivo, enquanto outras (como forma do edifício, número de zonas térmicas, padrões de uso e ocupação e cargas internas) devem ser iguais às do modelo real. Para que o edifício real tenha o nível de eficiência do modelo de referência, seu consumo anual de energia deve ser menor ou igual ao do modelo de referência.

Quanto à simulação do entorno, o RTQ-C considera opcional sua inclusão no modelo do edifício proposto e somente neste. Conforme demonstrado por Carlo e Lamberts (2010), o nível de eficiência do modelo real com sombreamento proveniente do entorno pode melhorar, contudo, a etiqueta de eficiência (ENCE) ficaria sujeita às alterações do entorno. Com o objetivo de demonstrar que o edifício de referência não deve ser simulado com entorno, os autores simularam diferentes sistemas de iluminação artificial para aproveitamento ou não da iluminação natural para um edifício comercial com e sem sombreamento por brises ou edifícios

vizinhos e os compararam com um edifício de referência nível A com e sem sombreamento pelo entorno.

Apenas o modelo real sem entorno com brises apresentou consumo menor do que o modelo de referência sombreado pelo entorno. Assim os autores reforçam a recomendação do RTQ-C de que o edifício de referência não deve ser modelado com entorno, apoiando-se na justificativa de que nenhum dos modelos reais atingiria o nível A. Contudo, o Percentual de Abertura na Fachada total (PAFt) dos modelos reais era maior do que o valor máximo de PAFt para o modelo de referência e esta variável está diretamente relacionada aos ganhos de calor por radiação.

Segundo a metodologia prescritiva de avaliação do RTQ-C, testada por Fossati e Lamberts (2010), as variáveis construtivas de maior relevância no desempenho da envoltória são o PAFt e a orientação das fachadas. Yamakawa e Westphal (2011) estudaram a influência do PAFt e do FS utilizando o método prescritivo e de simulação que demonstraram grande divergência. Portanto, a avaliação feita por Carlo e Lamberts (2010) seria válida se o PAFt do modelo real fosse condizente com o do seu modelo de referência.

O método prescritivo de avaliação da eficiência energética de um edifício descrito pelo RTQ-C ainda deve ser aperfeiçoado, pois é um modelo simplificado baseado em simulações computacionais que ainda apresenta limitações que o impedem de representar o desempenho de construções e materiais mais complexos. A precisão do método prescritivo para avaliação da eficiência energética da envoltória foi testada por Melo *et al.*(2011) demonstrando que o método prescritivo pode resultar em níveis de eficiência menores do que se o edifício fosse avaliado por simulação computacional.

As mesmas limitações foram comprovadas por Castro e Westphal (2011) ao compararem o nível de eficiência de um edifício de escritório pelo método prescritivo e de simulação. Enquanto o nível obtido pelo método de simulação é B, os pré-requisitos do método

prescritivo fazem com que o mesmo edifício obtenha nível E, ou seja, o método prescritivo pode penalizar um projeto que na realidade apresentaria bom desempenho como pode ser comprovado por simulação.

A simulação do entorno no modelo real é uma representação que se aproxima da realidade existente e por isso deveria ser inserido no processo de avaliação do RTQ-C como requisito. É um procedimento simples que adicionalmente exige a especificação de poucas características sobre os edifícios adjacentes, como a volumetria e a refletância de suas superfícies. Esta medida poderia servir como estímulo a projeto de sistemas que permitam o aproveitamento da iluminação natural sem, contudo, deixar de prover qualidade visual aos ambientes internos, desde que sua eficiência e qualidade sejam comprovadas para fins de etiquetagem.

O meio urbano deve estar preparado para receber edifícios eficientes proporcionando condições que permitam seu desempenho eficiente como planejado. As normas brasileiras de eficiência energética ainda não foram incorporadas nos Códigos de Obras das cidades. Todo o processo de etiquetagem ainda se restringe às figuras dos construtores, consultores, engenheiros, arquitetos, organismos de inspeção e de avaliação da conformidade. Sendo assim, antes que se tornem compulsórias, é necessário um processo de integração entre as normas e a legislação municipal (Plano Diretor, Lei de Parcelamento do Solo, Lei de Uso e Ocupação do Solo e Código de Obras) como verificado nas experiências internacionais, além da capacitação do corpo técnico das prefeituras.

Até o momento, existem somente estudos para incorporação de parâmetros de eficiência energética em edificações no âmbito da legislação municipal. Como exemplo tem-se a proposta de alteração do Código de Obras de Salvador e de Recife.

A proposta para a cidade de Salvador elaborada pela Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA) em parceria com o Laboratório de Eficiência Energética em

Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LabEEE/UFSC) constituiu os projetos “Normalização em Eficiência Energética para a cidade de Salvador” e “Eficiência energética no código de obras de Salvador”. O objetivo era o de definir critérios mínimos de eficiência energética para os equipamentos, sistemas de iluminação, condicionamento de ar e envoltória de novas edificações comerciais. A metodologia descrita por Carlo *et al.* (2003) baseou-se na adaptação dos requisitos da Standard 90.1 (ASHRAE, 1999) às realidades climática e construtiva locais e através de simulações computacionais foram definidos os limites das propriedades térmicas da envoltória bem como do consumo de eletricidade.

O aproveitamento da iluminação natural é a base da proposta de alteração do Código de Obras de Recife visando promover a eficiência energética dos novos edifícios comerciais condicionados. As recomendações estabelecem limites de Porcentual de Área de Janela na Fachada (PJF) e do seu Fator Solar (FS). Uma análise da relação entre a iluminação natural e as cargas térmicas foi conduzida por Carlo *et al.* (2004) por meio de simulação do consumo de energia e das iluminâncias internas dos ambientes.

Essas propostas de integração representam um avanço significativo, pois demonstram o interesse dos poderes municipais em adequarem suas leis à necessidade de conservação de energia no país antes mesmo da vigência de uma regulamentação compulsória. Entretanto, ainda é preciso que seja incorporada a questão da qualidade do ambiente interno, para que a preocupação com a economia de energia não comprometa a salubridade do ambiente e as condições de conforto térmico para seus ocupantes.

Como foi exposto no item “Cidade, luz e calor”, o desempenho de um edifício isolado é diferente do mesmo inserido na estrutura urbana. Entretanto, a complexidade dos fenômenos que acarretam essa diferença de comportamento exige métodos também complexos de análise. A simulação computacional é o método que mais se aproxima dessas necessidades, entretanto,

no Brasil, ainda são poucos os profissionais da área de construção civil capacitados para essa tarefa, além de ainda não haver uma certificação da qualidade dos simuladores.

Esse cenário inviabiliza a obrigatoriedade da simulação incluindo o entorno para a avaliação e certificação ou etiquetagem das edificações. Para que o método prescritivo, que é de fácil aplicação, seja condizente com o método de simulação, torna-se necessário seu aperfeiçoamento no sentido de incluir parâmetros urbanos na equação do Índice de Consumo da envoltória.

3.4 Simulação computacional

Conforme afirma Clarke (2002) a simulação surge para suprir a deficiência de estudos de consumo energético nas fases iniciais de projeto e de intervenção. A complexidade das interações presentes nos edifícios (como fluxo de energia e ocupação dos usuários) aliada à necessidade de retorno rápido do custo e do desempenho de diferentes alternativas de projeto são incentivos à sua aplicação prática. Entretanto, o autor enumera barreiras à sua aplicação, como o conflito entre a simplificação para viabilizar a modelagem do edifício e a necessidade de representação da sua complexa realidade.

As simulações computacionais para estimativa do consumo energético de uma edificação utilizam dados climáticos provenientes de estações meteorológicas localizadas em locais mais afastados dos centros urbanos, como campos abertos e aeroportos. A diferença de condições climáticas encontradas nessas localidades faz com que os dados não representem a condição real da localização do edifício.

Carlo e Lamberts (2001) simularam protótipos com diferentes sensibilidades às variações climáticas para as cidades do Rio de Janeiro e Florianópolis. Foram utilizados dados climáticos de estações meteorológicas localizadas em regiões distintas na mesma cidade com

diferentes topografias e ocupação urbana. Os resultados demonstraram que a combinação entre os parâmetros volumétricos e construtivos e as condições climáticas locais resulta em diferentes consumos de energia total anual de uma edificação.

Williamson *et al.* (2009) utilizaram o CAT (Temperatura do Ar de *Canyons*), um modelo computacional para estimar a temperatura do ar em diferentes configurações de *canyons* urbanos a partir de dados obtidos em estações meteorológicas e das características da geometria e dos materiais e compõe o *canyon*. Os resultados são compatíveis com o comportamento esperado das trocas térmicas nesse tipo de configuração, fazendo com que essa ferramenta seja útil para o planejamento urbano por viabilizar a utilização de dados climáticos que se aproximam da realidade local, diferentemente dos dados obtidos em estações climáticas localizadas em áreas suburbanas.

O programa de simulação termoenergética *EnergyPlus* faz parte do Programa de Tecnologia da Construção (BTP) do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) que objetiva auxiliar arquitetos e engenheiros a projetarem edifícios mais eficientes, inclusive podendo estimar condições de conforto térmico.

O *software* é composto por módulos que, associados, permitem estimar a energia necessária para aquecimento e resfriamento de um edifício a partir de padrões de ocupação e operação deste e das condições ambientais a que está submetido.

O módulo de iluminação diurna junto com a análise térmica permite estimar a disponibilidade de luz natural num ambiente e conseqüentemente os ganhos de calor decorrentes da radiação e o consumo com iluminação artificial no caso de aproveitamento da luz diurna. A iluminância da zona é obtida através de dois pontos de referência cuja localização é definida pelo simulador.

Entretanto, Ramos e Ghisi (2010) demonstram que a parcela referente à iluminação natural do programa mostra deficiências quanto ao cálculo da luz refletida no ambiente. As reflexões internas não são calculadas adequadamente de modo que as iluminâncias internas podem vir a ser superestimadas e o consumo de energia com iluminação artificial, subestimado. A mesma deficiência foi demonstrada no trabalho de Loura *et al.*(2009), onde foram confrontados dados medidos *in loco* e resultados de simulações de um estudo de caso utilizando o módulo de iluminação natural do programa *EnergyPlus*. As simulações demonstraram pouca correlação quanto à distribuição e aos níveis de iluminância.

O programa *Daysim* é uma ferramenta de simulação desenvolvida por Reinhart (2006) no *National Research Council Canada* e o *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems* na Alemanha. Utiliza os algoritmos do programa de *renderização* Radiance para calcular os níveis de iluminância sob diversas condições de céu ao longo do ano (Reinhart, 2010).

O *Daysim* foi utilizado por Didoné e Pereira (2009) juntamente com o programa *EnergyPlus* com o propósito de avaliar o desempenho luminoso de um edifício de escritórios e a consequente redução do consumo de energia com iluminação artificial através do aproveitamento da luz natural. Foram comparados modelos cujo sistema de iluminação artificial permanece ligado durante todo período de ocupação e modelos com sistema automático *dimerizável*. Constatou-se uma economia de 20% a 62% no consumo de energia do modelo com aproveitamento da luz natural. Essa economia foi refletida na redução do consumo com condicionamento de ar, resultando numa economia no consumo final de 12% a 52%.

Leder e Pereira (2008) analisaram o impacto de diferentes configurações urbanas sobre a disponibilidade de luz natural no meio urbano e em espaços internos. Foram estudados um cenário de ocupação atual e outro com ocupação máxima permitida pela legislação vigente da cidade de Florianópolis. Analisou-se um recorte da cidade utilizando os programas *Cityzoom*

(para elaboração do cenário urbano) e Apolux (para simulação do comportamento da luz natural).

O Fator de Céu Preferível (FCP) foi um parâmetro adotado pelos autores que representa o percentual do céu desobstruído visualizado a partir de um ponto de referência do meio externo. Para a análise da iluminação natural nos ambientes internos foram utilizados dados de iluminância e de Fator da Luz do Dia (FLD). Os autores constataram uma redução significativa da disponibilidade de luz natural nos meios interno e externo.

Os autores concluem que a metodologia se mostrou adequada para a análise da disponibilidade de luz natural, possuindo potencial para ser aplicada no estabelecimento de limites de ocupação urbana para garantir o acesso a esse recurso natural.

Uma metodologia que fosse capaz de unir o estudo de Leder e Pereira (2008) para a cidade de Florianópolis e o de Carlo *et al.* (2004) para a cidade de Recife (eficiência energética por meio do aproveitamento da iluminação natural) seria uma boa ferramenta para auxiliar na elaboração de legislações urbanísticas a fim de fornecer condições para o desempenho eficiente de seus edifícios.

4 Metodologia

O objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto do entorno no nível de eficiência energética de um edifício comercial ao utilizar diferentes sistemas de iluminação artificial aproveitando ou não a iluminação natural disponível. Para isso foi desenvolvido um modelo hipotético de edifício comercial com diferentes sistemas de iluminação e sob diferentes condições de entorno. A metodologia de avaliação do nível de eficiência do modelo por simulação baseia-se na prescrita pelo RTQ-C: comparação entre o consumo energético do projeto proposto e do projeto de referência, sendo que o consumo do primeiro deve ser igual ou inferior ao do segundo.

Segundo o regulamento, faz-se necessária a elaboração de cinco modelos: o modelo real mais quatro modelos de referência para os níveis A, B, C e D. O pior nível de eficiência é o E, entretanto não é necessário modelá-lo, pois se o modelo real apresentar um consumo de energia maior que o modelo referente ao nível D, aquele se classifica como nível E.

Foram modelados três cenários para o edifício estudado (ilustrados na Figura 4.1) e para cada um deles, três sistemas de iluminação artificial.

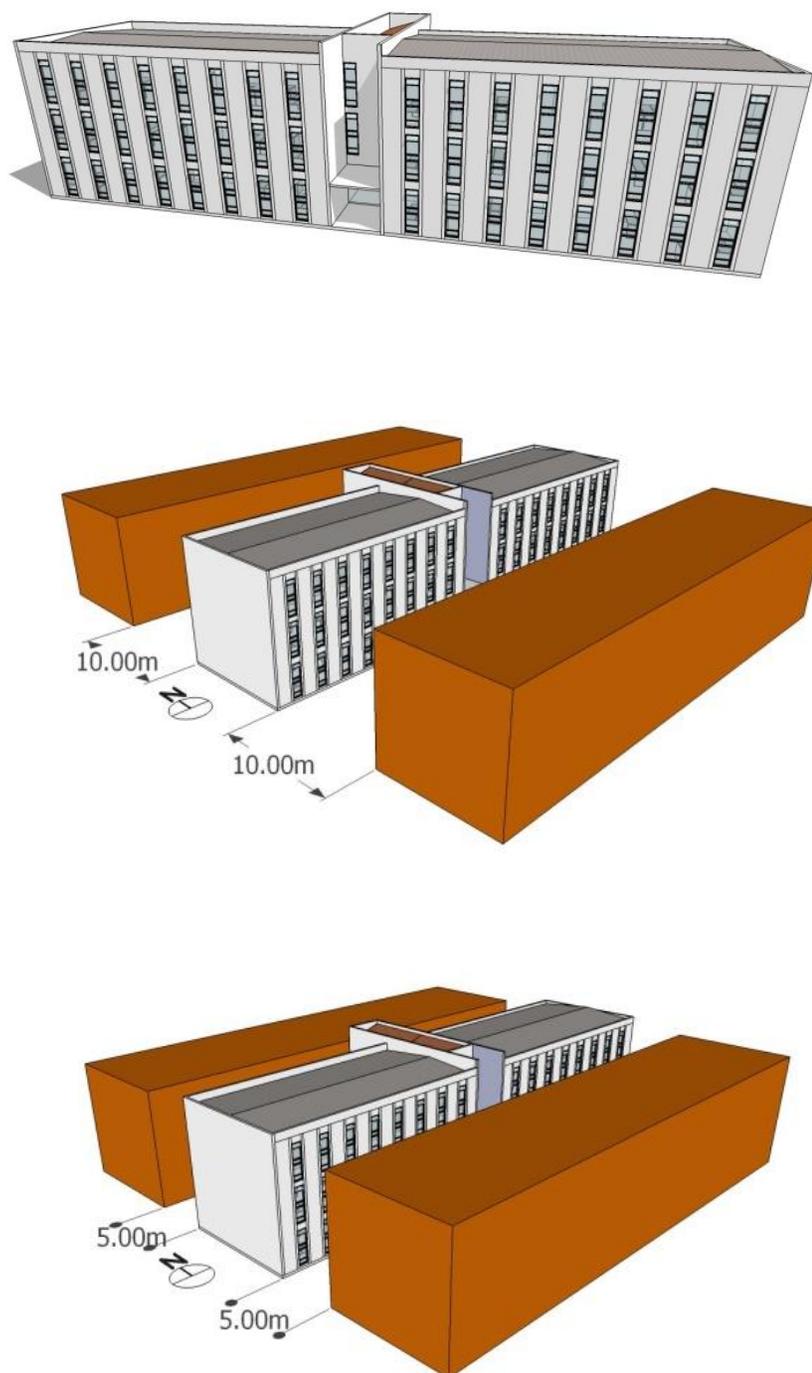


Figura 4.1 - Configurações do modelo estudado.

Os sistemas de iluminação artificial simulados foram:

- sem o aproveitamento da luz natural (acionado durante todo o período de ocupação);
- com aproveitamento da luz natural através do acionamento de interruptores pelos usuários e;
- sistema com *dimmers* que acionam a quantidade de iluminação artificial necessária para complementar a iluminação natural quando esta é insuficiente.

Para a comparação do nível de eficiência, os modelos de referência devem apresentar algumas características em comum com o modelo estudado, enquanto outras são determinadas a partir do método prescritivo, como as propriedades da envoltória e a Porcentagem de Abertura na Fachada (PAFt).

Uma visão geral da metodologia adotada para a classificação é apresentada na Figura 4.2, com as simulações realizadas e as comparações entre os modelos (setas tracejadas).

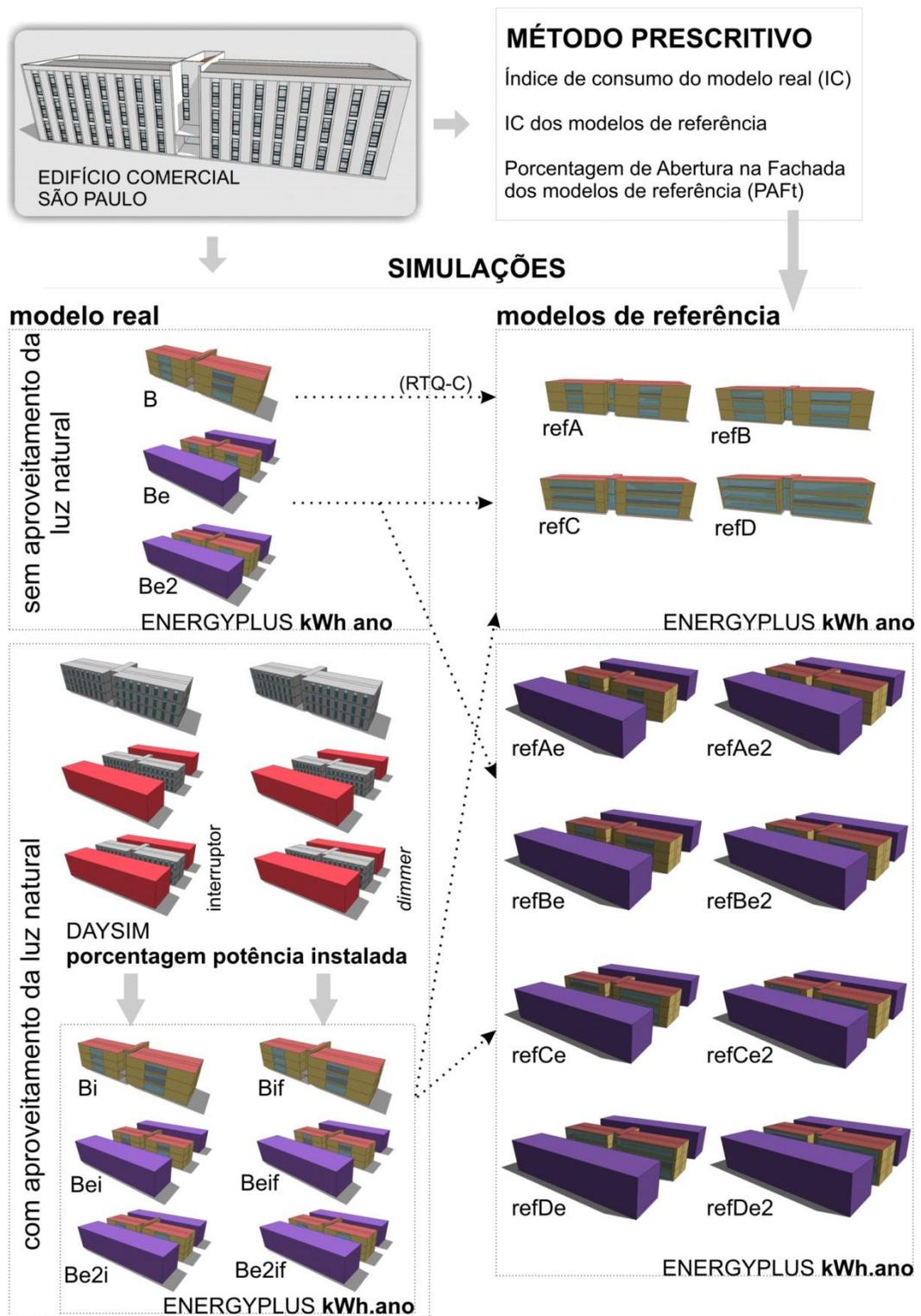


Figura 4.2 - Visão geral das simulações.

O RTQ-C recomenda que somente o modelo real seja simulado com entorno, entretanto, os modelos de referência foram simulados sob as mesmas situações de entorno com o propósito de comparar os modelos em situações semelhantes.

O presente capítulo está subdividido em três partes correspondentes às etapas de desenvolvimento do trabalho: em “Normas”, são apresentadas as normas nacionais e internacionais utilizadas como referência para a construção do modelo hipotético. O projeto arquitetônico e suas características construtivas são apresentados em “Edifício proposto”.

Para estimar o consumo de energia com o aproveitamento da luz natural foram utilizados o programa *Daysim* a fim de determinar os diferentes padrões de uso do sistema de iluminação artificial resultantes das diferentes condições de entorno e o EnergyPlus para estimar o consumo total anual de energia elétrica. No item: “Modelagem” são descritas as características em comum entre os modelos simulados em ambos os programas, bem como as características específicas da modelagem em cada um deles.

Para a determinação do nível de eficiência do edifício real, segundo a metodologia do RTQ-C, é necessário comparar seu consumo anual com edifícios de referência. Em “Modelos de referência” são descritas as características específicas dos modelos referentes aos níveis A, B, C e D de eficiência energética.

4.1 Normas

A elaboração do modelo hipotético foi baseada em normas nacionais e internacionais vigentes para caracterização dos materiais e definição dos ganhos internos gerados pela atividade humana e pelos equipamentos instalados (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Normas e manuais nacionais e internacionais utilizados.

Norma	Informação obtida	Norma	Informação obtida
Resolução 176 – ANVISA (Brasil, 2000)	Taxa de renovação do ar para ambientes condicionados artificialmente.	NBR 15220-2 (ABNT, 2008a)	Resistências térmicas superficiais.
<i>Handbook of Fundamentals</i> 2009 (ASHRAE, 2009)	Ganho de calor por computador e monitor.		Resistência câmara de ar não ventilada.
Standard 55 (ASHRAE, 2004)	Resistência térmica de vestimentas.		Emissividade e absorvância de superfícies.
	Limites de conforto térmico (umidade e temperatura operativa).		Propriedades térmicas dos materiais.
	PMV (Voto Médio Estimado).		Exemplos de cálculo.
NBR 5413 (ABNT, 1992)	Níveis de iluminância por atividade.		NBR 16401-1 (ABNT, 2008b)
NBR 15215-4 (ABNT, 2004)	Quantidade de pontos para verificação do nível de iluminação natural.	Atividade metabólica.	
NBR 15220-3 (ABNT, 2005)	Transmitância, capacidade térmica e atraso térmico para paredes.	Calor dissipado pelas pessoas.	

4.2 Edifício estudado

Foi elaborado um modelo hipotético de um edifício comercial cuja maior dimensão está orientada no sentido leste-oeste. São três pavimentos, com quatro salas por andar cujas aberturas estão voltadas para as orientações Sul (Figura 4.3) e Norte (Figura 4.4). As plantas e cortes do projeto são demonstrados da Figura 4.5 à Figura 4.12.

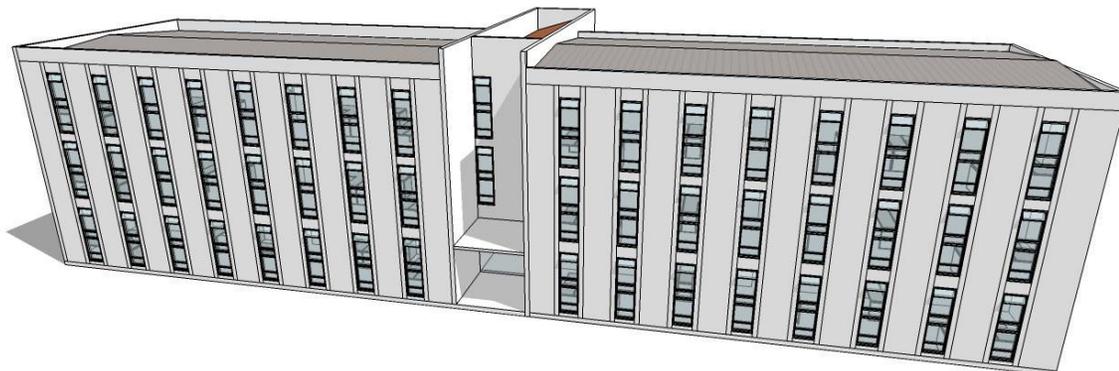


Figura 4.3 – Perspectiva fachada Sul.

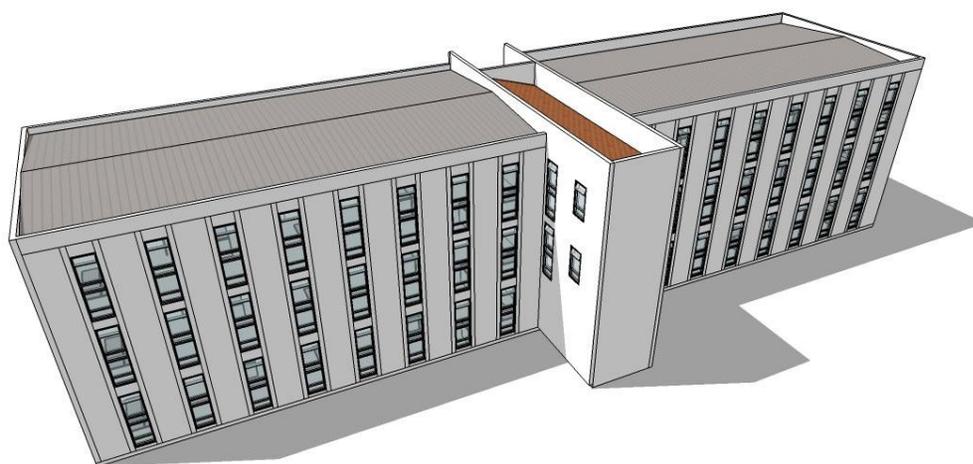


Figura 4.4 - Perspectiva fachada Norte.

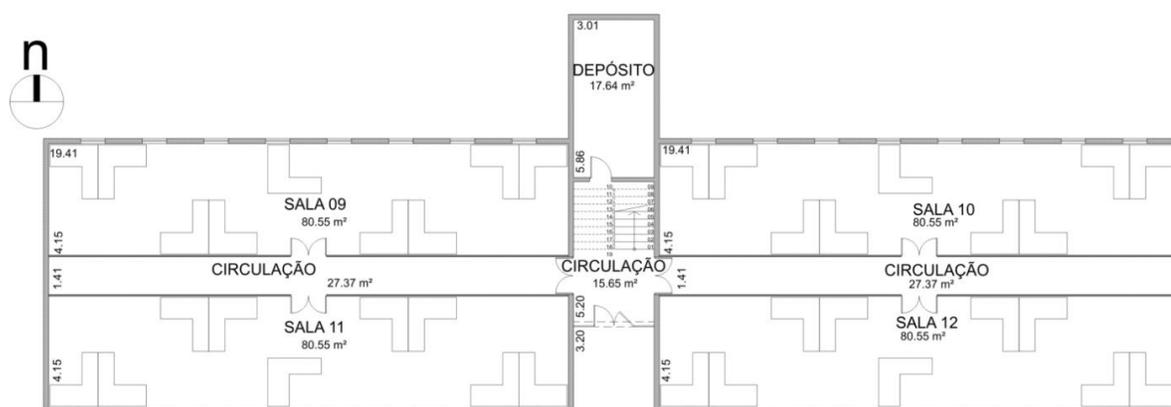


Figura 4.5 - Planta baixa pavimento térreo.

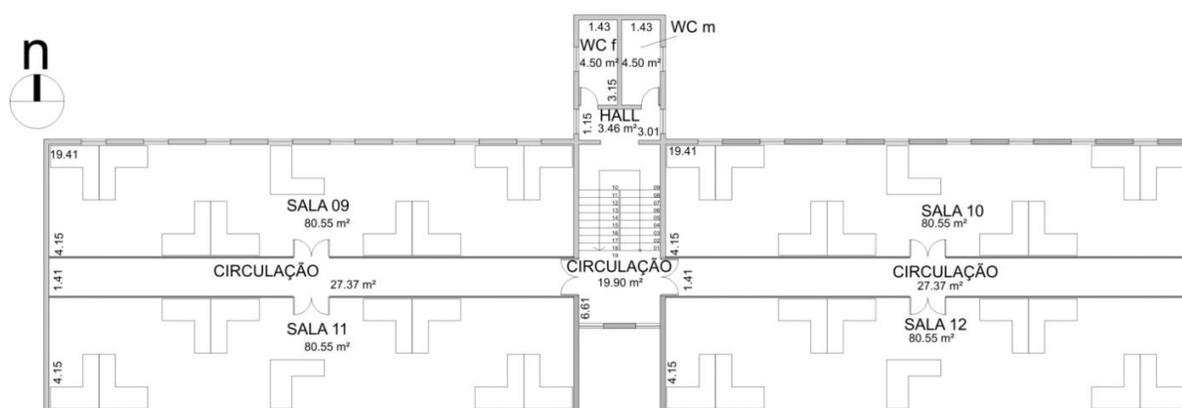


Figura 4.6 - Planta baixa 1º pavimento.

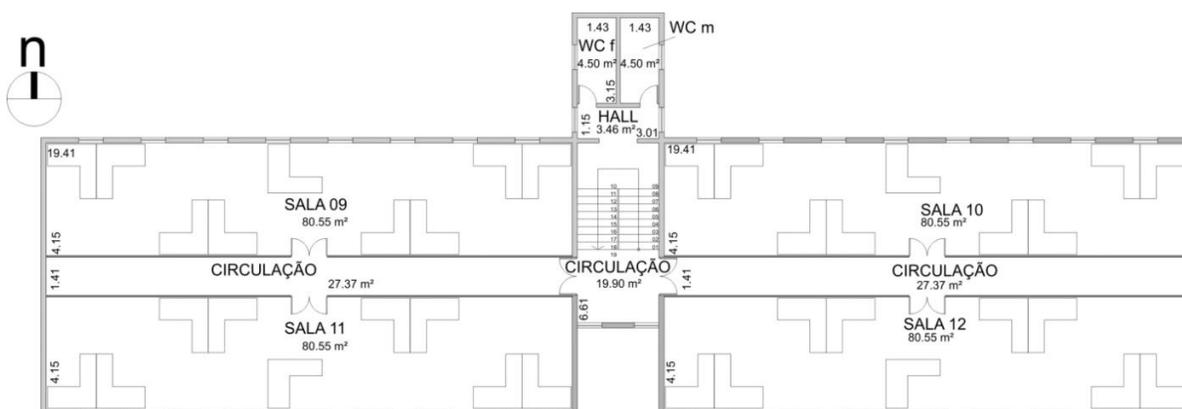


Figura 4.7 - Planta baixa 2º pavimento.

A influência do sombreamento do entorno na etiqueta de eficiência energética de edifício comercial

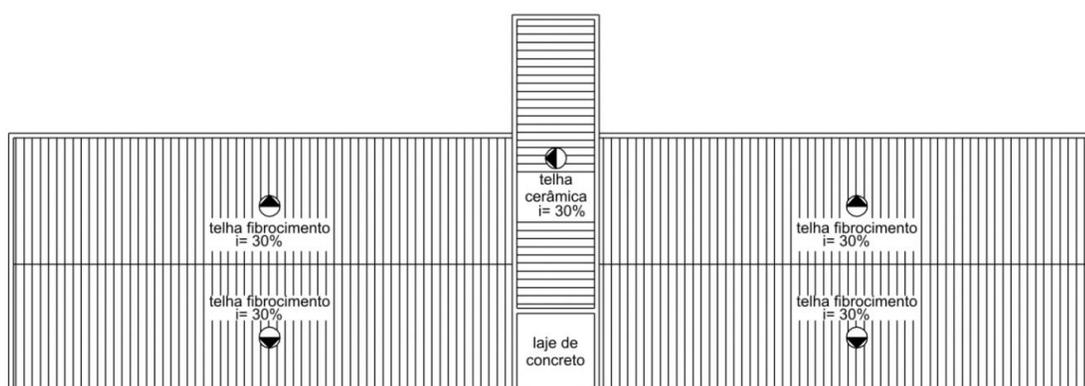


Figura 4.8 - Planta de cobertura.

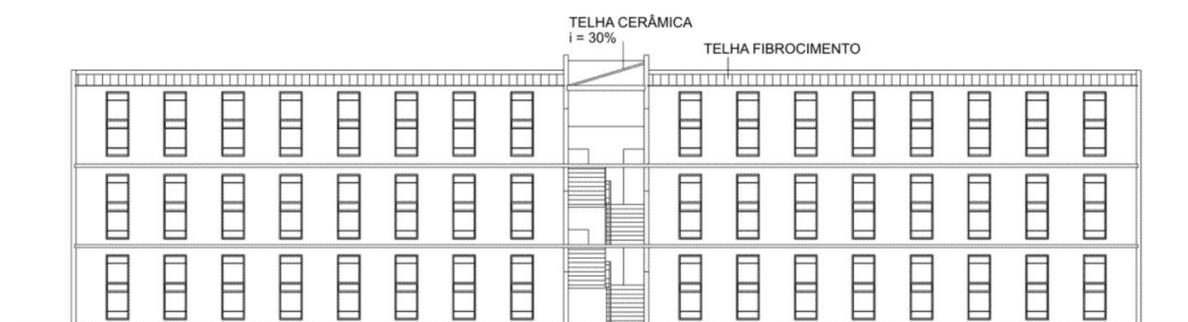


Figura 4.9 – Corte longitudinal esquemático.

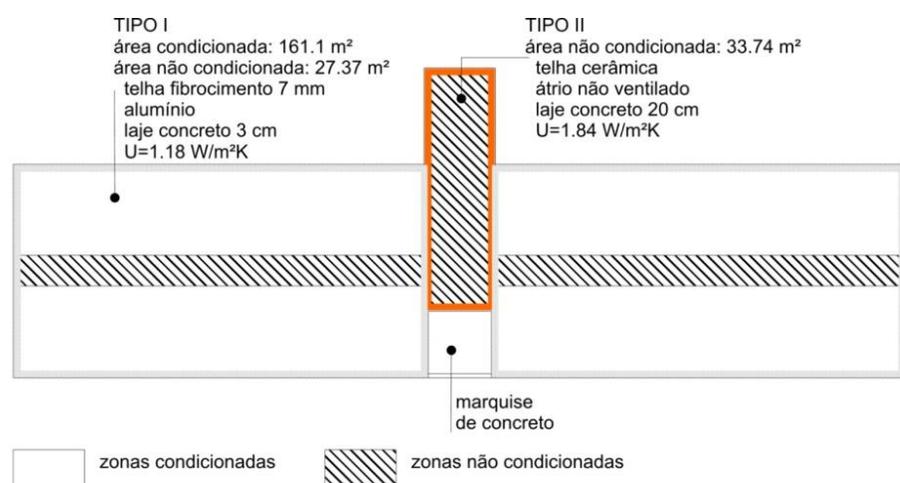


Figura 4.10 - Cobertura do modelo estudado.

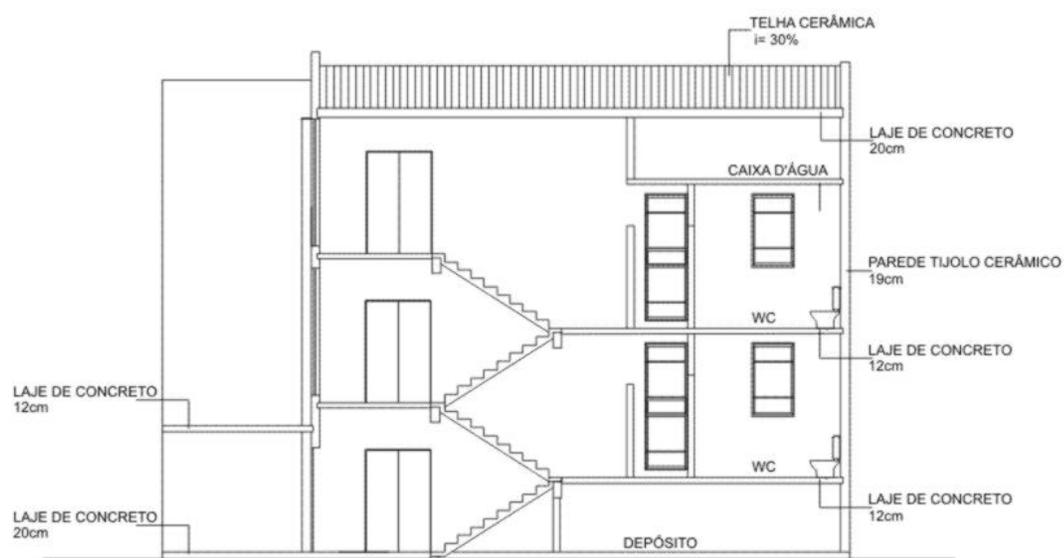


Figura 4.11 - Corte transversal esquemático – cobertura da área não condicionada.

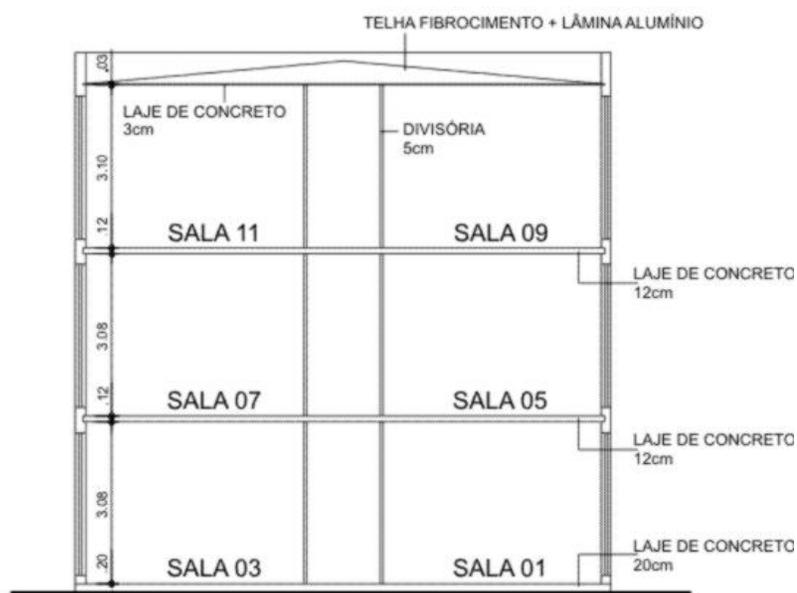
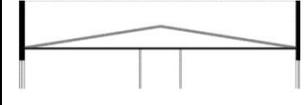


Figura 4.12 - Corte transversal esquemático - cobertura da área condicionada.

Com o propósito de verificar a possibilidade de mudança no nível de eficiência energética do modelo, as propriedades da envoltória e dos sistemas de iluminação e ar condicionado foram estabelecidas respeitando-se os limites das características prescritas para o nível B.

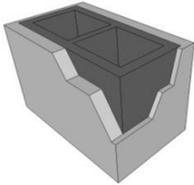
A Tabela 4.2 resume a configuração e as propriedades térmicas das coberturas, a Tabela 4.3 as propriedades das paredes internas e externas e a Tabela 4.3 as propriedades térmicas do piso do modelo estudado. Os cálculos de transmitância térmica são demonstrados no Apêndice A.

Tabela 4.2 - Propriedades térmicas das coberturas.

Composição		Transmitância Térmica	Absortância Solar*
Tipo I	 <p>Telha de fibrocimento (e=7 mm) Lâmina de alumínio Camada de ar (e=6 cm) Laje de concreto (e=3 cm)</p>	1,09 W/m ² K	0,70
Tipo II	 <p>Telha cerâmica (e=1 cm) Átrio não ventilado Laje de concreto (e=20 cm)</p>	1,83 W/m ² K	0,70

* Obtida da NBR 15220-2 (ABNT, 2008a)

Tabela 4.3 - Propriedades térmicas das paredes e do piso.

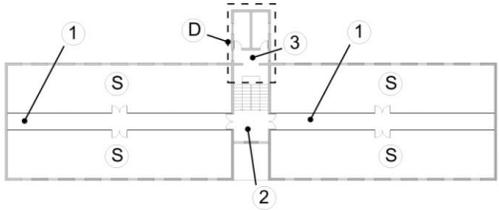
Composição das paredes externas		Transmitância Térmica	Absortância Solar*	
Externas		2,49 W/m ² K	0,40	
Composição das paredes internas		Absortância Solar*	Refletância Solar	
Internas	Divisórias (compensado de madeira cor cinza e=5 cm)	0,712	0,288	
	Concreto pintado na cor branca (e=15 cm)	0,399	0,601	
Composição do piso		Transmitância Térmica	Absortância Solar*	Refletância Solar
Laje de concreto (e=20 cm ou 12 cm) Argamassa de assentamento (e=1 cm) Piso cerâmico cor marfim (e=0,5 cm)		2,95 W/m ² K	0,346	0,654

* Fonte: Dornelles (2009).

O vidro utilizado é de 4 mm com Fator Solar (FS) igual a 0,83, cujo cálculo se encontra no Apêndice A (a partir dos dados de Castro, 2006). A Porcentagem de Abertura na Fachada total é 19%, sendo a área total de abertura igual a 209,48 m².

A Densidade de Potência Instalada (DPI) de cada ambiente foi definida dentro dos limites de DPI para o nível de eficiência nível B pelo “Método das Atividades do Edifício” e são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Densidade de Potência Instalada (DPI) e Potência Total instalada nos ambientes.



S SALAS
 1 CIRCULAÇÃO 1
 2 CIRCULAÇÃO 2
 3 CIRCULAÇÃO 3
 D DEPÓSITO

AMBIENTE	PAVIMENTO	ATIVIDADE	ÁREA m ²	DPI W/m ²	POTÊNCIA TOTAL (W)
Sala 1	Térreo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 2	Térreo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 3	Térreo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 4	Térreo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 5	Primeiro	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 6	Primeiro	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 7	Primeiro	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 8	Primeiro	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 9	Segundo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 10	Segundo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 11	Segundo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Sala 12	Segundo	Escritório	80,55	12,3	990,8
Circulação 1	Térreo	Circulação	54,74	7,3	399,6
Circulação 1	Primeiro	Circulação	54,74	7,3	399,6
Circulação 1	Segundo	Circulação	54,74	7,3	399,6
Circulação 2	Térreo	Circulação	15,65	7,3	114,2
Circulação 2	Primeiro	Circulação	19,9	7,3	145,3
Circulação 2	Segundo	Circulação	19,9	7,3	145,3
Circulação 3	Primeiro	Circulação	3,46	7,3	25,2
Circulação 3	Segundo	Circulação	3,46	7,3	25,2
WC f	Primeiro	Banheiro	4,5	5,2	23,4
WC m	Primeiro	Banheiro	4,5	5,2	23,4
WC f	Segundo	Banheiro	4,5	5,2	23,4
WC m	Segundo	Banheiro	4,5	5,2	23,4
Depósito	Térreo	Depósito	17,64	5,2	91,73

Todas as salas foram equipadas com sistema de condicionamento de ar de janela com Coeficiente de Desempenho (*Coefficient of Performance* - COP) de 2,8 W/W (nível de eficiência B do INMETRO) e temperatura de resfriamento estabelecida em 24 °C. O sistema só é acionado durante as horas ocupadas.

4.3 Modelagem

Para a modelagem do edifício proposto nos programas de simulação foram necessárias diferentes simplificações de sua geometria, já que cada programa interpreta o modelo de maneiras distintas. A modelagem para cada programa é descrita nos itens “Modelo para simulação termoenergética” e “Modelo para simulação da luz natural”.

Apesar das diferenças geométricas entre os modelos, eles têm em comum a divisão das zonas. No programa *EnergyPlus*, cada sala condicionada foi considerada uma zona térmica, totalizando doze zonas condicionadas. As áreas de permanência transitória como as circulações, os banheiros e o depósito que não são condicionadas foram agrupadas numa zona chamada “central”. Sendo assim, o edifício foi dividido em 13 zonas, como mostra a Figura 4.13, a mesma divisão adotada para o programa *Daysim*:

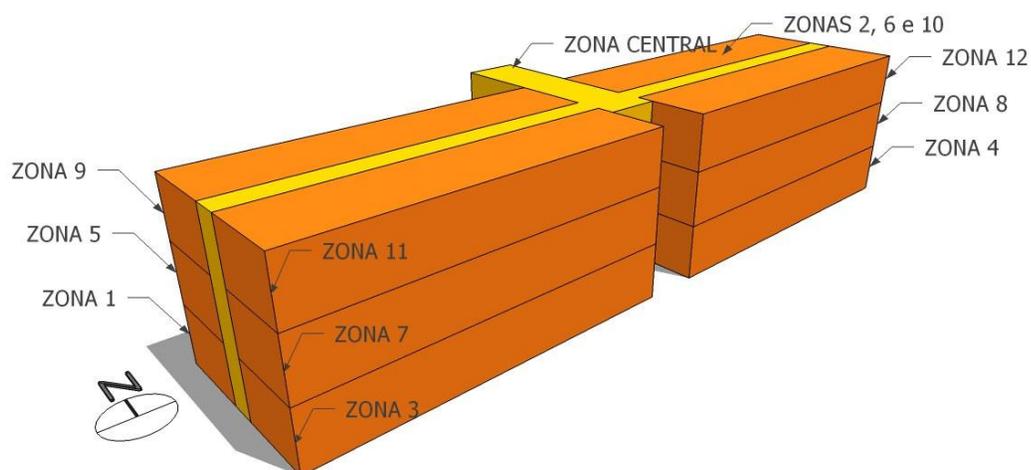


Figura 4.13 – Divisão do edifício em zonas para simulação (vista sudoeste).

As cores das superfícies também foram fixadas para os modelos. No programa *EnergyPlus* foram fornecidos os dados de absorvância e no *Daysim* os dados de refletância, conforme a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Propriedades das superfícies.

SUPERFÍCIE	COR	ABSORVÂNCIA* <i>EnergyPlus</i>	REFLETÂNCIA <i>Daysim</i>
TETO	BRANCO GELO	0,399	0,601
PAREDE			
DIVISÓRIAS	CINZA BR	0,712	0,288
PISO	MARFIM	0,346	0,654

* Obtida do trabalho de Dornelles (2009).

Alguns dados de entrada são iguais para os dois programas. Foi utilizado o arquivo climático TRY para o ano de 1954 da cidade de São Paulo, disponível no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE, 2012). O *Test Reference Year* (TRY) é uma fonte de dados climáticos desenvolvida pelo Centro de Dados Climáticos do Departamento de Comércio dos Estados Unidos – NCDC (Goulart *et al.* 1998). A partir dos dados coletados durante diversos anos para determinada localidade, excluem-se aqueles que apresentam temperaturas médias mensais extremas restando somente um ano representativo do clima da cidade.

Os dados de temperatura, umidade e radiação solar direta para a cidade de São Paulo utilizados nesta pesquisa são apresentados da Figura 4.14 à Figura 4.27.

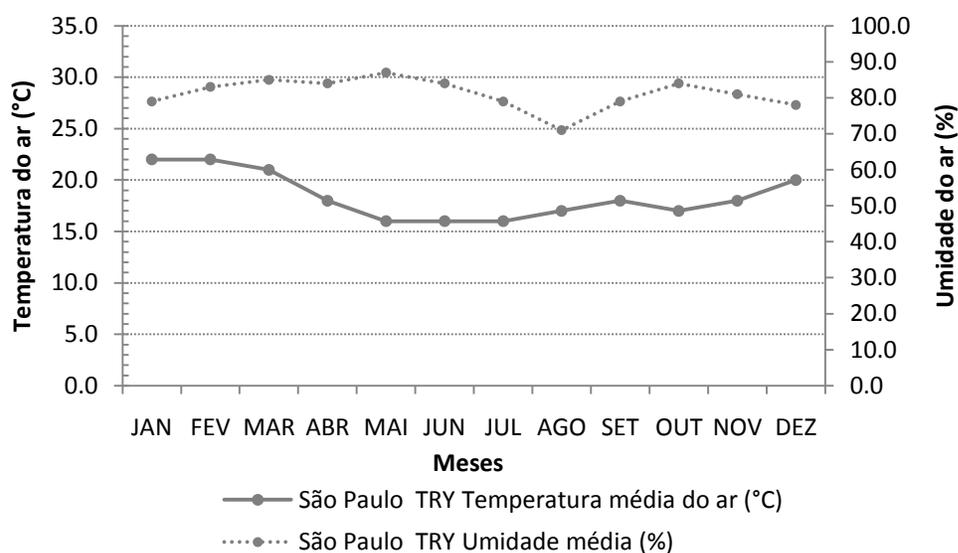


Figura 4.14 - Gráfico da variação anual de temperatura e umidade do ar obtido do arquivo TRY.

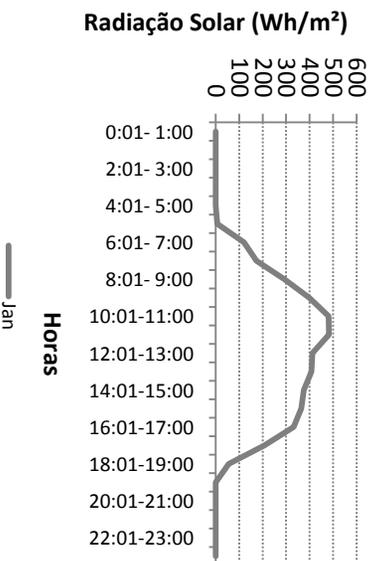


Figura 4.15 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRV para o mês de Janeiro.

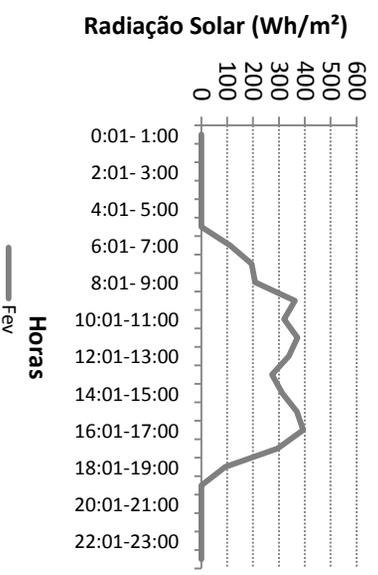


Figura 4.16 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRV para o mês de Fevereiro.

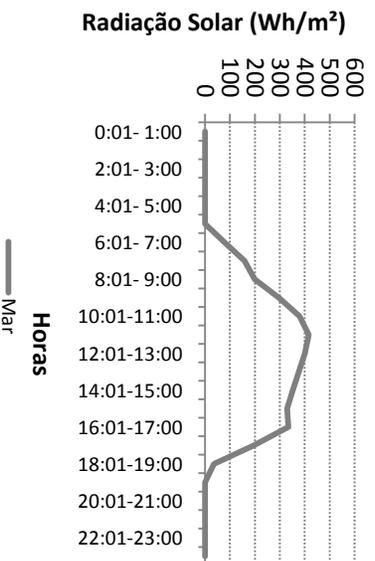


Figura 4.17 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRV para o mês de Março.

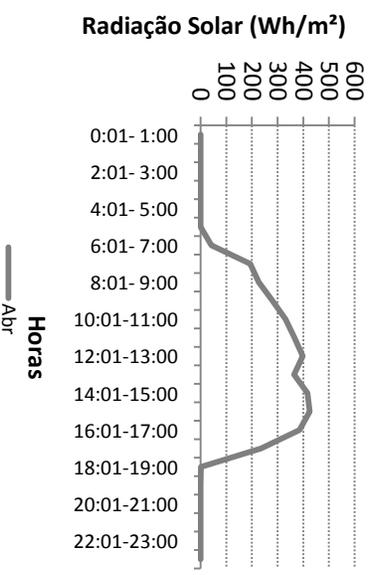


Figura 4.18 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRV para o mês de Abril.

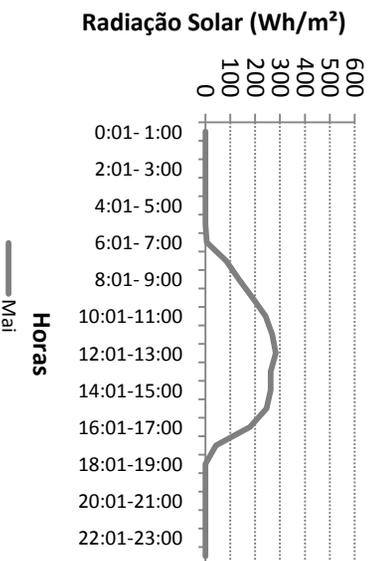


Figura 4.19 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRV para o mês de Maio.

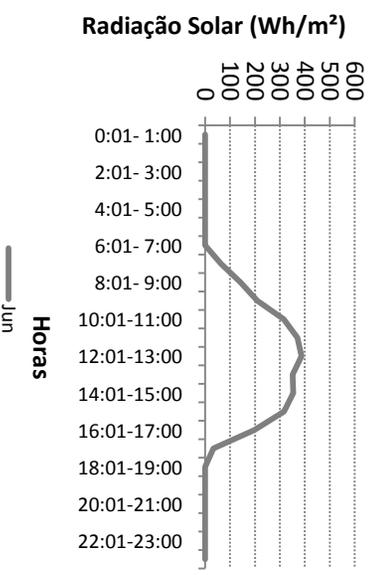


Figura 4.20 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRV para o mês de Junho.

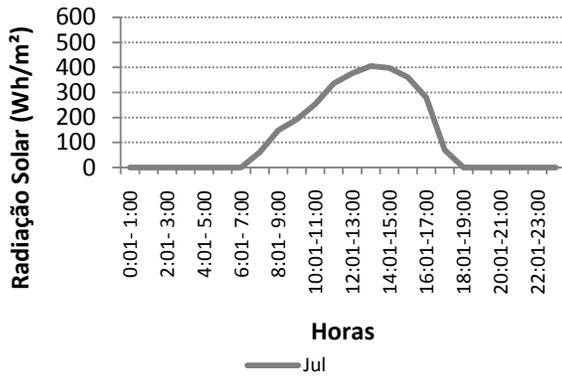


Figura 4.21 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRY para o mês de Julho.

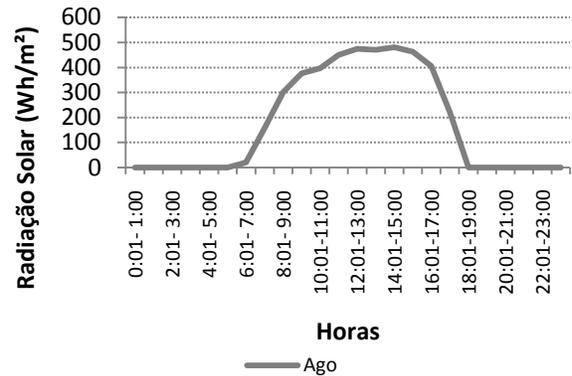


Figura 4.22 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRY para o mês de Agosto.

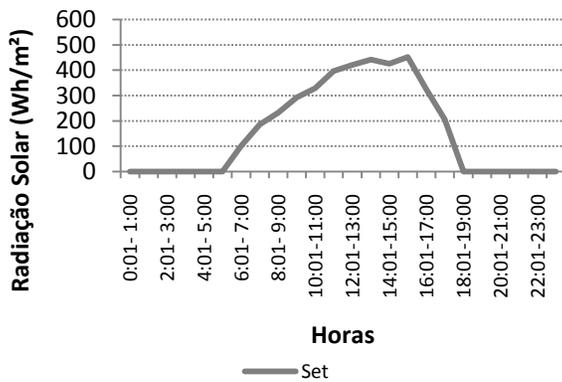


Figura 4.23 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRY para o mês de Setembro.

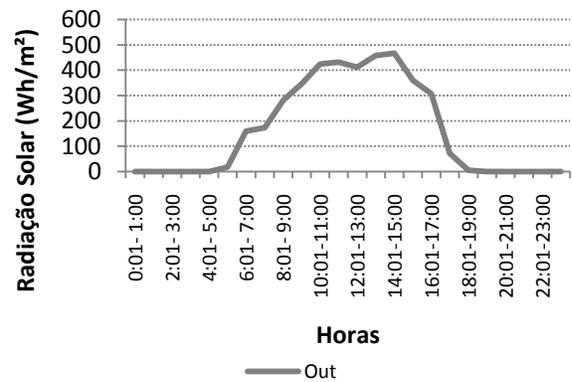


Figura 4.24 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRY para o mês de Outubro.

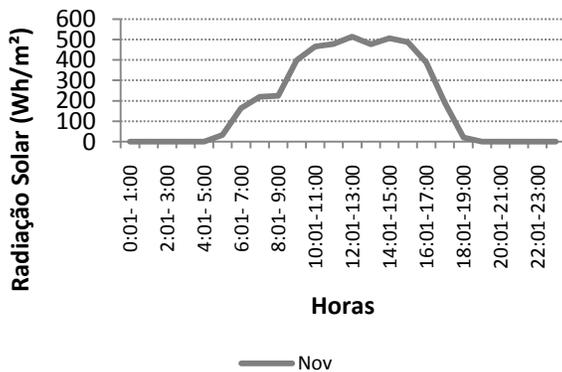


Figura 4.25 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRY para o mês de Novembro.

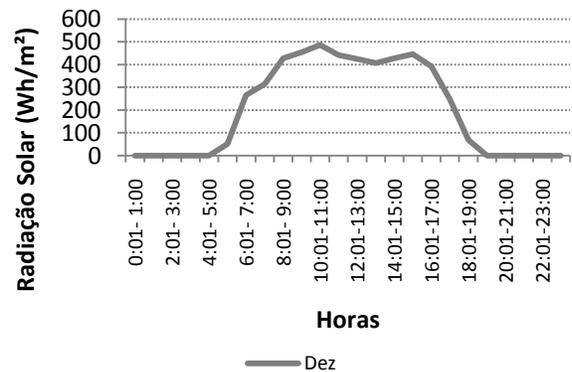


Figura 4.26 – Radiação Solar Direta média horária obtida do arquivo TRY para o mês de Dezembro.

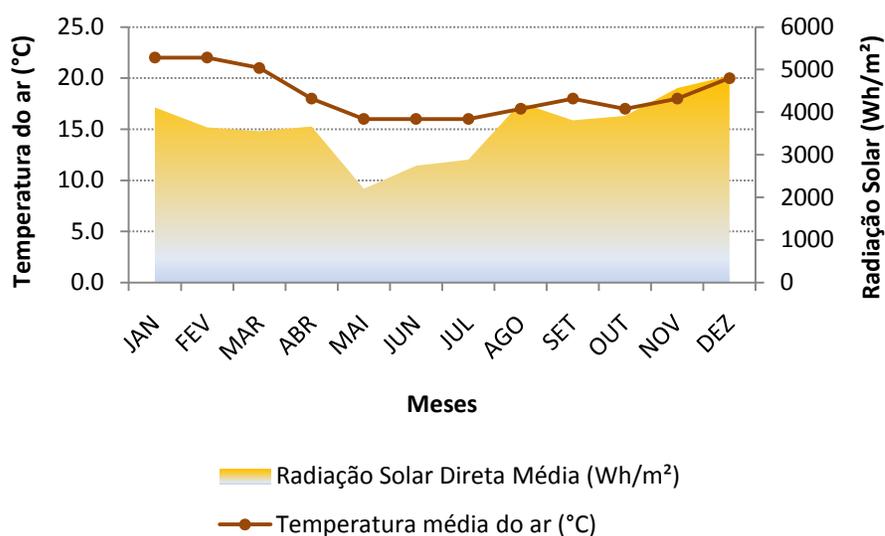


Figura 4.27 - Temperatura e radiação solar direta médias ao longo do ano obtidas do arquivo TRY.

A ocupação ocorre durante os dias úteis (segunda à sexta), das 8 às 17 horas, desconsiderando feriados e horário de verão (Figura 4.28).

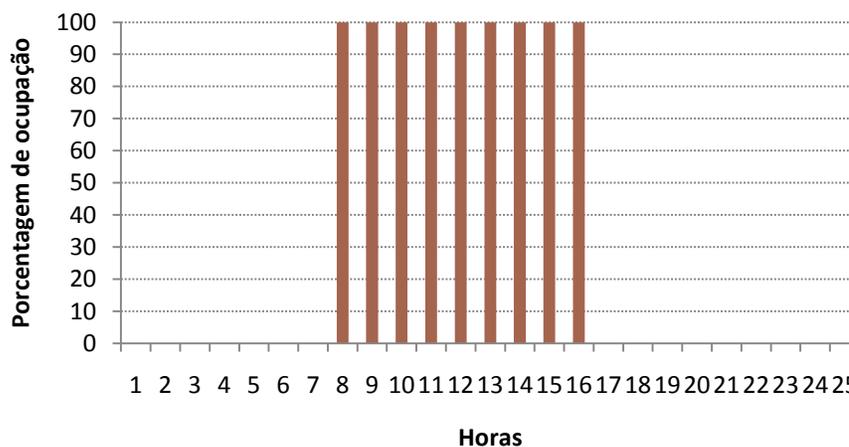


Figura 4.28 - Porcentagem de ocupação do edifício durante os dias úteis.

A partir da DPI estabelecida para cada ambiente e do agrupamento dos ambientes não condicionados em uma única zona, os dados de entrada que caracterizam o sistema de iluminação para ambos os programas são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - DPI das zonas nos modelos do *EnergyPlus* e *Daysim*.

DPI DAS ZONAS		
ZONA TÉRMICA	ÁREA TOTAL (m ²)	DPI (W/m ²)
ZONA 01 a 12	966,6	12,3
CENTRAL	262,2	7,0

4.3.1 Modelo para simulação termoenergética

O programa utilizado nas simulações termoenergéticas foi o *EnergyPlus* versão 6.0 (DOE, 2011). Os ambientes de mesma condição térmica foram agrupados em zonas. A volumetria de cada zona térmica não foi definida pelas superfícies internas do ambiente, mas pelo eixo entre as superfícies internas e externas que os delimitam, como mostram a Figura 4.29 e a Figura 4.30.

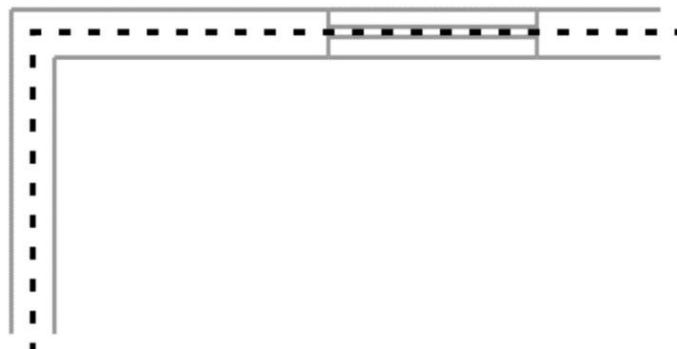


Figura 4.29 - Extensão da zona em planta.

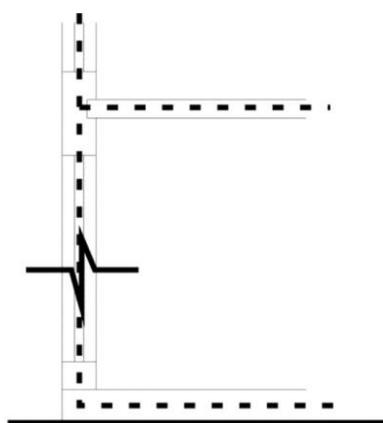


Figura 4.30 - Extensão da zona em corte.

Esse procedimento de simplificação da volumetria resultou nas configurações representadas na Figura 4.31 e na Figura 4.32, em planta e em corte, respectivamente.

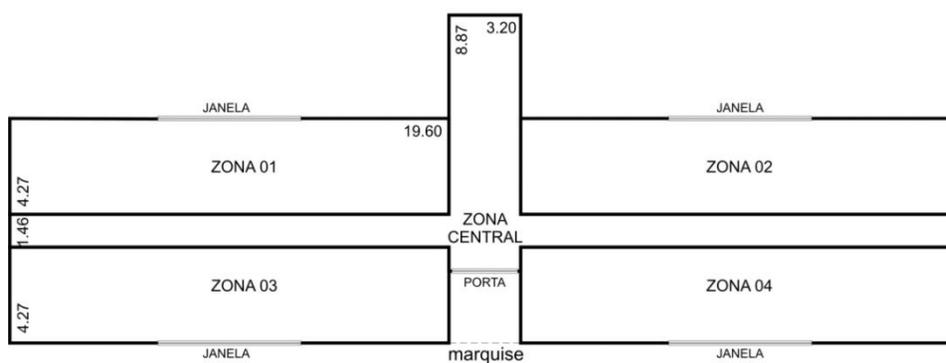


Figura 4.31- Configuração das zonas do modelo do piso térreo em planta.

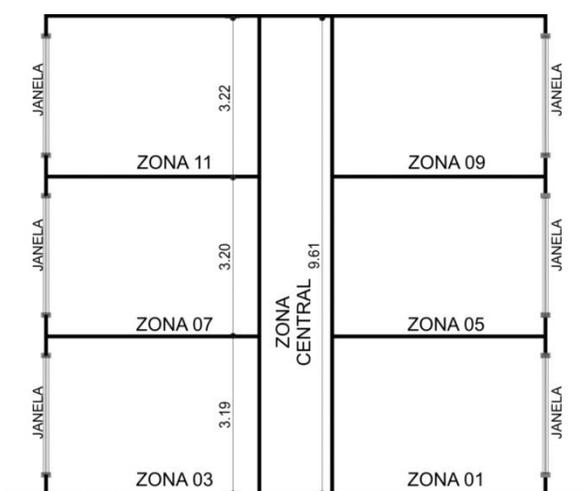


Figura 4.32 - Configuração das zonas do modelo em corte.

As janelas também foram simplificadas e agrupadas em um único plano de vidro por zona, com área correspondente à soma das áreas de vidro de cada janela, resultando na fachada apresentada na Figura 4.33.

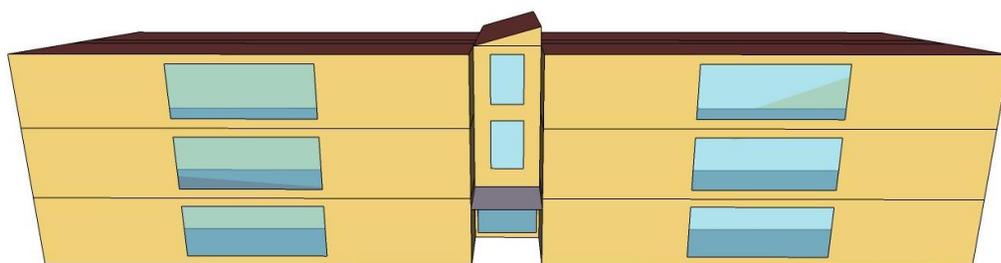


Figura 4.33 - Modelo para simulação termoenergética (vista sul).

O programa de simulação termoenergética *EnergyPlus* interpreta os materiais construtivos como camadas dispostas transversalmente ao fluxo de calor impossibilitando a modelagem de materiais de geometria complexa como tijolos furados, por exemplo, daí a necessidade de simplificação do material a partir da equivalência de suas propriedades.

Uma metodologia para modelagem de componentes construtivos foi utilizada por Ordenes *et al.* (2003) a partir dos cálculos de Resistência e Capacidade Térmica apresentados pela NBR 15220-2 (ABNT, 2008). Essa mesma metodologia foi utilizada para a simplificação da parede de blocos cerâmicos especificada para a envoltória (Figura 4.34). O procedimento de cálculo é descrito no Apêndice A e as propriedades do componente resultante são apresentadas na Tabela 4.7.

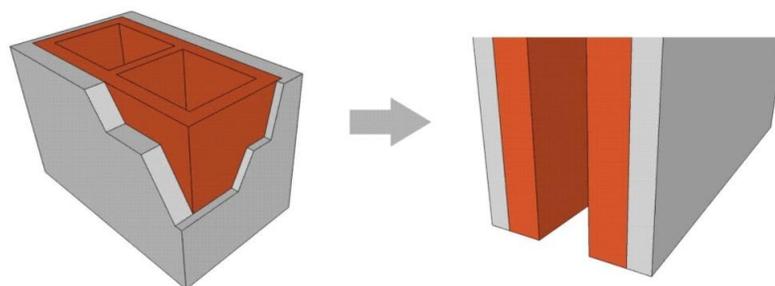


Figura 4.34 - Simplificação da parede de blocos cerâmicos para modelagem no EnergyPlus.

Tabela 4.7 - Propriedades térmicas do componente construtivo equivalente.

Paredes			
Composição		Transmitância Térmica	Absortância Solar*
Externas	Externo – Interno: Reboco pintado na cor branca (e=2,5 cm) Cerâmica (e=7 cm) Camada de ar (e=3 cm) Cerâmica (e=7 cm) Reboco pintado na cor branca (e=2,5 cm)	2,56 W/m ² K	0,40

* Obtida do trabalho de Dornelles (2009).

A determinação dos ganhos internos partiu da definição dos equipamentos instalados e do número de pessoas nos ambientes (Tabela 4.8). A Figura 4.35 representa as trocas térmicas presentes no modelo: ganho de calor interno pelos equipamentos e atividade humana, ganho de calor por fatores externos através de radiação, condução e convecção, além das trocas térmicas com o solo.

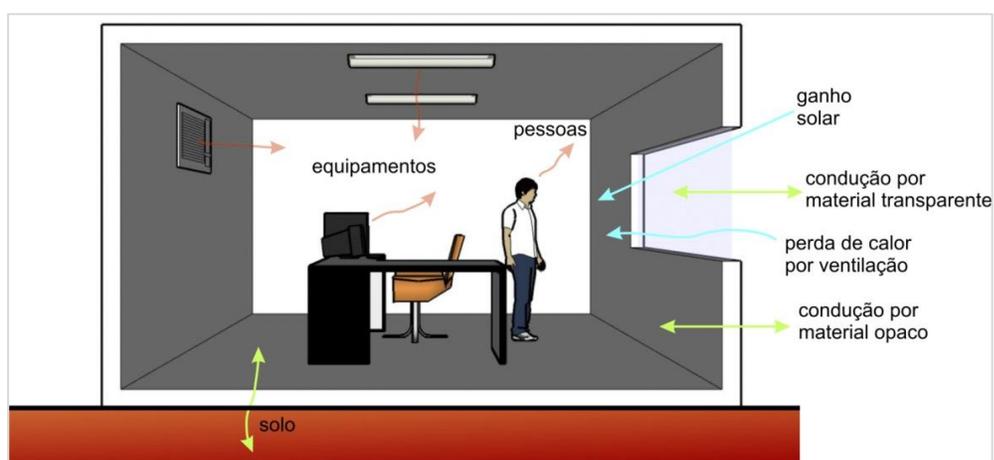


Figura 4.35 – Representação de trocas térmicas.
Fonte: adaptado de Baker e Steemers (2000).

Cada sala é ocupada por nove pessoas e um conjunto de computador e monitor de tela plana por pessoa. O calor dissipado pelo computador é de 65 W (sendo a fração radiante igual a 10%) e o calor dissipado pelo monitor, 30 W (fração radiante de 40%) – dados obtidos através do *Handbook of Fundamentals*, 2009 (ASHRAE, 2009).

O nível de atividade metabólica e o calor dissipado por pessoa foram obtidos na NBR 16401 (ABNT, 2008). Foi adotado um nível de atividade moderada em trabalhos de escritório e o valor do calor dissipado utilizado foi o ajustado para homens e mulheres, 130 W, sendo 75 W de calor sensível e 55 W de calor latente.

Para estimar o calor dissipado pela iluminação foi adotada uma configuração de luminárias de sobrepôr com lâmpadas fluorescentes. Conforme o manual de referência de dados de entrada e saída do *EnergyPlus*, a fração de calor dissipado por radiação e a de radiação visível são, respectivamente, 72% e 18% da energia fornecida para o sistema.

Tabela 4.8 - Dados de ganhos internos das zonas térmicas.

		PESSOAS	ILUMINAÇÃO	EQUIPAMENTOS	
				COMPUTADOR	MONITOR
LATENTE		55 W	-	-	-
SENSÍVEL		75 W	990,8 W	65 W	30 W
		RADIAÇÃO	72%	10%	40%
		CONVECÇÃO	-	90%	60%
RADIAÇÃO VISÍVEL		-	18%	-	-

Para o dimensionamento do sistema de condicionamento de ar foi necessário estabelecer um dia típico de projeto de verão e inverno. Conforme recomendação da NBR 16401 (ABNT, 2008) para projetos comerciais foram adotados dados climáticos com frequência

de ocorrência de 1% e 99%. A “temperatura de 1%” corresponde a uma temperatura muito alta, superada apenas 1% das horas do ano, já a “temperatura de 99%” é muito baixa e superada 99% das horas do ano.

A maneira como o programa interpreta a interação dos ventos com o edifício é definida pela rugosidade do terreno onde este está implantado, no caso, adotou-se como padrão um terreno aberto para todos os modelos.

Como o comportamento da luz natural dentro dos ambientes foi simulado em programa específico, somente a distribuição solar externa com reflexões foi simulada. Neste caso são considerados os sombreamentos causados por dispositivos acoplados ao edifício ou por edifícios vizinhos e a radiação solar incidente no interior é absorvida pelo piso conforme suas propriedades e a fração refletida é distribuída uniformemente pelas superfícies internas.

A renovação de ar dos ambientes condicionados artificialmente foi estabelecida em 27 m³/ hora/ pessoa, conforme recomendação da Resolução 176 da ANVISA (Brasil, 2000).

Foi utilizado o *Slab*, um programa auxiliar do *EnergyPlus* para calcular as trocas de calor entre o edifício e o solo e estimar as temperaturas médias mensais deste último. A utilização do programa é recomendada para o caso de edifícios pequenos cuja troca de calor com o solo pode ser significativa. Sendo assim, não foram utilizadas as temperaturas de solo fornecidas no arquivo climático.

Para a determinação das horas anuais de desconforto térmico, o modelo de conforto adotado foi o Método PMV/PPD de Fanger (*Predicted Mean Vote* ou Voto Médio Estimado e *Predicted Percentage Dissatisfied* ou Porcentagem Estimada de Insatisfeitos). Desta forma, o programa *EnergyPlus* gera relatórios horários baseados na ASHRAE 55-2004.

Para que o programa calculasse os índices de conforto PMV e PPD foi necessário estabelecer alguns parâmetros relativos ao usuário e às condições ambientais. Como vestimenta foi adotado o conjunto calça, camisa de manga curta, sapatos, meias e roupas íntimas, cujo valor de isolamento totaliza 0,57 clo (fonte: Standard 55 – ASHRAE, 2005). A eficiência do uso de energia pelo corpo humano foi estabelecido em 0, ou seja, toda energia é convertida em calor que é considerado no balanço térmico da zona (fonte: ISO 7730 – ISO, 2005). Adotou-se uma velocidade do ar de 0,2 m/s nos ambientes durante o horário de ocupação.

4.3.2 Modelo para simulação da luz natural

Para a simulação no *Daysim*, a volumetria dos ambientes foi definida pelas superfícies internas do ambiente, diferentemente do modelo para simulação termoenergética, como mostra a Figura 4.36.

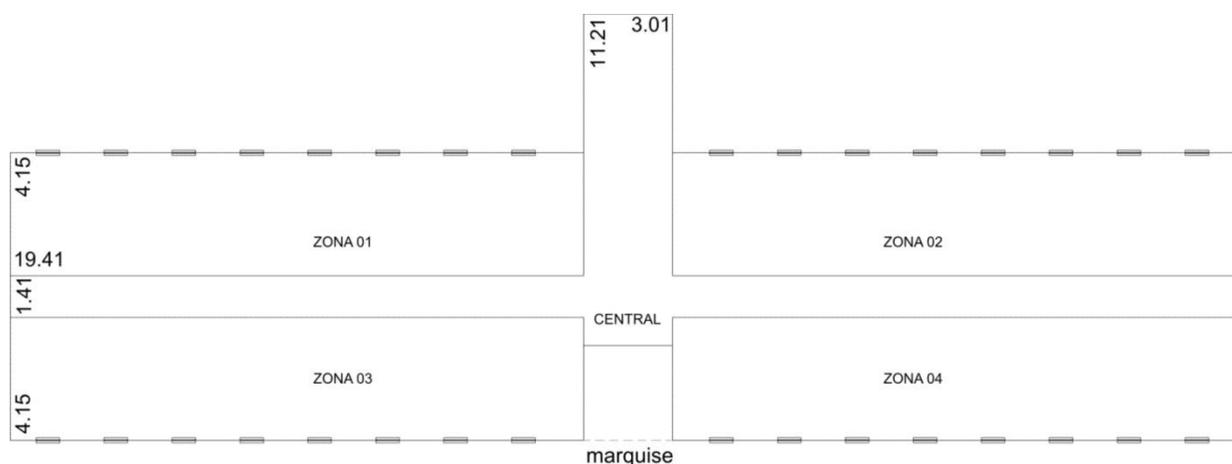


Figura 4.36 - Dimensão dos ambientes no programa *Daysim* em planta.

Para esse tipo de simulação, as janelas não foram agrupadas como no modelo do *EnergyPlus*. O posicionamento e dimensão das janelas do edifício proposto foram mantidos, resultando na configuração mostrada na Figura 4.37. As janelas presentes na zona central (das áreas de circulação e banheiros) não foram modeladas pois a análise de iluminância foi feita somente para os ambientes de permanência prolongada, as salas de 1 a 12.

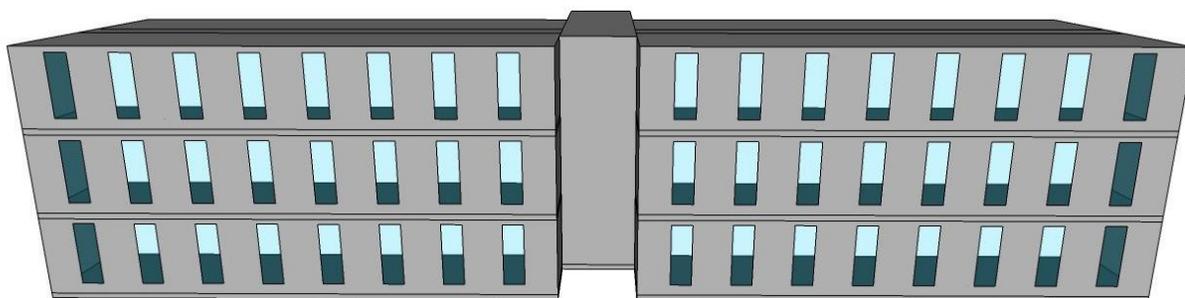


Figura 4.37 - Modelo para simulação da luz natural.

Foram simulados três sistemas de iluminação artificial: o primeiro é o sistema que permanece ligado durante todo o período de ocupação do prédio sem aproveitamento da iluminação natural. O segundo é acionado manualmente pelo usuário quando o nível de iluminância é insatisfatório no plano de trabalho. O terceiro é o sistema *dimerizável* com usuário passivo, ou seja, um sistema composto por sensores que detectam a iluminância no plano de trabalho e acionam a quantidade de iluminação artificial necessária para atingir o nível mínimo de iluminância e usuários que não interferem no funcionamento deste.

Para cada sistema de iluminação foram simuladas três situações de entorno: o edifício sem obstruções no entorno (Figura 4.38) e o mesmo com edifícios de mesma altura afastados 10m (Figura 4.39) e 5m (Figura 4.40) das fachadas norte e sul (onde estão localizadas as

aberturas das salas do edifício estudado), resultando em nove combinações de entorno e sistema de iluminação.

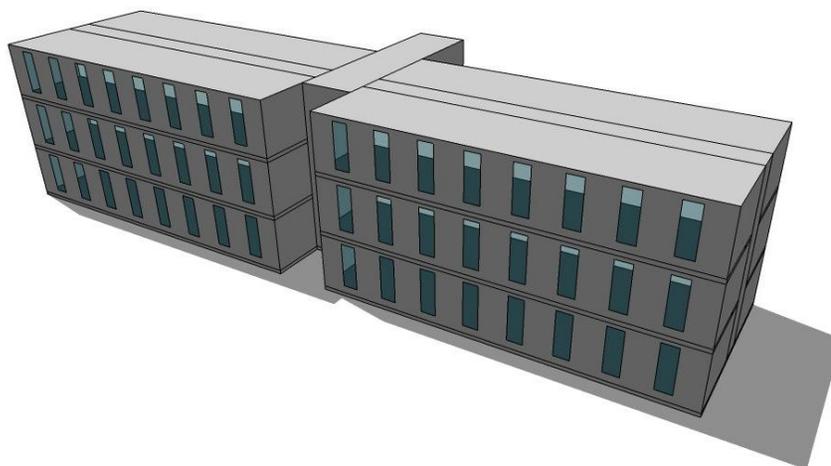


Figura 4.38 - Edifício isolado.

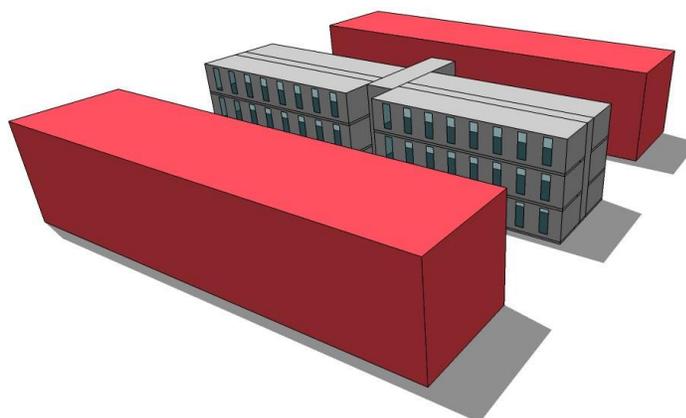


Figura 4.39 - Edifício com construções vizinhas (em vermelho) afastadas 10m das fachadas Norte e Sul.

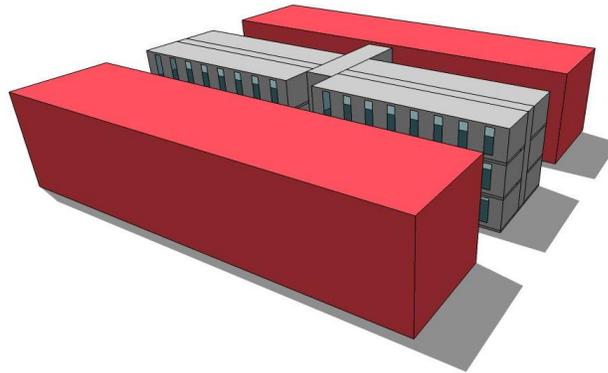


Figura 4.40- Edifício com construções vizinhas (em vermelho) afastadas 5m das fachadas Norte e Sul.

Os dados de saída analisados foram:

- autonomia de luz diurna (DA): indicador da porcentagem de horas do ano quando a luz natural é suficiente para satisfazer os níveis mínimos de iluminância de um ambiente; considera todas as condições de céu ao longo do ano e;
- ganhos internos: valores médios horários da porcentagem da potência instalada utilizada efetivamente (o que inclui o consumo do sistema em modo de *standby*). Esses dados foram inseridos como padrão de uso do sistema de iluminação no *EnergyPlus*.

Foram mantidos alguns parâmetros pré-definidos pelo programa (Tabela 4.9) para a simulação de um cenário em que os raios de sol são traçados a partir dos pontos de referência contidos no plano de análise do ambiente para calcular seu perfil anual de iluminância. Além disso, o controle de ofuscamento não foi simulado.

Tabela 4.9 – Parâmetros pré-definidos para a simulação da luz natural (*Radiance Parameters*).

<i>ambient bounces</i>	<i>ambient division</i>	<i>ambient super-samples</i>	<i>ambient resolution</i>	<i>ambient accuracy</i>	<i>limit reflection</i>	<i>specular threshold</i>
5	1000	20	300	0.1	6	0,15
<i>specular jitter</i>	<i>limit weight</i>	<i>direct jitter</i>	<i>direct sampling</i>	<i>direct relays</i>	<i>direct pretest density</i>	
1,0	0,004	0	0	2	512	

A distribuição dos sensores pelo plano de trabalho para estimativa dos níveis de iluminância ao longo do ano partiu da recomendação da NBR 15215-4 (ABNT, 2004):

A quantidade de pontos para verificação do nível de iluminância natural depende do índice “K” do ambiente determinado pela equação (4.1):

$$K = \frac{C \times L}{Hm \times (C + L)} \quad (4.1)$$

Onde,

C= comprimento (19,41 m)

L=largura (4,15 m)

Hm=distância entre a superfície de trabalho e o topo da janela (1,96 m).

O resultado obtido para K foi 1,74 e seguindo a Tabela 4.10 foi obtido o número de pontos a serem distribuídos no plano de trabalho de cada sala, como mostram a Figura 4.41 e a Figura 4.42.

Tabela 4.10 - Quantidade mínima de pontos a serem medidos.

Fonte: ABNT (2004).

K	N° de pontos
$K < 1$	9
$1 \leq K < 2$	16
$2 \leq K < 3$	25
$K \geq 3$	36

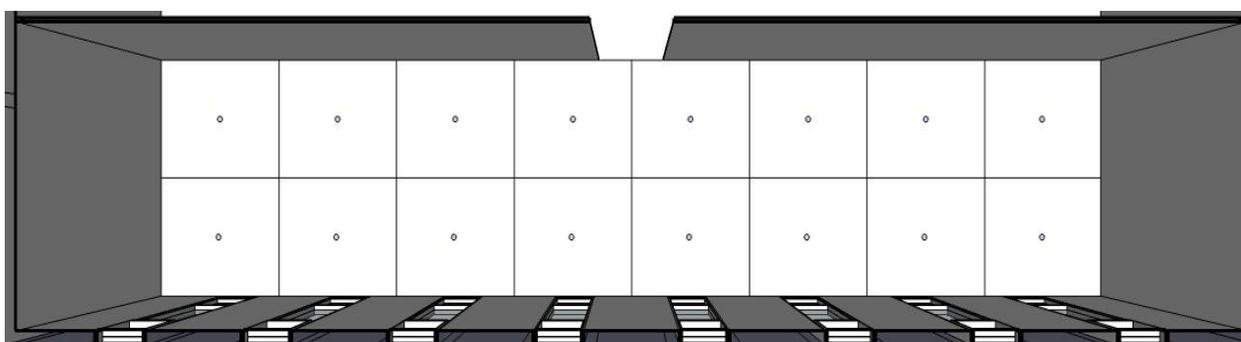


Figura 4.41 - Distribuição da malha de pontos pelas salas.

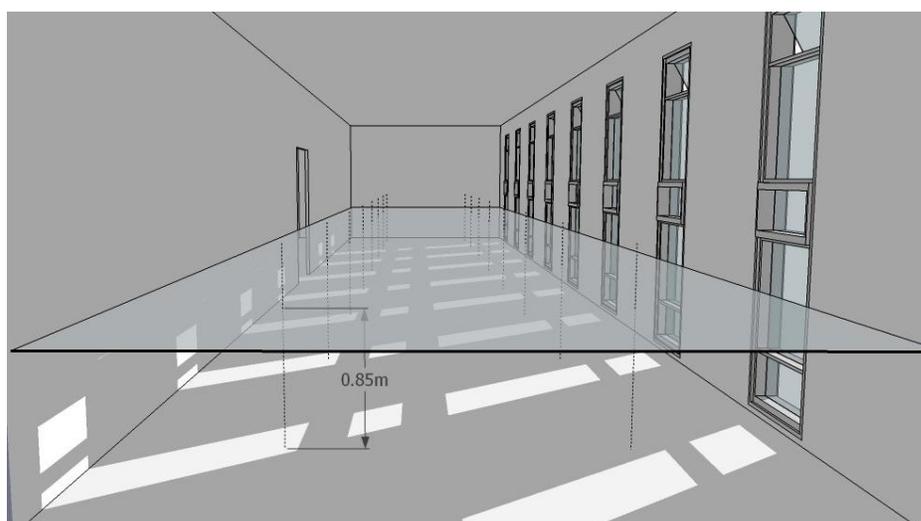


Figura 4.42 - Perspectiva do plano de trabalho com distribuição dos sensores a 0,85m do piso.

O nível mínimo estabelecido de iluminância no plano de trabalho foi de 500 lux, de acordo com a recomendação da NBR 5413 (ABNT, 1992) para atividades de escritório.

Dois sistemas de acionamento da iluminação artificial: o primeiro é a presença de um usuário ativo, que liga as luzes através de interruptor quando o nível de iluminância em qualquer sensor fica abaixo do mínimo estabelecido de 500 lux. O segundo é a utilização de fotosensores que ao detectarem níveis de iluminância insuficientes ativam, por meio de *dimmers*, somente a potência necessária do sistema para atingir o nível mínimo de iluminância e consome 2 W no modo *standby*.

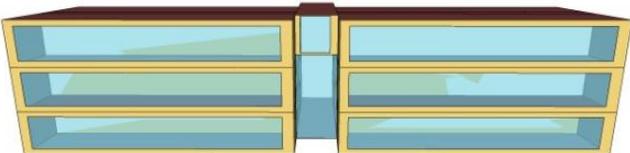
O padrão de uso resultante da simulação da luz natural no Daysim é uma planilha horária com a porcentagem da potência instalada efetivamente utilizada. Esses dados são inseridos como dado de entrada de utilização do sistema no *EnergyPlus (schedule)* para obter o consumo energético anual com iluminação artificial de cada variação do modelo.

4.4 Modelos de referência

O método prescritivo estabelece as propriedades da envoltória, o nível de eficiência dos sistemas de iluminação e de condicionamento de ar dos modelos de referência de acordo com a Zona Bioclimática onde o edifício proposto está inserido.

A Porcentagem de Abertura na Fachada Total (PAFt) também deve ser calculada para o modelo representativo de cada nível de eficiência. Esse parâmetro é obtido por meio do método prescritivo após o cálculo do Índice de Consumo da envoltória do modelo estudado (IC_{env}). Esse procedimento está descrito no Apêndice B e os valores obtidos estão descritos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Porcentagem de Abertura na Fachada Total (PAFt) dos modelos de referência.

MODELO DE REFERÊNCIA	PERSPECTIVA	PAFt
NÍVEL A		0,17
NÍVEL B		0,29
NÍVEL C		0,41
NÍVEL D		0,53

Quanto às características da envoltória, adotou-se a recomendação da proposta de alteração do RTQ-C que será submetida à consulta pública. Esse documento foi fornecido no curso de treinamento para aplicação do método de simulação dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de serviços e públicos em outubro de 2011.

A Tabela 4.12 resume as propriedades térmicas prescritas para parede e cobertura de cada modelo de referência para a Zona Bioclimática 3, onde está a cidade de São Paulo. Na Tabela 4.13 e na Tabela 4.14 estão descritos os componentes construtivos recomendados para parede e cobertura, respectivamente, para atenderem às propriedades recomendadas e que foram utilizados nos modelos de referência.

Tabela 4.12 - Propriedades térmicas da envoltória dos modelos de referência.

NÍVEL A		NÍVEL B		NÍVEIS C e D	
TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DA COBERTURA U_{cob}					
Ambientes condicionados	Ambientes não condicionados	Ambientes condicionados	Ambientes não condicionados	Ambientes condicionados	Ambientes não condicionados
1,0	2,0	1,5	2,0	2,0	
TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DAS PAREDES EXTERNAS U_{par}					
3,7					
ABSORTÂNCIA DE SUPERFÍCIES (PAREDES E COBERTURAS) – α_{par} e α_{cob}					
0,50				0,70	

Tabela 4.13 - Componentes construtivos de paredes dos modelos de referência.

U_{cob} W/(m ² K)	Composição (camadas)	Densidade ρ (kg/m ³)	Condutividade Térmica λ (W/(mK))	Calor específico c kJ/(kgK)
3,7	Tijolo cerâmico – 9,025 cm	1600	0,90	0,92

Tabela 4.14 - Componentes construtivos de coberturas dos modelos de referência para diferentes valores de transmitância térmica.

U_{cob} W/(m ² K)	Composição (camadas)	Densidade ρ (kg/m ³)	Condutividade Térmica λ (W/(mK))	Calor específico c kJ/(kgK)
1,0	Reboco externo – 1 cm	2000	1,15	1,0
	Poliestireno extrudado – 2,505 cm	40	0,035	1,4
	Concreto (laje) – 10 cm	2200	1,75	1,0
	Reboco interno – 1 cm	2000	1,15	1,0
1,5	Reboco externo – 1 cm	2000	1,15	1,0
	Poliestireno extrudado – 1,338 cm	40	0,035	1,4
	Concreto (laje) – 10 cm	2200	1,75	1,0
	Reboco interno – 1 cm	2000	1,15	1,0
2,0	Reboco externo – 1 cm	2000	1,15	1,0
	Poliestireno extrudado – 0,754 cm	40	0,035	1,4
	Concreto (laje) – 10 cm	2200	1,75	1,0
	Reboco interno – 1 cm	2000	1,15	1,0

Assim como para o modelo estudado, a Densidade de Potência Instalada (DPI) dos ambientes dos modelos de referência foi definida pelo “Método das Atividades do Edifício” respeitando os limites máximos para cada nível. Na Tabela 4.15 são apresentados os valores de DPI adotados para cada modelo.

Tabela 4.15 - Definição da DPI dos ambientes dos modelos de referência.

AMBIENTE	FUNÇÃO	DPI (W/m ²)			
		NÍVEL A	NÍVEL B	NÍVEL C	NÍVEL D
SALAS 1 a 12	Escritório	10,4	12,3	13,6	15,6
CIRCULAÇÃO	Circulação	6,2	7,3	8,1	8,5
BANHEIRO	Banheiros	4,4	5,2	5,7	7,0
DEPÓSITO	Depósito	4,4	5,2	5,7	7,0

Todas as salas foram equipadas com sistema de condicionamento de ar de janela e temperatura de resfriamento estabelecida em 24 °C. O sistema só é acionado durante as horas ocupadas. Os Coeficientes de Desempenho (*Coefficient of Performance – COP*) de cada nível são apresentados na Tabela 4.16 e foram estabelecidos a partir das tabelas de eficiência energética de condicionadores de ar de janela do site do INMETRO (INMETRO, 2012).

Tabela 4.16 - Coeficiente de Desempenho (COP) dos modelos de referência.

NÍVEL	A	B	C	D
COP (W/W)	3,02	2,80	2,56	2,35



5 Resultados e discussão

Para determinar o nível de eficiência da edificação proposta através do método de simulação descrito no RTQ-C, comparou-se o consumo total das diferentes variações do modelo estudado (obstrução do entorno e sistema de iluminação artificial) e o dos modelos de referência representativos dos níveis A, B, C e D. Segundo o RTQ-C os modelos de referência não devem ser simulados com o entorno, entretanto, estes foram modelados com as mesmas variações de entorno do modelo estudado a fim de comparar situações semelhantes e verificar se a inclusão do entorno no modelo de referência prejudicaria a classificação de sua eficiência.

Ao longo deste capítulo os modelos são nomeados conforme legenda abaixo, para simplificar sua citação no texto e nos gráficos. No Apêndice C encontram-se os dados do uso final de energia dos modelos obtidos no relatório de saída do *EnergyPlus* que utilizam a mesma nomenclatura.

- B = modelo estudado sem entorno com iluminação acesa das 8 às 17 horas.
- Bi = modelo estudado sem entorno com iluminação artificial acionada por interruptor pelo usuário.
- Bd = modelo estudado sem entorno com iluminação artificial ativada por sensores e controlada por *dimmers*.
- Be = modelo estudado com prédios vizinhos à mesma altura afastados 10 m das fachadas Norte e Sul com iluminação acesa das 8 às 17 horas.
- Bei = modelo estudado com prédios vizinhos à mesma altura afastados 10 m das fachadas Norte e Sul com iluminação artificial acionada por interruptor pelo usuário.

- Bed = modelo estudado com prédios vizinhos à mesma altura afastados 10 m das fachadas Norte e Sul com iluminação artificial ativada por sensores e controlada por *dimmers*.
- Be2 = modelo estudado com prédios vizinhos à mesma altura afastados 5 m das fachadas Norte e Sul com iluminação acesa das 8 às 17 horas.
- Bei2 = modelo estudado com prédios vizinhos à mesma altura afastados 5 m das fachadas Norte e Sul com iluminação artificial acionada por interruptor pelo usuário.
- Bed2 = modelo estudado com prédios vizinhos à mesma altura afastados 5 m das fachadas Norte e Sul com iluminação artificial ativada por sensores e controlada por *dimmers*.
- REF_A, REF_B, REF_C e REF_D = modelos de referência sem entorno e com iluminação acesa das 8 às 17 horas sem aproveitamento da iluminação natural.
- REF_Ae, REF_Be, REF_Ce e REF_De = modelos de referência com prédios vizinhos à mesma altura afastados 10 m das fachadas Norte e Sul e com iluminação acesa das 8 às 17 horas sem aproveitamento da iluminação natural.
- REF_Ae2, REF_Be2, REF_Ce2 e REF_De2 = modelos de referência com prédios vizinhos à mesma altura afastados 5 m das fachadas Norte e Sul e com iluminação acesa das 8 às 17 horas sem aproveitamento da iluminação natural.

A Figura 5.1 apresenta uma visão geral do consumo total anual de energia elétrica de todos os modelos simulados, o que inclui as simulações termoenergéticas (modelos B, Be, Be2 e modelos de referência) e as simulações integradas com o *Daysim* e o *EnergyPlus* (modelos Bi, Bei, Bei2, Bd, Bd, Bed, Be2d).

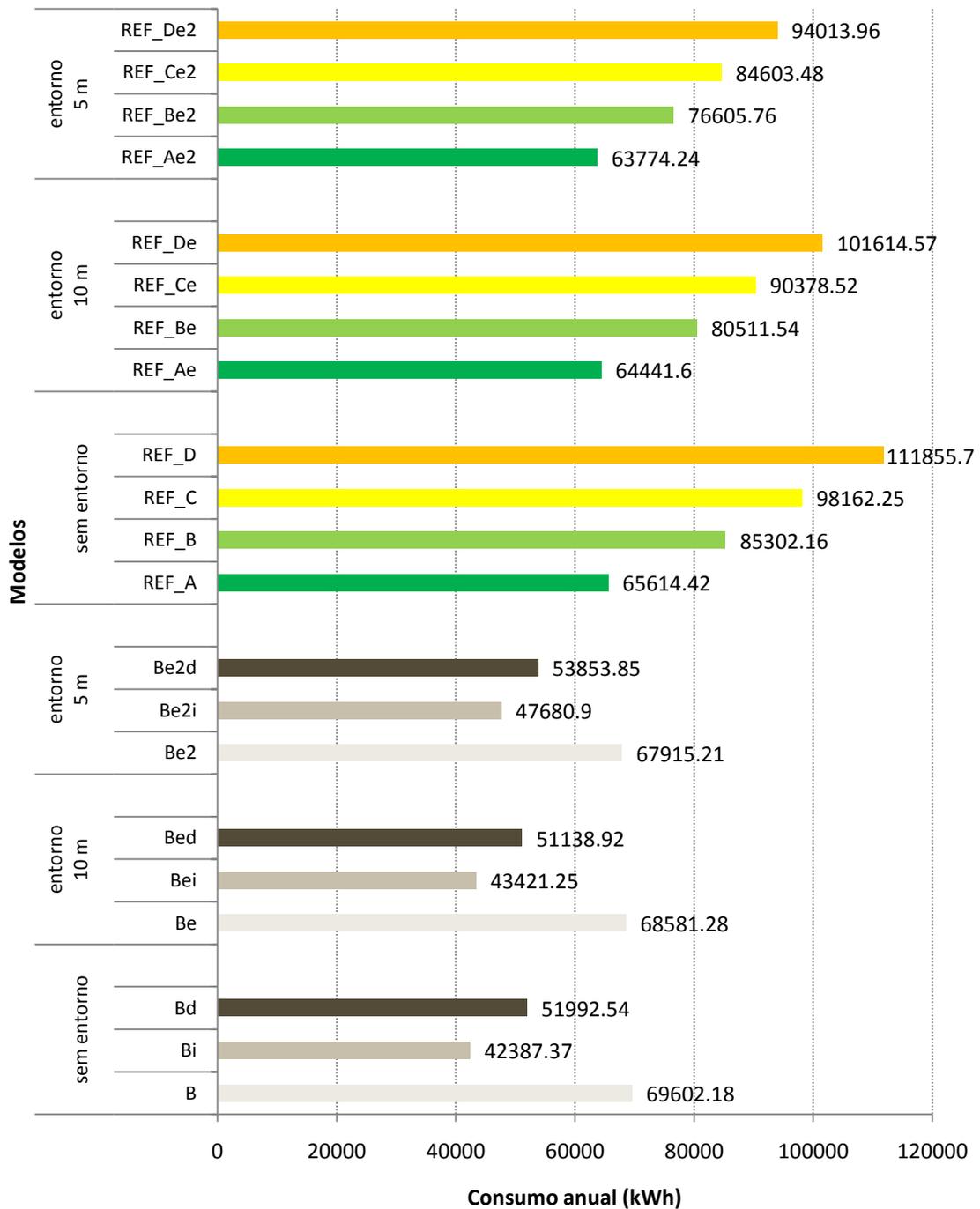


Figura 5.1 - Visão geral do consumo total de energia elétrica anual dos modelos analisados e dos modelos de referência.

A classificação do nível de eficiência dos modelos que não apresentam estratégia de aproveitamento da luz natural (B, Be e Be2), de acordo com a metodologia do RTQ-C recebem classificação nível B, isolado ou sombreado pelo entorno. Já os modelos que apresentam estratégia de aproveitamento da luz natural, seja pela operação do sistema pelos usuários, seja por acionamento por sensores e controle de potência por *dimmers*, conseguem atingir nível A mesmo quando inseridos em diferentes condições de entorno.

Como apresentado na Figura 5.2, o sistema de iluminação do edifício estudado quando ativado durante todo o que representa quase 50% do consumo total de energia. Sendo assim, a disponibilidade e o aproveitamento da iluminação natural fazem com que seja possível uma significativa redução no consumo deste sistema.

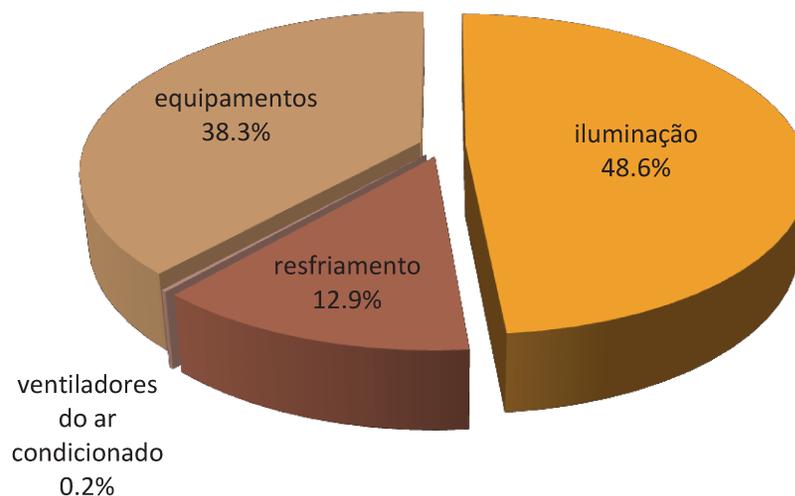


Figura 5.2 – Usos finais de energia no modelo isolado e sem aproveitamento da luz natural.

Ao inserir o modelo estudado em diferentes condições de entorno e mantendo fixos o padrão de uso dos equipamentos e do sistema de iluminação o consumo total é reduzido em função da proximidade das construções vizinhas. Conforme demonstrado na Figura 5.3 essa redução se deve ao uso do sistema de condicionamento de ar.



Figura 5.3 – Consumo com equipamentos, sistema de iluminação e condicionamento de ar dos modelos estudados sem aproveitamento da luz natural em diferentes entornos.

Adotando o modelo B como referência, os modelos Be e Be2 apresentam redução no consumo de resfriamento de 11% e 18%, respectivamente.

Os gráficos da Figura 5.4 e da Figura 5.5 demonstram a variação anual do consumo de energia nos modelos sem aproveitamento da luz diurna em função da radiação solar direta e da temperatura do ar externo.

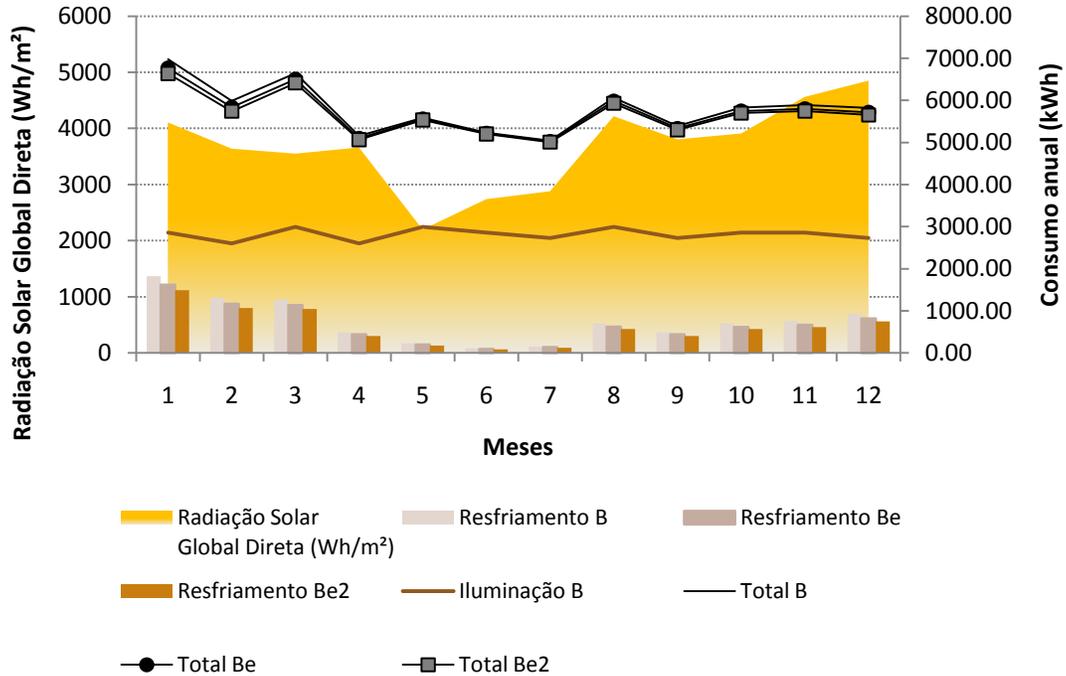


Figura 5.4 – Radiação solar direta, consumo total, com iluminação e resfriamento do modelo estudado em diferentes entornos ao longo do ano.

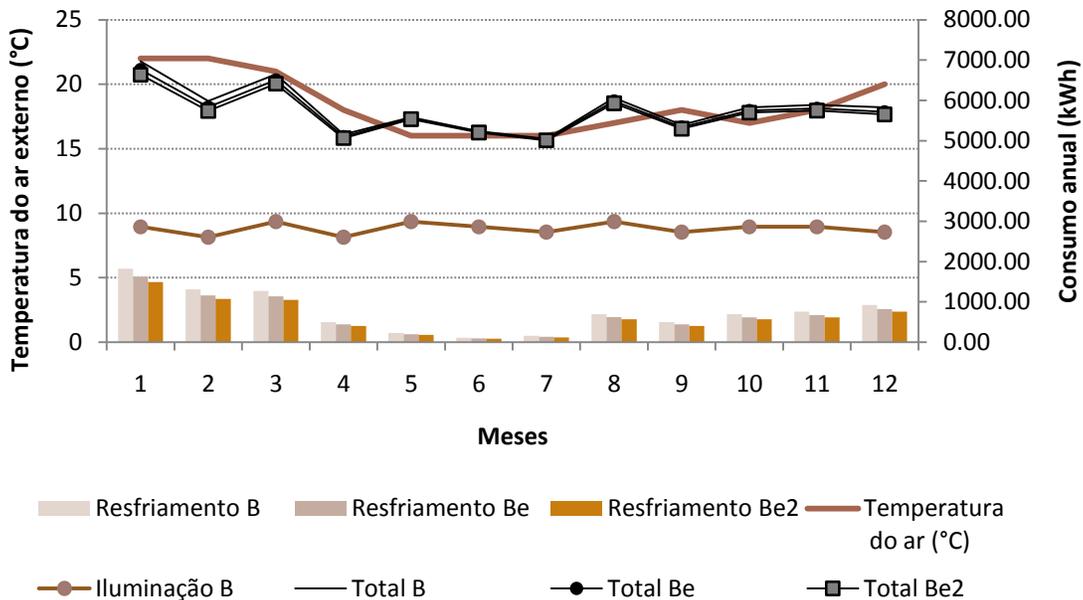


Figura 5.5 - Temperatura externa, consumo total, com iluminação e resfriamento do modelo estudado em diferentes entornos ao longo do ano.

O consumo com iluminação artificial é praticamente constante ao longo do ano, pois o sistema permanece ligado durante todo período de ocupação. As variações apresentadas são justificadas pela diferença na quantidade de dias dos meses.

A energia destinada ao resfriamento em todos os modelos acompanha a variação da intensidade da radiação solar direta e da temperatura externa. Entretanto, à medida que o acesso à radiação solar reduz pela proximidade das construções vizinhas, esse consumo decresce ligeiramente.

Na Figura 5.6 são comparados o consumo total dos modelos estudados e dos modelos de referência conforme metodologia do RTQ-C:

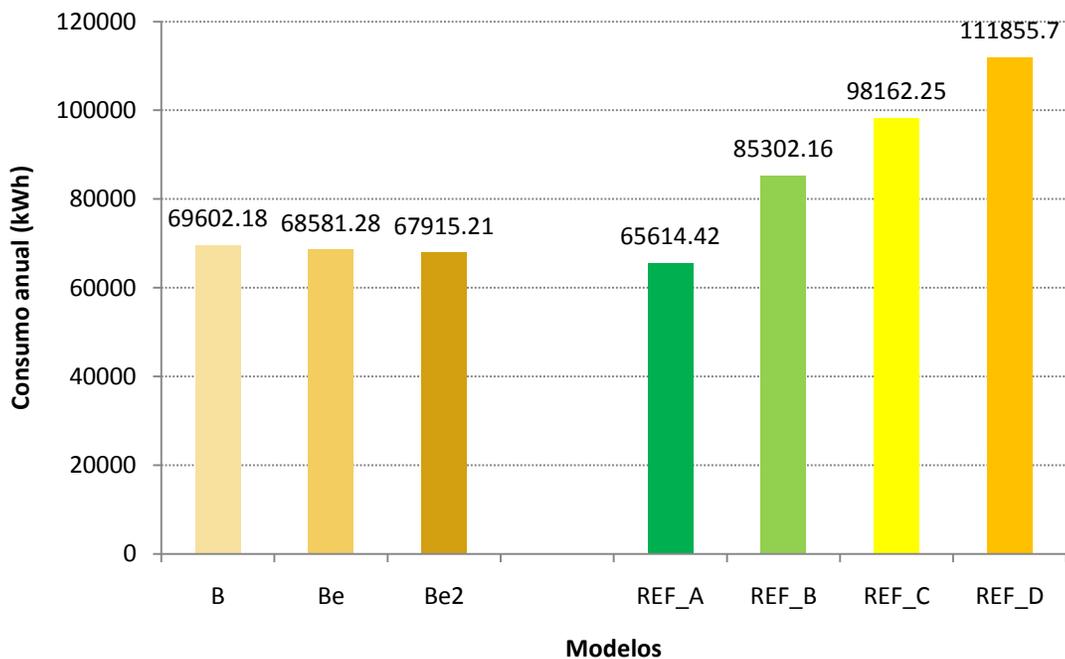


Figura 5.6 - Consumo total anual de energia elétrica pelos modelos estudados e de referência.

A redução do consumo total anual decorrente da presença de obstruções ao modelo estudado não é suficiente para alterar seu nível de eficiência energética. Os

modelos de referência apresentam diferenças de 20% a 30% no consumo total entre os níveis. Os modelos Be e Be2 tem seu consumo total reduzido em apenas 1% e 2%, respectivamente, em relação ao modelo B. Isso significa que a redução de 11% e 18% no consumo com resfriamento não teve grande impacto no consumo total do modelo.

Os modelos de referência também foram simulados em diferentes entornos, os mesmos idealizados para o modelo estudado. Com o objetivo de verificar se a presença do entorno nos modelos de referência poderia prejudicar a classificação dos modelos propostos, foram comparados os modelos propostos e de referência com a mesma condição de entorno. Os resultados são apresentados na Figura 5.7 e Figura 5.8.

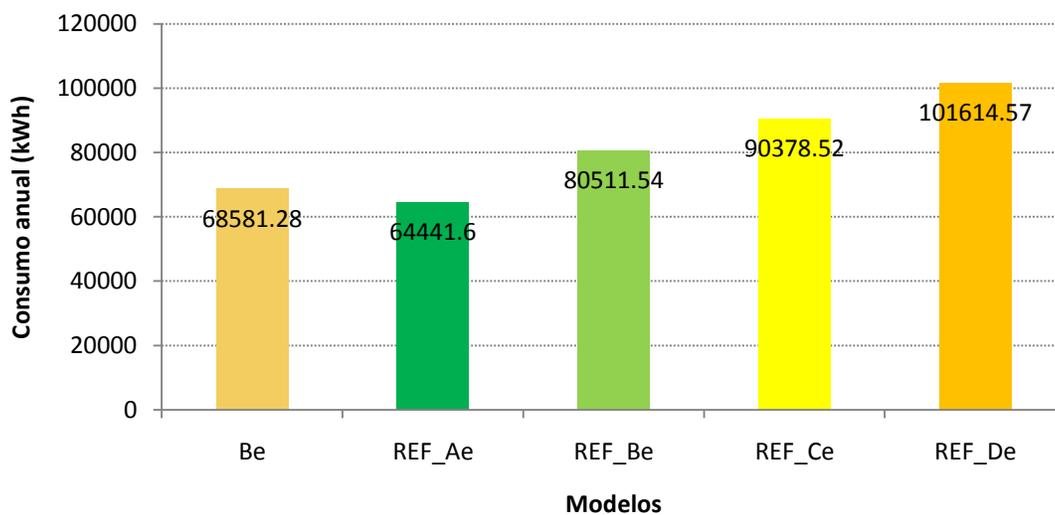


Figura 5.7 – Consumo total anual de energia elétrica do modelo estudado e modelos de referência com entorno a 10 m.

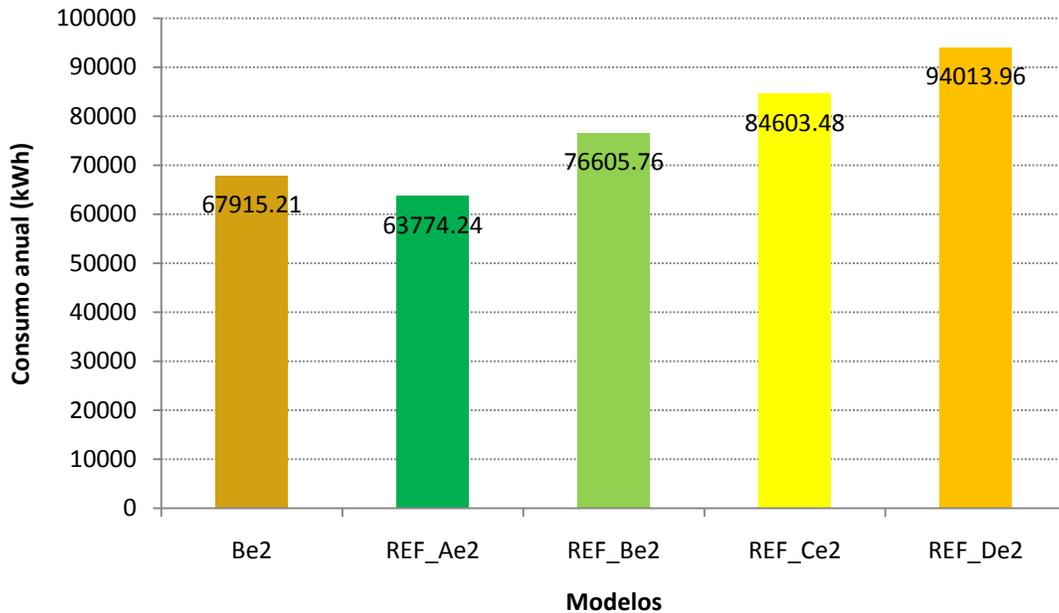


Figura 5.8 - Consumo total anual de energia elétrica do modelo estudado e modelos de referência com entorno a 5 m.

A simulação dos modelos de referência com sombreamento do entorno não alterou a classificação obtida pelo método do RTQ-C. À medida que as construções vizinhas se aproximam dos modelos de referência, a diferença de consumo entre os modelos de mesmo nível diminui, pois os modelos menos eficientes (como o C e o D) apresentam maior redução no consumo total quando comparados aos modelos mais eficientes (como o A e o B). Os modelos sem entorno (REF_A, REF_B, REF_C e REF_D) apresentam de 13% a 30% de diferença no consumo entre os níveis, com entorno a 10m (REF_Ae, REF_Be, REF_Ce e REF_De) de 12% a 25% e com entorno a 5m (REF_Ae2, REF_Be2, REF_Ce2 e REF_De2) de 11% a 20%.

Quando os modelos de referência com entorno são comparados aos seus respectivos modelos isolados, as diferenças de consumo ficam entre 2% e 3%, nos modelos do nível A, 6% e 10%, no nível B, 8% e 14% nos modelos do nível C e 9 e 16% nos

modelos do nível D. Partindo do princípio de que o consumo com iluminação e equipamentos é constante, pode-se afirmar que essa redução se deve pelo menor ganho de calor pelas aberturas, pois os modelos menos eficientes têm maior Percentual de Abertura na Fachada Total (PAFT).

A Figura 5.9 apresenta a comparação do consumo anual dos modelos com aproveitamento de luz diurna em diferentes entornos e dos modelos de referência isolados.

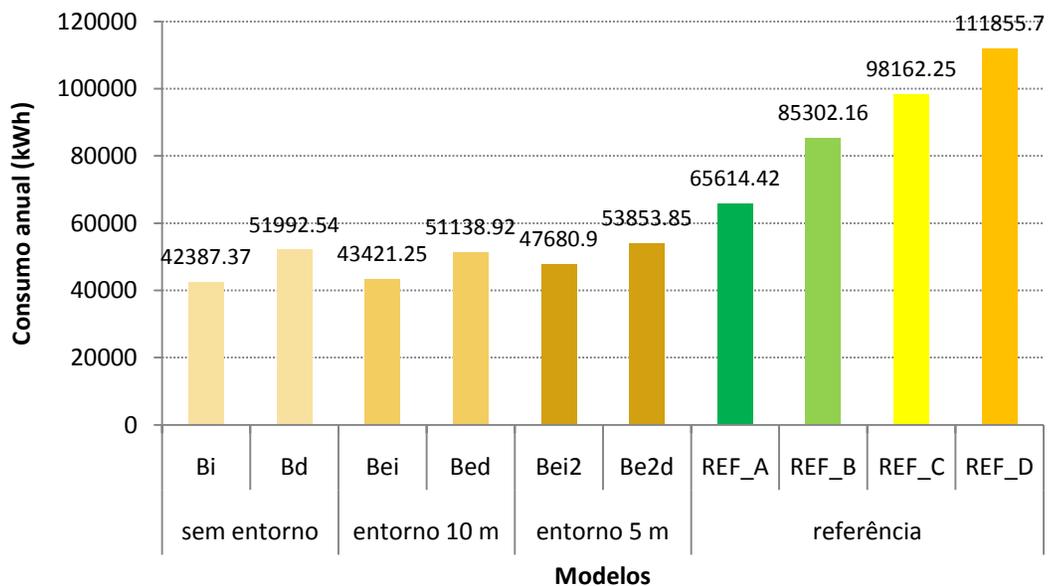


Figura 5.9 - Consumo total anual de energia elétrica dos modelos estudados em diferentes entornos com aproveitamento da luz natural e modelos de referência.

O aproveitamento da luz natural através do acionamento manual ou de *dimmers* faz com que o edifício possa melhorar seu nível de eficiência quando comparado aos modelos de referência. Dessa forma o edifício classificado como nível B, se utilizar a luz natural para diminuir o uso da luz artificial, pode obter nível de eficiência A, independente de estar sujeito ao sombreamento do entorno. O PAFT tem grande importância nesse

resultado, já que o PAft do modelo estudado é muito próximo do PAft do modelo de referência A, 19% e 17%, respectivamente.

A dinâmica do sombreamento do entorno foi representada para os solstícios de verão e inverno e equinócio de primavera para as duas configurações de entorno estudadas durante o período de ocupação (Figura 5.10 à Figura 5.15). Com isso foi possível verificar que o solstício de inverno é o período em que o edifício analisado é sombreado pelas construções vizinhas durante o período de sua ocupação.

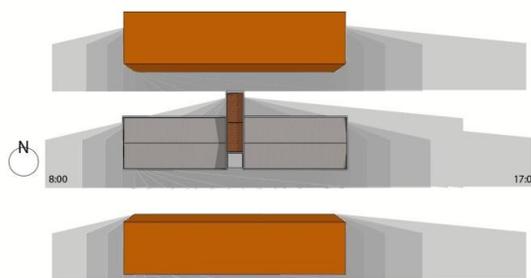


Figura 5.10 - Projeção da sombra dos edifícios com afastamento de 10m das 8:00 às 17:00 durante o equinócio de primavera - 23 de setembro.

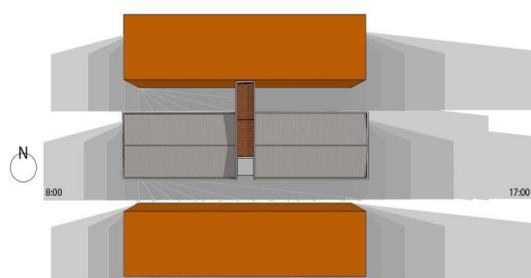


Figura 5.13 - Projeção da sombra dos edifícios com afastamento de 5m das 8:00 às 17:00 durante o equinócio de primavera- 23 de setembro.

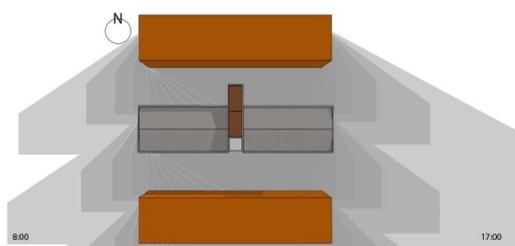


Figura 5.11 - Projeção da sombra dos edifícios com afastamento de 10m das 8:00 às 17:00 durante o solstício de inverno - 21 de junho.

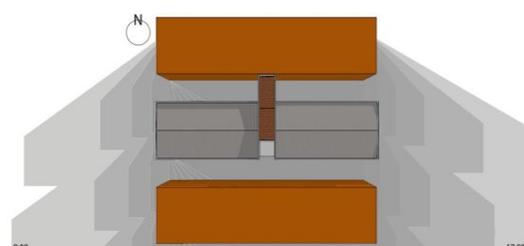


Figura 5.14 - Projeção da sombra dos edifícios com afastamento de 5m das 8:00 às 17:00 durante o solstício de inverno - 21 de junho.

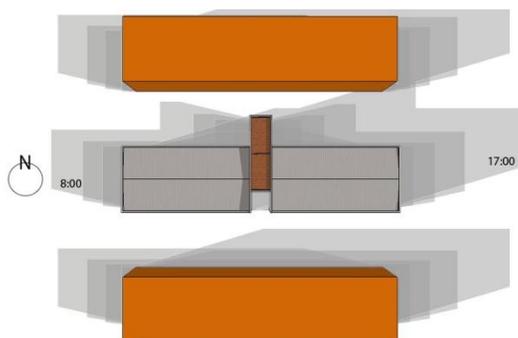


Figura 5.12 - Projeção da sombra dos edifícios com afastamento de 10m das 8:00 às 17:00 durante o solstício de verão - 22 de dezembro.

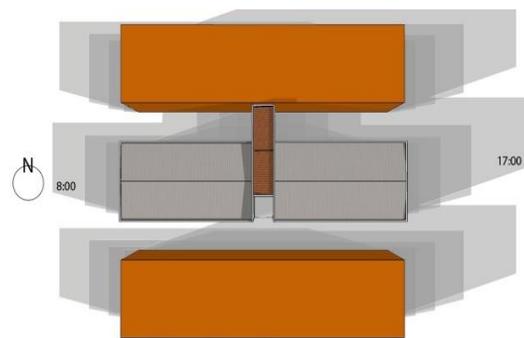


Figura 5.15 - Projeção da sombra dos edifícios com afastamento de 5m das 8:00 às 17:00 durante o solstício de verão - 22 de dezembro.

O consumo anual dos modelos com aproveitamento da luz natural através de acionamento da luz elétrica por interruptor e controle por *dimmers* são apresentados da Figura 5.16 à Figura 5.21. Os dados de consumo total, de iluminação e resfriamento de cada modelo são comparados, no mesmo gráfico, com os consumos do modelo cuja iluminação artificial permanece acesa durante todo o período de ocupação. As linhas tracejadas correspondem aos modelos sem aproveitamento da luz diurna (B, Be e Be2), a linha contínua representa os modelos que utilizam sistema de iluminação acionado por interruptor (Bi, Bei, Be2i), ou sistema controlado por *dimmers* (Bd, Bed, Be2d).

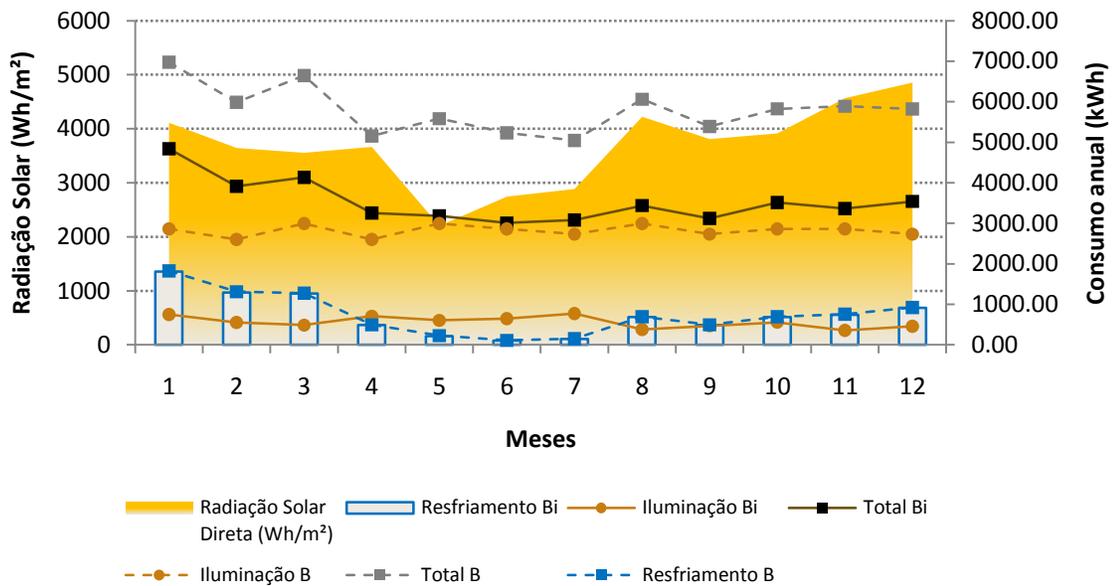


Figura 5.16 - Radiação solar direta, consumo total, com resfriamento e com iluminação do modelo isolado com interruptor comparado ao modelo sem aproveitamento da luz diurna.

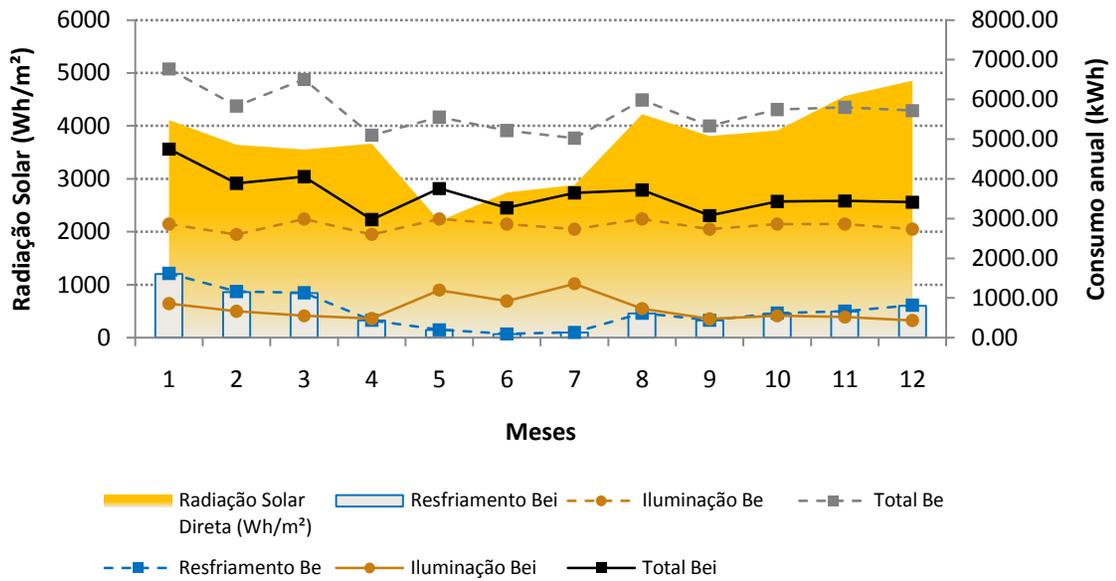


Figura 5.17 - Radiação solar direta, consumos total, com resfriamento e com iluminação do modelo com entorno a 10 m com interruptor comparado ao modelo sem aproveitamento da luz diurna.

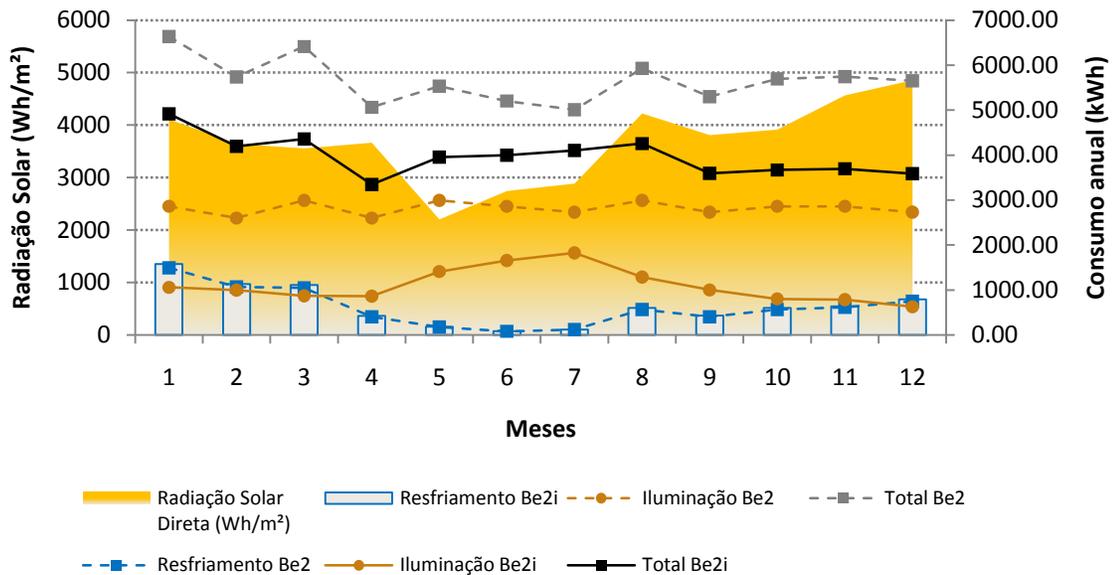


Figura 5.18 - Radiação solar direta, consumos total, com resfriamento e com iluminação do modelo com entorno a 5 m com interruptor comparado ao modelo sem aproveitamento da luz diurna.

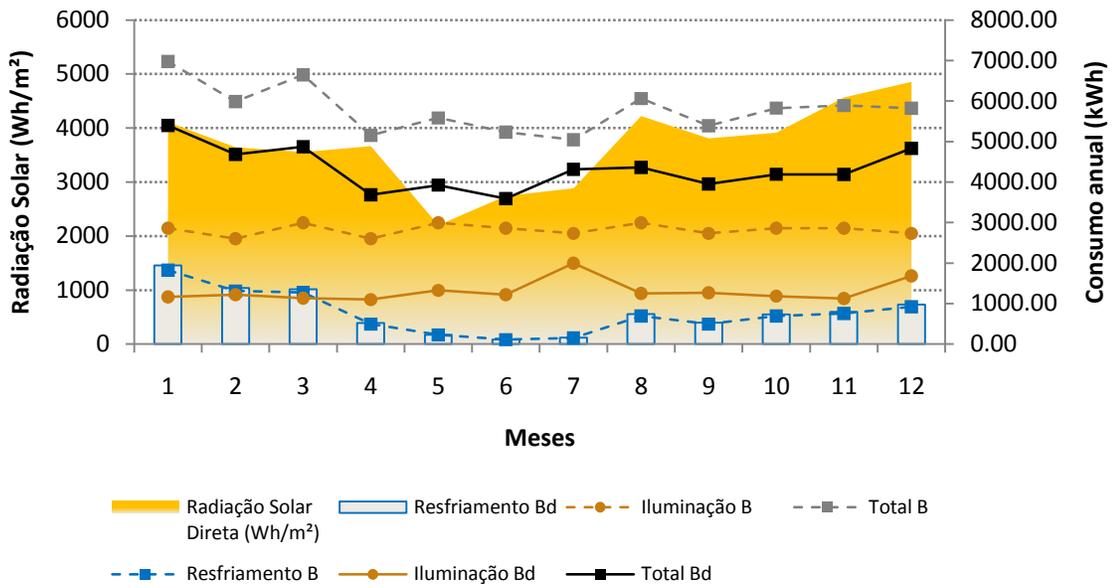


Figura 5.19 - Radiação solar direta, consumos total, com resfriamento e com iluminação do modelo isolado com *dimmers* comparado ao modelo sem aproveitamento da luz diurna.

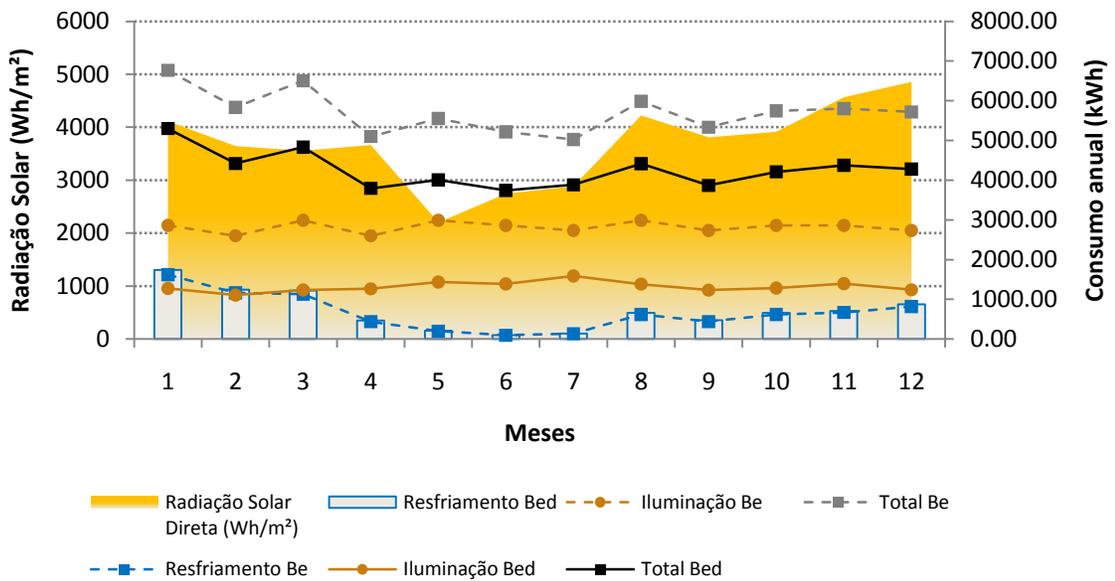


Figura 5.20 - Radiação solar direta, consumos total, com resfriamento e com iluminação do modelo com entorno a 10 m com *dimmers* comparado ao modelo sem aproveitamento da luz diurna.

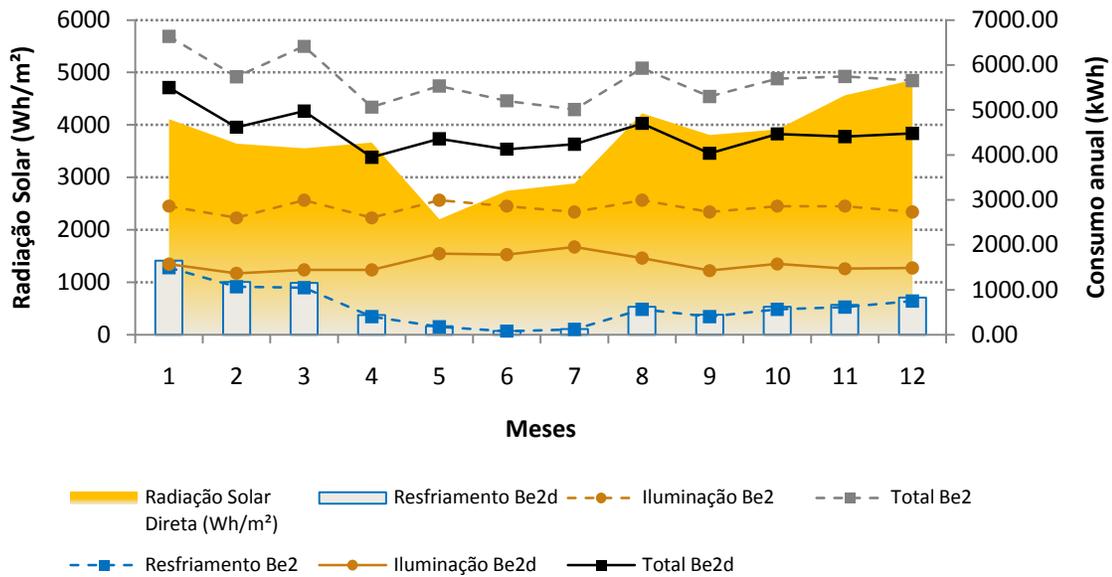


Figura 5.21 - Radiação solar direta, consumos total, com resfriamento e com iluminação do modelo com entorno a 5 m com *dimmers* comparado ao modelo sem aproveitamento da luz diurna.

É notável em todos os gráficos a diferença entre os consumos com iluminação, o suficiente para reduzir significativamente o consumo total. Já o consumo com resfriamento apresenta comportamento semelhante nos modelos com e sem aproveitamento da luz diurna ao longo do ano.

A curva do consumo anual de iluminação dos modelos que utilizam a luz natural apresenta comportamento semelhante para as três condições de entorno: nos meses em que a radiação solar direta é menor (entre os meses de Maio e Julho) este consumo aumenta, como é possível verificar na Figura 5.22 para os modelos com uso de interruptor e na Figura 5.23 para os modelos com *dimmers*. Entretanto, a diferença no gasto de energia pelo sistema de iluminação entre os modelos com interruptor em diferentes entornos é maior do que os modelos com *dimmers*, que já apresentam um maior consumo com iluminação (pois os usuários do sistema são passivos, fazendo com que as luzes permaneçam acesas durante quase todo o

horário de ocupação). Sendo assim, o sistema simulado com *dimmers* resultou em pequenas, entretando ainda notáveis variações em resposta ao sombreamento pelas construções vizinhas.

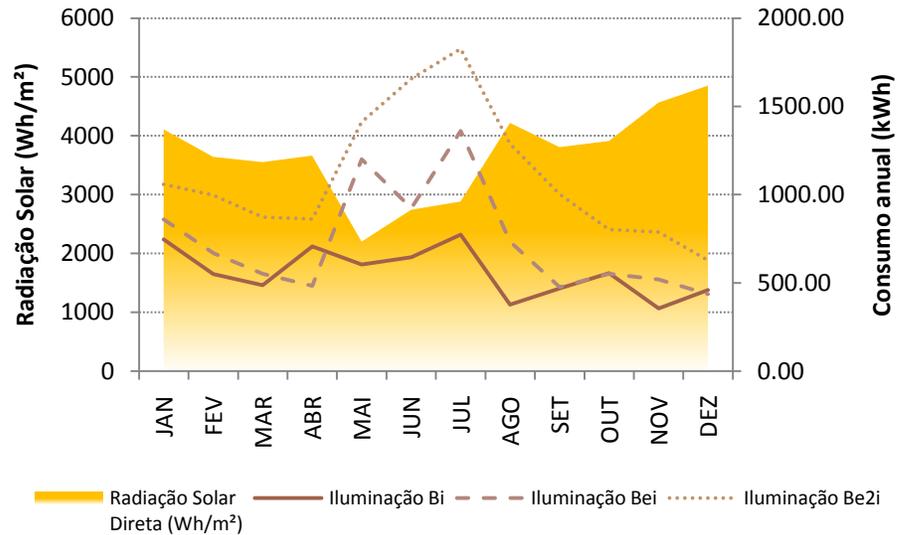


Figura 5.22 – Radiação solar direta e consumo com iluminação do modelo com interruptor nos três cenários simulados.

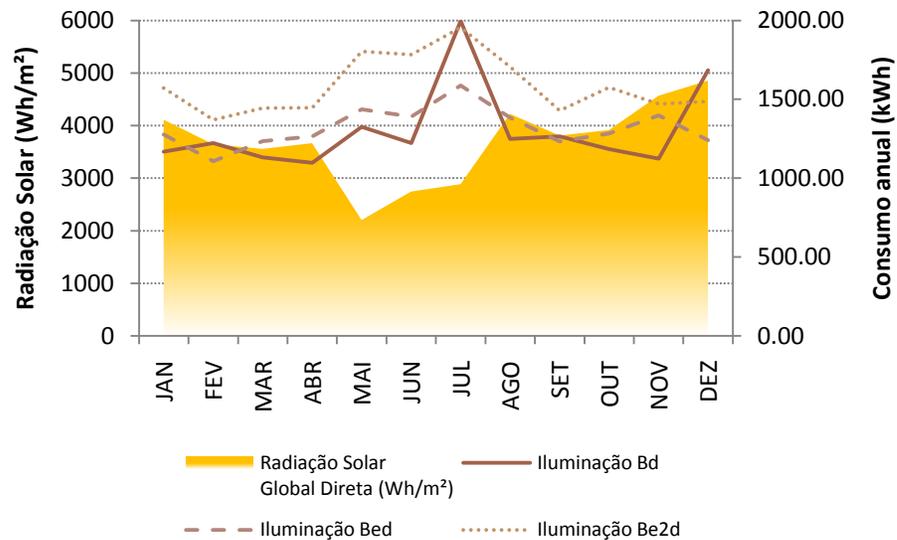


Figura 5.23 – Radiação solar direta e consumo com iluminação do modelo com *dimmers* nos três cenários simulados.

A modelagem do entorno nos modelos de referência não impediu que o edifício proposto com aproveitando a luz natural e na de presença de construções vizinhas atingisse o nível A. Foram comparadas as mesmas situações de entorno para os modelos propostos e os modelos de referência (Figura 5.24 e Figura 5.25).

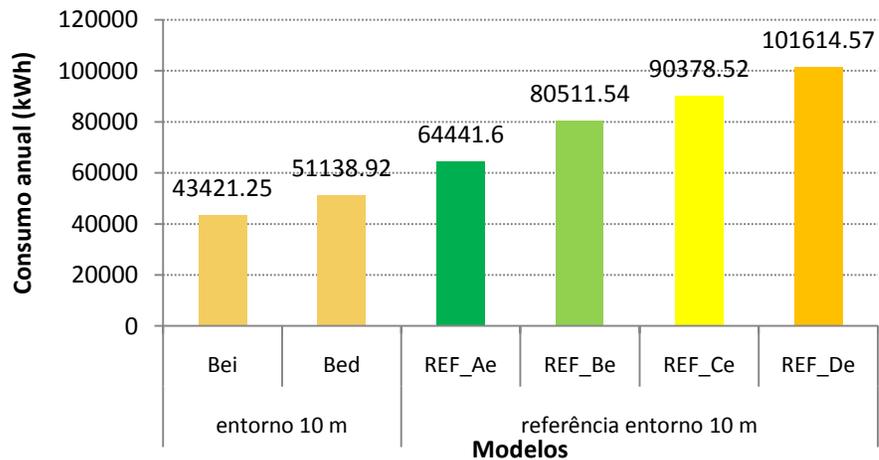


Figura 5.24 - Consumo total de energia elétrica pelos modelos com aproveitamento da luz diurna e modelos de referência com entorno a 10 m.

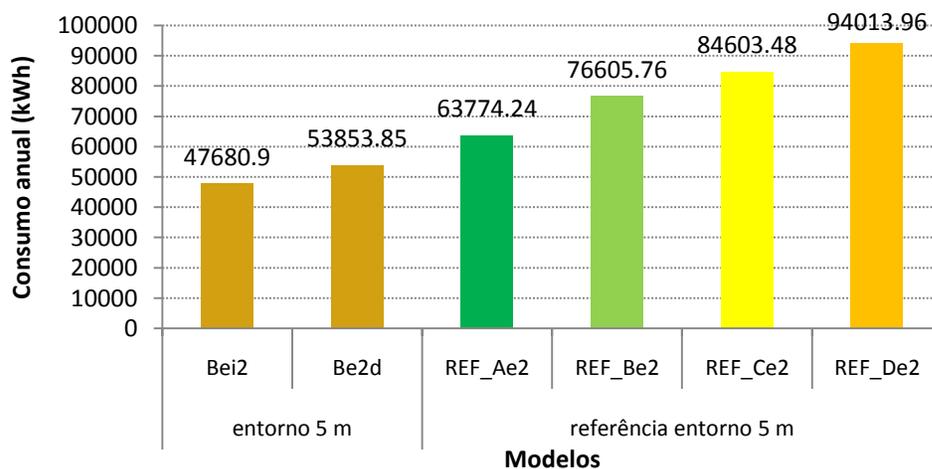


Figura 5.25 - Consumo total de energia elétrica pelos modelos com aproveitamento da luz diurna e modelos de referência com entorno a 5 m.

Sobre o potencial de aproveitamento da luz diurna, a Figura 5.26 apresenta o fator Autonomia de luz diurna (*Daylight Autonomy – DA*). Este fator corresponde ao percentual de horas no ano em que o ambiente (na figura são apresentados os modelos) atinge o nível mínimo de iluminância requerido (no caso, 500 lux) sem necessidade de utilizar iluminação artificial.

No Apêndice D são apresentados os valores horários de iluminância encontrados na zona 5 (piso intermediário), no Ponto 12 (mais distante das aberturas e aproximadamente no meio da zona) durante o horário de ocupação (entre 8h e 17h) em dias típicos: solstícios de verão e inverno e equinócios de primavera e outono.

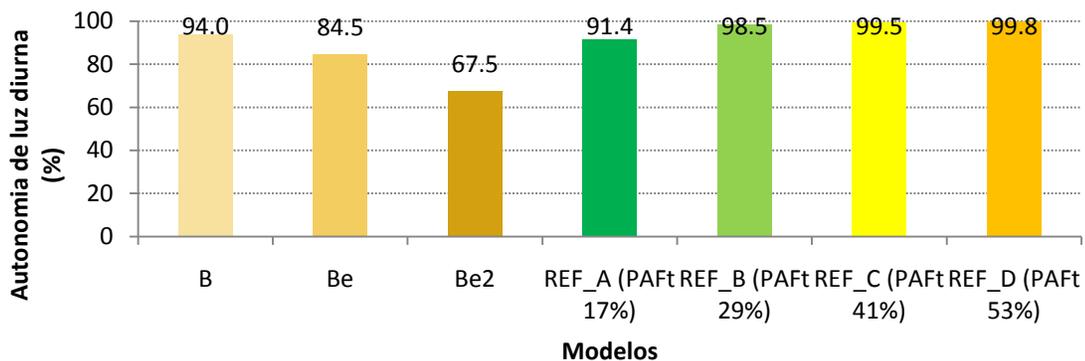


Figura 5.26 - Valores médios de autonomia de luz diurna (DA) por modelo.

Como esperado, quanto maior o PAFt, maior o potencial de aproveitamento da iluminação natural. Neste gráfico é possível notar a semelhança de DA entre o modelo estudado (B) e o de referência do nível A, por terem valores de PAFt muito próximos. Entretanto, a obtenção de valores elevados de DA foi possível porque o controle de ofuscamento não foi incluído nas simulações, caso contrário, esses seriam menos expressivos.

Na Figura 5.27 o parâmetro DA é analisado por zona do modelo estudado nas três condições de entorno e dos modelos de referência isolados.

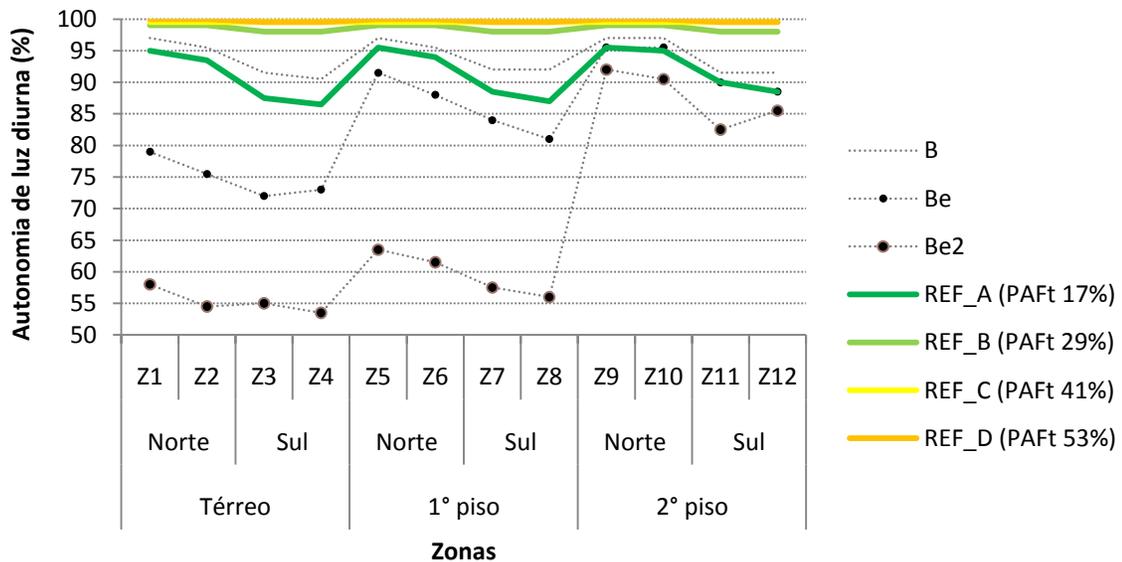


Figura 5.27 - Valores médios de autonomia de luz diurna (DA) por zona dos modelos.

As zonas foram agrupadas por orientação e por pavimento. As zonas voltadas para Norte (1, 2, 5, 6, 9 e 10) têm maior potencial para aproveitamento da luz. Enquanto que, de maneira geral, as zonas localizadas no último pavimento (9 a 12) apresentam maior autonomia, pelo fato das construções vizinhas apresentarem a mesma altura do modelo analisado.

Mais uma vez aqui é possível verificar a semelhança no desempenho luminoso entre o modelo estudado sem entorno (B) e o modelo de referência do nível A. Os valores de DA para os modelos B (sem entorno) e de referência A são muito próximos por apresentarem valores semelhantes de PAFt. Nota-se uma queda no valor de DA à medida que a distância das construções vizinhas diminui.

O consumo de energia pelo sistema de iluminação das zonas com aberturas voltadas a Norte e Sul não apresentam diferenças significativas, como é possível verificar na Figura 5.28. Entretanto, o consumo do sistema de condicionamento de ar com resfriamento é maior nas zonas voltadas a Norte (Figura 5.29).

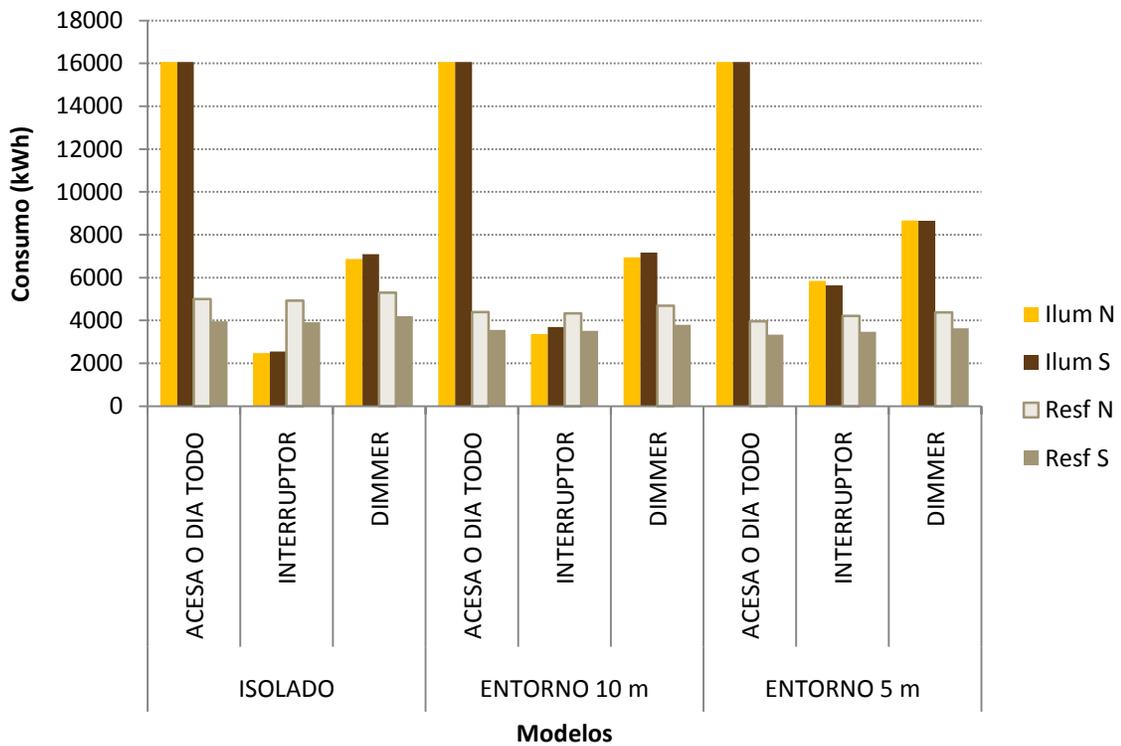


Figura 5.28 - Uso final de energia elétrica e orientação solar das zonas.

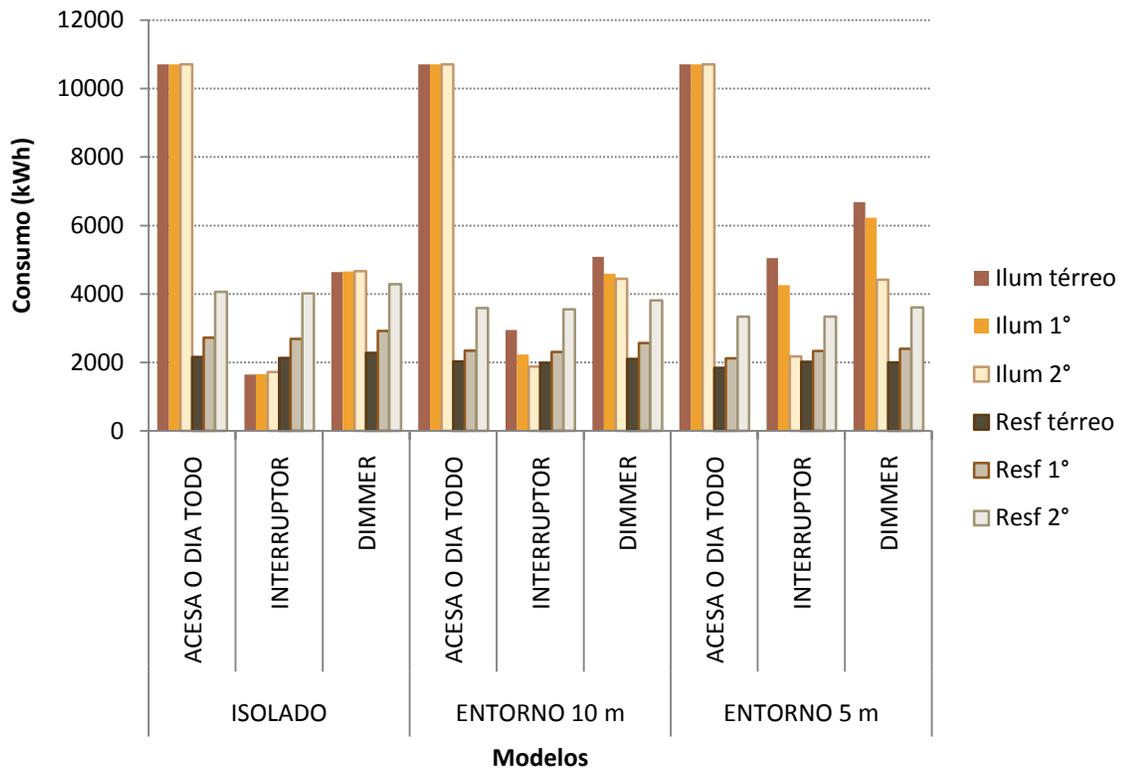


Figura 5.29 - Uso final de energia por pavimento.

Ao observar o consumo dos sistemas por pavimento (Figura 5.30), nota-se que o último pavimento, consome menos energia com iluminação, ao contrário dos equipamentos condicionadores de ar para resfriamento. Somando o consumo de iluminação com o de resfriamento essa diferença torna-se mais nítida.

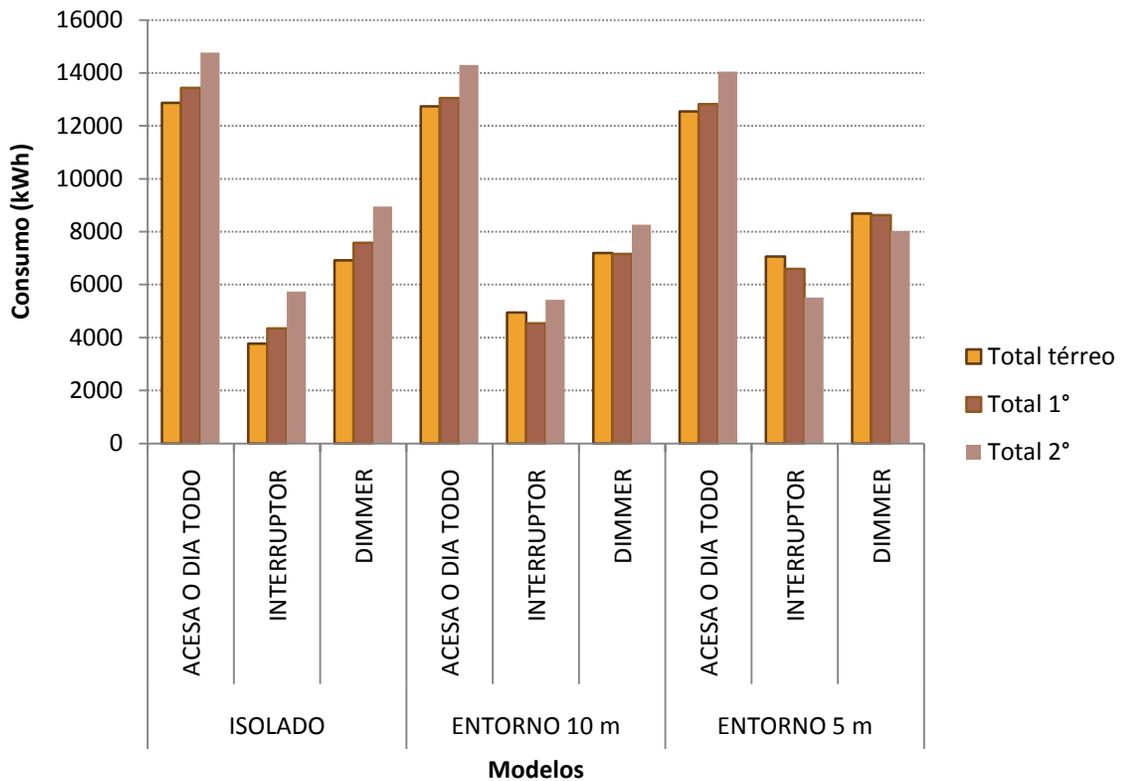


Figura 5.30 - Consumo com iluminação e condicionamento de ar por pavimento.

Os modelos cujo sistema permanece ligado durante todo período de ocupação apresentam maiores valores de consumo com iluminação. O modelo sem obstruções com operação do sistema por interruptor apresentou menor consumo com iluminação do que o modelo com sistema acionado por fotosensores e controlado por *dimmers* já que este último é operado por usuários passivos e as luzes permanecem acesas durante quase todo horário de ocupação.

A redução no consumo de energia elétrica foi acompanhada pela variação das condições de conforto, conforme ilustra a Figura 5.31. Segundo a ASHRAE 55, o intervalo de conforto compreende a faixa de -0,5 a +0,5 na escala de sensação térmica do Método PMV/PPD de Fanger.

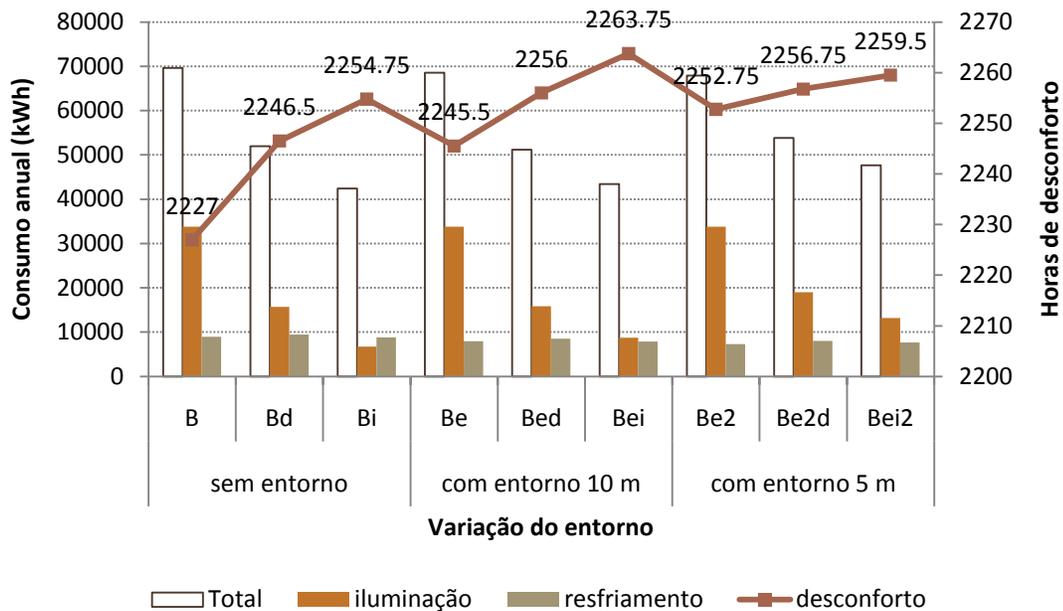


Figura 5.31 - Consumo de energia elétrica e horas de desconforto anual.

A melhor condição de conforto encontrada foi a do modelo isolado, sem aproveitamento da luz natural, que apresentou o menor número de horas de desconforto ao longo do ano. Enquanto que a pior situação foi a do modelo com entorno a 10 m e utilização de interruptor. Os modelos com aproveitamento da luz natural, que obtiveram nível A de eficiência energética, apresentaram menor consumo total, entretanto, apresentaram também maior número de horas de desconforto anual. Quando comparados os modelos em diferentes condições de entorno, nota-se um aumento nas horas de desconforto conforme a distância das construções vizinhas diminui.

A variação das horas de desconforto é semelhante quando os cenários são agrupados e os diferentes sistemas de iluminação são comparados. As horas de desconforto são maiores nos modelos que utilizam acionamento manual da iluminação artificial e diminuem nos modelos que não aproveitam a contribuição da luz natural. Esse comportamento se deve principalmente

pelo ganho de calor proporcionado pelo sistema de iluminação, ilustrado na Figura 5.32, considerando somente as 12 zonas ocupadas.

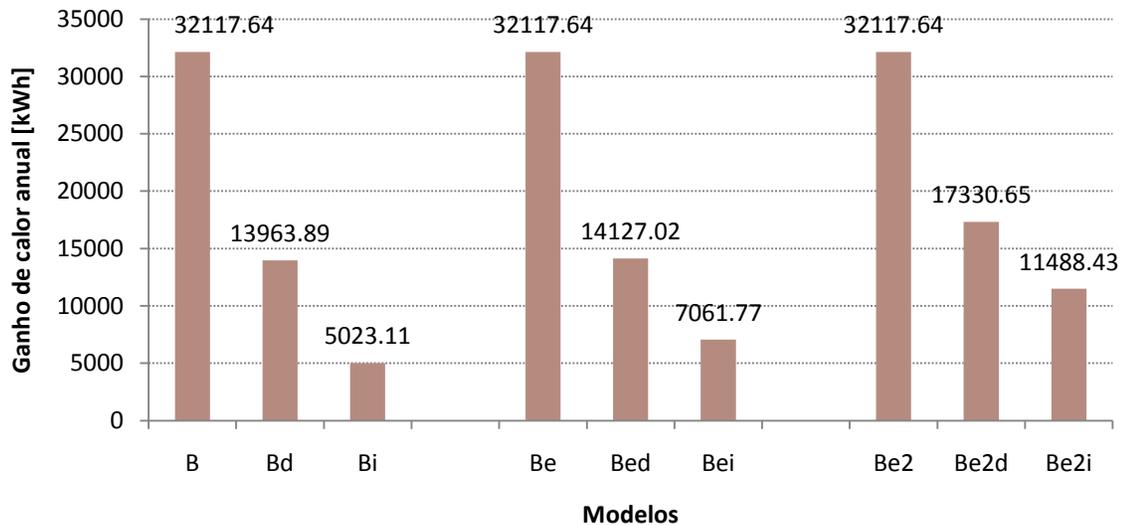


Figura 5.32 - Ganho de calor anual pelos sistemas de iluminação dos modelos isolados.

O desconforto dos usuários é basicamente pelo frio nos meses de inverno, como é possível verificar da Figura 5.33 à Figura 5.35, já que o isolamento da vestimenta foi mantida constante ao longo do ano e pelo fato do sistema de condicionamento de ar não desempenhar a função de aquecimento. Quanto mais próximas as construções vizinhas, maior o sombreamento e maior o desconforto pelo frio, mensurado pelo Método de Fanger. Os modelos foram agrupados por tipo de entorno e os índices obtidos são apresentados a seguir.

Na Figura 5.33 estão os resultados dos modelos sem aproveitamento da luz natural (B, Be e Be2). A Figura 5.34 apresenta os modelos com sistema de iluminação acionado por

interruptores (Bi, Bei e Be2i) e a Figura 5.35 os modelos com sistema de iluminação controlado por *dimmers*.

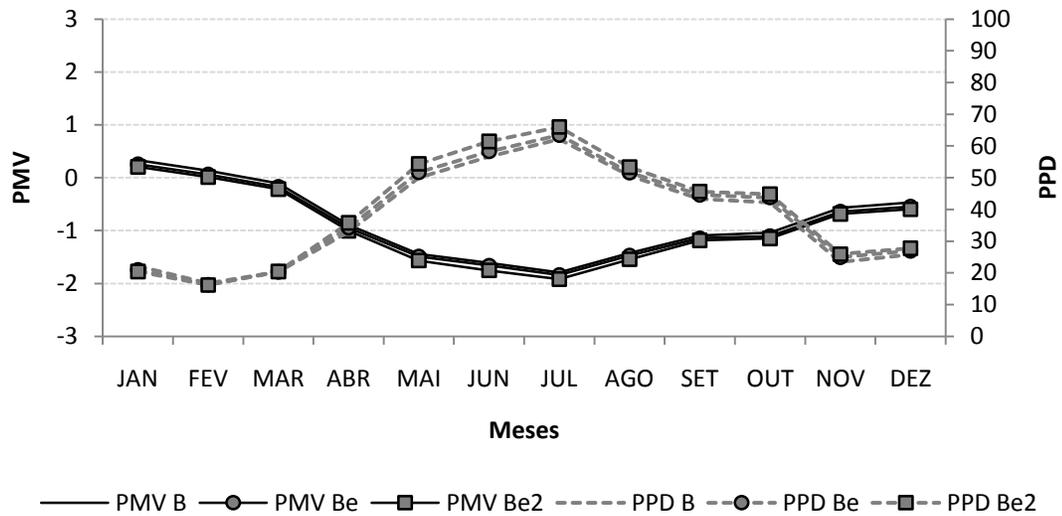


Figura 5.33 - PMV e PPD para os modelos B, Be e Be2.

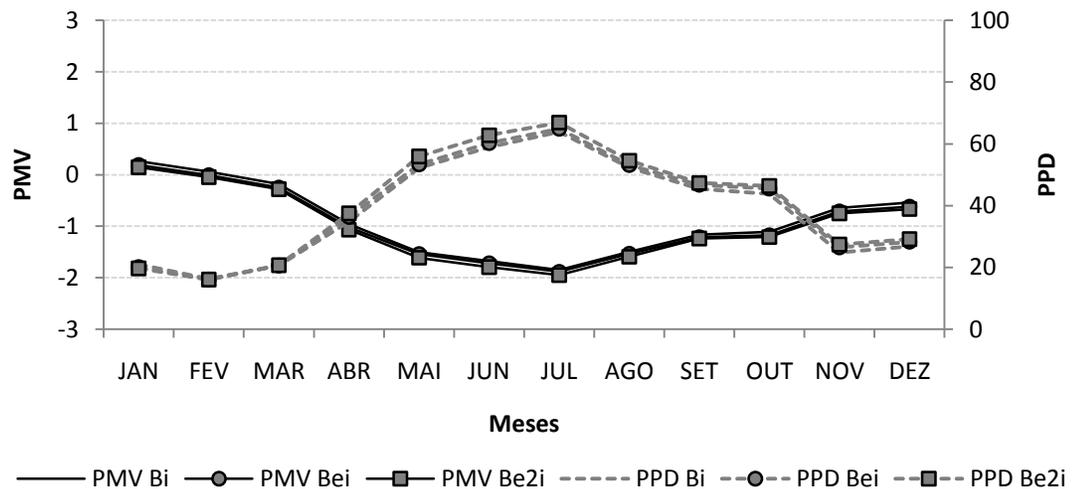


Figura 5.34 - PMV e PPD para os modelos Bi, Bei e Be2i.

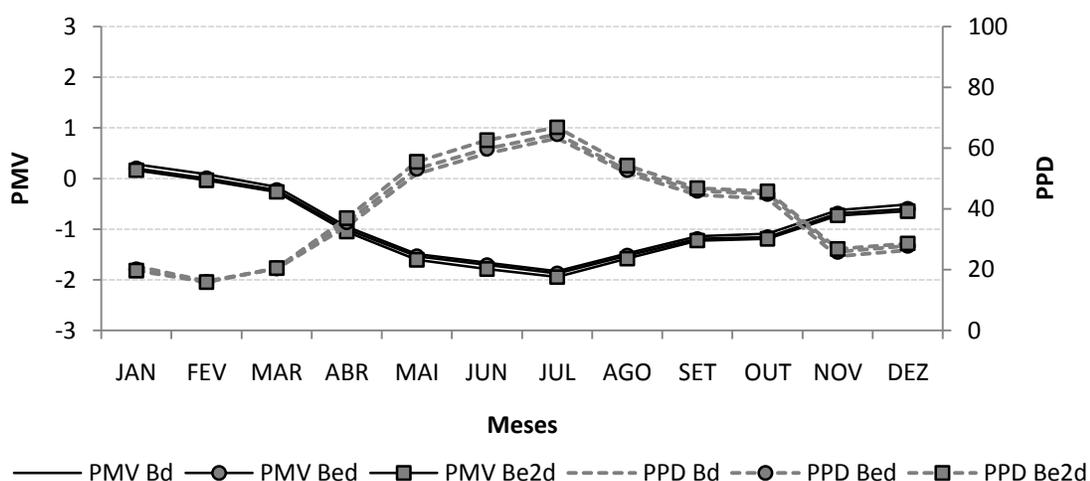


Figura 5.35 - PMV e PPD para os modelos Be, Bed e Be2d.

Os valores mensais de PMV obtidos nos modelos são descritos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores médios de Voto Médio Estimado (PMV) para os modelos analisados.

	B	Be	Be2	Bi	Bei	Be2i	Bd	Bed	Be2d
JAN	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2
FEV	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
MAR	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
ABR	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-0.9	-1.0	-1.0
MAI	-1.4	-1.5	-1.6	-1.5	-1.5	-1.6	-1.5	-1.5	-1.6
JUN	-1.6	-1.7	-1.8	-1.7	-1.7	-1.8	-1.7	-1.7	-1.8
JUL	-1.8	-1.8	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.8	-1.9	-1.9
AGO	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.6	-1.5	-1.5	-1.6
SET	-1.1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.1	-1.2	-1.2
OUT	-1.0	-1.1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.2	-1.1	-1.2	-1.2
NOV	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.7	-0.7
DEZ	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6
Mín	-1.79	-1.84	-1.92	-1.85	-1.88	-1.95	-1.83	-1.87	-1.95

Observando os valores mínimos de PMV para cada modelo, é possível notar o ligeiro aumento de desconforto por frio à medida que as construções vizinhas se aproximam do modelo analisado.

6 Conclusões

O método de simulação para avaliar a eficiência energética das edificações é o que melhor representa bem o desempenho destas por permitir analisar seus potenciais de conservação de energia, além de viabilizar o estudo de estratégias passivas e conforto. A integração entre programas de simulação específicos (termoenergética, de iluminação e ventilação, por exemplo) permite maior precisão dos resultados. Entretanto, no Brasil, este método ainda apresenta algumas limitações, como a capacidade técnica de profissionais e a disponibilidade de dados climáticos locais.

O trabalho tinha como objetivo avaliar a influência do sombreamento do entorno na etiqueta de eficiência energética de um edifício comercial. Para isso foram simulados três casos de disposição do entorno (sem entorno e construções vizinhas distantes 10 e 5 metros das fachadas Norte e Sul) e três sistemas de uso e operação do sistema de iluminação artificial (sistema ligado durante todo período de ocupação, luzes acionadas manualmente pelos usuários e sistema ativado por sensores e controlado por *dimmers*).

Nas situações analisadas o sombreamento do entorno contribuiu para a redução do consumo de energia dos modelos, porém, não o bastante para elevar seu nível de eficiência energética. Já o uso conjunto da iluminação artificial e da natural levou a reduções significativas no consumo total, resultando num melhor nível de eficiência energética sem, no entanto, acarretar em grandes ganhos de calor.

Em trabalhos anteriores, como os apresentados na Contextualização, os edifícios implantados em áreas adensadas apresentam maior consumo de energia devido ao uso intensivo do sistema de condicionamento de ar decorrente do aumento da temperatura do ar nessas áreas (efeito de ilhas de calor). Nesse estudo, especificamente, o sombreamento do entorno contribuiu para a redução do uso desse sistema em todos os modelos analisados. Além disso, os resultados obtidos confirmam a relevância das variáveis relacionadas à radiação solar (como área e tempo de exposição da envoltória e suas propriedades, sombreamento da edificação, porcentagem de abertura na fachada e a orientação dessas aberturas) sobre o desempenho energético da edificação.

Para a classificação da eficiência energética deste caso particular de edificação e localidade pelo método de simulação, o aproveitamento da luz natural mostrou ser uma estratégia que pode contribuir muito com a redução do consumo de energia. Os resultados servem como incentivo para que os projetos candidatos à etiqueta de eficiência energética sejam projetados utilizando estratégias passivas que possam melhorar o nível de eficiência e ainda manter o conforto térmico dos usuários.

Nas simulações termoenergéticas o isolamento da vestimenta dos usuários foi mantido constante para o ano todo e o sistema de condicionamento não desempenhava a função de aquecimento, o que levou ao desconforto por frio nos meses de inverno. A disponibilidade de dados climáticos mais recentes contribuiria para uma avaliação mais próxima à realidade.

Foram analisadas somente as orientações das aberturas a norte e sul por representarem situações opostas quanto ao tempo de exposição à insolação ao longo do dia, onde a fachada norte está sujeita a um maior tempo do que a fachada sul.

O sistema de iluminação com *dimmers* não era equipado com sensores de presença e os usuários eram passivos, o que significa que as luzes ficavam acesas na maior parte do tempo

de ocupação. Ainda assim, a redução no consumo de energia com esse sistema possibilitou a melhoria no nível de eficiência energética.

Possíveis desdobramentos deste trabalho: considerar a ventilação natural para retirar a carga térmica dos ambientes, simular o desempenho termoenergético do edifício inserido em uma área maior para representar com maior precisão os fenômenos da escala urbana. Em particular, o conforto térmico pode ser estudado em maior detalhe diferenciando o isolamento da vestimenta ao longo do ano. Também seria interessante um estudo complementar do consumo do sistema de iluminação de ambientes com aberturas voltadas a leste e oeste, que são sujeitas a situações opostas de insolação ao longo do dia.

Mediante o expressivo potencial de economia de energia encontrado no caso estudado nesta pesquisa, a partir do aproveitamento da iluminação natural, sugere-se também como possível desdobramento o estudo para a inclusão de um termo à equação do método prescritivo de avaliação da eficiência energética que considere a luz natural e o sombreamento causado por edificações vizinhas.



Referências Bibliográficas

ABC. *Australian Building Codes Board*. Disponível: **site ABCB**. URL: <<http://www.abcb.gov.au/en/about-the-australian-building-codes-board>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 90.1-1999**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta: 1999.

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

_____. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta: 2009.

_____. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **Standard 55-2004**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15215-4**: Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição. Rio de Janeiro : 2004.

_____. **NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações, Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro : 2008a.

_____. **NBR 15220-3**: Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro : 2005.

_____. **NBR 16401-1**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro : 2008b.

_____. **NBR 5413**: Iluminância de interiores. Rio de Janeiro : 1992.

ASIMAKOPOULOS, D. N.; ASSIMAKOPOULOS, V. D.; CHRISOMALLIDOU, N.; KLITSIKAS, N; MANGOLD, D.; MICHEL, P.; SANTAMOURIS, M.; TSANGRASSOULIS, A. **Energy and climate in the urban built environment**. London: James & James, 2001. 402p., il.

BAKER, N. (autor); STEEMERS, K. (co-autor). **Energy and environment in architecture: a technical design guide**. London, New York : Spon, 2000. 224 p.

BARBOSA, M. J.; WEILLER, G. C. B. Influência das variáveis de entorno no desempenho térmico das habitações de interesse social (HIS). In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 12, 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2008. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>> Acesso em 20 jan. 2012.

BECP. *Building Energy Codes Program*. Disponível em: **site BECP**. URL: <<http://www.energycodes.gov/about/>>. Acesso em 11 jan. 2012.

BRASIL. Decreto nº4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei nº10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 19 dez. 2001a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/D4059.htm>. Acesso em 20 jan. 2012.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2010: Ano base 2009**. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2010a. 276 p. : 180 il. ; 23 cm. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em 29 jul. 2011.

_____. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria 372, de 17 de setembro de 2010**. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro : 2010b. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001599.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2011.

_____. Lei nº10.295, de 18 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. **Diário Oficial**, Brasília, 17 out.

2001b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm> Acesso em 20 jan. 2012.

_____. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução nº 176**. 2000. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/176_00re.htm> Acesso em 22 fev. 2011.

_____. Ministério de Minas e Energia. Disponível: **site MME**. URL: <http://www.mme.gov.br/mme/noticias/destaque_foto/destaque_162.html>. Acesso em 10 jan. 2012

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. Urban climate and its influence on energy consumption – A case study in two brazilian cities. In: International Building Performance Simulation Association Conference, 7, 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2001. p. 167-174.

CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. **Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação**. Ambiente Construído, v. 10, n. 2, p. 27-40, 2010. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/11791/8451>>. Acesso em 18 out. 2010.

CARLO, J.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. The use of computer simulation to establish energy efficiency parameters for a building code of a city in Brazil. In: International Building Performance Simulation Association Conference, 8, 2003, Eindhoven. **Anais...** Eindhoven, 2003. p. 131-138.

CARLO, J. C.; PEREIRA, F. O. R.; LAMBERTS, R. Iluminação Natural para Redução do Consumo de Energia de Edificações de Escritório Aplicando Propostas de Eficiência Energética para o Código de Obras do Recife. In: Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, 1, e Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 10, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.labcon.ufsc.br/publicacoes/16.pdf>>. Acesso em 28 jan. 2011.

CASTRO, A. P. de A. S. **Desempenho térmico de vidros utilizados na construção civil: estudo em células-teste**. 2006. 239f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo / Unicamp, Campinas, 2006. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000410444>> Acesso em 1 fev. 2011.

CASTRO, L. T de; WESTPHAL, F. S. Etiqueta Nacional de Conservação de Energia: comparativo entre o método prescritivo e simulação para análise de desempenho da envoltória. In: Encontro

Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 11 e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 7, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios, 2011.

CLARKE, J. A. **Energy simulation in building design**. Oxford: Butterworth Heinemann, 2002. 362p. :il.

DIDONÉ, E. L., **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**. 2009. 179f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – UFSC/Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PARQ0099-D.pdf>> Acesso em 25 mar. 2010.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. O potencial da luz natural na economia de energia elétrica para a iluminação artificial. **Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA 2009**. Maringá, p. 24-34, 2009. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/viewPDFInterstitial/8708/5168>>. Acesso em 24 mar. 2010.

DOE – U.S. Department of Energy. **EnergyPlus**. Versão 6.0. DOE: 2011. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em 23 jan. 2012.

DOE – U.S. Department of Energy. **EnergyPlus Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations**. DOE: 2011. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>>. Acesso em 23 jan. 2012.

DORNELLES, K. A. Absortância solar de superfícies opacas: base de dados de tintas látex acrílica e PVA e a influência da rugosidade superficial. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 10, e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 6, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009. p. 612-621.

ELETROBRAS. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética do Brasil - Sumário Executivo. Ano Base 2005**. Rio de Janeiro: ELETROBRAS; PROCEL, 2009. 77 p. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B99EBBA5C-2EA1-4AEC-8AF2-5A751586DAF9%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>> Acesso em 13 set. 2011.

ENERGY STAR. Disponível: **site ENERGY STAR**. URL: <<http://www.energystar.gov>>. Acesso em 11 jan. 2012.

EUROPEAN UNION. **Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings**. Official Journal of the European Union. URL: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:001:0065:0071:EN:PDF>>. Acesso em 29 jan. 2012.

EUROPEAN UNION. **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings**. Official Journal of the European Union. URL: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF>>. Acesso em 29 jan. 2012.

FOSSATI, M.; LAMBERTS, R. **Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.10, n.2, p. 59-69, abr./jun. 2010. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/12180/8457>>. Acesso em 20 jan. 2012.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: J. Wiley, 1998. xiv, 464 p., ill., 29 cm. Includes bibliographical references and index. ISBN 0471291773 (Wiley : label on cover).

GOULART, S. V. G.; Lamberts, R.; Firmino, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras – 2. Ed.** – Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998. 345 p.: il.

Harvard University; National Research Council Canada; Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. **Daysim**. Versão 3.1. Harvard: 2010. Disponível em: <<http://www.daysim.com/index.html>>. Acesso em 23 jan. 2012.

IECC – The *International Energy Conservation Code*. Overview of the 2009 IECC. Disponível: **site IECC**. URL: <http://reca-codes.org/pages/current_code.html>. Acesso em 10 jan. 2012.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Tabelas de consumo/eficiência energética**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionador.pdf>>. Acesso em 24 jan. 2012.

ISO. International Organization for Standardization. **Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**; (ISO 7730). Suíça : 2005.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **site: LabEEE**. URL: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em 30 jan. 2012.

LEDER, S. M; PEREIRA, F. O. R. Ocupação urbana e disponibilidade de luz natural. **Revista Minerva**, São Carlos, v.5, n. 2, 2008, p. 129-138. Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2005\(02\)%2003.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2005(02)%2003.pdf)>. Acesso em: 25 ago. 2010.

LIMA, Glênio L. F. **Influência de variáveis arquitetônicas no desempenho energético de hotéis no clima quente e úmido da cidade de Natal/RN**. 2007. 162f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte/UFRN, Natal, 2007. Disponível em: <http://bdtd.bczm.ufrn.br/tesdesimplificado/tde_arquivos/22/TDE-2007-11-06T010746Z-893/Publico/GlenioLFL.pdf>. Acesso em 25 ago. 2010.

LOURA, R. M.; ASSIS, E. S. de; SOUZA, R. V. G. Analysis of EnergyPlus Daylighting Module results – A brazilian case. In: International Building Performance Simulation Association Conference, 11, 2009, Glasgow. **Anais...** Glasgow, 2009. p. 1699-1705.

MELO, A. P.; CÓSTOLA, D.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Avaliação comparativa entre o método prescritivo e o método de simulação para determinação do nível de eficiência da envoltória de edificações comerciais. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 11 e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 7, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios, 2011.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3.1**. UFSC. Florianópolis, Setembro de 2003. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Biblioteca_Materiais_VisualDOE.pdf>. Acesso em 20 jan. 2012.

RAMOS, G; GHISI, E. **Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus**. Ambiente Construído, v. 10, n. 2, p. 159-169, 2010. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/12354>>. Acesso em 23 jan. 2012.

RAMOS, G; LAMBERTS, R. Relatório técnico do método de avaliação do sistema de iluminação do RTQ-C. UFSC. Florianópolis. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/Relatorio_Illuminate_fin_al.pdf>. Acesso em 23 nov. 2011.

RATTI, C.; BAKER, N.; STEEMERS, K. **Energy consumption and urban texture**. Energy and Buildings, v. 37, n. 7, p. 762-776, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804003391>>. Acesso em 19 ago. 2010.

REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Harvard University, Cambridge, 2010. Disponível em: <<http://daysim.com/pub/Daysim3.0.Tutorial.pdf>>. Acesso em 20 jan. 2012.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z.. **Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design**. NRCC-48669. 2006. Disponível em: <<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc48669/nrcc48669.pdf>>. Acesso em 20 jan. 2012.

ROCHA, Eraldo F. da. **Análise da relação entre desempenho e implantação de edificações unifamiliares e o consumo de energia**. 2007. 91f. Dissertação (Mestrado em Ergonomia) - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Bauru, Bauru, 2007. Disponível em: <<http://www2.faac.unesp.br/posgraduacao/design/dissertacoes/pdf/eraldo.pdf>> Acesso em 25 mar. 2010.

SANTAMOURIS, Matheos. **Energy and climate in the urban built environment**. London: James & James, 2001. 402p., il.

SANTAMOURIS, M. Energy and indoor climate in urban environments - recent trends. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 4, 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: ANTAC, 1997. p.15-24. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em 18 nov. 2010.

WILLIAMSON, T.J.; ERELL, E.; SOEBARTO, V. Assessing the error from failure to account for urban microclimate in computer simulation of building energy performance. In: International Building Performance Simulation Association Conference, 11, 2009, Glasgow. **Anais...** Glasgow, 2009. p. 497-504.

YAMAKAWA, M. A.; WESTPHAL, F. S. Influência do percentual de abertura nas fachadas e do fator solar dos vidros na etiquetagem do PROCEL/Inmetro: método prescritivo x simulação. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 11 e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 7, 2011, Búzios. **Anais...** Búzios, 2011.

APÊNDICES

Apêndice A

Cálculos das propriedades térmicas dos componentes da envoltória do modelo estudado

▪ Transmitância térmica da cobertura tipo I

A cobertura do tipo I está sobre as áreas condicionadas e áreas não condicionadas. Um esquema da composição da cobertura é apresentado na Figura A.1 e as propriedades dos materiais são descritas na Tabela A.1.

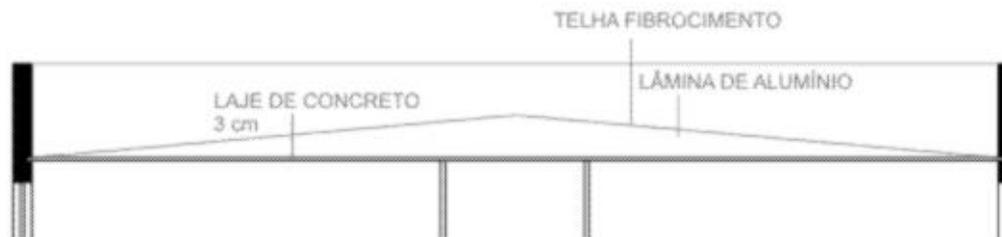


Figura A.1 – Composição da cobertura tipo I

Dados (Fonte: ABNT, 2008):

Resistência térmica da camada de ar não ventilada (R_{ar}) de 6,0 cm de espessura composta por superfície de baixa emissividade ($\epsilon < 0,2$), considerando-se fluxo de calor descendente = $0,61 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Resistência térmica superficial interna para fluxo de calor descendente = $0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Resistência térmica superficial externa para fluxo de calor descendente = $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Tabela A.1 – Propriedades térmicas dos materiais da cobertura TIPO I

Material	densidade (ρ)	espessura (e)	condutividade térmica (λ)	calor específico (c)
Telha fibrocimento	$2000 \text{ kg}/\text{m}^3$	0,7 cm	$0,95 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$0,84 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$
Laje de concreto	$2400 \text{ kg}/\text{m}^3$	3 cm	$1,75 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$1,00 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

$$R_{cob} = \frac{e}{\lambda} \text{fibrocimento} + R_{ar} + \frac{e}{\lambda} \text{concreto} = 0,70 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$R_{TOTAL} = R_{se} + R_{cob} + R_{si} = 0,91 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

$$U_{cob} = \frac{1}{R_{TOTAL}} = \frac{1,09 \text{ W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

▪ Transmitância térmica da cobertura tipo II

A cobertura do tipo II está sobre as áreas não condicionadas, cujo esquema é apresentado na Figura A.2 e as propriedades dos materiais são descritas na Tabela A.2Tabela 3.1.

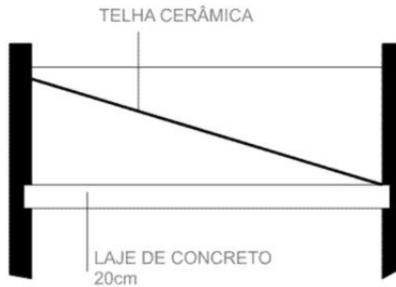


Figura A.2 – Composição da cobertura TIPO II.

Dados (Fonte: ABNT, 2008):

Resistência térmica da camada de ar não ventilada (R_{ar}) acima de 5,0 cm de espessura composta por superfície de alta emissividade ($\epsilon > 0,8$), considerando-se fluxo de calor descendente = $0,21 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Resistência térmica superficial interna para fluxo de calor descendente = $0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Resistência térmica superficial externa para fluxo de calor descendente = $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Tabela A.2 – Propriedades térmicas dos materiais da cobertura TIPO II

Material	densidade (ρ)	espessura (e)	condutividade térmica (λ)	calor específico (c)
Telha cerâmica	$1400 \text{ kg}/\text{m}^3$	1,0 cm	$0,90 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$0,92 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$
Laje de concreto	$2400 \text{ kg}/\text{m}^3$	20 cm	$1,75 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$	$1,00 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

$$R_{cob} = \frac{e}{\lambda} \text{cerâmica} + R_{ar} + \frac{e}{\lambda} \text{concreto} = 0,33 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$$

$$R_{TOTAL} = R_{se} + R_{cob} + R_{si} = 0,54 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$$

$$U_{cob} = \frac{1}{R_{TOTAL}} = \frac{1,83 \text{ W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Como as áreas não condicionadas apresentam diferentes tipos de cobertura, é necessário fazer uma ponderação das transmitâncias térmicas das duas coberturas pela área total de cobertura, como é demonstrado na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Ponderação da transmitância térmica da cobertura das áreas não condicionadas

U_{cob} (W/m ² K)	Área (m ²)	%	U_{cob} ponderado (W/m ² K)
1,09	54,74	0,62	0,70
1,83	33,74	0,38	0,70
Total	88,48	1,00	1,40

▪ **Componente equivalente das paredes externas**

As paredes externas são de blocos cerâmicos de dois furos (14,0 cm x 29,5 cm x 19,0 cm) com argamassa de assentamento de 1,0 cm de espessura e reboco de 2,5 cm de espessura. Para sua modelagem é necessário criar um material equivalente simplificado composto por camadas de argamassa, cerâmica e ar. A partir do cálculo da transmitância da parede de blocos, calcula-se a espessura da camada cerâmica e a densidade aparente do componente. A configuração da parede de blocos é demonstrada na Figura A.3, as propriedades térmicas dos materiais são descritos na Tabela A.4 e a configuração com componente é apresentado na Figura A.4:

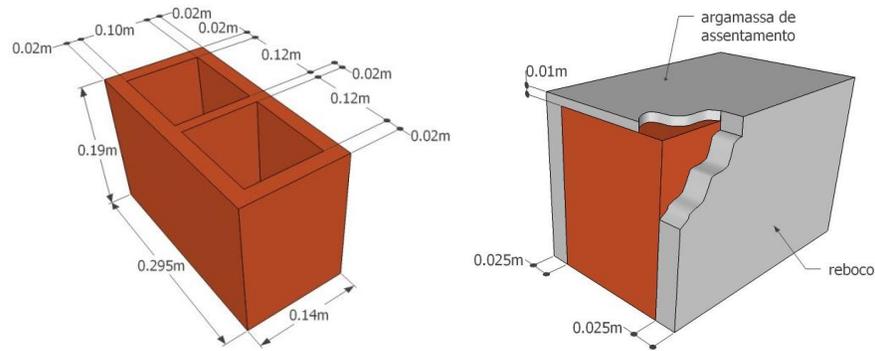


Figura A.3 – Composição das paredes dos modelos

Dados (Fonte: ABNT, 2008):

Resistência térmica superficial interna para fluxo de calor horizontal = 0,13 m^2K/W

Resistência térmica superficial externa para fluxo de calor horizontal = 0,04 m^2K/W

Resistência térmica da camada de ar não ventilada (R_{ar}) acima de 5,0 cm de espessura composta por superfície de alta emissividade ($\epsilon > 0,8$), considerando-se fluxo de calor horizontal = 0,17 $m^2.K/W$

Tabela A.4 – Propriedades térmicas dos materiais das paredes

Material	densidade (ρ)	condutividade térmica (λ)	calor específico (c)
Cerâmica	1400 kg/m^3	0,90 W/mK	0,92 kJ/kgK
Argamassa	2000 kg/m^3	1,15 W/mK	1,00 kJ/kgK

O cálculo da transmitância térmica da parede foi feita a partir do procedimento descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2008):

Resistência térmica do bloco (R_{bloco}):

a. Seção cerâmica

$$A_a = 0,01045 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e}{\lambda} \text{cerâmica} = 0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$$

b. Seção cerâmica + ar + cerâmica

$$A_b = 0,0456 \text{ m}^2$$

$$R_b = 2 \times \frac{e}{\lambda} \text{cerâmica} + R_{ar} = 0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{bloco} = \frac{\sum A}{\frac{\sum A_a}{R_a} + \frac{\sum A_b}{R_b}} = 0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistência térmica da parede (R_{parede}):

a. Emboço + argamassa + emboço

$$A_a = 0,00495 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e}{\lambda} \text{argamassa} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$$

b. Emboço + bloco + emboço

$$A_b = 0,056 \text{ m}^2$$

$$R_b = 2 \times \frac{e}{\lambda} \text{argamassa} + R_{bloco} = 0,24 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{parede} = \frac{\sum A}{\frac{\sum A_a}{R_a} + \frac{\sum A_b}{R_b}} = 0,23 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_{TOTAL} = R_{se} + R_{parede} + R_{si} = 0,40 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U_{parede} = \frac{1}{R_{TOTAL}} = \frac{2,49 \text{ W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Cálculo para determinar a espessura da cerâmica:

$$R_{parede} = 2 \times \frac{e}{\lambda} \text{ argamassa} + R_{ar} + 2 \times \frac{e}{\lambda} \text{ argamassa} \rightarrow e = 0,04 \text{ m}$$

Cálculo para determinar a densidade aparente da cerâmica a partir da Capacidade Térmica da parede:

a. Reboco + cerâmica + reboco

$$A_a = 0,01045 \text{ m}^2$$

$$C_a = 2e\rho_{reboco} + e\rho_{cerâmica} = 280,32 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

b. Reboco + argamassa + reboco

$$A_b = 0,00495 \text{ m}^2$$

$$C_b = e\rho_{argamassa} = 380 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

c. Reboco + cerâmica + ar + cerâmica + reboco

$$A_c = 0,0456 \text{ m}^2$$

$$C_c = e\rho_{\text{argamassa}} + e\rho_{\text{cerâmica}} = 151,52 \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

$$C_{\text{total}} = \frac{\sum A}{\frac{A_a}{C_a} + \frac{A_b}{C_b} + \frac{A_c}{C_c}} = 173,66 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$C_{\text{cerâmica}} = e\rho_{\text{cerâmica}} \rightarrow \rho_{\text{cerâmica}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

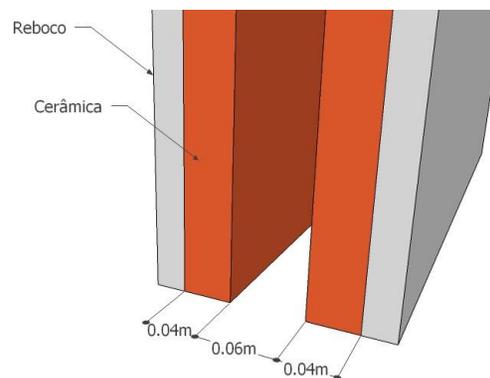


Figura A.4 – Componente construtivo equivalente à parede de tijolos cerâmicos

- **Transmitância térmica do piso**

A configuração do piso dos modelos é apresentada na Figura A.5 e as propriedades térmicas dos materiais são descritas na Tabela A.5.

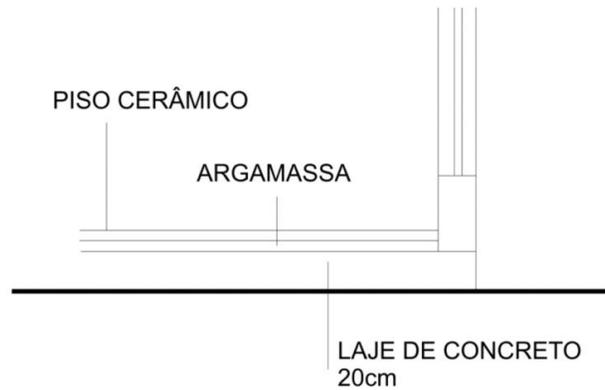


Figura A.5 – Configuração das camadas do piso

Dados (Fonte: ABNT, 2008):

Resistência térmica superficial interna para fluxo de calor descendente = $0,17\text{m}^2\text{K/W}$

Resistência térmica superficial externa para fluxo de calor descendente = $0,04\text{m}^2\text{K/W}$

Tabela A.5 - Propriedades térmicas dos materiais do piso

Material	espessura (e)	condutividade térmica (λ)
Cerâmica	0,5 cm	0,90 W/m.K
Argamassa	1 cm	1,15 W/m.K
Laje de concreto	20 cm	1,75 W/m.K

$$R_{\text{piso}} = \frac{e}{\lambda} \text{cerâmica} + \frac{e}{\lambda} \text{argamassa} + \frac{e}{\lambda} \text{concreto} = 0,13\text{m}^2\text{K/W}$$

$$R_{\text{TOTAL}} = R_{\text{se}} + R_{\text{piso}} + R_{\text{si}} = 0,34\text{m}^2\text{K/W}$$

$$U_{\text{piso}} = \frac{1}{R_{\text{TOTAL}}} = \frac{2,95 \text{ W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

- **Fator Solar do vidro de 4 mm**

Para o cálculo do Fator Solar (FS) dos vidros foram utilizados dados do trabalho de Castro, 2006.

$$FS = \tau + \alpha \times \frac{U}{h_e} = 0,83$$

Onde,

τ = transmitância solar = 0,80

α = absortância solar = 0,09

$U/h_e = 1/3$

Apêndice B

Cálculos do método prescritivo

- **Cálculo do IC da envoltória do modelo estudado**

$$\begin{aligned} IC_{env} = & -175,30 * FA - 212,79 * FF + 21,86 * PAF_T + 5,59 * FS - 0,19 * AVS \\ & + 0,15AHS + 275,19 * \frac{FA}{FF} + 213,35 * FA * FF - 0,04 * PAF_T * FS * AVS \\ & - 0,45 * PAF_T * AHS + 190,42 \end{aligned}$$

Sendo:

$$FA = \frac{A_{pcob}}{A_{total}} = \frac{439,98}{1319,94} = 0,33$$

A_{pcob} = Área de projeção da cobertura

A_{total} = Área total construída

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{total}} = \frac{1683,7}{4320,60} = 0,39$$

A_{env} = Área de envoltória

V_{total} = Volume da edificação

$$FS = 0,83$$

Cálculo do PAFt (Tabela B.1):

Tabela B.1 – Porcentagem de Abertura na Fachada de todas as orientações

ORIENTAÇÃO	ÁREA FACHADA (m ²)	ÁREA ABERTURA (m ²)	PAF	
NORTE	418,25	91,68	0,22	
SUL	418,25	105,76	0,25	
LESTE	145,24	6,02	0,04	
OESTE	145,24	6,02	0,04	
TOTAL	1126,98	209,48	0,19	PAFt

Cálculo de AVS e AHS (Tabela B.2):

Tabela B.2 – Áreas das aberturas de todas as orientações

Orientação	Área de abertura (m ²)
NORTE	91,68
SUL	105,76
LESTE	6,02
OESTE	6,02
TOTAL	209,48

O AVS é a relação entre as aberturas e seus ângulos de sombreamento e a somatória das áreas de abertura. Somente a porta de vidro (cuja área é de 6,44 m²) possui proteção solar, como é demonstrado na Figura B.1.

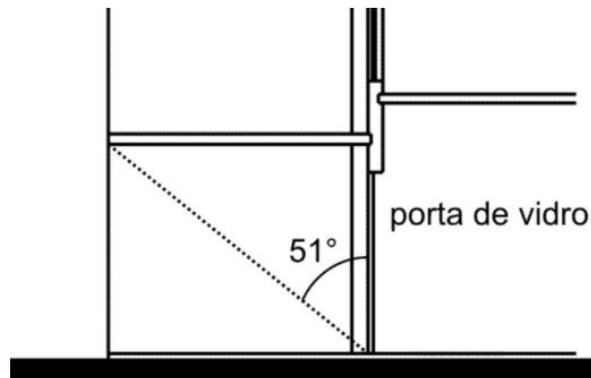


Figura B.1 – Ângulo Vertical de Sombreamento da porta de vidro

Logo:

$$AVS = \frac{\sum A_{abertura} \times \theta}{\sum A_{abertura}} = \frac{6,44 \times 51^\circ}{209,48} = 1,57$$

O AHS é a relação entre as aberturas e seus ângulos de sombreamento e a somatória das áreas de abertura. Porém, diferentemente do AVS, o AHS de cada abertura é a média ponderada dos ângulos de sombreamento. Um exemplo é ilustrado na Figura B.2:

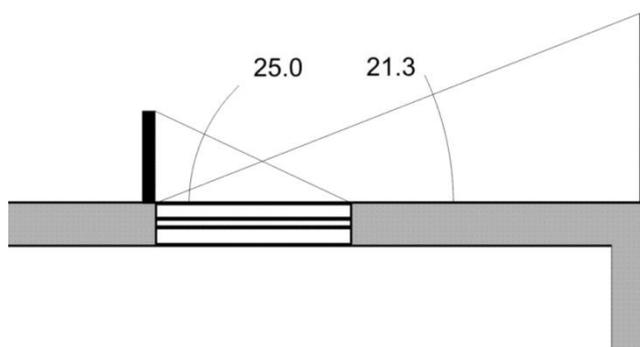


Figura B.2 – Exemplo de Ângulo Horizontal de Sombreamento

$$AHS = \frac{25^{\circ} + 21.3^{\circ}}{2} = 23.15^{\circ}$$

Na Tabela B.3 são apresentados os ângulos de proteção solar das aberturas do edifício proposto e na Tabela B.4, as áreas de abertura, quantidade e respectivos ângulos de sombreamento.

Tabela B.3 – Ângulos de proteção solar das aberturas do modelo estudado

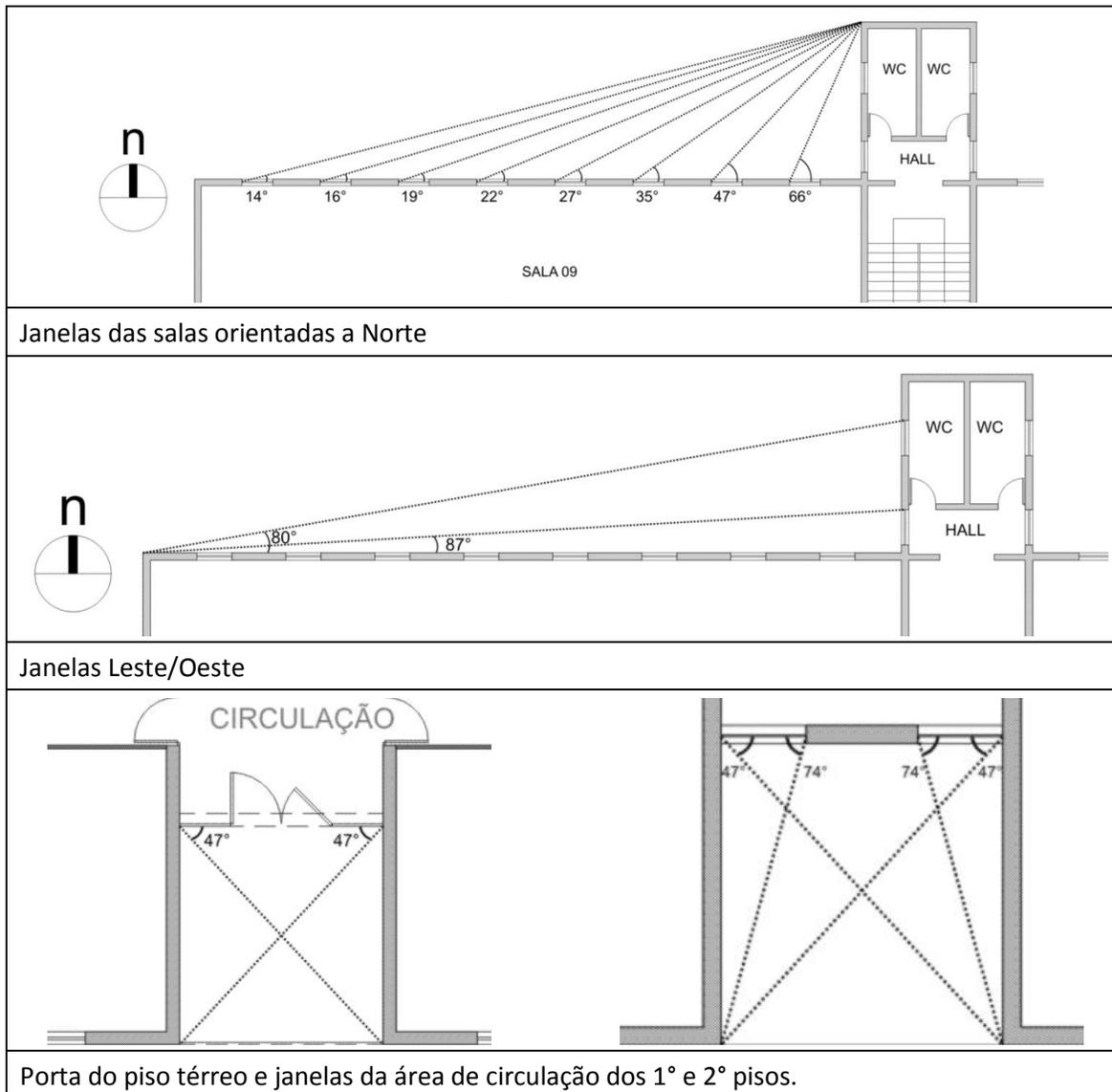


Tabela B.4 – Relação das áreas das aberturas e ângulos de sombreamento

NORTE	ÁREA (m ²)	1,91 (X6)	1,91 (X6)	1,91 (X6)	1,91 (X6)	1,91 (X6)	1,91 (X6)	1,91 (X6)	1,91 (X6)
	AHS	7°	8°	9,5°	11°	13,5°	17,5°	23,5°	33°
SUL	ÁREA (m ²)	1,91 (X48)	1,91 (X4)	6,44	-	-	-	-	-
	AHS	0	60,5°	47°	-	-	-	-	-
LESTE	ÁREA (m ²)	1,91 (X2)	1,10 (X2)	-	-	-	-	-	-
	AHS	43,5°	40°	-	-	-	-	-	-
OESTE	ÁREA (m ²)	1,91 (X2)	1,10 (X2)	-	-	-	-	-	-
	AHS	43,5°	40°	-	-	-	-	-	-

Cálculo do AHS:

$$AHS = \frac{\sum A_{abertura} \times \theta}{\sum A_{abertura}}$$

$$\begin{aligned} & \sum A_{abertura} \times \theta \\ &= 6 \times [1,91 \times (7^\circ + 8^\circ + 9,5^\circ + 11^\circ + 13,5^\circ + 17,5^\circ + 23,5^\circ + 33^\circ)] \\ &+ 48 \times (1,91 \times 0^\circ) + 4 \times (1,91 \times 60,5^\circ) + (6,44 \times 47^\circ) + 2 \\ &\times (1,91 \times 43,5^\circ) + 2 \times (1,10 \times 40^\circ) + 2 \times (1,91 \times 43,5^\circ) + 2 \\ &\times (1,10 \times 40^\circ) = 2682,82 \end{aligned}$$

$$AHS = \frac{\sum A_{abertura} \times \theta}{\sum A_{abertura}} = \frac{2682,82}{209,48} = \mathbf{12,81^\circ}$$

Ao inserir os parâmetros na equação do Índice de Consumo da envoltória do modelo proposto, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 IC_{env} = & -175,30 * 0,33 - 212,79 * 0,39 + 21,86 * 0,19 + 5,59 * 0,83 - 0,19 \\
 & * 1,57 + 0,15 * 12,81 + 275,19 * \frac{0,33}{0,39} + 213,35 * 0,33 * 0,39 - 0,04 \\
 & * 0,19 * 0,83 * 1,57 - 0,45 * 0,19 * 12,81 + 190,42 = 319,21
 \end{aligned}$$

O índice de consumo do modelo proposto é 319,21. Para determinar os IC_{env} para todos os níveis de eficiência, substituí-se os valores de PAft, FS, AVS e AHS da mesma equação pelos estabelecidos para os níveis máximos e mínimos conforme a Tabela B.5.

Tabela B.5 – Parâmetros para cálculo do IC_{env} máximo e mínimo

Parâmetros do $IC_{máxD}$				Parâmetros do $IC_{mín}$			
PAft	FS	AVS	AHS	PAft	FS	AVS	AHS
0,60	0,61	0	0	0,05	0,87	0	0

Os valores obtidos para $IC_{máxD}$ foi 326,43 e 315,85 para $IC_{mín}$. Com esses valores foi determinado o intervalo que definirá os limites máximos e mínimos de IC_{env} para cada nível:

$$i = \frac{IC_{máxD} - IC_{mín}}{4} = 2,64$$

Substituindo o valor i nas equações da Tabela B.6, obtêm-se os limites de cada nível de eficiência (Tabela B.7).

Tabela B.6 – Equações para determinar os limites de IC_{env} de cada nível de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Limite mínimo	-	$IC_{máxD} - 3i + 0,01$	$IC_{máxD} - 2i + 0,01$	$IC_{máxD} - i + 0,01$	$IC_{máxD} + 0,01$
Limite máximo	$IC_{máxD} - 3i$	$IC_{máxD} - 2i$	$IC_{máxD} - i$	$IC_{máxD}$	-

Tabela B.7 – Limites de IC_{env} para todos os níveis de eficiência

Eficiência	A	B	C	D	E
Limite mínimo	-	318,50	321,15	323,79	326,43
Limite máximo	318,49	321,14	323,78	326,42	-

▪ **Cálculo do PAft dos modelos de referência**

Substituindo AVS e AHS na equação de IC_{env} por 0, tem-se a equação reordenada para determinar o PAft de cada modelo de referência:

$PAft$

$$= \frac{IC + 175,30 * FA + 212,79 * FF - 5,59 * FS - 275,19 * \frac{FA}{FF} - 213,35 * FA * FF - 190,42}{21,86}$$

Substituindo IC_{env} pelo $IC_{m\acute{a}x}$ obtido para cada nívél, utilizando os mesmo valores de FA e FF utilizados para o modelo estudado (pois a geometria é a mesma) e adotando um vidro de $FS = 0,87$ (segundo recomendação do RTQ-C), tem-se os PAFT para cada nívél de eficiência (Tabela B.8):

Tabela B.8 – Valores de PAFT para os modelos de referência

PAFT nívél A	PAFT nívél B	PAFT nívél C	PAFT nívél D
0,17	0,29	0,41	0,53

Apêndice C

Dados de saída do *EnergyPlus*: *sumário do desempenho anual*

Os dados de área para todos os modelos são apresentados na Tabela C.1.

Tabela C.1 – Quadro de áreas dos modelos.

	Área [m ²]
Área total	1134,50
Área condicionada	1004,30
Área não condicionada	130,19

A Tabela C.2 contém a energia total consumida pelos modelos assim como a energia consumida pela área total e pela área condicionada.

Tabela C.2 - Consumo total pelos modelos.

Modelo	Energia Total [kWh]	Energia por área total [kWh/m²]	Energia por área condicionada [kWh/m²]
B	69602.18	61.35	69.30
Be	68581.28	60.45	68.29
Be2	67915.21	59.86	67.62
Bi	42387.37	37.36	42.21
Bei	43421.25	38.27	43.24
Be2i	47680.90	42.03	47.48
Bd	51992.54	45.83	51.77
Bed	51138.92	45.08	50.92
Be2d	53853.85	47.47	53.62
REF_A	65614.42	59.76	65.33
REF_B	85302.16	77.69	84.94
REF_C	98162.25	89.40	97.74
REF_D	111855.70	101.87	111.38
REF_Ae	64441.60	58.69	64.17
REF_Be	80511.54	73.32	80.17
REF_Ce	90378.52	82.31	89.99
REF_De	101614.57	92.54	101.18
REF_Ae2	63774.24	58.08	63.50
REF_Be2	76605.76	69.77	76.28
REF_Ce2	84603.48	77.05	84.24
REF_De2	94013.96	85.62	93.61

Na Tabela C.3 são apresentados os resultados do uso final de energia de cada modelo.

Tabela C.3 - Uso final de energia pelos modelos.

Modelos	Resfriamento [kWh]	Iluminação interna [kWh]	Equipamento interno [kWh]	Ventiladores [kWh]	Uso final total [kWh]
B	8954.02	33823.20	26676.00	148.96	69602.18
Be	7956.75	33823.20	26676.00	125.33	68581.28
Be2	7304.27	33823.20	26676.00	111.74	67915.21
Bi	8835.90	6728.68	26676.00	146.80	42387.37
Bei	7854.33	8767.32	26676.00	123.59	43421.25
Be2i	7691.28	13194.00	26676.00	119.62	47680.90
Bd	9485.51	15669.42	26676.00	161.61	51992.54
Bed	8492.53	15832.59	26676.00	137.80	51138.92
Be2d	8014.60	19036.22	26676.00	127.03	53853.85
REF_A	10203.70	28535.45	26676.00	199.28	65614.42
REF_B	24365.10	33823.20	26676.00	437.86	85302.16
REF_C	32493.47	37312.77	26676.00	1680.01	98162.25
REF_D	40427.76	42642.36	26676.00	2109.58	111855.70
REF_Ae	9060.05	28535.45	26676.00	170.10	64441.60
REF_Be	19685.32	33823.20	26676.00	327.02	80511.54
REF_Ce	25318.13	37312.77	26676.00	1071.61	90378.52
REF_De	30961.38	42642.36	26676.00	1334.84	101614.57
REF_Ae2	8409.46	28535.45	26676.00	153.33	63774.24
REF_Be2	15856.89	33823.20	26676.00	249.68	76605.76
REF_Ce2	19925.79	37312.77	26676.00	688.92	84603.48
REF_De2	23845.82	42642.36	26676.00	849.78	94013.96

Apêndice D

Iluminância em dias típicos

São apresentados os níveis de iluminância para o Ponto 12, localizado no pavimento intermediário do modelo estudado (correspondente à zona 5). Os valores foram obtidos dentro do intervalo de ocupação (entre 8h e 17h) nos dias típicos: solstícios de verão e inverno e equinócios de primavera e outono.

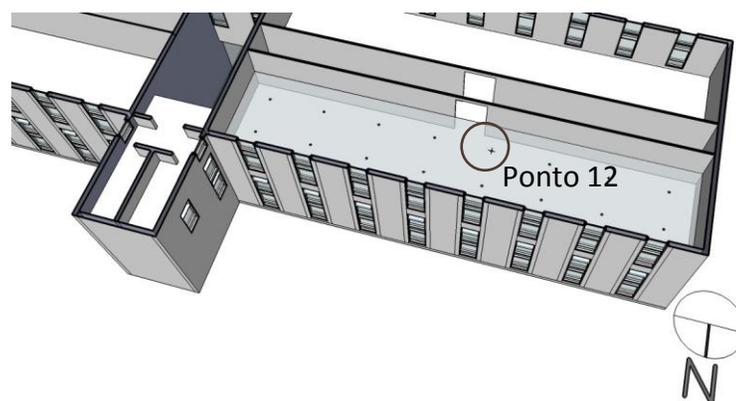


Figura D.1 – Localização do Ponto 12 de onde foram obtidos os níveis de iluminância.

Resultados obtidos para o modelo sem obstrução do entorno (Figura D.2 à Figura D.5):

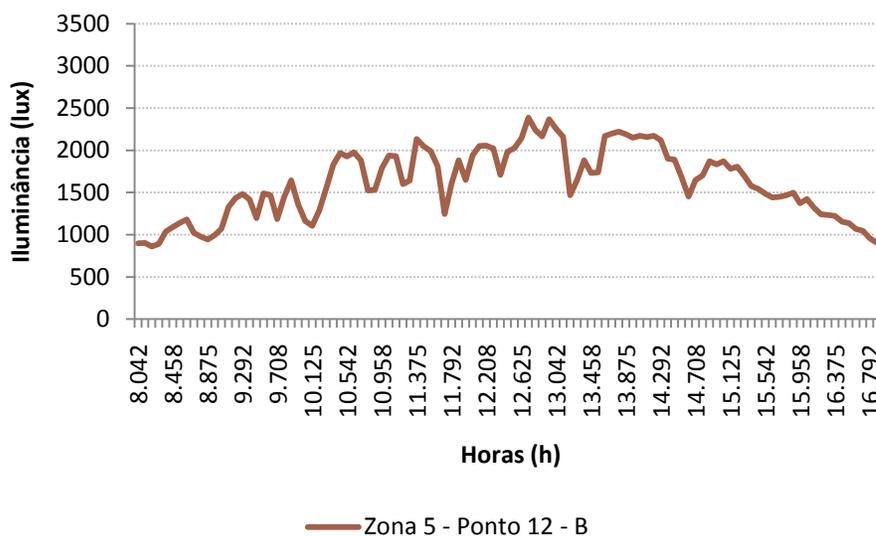


Figura D.2 – Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 21/3 (equinócio de outono) para o modelo sem entorno (B).

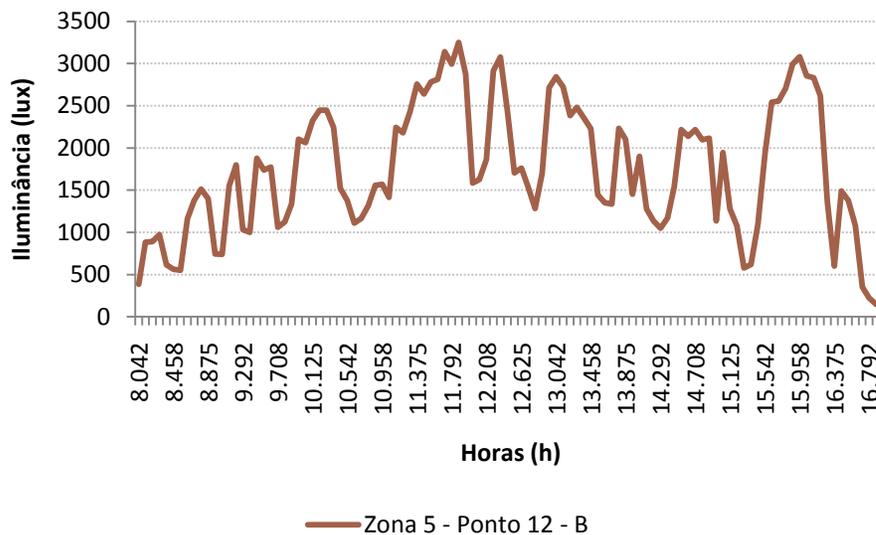


Figura D.3 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 22/6 (solstício de inverno) para o modelo sem entorno (B).

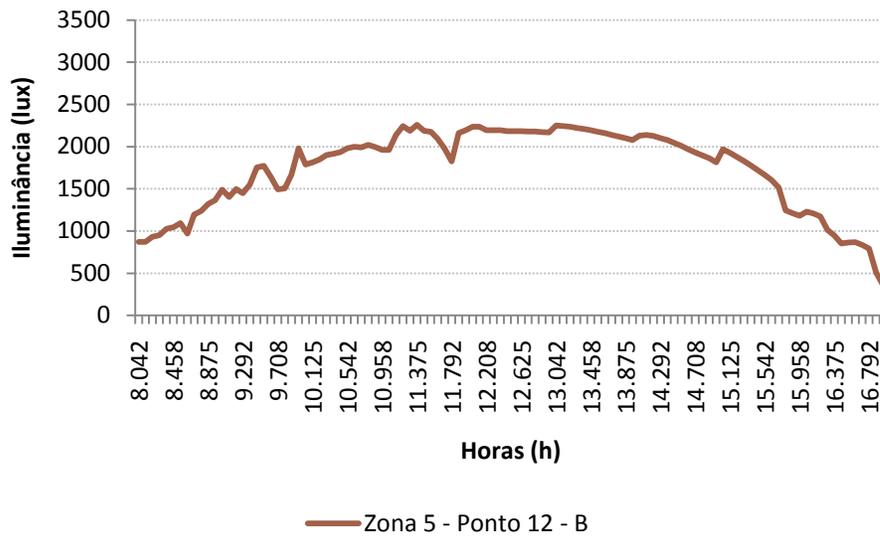


Figura D.4 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 24/9 (equinócio de primavera) para o modelo sem entorno (B).

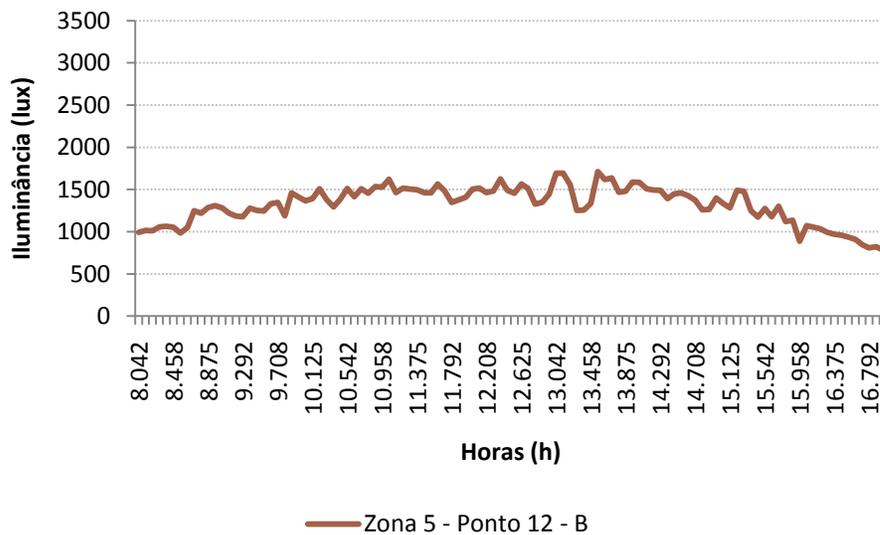


Figura D.5 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 22/12 (solstício de verão) para o modelo sem entorno (B).

Resultados obtidos para o modelo com obstrução a 10m da fachada (Figura D.6 à Figura D.9):

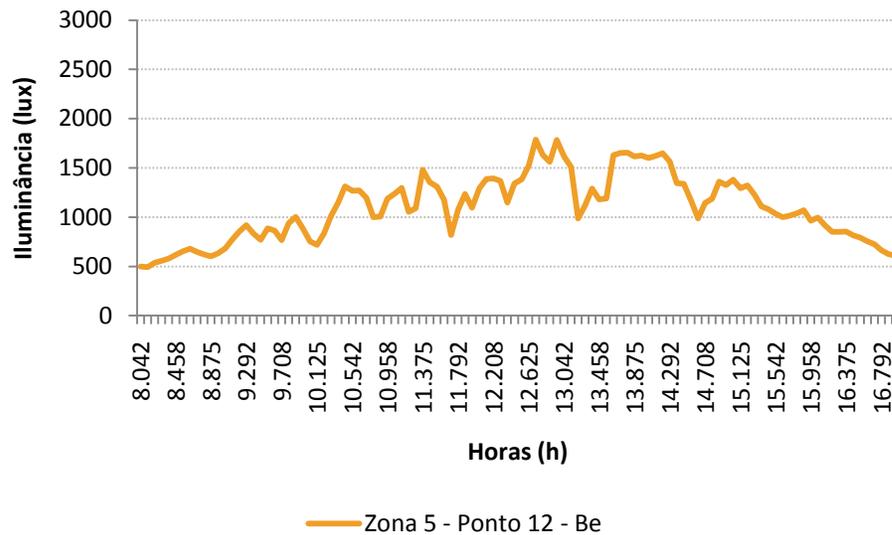


Figura D.6 – Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 21/3 (equinócio de outono) para o modelo com entorno a 10 m(Be).

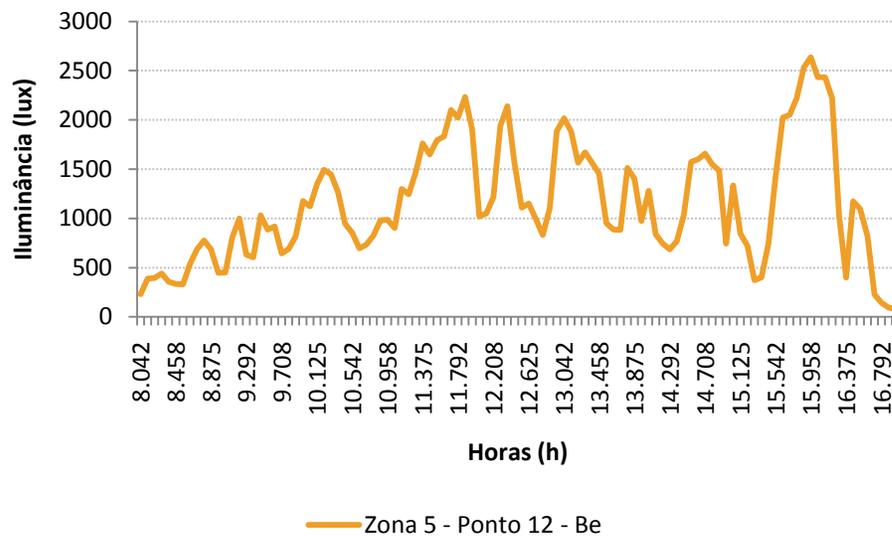


Figura D.7 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 22/6 (solstício de inverno) para o modelo com entorno a 10 m(Be).

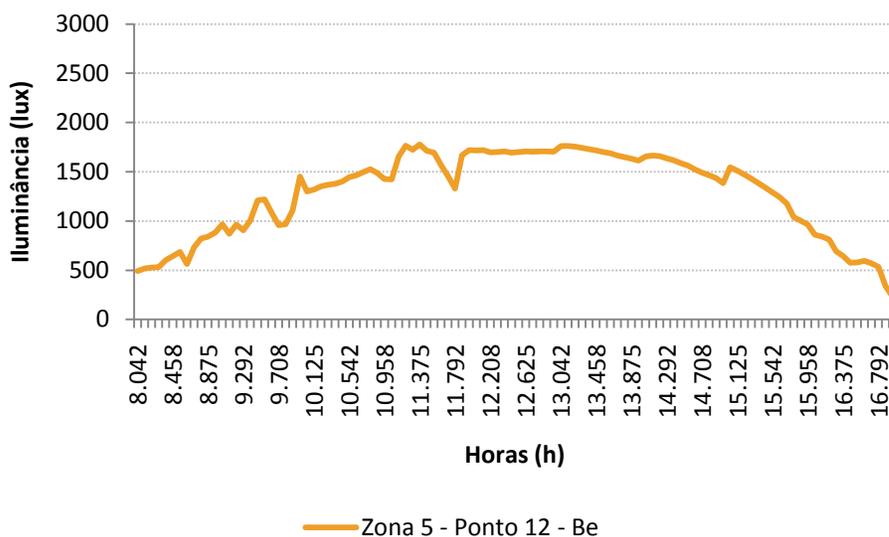


Figura D.8 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 24/9 (equinócio de primavera) para o modelo com entorno a 10 m(Be).

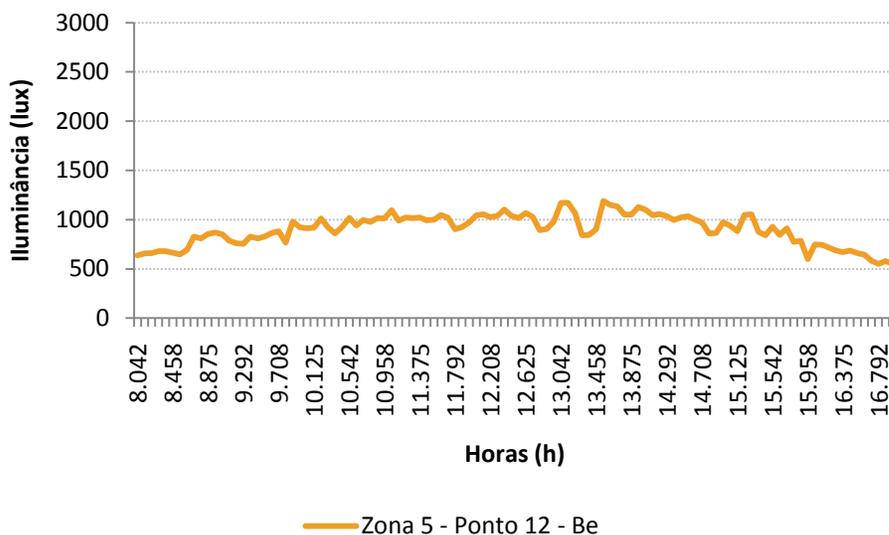


Figura D.9 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 22/12 (solstício de verão) para o modelo com entorno a 10 m(Be).

Resultados obtidos para o modelo com obstrução a 5m da fachada (Figura D.10 à Figura D.13):

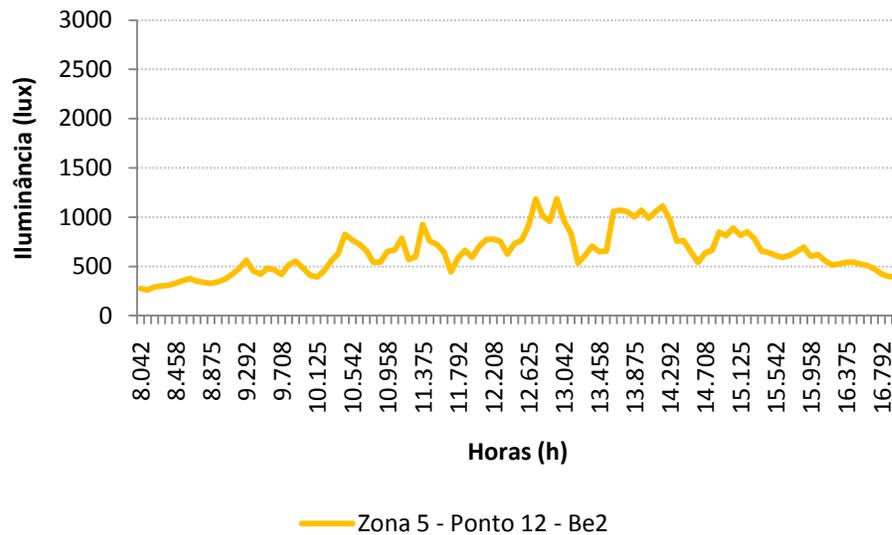


Figura D.10 – Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 21/3 (equinócio de outono) para o modelo com entorno a 5 m(Be2).

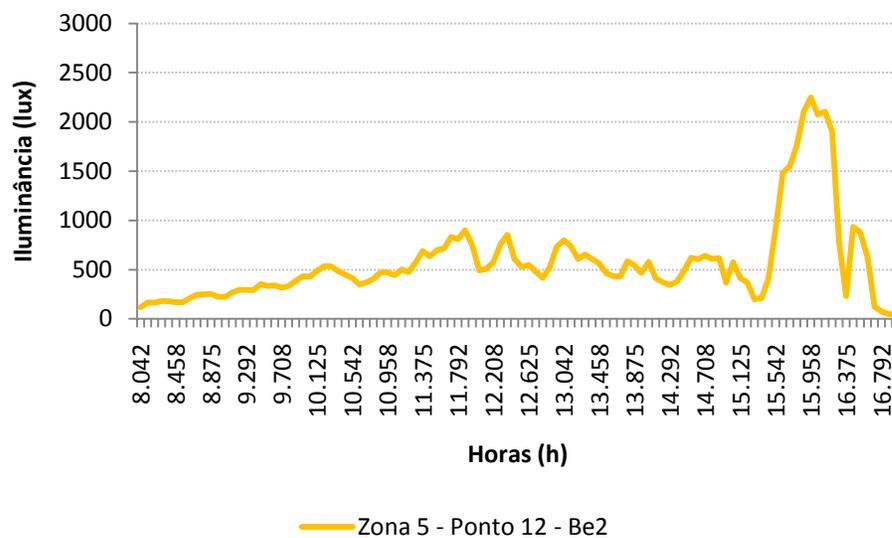


Figura D.11 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 22/6 (solstício de inverno) para o modelo com entorno a 5 m(Be2).

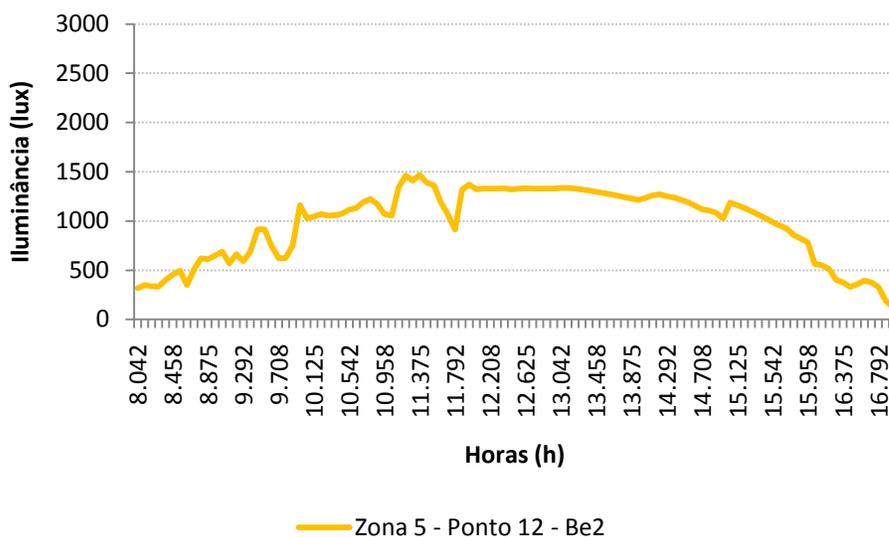


Figura D.12 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 24/9 (equinócio de primavera) para o modelo com entorno a 5 m(Be2).

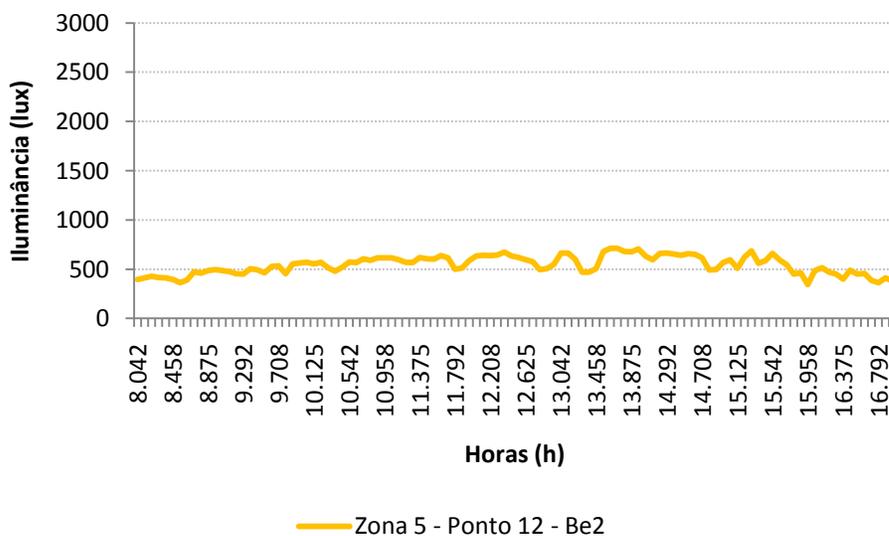


Figura D.13 - Níveis de iluminância durante o horário de ocupação para o dia 22/12 (solstício de verão) para o modelo com entorno a 5 m(Be2).