

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Bruno Martins Mallmann

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO IMPACTO DA
ILUMINAÇÃO E DOS VIDROS NA DEMANDA ENERGÉTICA
DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL**

Porto Alegre
julho 2011

BRUNO MARTINS MALLMANN

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO IMPACTO DA
ILUMINAÇÃO E DOS VIDROS NA DEMANDA ENERGÉTICA
DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Dieter Wartchow
Coorientador: Maurício Carvalho Ayres Torres

Porto Alegre
julho 2011

BRUNO MARTINS MALLMANN

**ANÁLISE COMPUTACIONAL DO IMPACTO DA
ILUMINAÇÃO E DOS VIDROS NA DEMANDA ENERGÉTICA
DE UM EDIFÍCIO COMERCIAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de julho de 2011

Prof. Dieter Wartchow
Dr. pela Universität Stuttgart
Orientador

Maurício Carvalho Ayres Torres
Dr. pela Universidad Politécnica de Cataluña
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Santiago Muñoz Navarrete
Eng.º. Civil pela Universidad de los Andes

Profa. Livia Salomão Piccinini (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do
Rio Grande do Sul

Maurício Carvalho Ayres Torres
Dr. pela Universidad Politécnica de
Cataluña

Prof. Dieter Wartchow (UFRGS)
Dr. pela Universität Stuttgart

Dedico este trabalho a meus pais, Cláudia e Eduardo, e ao meu irmão, Gustavo, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dieter Wartchow, orientador deste trabalho, pela confiança e incentivos depositados em mim.

Agradeço ao arquiteto Maurício Torres, coorientador deste trabalho, pelos conselhos inestimáveis durante esta fase de aprendizado e por disponibilizar a infraestrutura do escritório da Sustentativa, onde foi possível o melhor desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Profa. Carin, grande coordenadora e incentivadora da disciplina do Trabalho de Conclusão, por sua total dedicação e paciência para com os alunos.

Agradeço a todas as pessoas que me apoiaram durante este período, palavras de incentivo nunca faltaram.

*Success is the sum of small efforts,
repeated day in and day out.*

Harold R. Collier

RESUMO

MALLMANN, B. M. **Análise computacional do impacto da iluminação e dos vidros na demanda energética de uma edificação comercial.** 2011. 50 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho versa sobre o impacto do tipo de vidro e do controle de iluminação artificial na demanda energética de edificações comerciais. Para análise da eficiência energética, o presente trabalho utiliza simulações energéticas executadas no software *Energyplus* a partir de um modelo projetado no software *Design Builder*. Para o estudo foi utilizado um prédio comercial existente em Porto Alegre. A partir da simulação do uso ou não do controle de iluminação e da variação de três vidros, sendo o primeiro um vidro simples de espessura 4 mm, o segundo um vidro simples de controle solar de 6 mm e o terceiro um vidro duplo, composto de duas camadas de vidro de 4 mm e uma de ar de 6 mm, foi possível a identificação do efeito de cada variável isoladamente. Os resultados indicaram uma economia no consumo do sistema de iluminação de até 39%, devido ao uso de controle de iluminação, enquanto que os vidros impactaram de forma mais efetiva na demanda do sistema de condicionamento de ar, obtendo uma redução de 16% quando utilizado o vidro de controle solar.

Palavras-chave: eficiência energética, simulação energética.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: diagrama de etapas da pesquisa.....	15
Figura 2: participação dos eletrodomésticos no consumo residencial de energia elétrica no Brasil.....	17
Figura 3: participação dos eletrodomésticos no consumo residencial de energia elétrica na Região Sul.....	18
Figura 4: distribuição do consumo final de energia elétrica em edificações comerciais no Brasil.....	18
Figura 5: trocas de calor e efeito estufa.....	23
Figura 6: zoneamento bioclimático brasileiro.....	32
Figura 7: edifício real.....	38
Figura 8: edifício modelado.....	42
Figura 9: planta baixa do pavimento tipo.....	42
Figura 10: redução da demanda de iluminação total e na zona periférica.....	45
Figura 11: ganhos de calor pelas janelas x carga do sistema de iluminação.....	46
Figura 12: ganhos totais de calor x carga do sistema de condicionamento de ar.....	46
Figura 13: comparativo carga de refrigeração e aquecimento.....	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: absorvidade de cores e superfícies	24
Quadro 2: transmitância térmica dos elementos	25
Quadro 3: emissividade de superfícies.....	26
Quadro 4: transmissividade, absorvidade e refletividade de vidros	27
Quadro 5: taxas típicas de calor liberado por pessoa.....	28
Quadro 6: densidade típica de carga de equipamentos para diferentes tipos de escritórios.....	29
Quadro 7: taxas típicas de dissipação de calor pela iluminação.....	29
Quadro 8: aberturas para ventilação.....	33
Quadro 9: vedações externas.....	33
Quadro 10: propriedades térmicas dos materiais simulados.....	41
Quadro 11: configuração das atividades simuladas.....	41
Quadro 12: propriedades gerais dos vidros simulados.....	43
Quadro 13: definição dos casos para simulação.....	43
Quadro 14: ganhos anuais de calor da edificação.....	44
Quadro 15: demanda energética anual da edificação.....	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 MÉTODO DE PESQUISA	13
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	13
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	13
2.2.1 Objetivo principal	13
2.2.2 Objetivo secundário	13
2.3 DELIMITAÇÕES.....	14
2.4 LIMITAÇÕES.....	14
2.5 DELINEAMENTO.....	14
3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES	16
3.1 CONCEITO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	16
3.2 CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL.....	17
3.3 DESEMPENHO TÉRMICO DA EDIFICAÇÃO.....	19
3.3.1 Absortividade, refletividade e transmissividade	20
3.3.2 Emissividade	20
3.3.3 Condutividade térmica	20
3.3.4 Transmitância térmica	21
3.3.5 Inércia térmica	21
3.3.6 Fator solar	21
3.4 FONTES DE CALOR.....	21
3.4.1 Radiação solar	22
3.4.1.1 Materiais opacos.....	24
3.4.1.2 Materiais transparentes.....	26
3.4.2 Ocupação	27
3.4.3 Equipamentos	28
3.4.4 Iluminação	29
3.5 PROTEÇÕES SOLARES.....	29
3.6 NBR 15220/2005 – DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES.....	30
3.7 ILUMINAÇÃO SUSTENTÁVEL.....	33
4 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA	35
4.1 ASPECTOS GERAIS.....	35
4.2 PROGRAMAS DE ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	35
4.3 CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA.....	36

5 EDIFICAÇÃO ESTUDADA.....	38
5.1 EDIFÍCIO REAL.....	38
5.2 ESPECIFICAÇÕES DO MODELO.....	39
5.3 VARIAÇÕES NO MODELO.....	42
6 RESULTADOS.....	44
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico sempre esteve diretamente relacionado com a capacidade do Homem de controlar/produzir energia. Ao longo dos anos, novas fontes de energia foram descobertas, o que expandiu as possibilidades de crescimento. Porém, atualmente, o cenário energético é pouco favorável, visto que o principal combustível utilizado, o petróleo, torna-se cada vez mais escasso e, conseqüentemente, mais caro. Do mesmo modo, a exploração sem consciência ambiental dos recursos naturais, até o momento justificada em prol do avanço econômico, não pode mais ser aceita.

A construção civil contribui com uma porcentagem significativa do impacto ambiental e não pode mais ser baseada nos conceitos básicos de custo/benefício, nos quais somente a vantagem econômica determina as escolhas. Uma nova premissa surge no cenário: o desenvolvimento sustentável, no qual as necessidades da atual população devem ser atendidas sem haver o comprometimento das gerações futuras.

Neste contexto, racionalizar o consumo de energia elétrica no Brasil através de medidas que acarretem melhorias no desempenho energético nas edificações é uma alternativa que deve ser explorada. Simulações ainda na fase de projeto indicam soluções construtivas eficientes, auxiliando inclusive na escolha dos materiais mais apropriados para se atingir determinados objetivos.

Após a breve introdução do assunto abordado neste trabalho neste capítulo introdutório, são descritos no segundo capítulo a metodologia aplicada e os objetivos do trabalho, juntamente com o delineamento da pesquisa. O conceito de eficiência energética e de que forma pode influenciar no comportamento térmico de uma edificação são relatados no terceiro capítulo, bem como o equacionamento do balanço térmico da edificação, contrapondo-se as fontes de calor, externas e internas, com o sistema de condicionamento de ar.

No quarto capítulo, o tema principal é a simulação de edificações. Especificações dos programas utilizados e o algoritmo de cálculo da demanda energética são apresentados. Inicia-se no quinto capítulo a descrição do estudo, relatando-se aspectos gerais da edificação escolhida e como esta, levando em conta suas particularidades construtivas, foi modelada no

programa *Design Builder*. Foram criados seis casos para simulação, variando-se três tipos de vidro com a opção de controle da iluminação artificial. Os resultados obtidos e a análise do impacto de cada uma das modificações sugeridas são apresentados no sexto capítulo, concluindo-se com as considerações finais no último segmento deste trabalho.

2 MÉTODO DE PESQUISA

Para este trabalho de diplomação foram estabelecidas diretrizes que definem como o trabalho será desenvolvido, sendo as mesmas apresentadas abaixo.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: qual o impacto da iluminação artificial e dos vidros na demanda energética de uma edificação comercial?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a verificação do impacto da iluminação artificial e dos vidros na demanda energética de uma edificação comercial.

2.2.2 Objetivos secundários

O objetivo secundário deste trabalho é a análise do desempenho energético de diferentes soluções contrutivas usualmente utilizadas através de simulações computacionais.

2.3 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a análise computacional do desempenho energético de uma edificação comercial situada em Porto Alegre através de simulações termoenergéticas realizadas no programa *EnergyPlus* e modeladas no programa *Design Builder*.

2.4 LIMITAÇÕES

É limitação do trabalho o estudo de seis casos referentes a somente uma edificação, sendo eles obtidos pela variação de três tipos de vidro e o controle ou não da iluminação artificial.

2.5 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) caracterização do conceito de eficiência energética em edificações;
- c) caracterização dos programas de simulação;
- d) definição dos casos simulados;
- e) simulação energética e análise dos resultados;
- f) considerações finais.

O diagrama da figura 1 mostra o encadeamento entre as etapas da pesquisa.

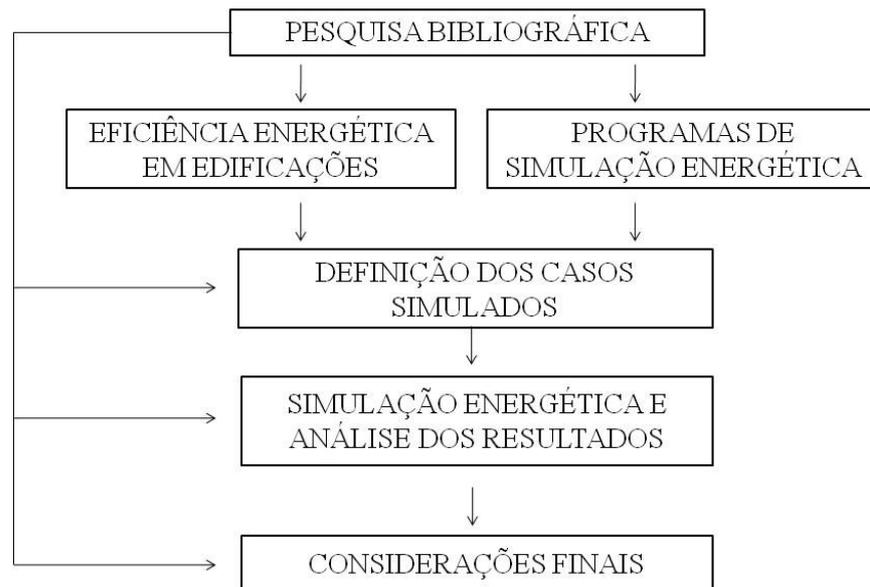


Figura 1: diagrama de etapas da pesquisa

A pesquisa bibliográfica foi desenvolvida durante todas as etapas do trabalho, de modo a adquirir conhecimento sobre os diversos aspectos que impactam na eficiência energética de uma edificação. Dentre os assuntos estudados encontram-se os processos de troca de calor e a influência de diversos fatores nos mesmos, entre eles as propriedades dos materiais utilizados para vedação da envoltória. Programas de simulação e sua alta aplicabilidade durante a fase de projeto tiveram grande enfoque.

Um edifício comercial existente em Porto Alegre foi utilizado como exemplo para a execução de simulações energéticas com o programa *Energyplus*, com o auxílio da plataforma compatível a este programa para modelagem de edificações, o *Design Builder*. Após a completa caracterização do modelo, foi possível realizar a simulação dos diferentes casos propostos, onde variaram-se os tipos de vidro e o controle ou não da iluminação artificial.

Para fins de comparação da influência na eficiência energética do edifício das variáveis simuladas, foi utilizado o parâmetro de carga anual consumida em kWh por metro quadrado de área pelos sistemas de iluminação e de condicionamento de ar. Os resultados obtidos indicaram quais configurações são mais adequadas e vantajosas, permitindo a análise do impacto da iluminação e dos vidros na energia consumida para climatização da edificação. Ao final, levando em conta o conhecimento adquirido foram desenvolvidas considerações finais sobre o assunto.

3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

Neste capítulo é apresentado o conceito de eficiência energética aplicado a edificações. O processo de ganho e perda de calor é descrito, bem como a influência das propriedades térmicas dos materiais utilizados.

3.1 CONCEITO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O conceito de eficiência energética pode ser entendido como a obtenção de um mesmo serviço, sob as mesmas condições, sejam de conforto ou ambientais, com consumo de energia menor do que o nível de referência pré-estabelecido (LAMBERTS et al., 1997, p. 14). O uso eficiente da energia não significa apenas uma redução nas despesas, mas também redução nos impactos ambientais. Além disso, a eficiência energética muitas vezes está ligada a melhoria na qualidade do ambiente de trabalho e do processo produtivo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2010).

A partir da década de 70, devido ao aumento da população nos centros urbanos, a produção de eletricidade cresceu exponencialmente. O crescimento na demanda foi atendido, porém os impactos ambientais provenientes da expansão foram desconsiderados, como possíveis inundações, poluição e riscos à segurança pública (LAMBERTS et al., 1997, p. 18-19). Segundo Geller¹ (1994 apud LAMBERTS et al., 1997, p. 19), o mais correto em uma situação como esta seria encontrar meios de economizar energia, ao invés de aumentar a produção. Desta forma fica a cargo do projetista a concepção de edifícios mais eficientes, que devem propiciar o uso racional de energia.

¹ GELLER, H. **O uso eficiente da eletricidade**: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: ACEEE, 1994.

3.2 CONSUMO ENERGÉTICO NO BRASIL

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2010, p. 11), o consumo total de energia elétrica no País, no ano de 2009, atingiu o valor de 426 TWh. Somente no setor residencial é consumido 23,9% deste montante, enquanto que os setores comercial e público representam, respectivamente, 15,1% e 8,6% (BRASIL, 2010, p. 28). Isto significa que 47,6% de toda energia consumida no Brasil tem como destino final as edificações.

A figura 2 ilustra a participação dos eletrodomésticos no consumo residencial no Brasil, enquanto que a figura 3 exibe esta participação na região Sul especificamente. Pode-se notar três itens principais consumidores de energia: o chuveiro, a geladeira e o consumo devido ao condicionamento ambiental. Em função do clima apresentar uma maior amplitude térmica na região Sul os dados se alteram e o consumo relativo ao condicionamento ambiental passa de 20% no contexto nacional para 32 %.

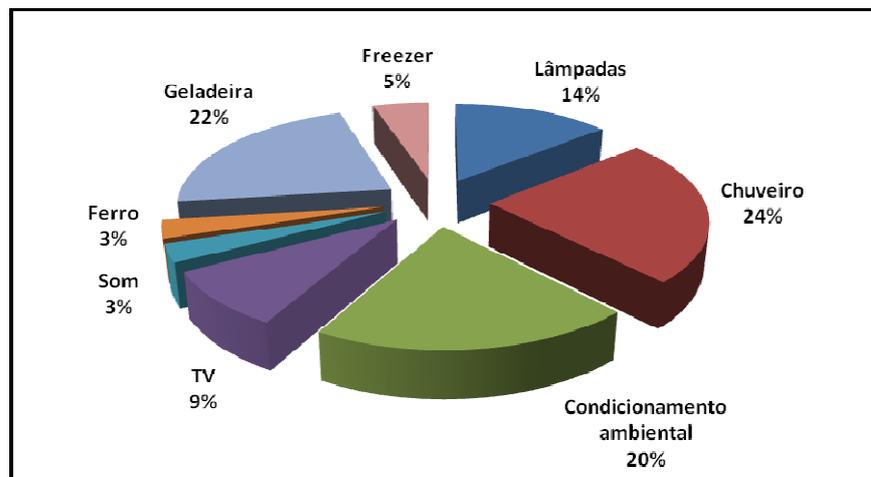


Figura 2: participação dos eletrodomésticos no consumo residencial de energia elétrica no Brasil (ELETROBRÁS, 2007, p. 16)

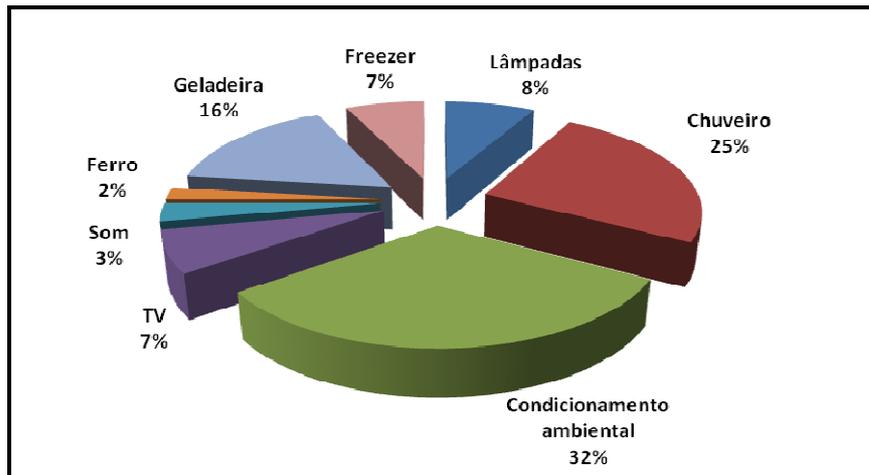


Figura 3: participação dos eletrodomésticos no consumo residencial de energia elétrica na região Sul (ELETROBRÁS, 2007, p. 17)

No setor comercial a participação no consumo final de energia elétrica é concentrada principalmente nos itens sistema de ar condicionado e iluminação, ilustrado na figura 4.

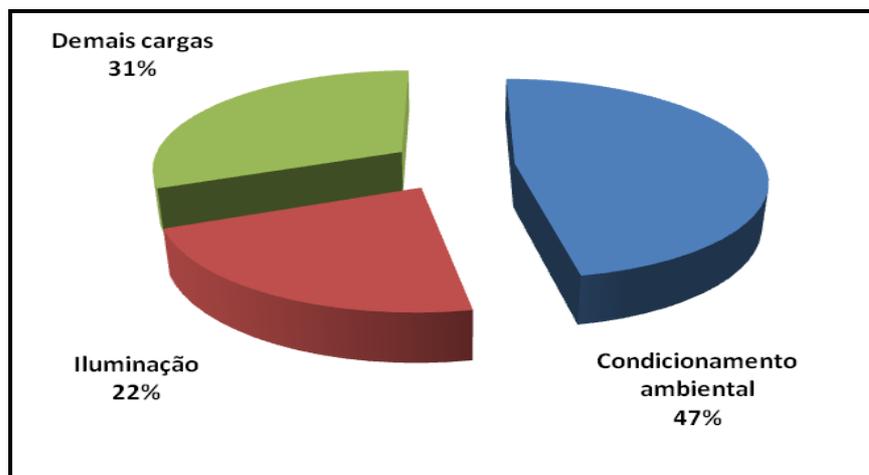


Figura 4: distribuição do consumo final de energia elétrica em edificações comerciais no Brasil (ELETROBRÁS, [2006?], p. 30)

Conforme pode ser observado nos gráficos, uma quantia significativa do consumo energético em edificações é devida ao condicionamento ambiental, ou seja, meios artificiais de resfriamento ou aquecimento para manter condições de conforto. Segundo Lamberts et al. (1997, p. 95), o dimensionamento destes sistemas depende diretamente da carga térmica do ambiente, que pode ser entendida como a quantidade de calor total que deverá ser extraída ou fornecida ao ar para mantê-lo em condições desejáveis de temperatura e teor de umidade.

Dentre os fatores que influenciam na carga térmica de uma edificação, um dos mais importantes é a configuração da envoltória, responsável pelos ganhos de calor pelas fachadas externas e pela cobertura.

3.3 DESEMPENHO TÉRMICO DA EDIFICAÇÃO

Conforme Carlo (2008, p. 23) explica, o desempenho térmico de uma edificação é resultado direto do seu balanço termoenergético. Os ganhos ou perdas de calor pela envoltória de um edifício, juntamente com a carga interna gerada pelos ocupantes, pelo uso dos equipamentos e pela iluminação artificial são as variáveis que interferem na temperatura interna dos ambientes. Para atingir níveis de conforto aceitáveis e manter a temperatura dentro de limites especificados é necessário utilizar-se de meios naturais ou artificiais de condicionamento de ar, como a ventilação e os sistemas de refrigeração e aquecimento. As propriedades da envoltória influenciam não somente nos ganhos de calor, como também na entrada de luz natural, a qual, se bem aproveitada, pode representar uma redução na carga de iluminação artificial. O consumo energético total pode ser simplificado como a soma do consumo individual dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar. Desta forma é explícita a ligação entre trocas térmicas e a demanda energética de uma edificação.

Carlo (2008, p. 3-4) ainda complementa que:

Programas de eficiência energética para edificações devem incluir etapas que intervenham na envoltória, atuando no projeto e construção da edificação, na eficiência dos sistemas de condicionamento de ar, na eficiência e potência instalada dos sistemas de iluminação e no uso da edificação.

Segundo Pinheiro (2010, p. 1), a envoltória de uma edificação pode ser identificada por suas “[...] características externas, como área de janelas, tipo de vidro, existência e dimensões de proteções solares, dimensões da edificação – proporção das menores fachadas em relação às maiores, número de pavimentos e forma, isolamento térmico e zoneamento bioclimático.”. Lamberts et al. (1997, p. 56) confirmam que o desempenho térmico de uma edificação é diretamente influenciado pelas propriedades de seus materiais construtivos, mais especificamente dos materiais empregados na sua envoltória, pois é nesta interface entre o meio externo e o interno que ocorrem as trocas de calor. Os materiais podem ser classificados

entre opacos e transparentes, distinguidos pela sua capacidade de transmitir, ou não, a radiação solar para o ambiente interno.

3.3.1 Absortividade, refletividade e transmissividade

A radiação solar incidente sobre a superfície de uma edificação terá uma parcela absorvida, uma refletida e outra transmitida. Em fechamentos opacos não há transmissividade, sendo a soma das parcelas absorvida e refletida equivalente a radiação total, portanto, uma superfície com absortividade de 80% necessariamente apresentará um valor de refletividade de 20%. A cor da superfície nestes casos é uma característica determinante (LAMBERTS et al., 1997, p. 57). Em fechamentos transparentes, vidros principalmente, ocorre absorção e reflexão de forma semelhante a dos fechamentos opacos, porém acrescida de uma parcela da radiação que é diretamente transmitida para o meio interno (LAMBERTS et al., 1997, p. 64). São representadas percentualmente.

3.3.2 Emissividade

É uma característica referente especificamente à superfície do material emissor. Representa a quantidade de energia térmica que é emitida por unidade de tempo pela superfície para a camada de ar e interfere diretamente na troca térmica por radiação (LAMBERTS et al., 1997, p. 58). É representada percentualmente.

3.3.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica de um material está relacionada com a sua densidade e representa a capacidade de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo. Quanto maior a condutividade, maior será a quantidade de calor transferida entre superfícies (LAMBERTS et al., 1997, p. 58). É expressa em $W/(m.K)$.

3.3.4 Transmitância térmica

Relacionando-se a capacidade térmica com a espessura do fechamento é possível obter-se o valor de transmitância térmica, propriedade do material em permitir a passagem do calor. É uma característica muito importante, pois possibilita avaliar o comportamento de um fechamento opaco frente a transmissão de calor, permitindo a comparação entre diversas opções de fechamentos (LAMBERTS et al., 1997, p. 60). É expressa em $W/(m^2.K)$.

3.3.5 Inércia térmica

É a capacidade de uma edificação de armazenar e liberar calor. Quanto maior a inércia, menos será sentida a mudança de temperatura ocorrida no meio externo, pois o calor é dissipado tardiamente, evitando a oscilação e os picos durante o dia (PAPST, 1999, p. 8). É representada através do atraso térmico, o que segundo Rivero² (1986 apud PAPST, 1999, p. 9) é o tempo, em horas, necessário para que a diferença térmica ocorrida em um meio se manifeste na face oposta do fechamento.

3.3.6 Fator solar

O fator solar é representado pela razão entre a quantidade de energia solar que atravessa a abertura pelo que nela incide. Cada elemento construtivo possui um valor característico que varia com o ângulo de incidência da radiação solar (LAMBERTS et al., 1997, p. 71). É representado percentualmente.

3.4 FONTES DE CALOR

A seguir são descritas as fontes de calor de uma edificação, classificadas como externas (radiação solar) e internas (provenientes da ocupação, iluminação e equipamentos).

² RIVERO, R. **Arquitetura e clima**: condicionamento térmico natural. Porto Alegre: DC Luzzatto, 1986.

3.4.1 Radiação solar

Dentre as formas de transmissão de calor, Lamberts et al. (2011, p. 88-89) citam três delas que ocorrem na interface entre a edificação e o ambiente externo:

- a) condução, quando ocorre o contato molecular entre os sólidos;
- b) convecção, após o contato molecular entre corpos, sendo pelo menos um deles um fluido, este muda de densidade, provocando a emissão de calor na forma convectiva;
- c) radiação, quando parte do calor de um corpo com maior temperatura chega a um corpo com menor temperatura através da forma de energia radiante, onde é absorvida e novamente transformada em calor, em uma proporção de acordo com as características emissivas da superfície receptora.

O projeto da edificação deve levar em consideração um estudo de clima e do local do empreendimento, visando desenvolvê-lo de tal forma que atinja um nível de desempenho energético satisfatório. Simultaneamente deverá atender às necessidades de conforto do usuário. Dentre os fatores externos podem-se citar o vento, a temperatura, a umidade e a radiação solar, sendo este último o fator mais influente para o ganho térmico nas edificações (LAMBERTS et al., 1997, p. 29-30).

A radiação solar é uma alta fonte de luz e calor que pode ser aproveitada ou evitada, tendo por premissa o conforto térmico e visual e a economia de energia. Conforme Lamberts et al. (1997, p. 29), em muitos casos, somente uma das características da radiação era explorada, a luz ou o calor, comprometendo a outra variável, esta tendo que ser resolvida por sistemas artificiais, potenciais consumidores de energia. Hoje sabe-se que é possível, por exemplo, obter a entrada de iluminação natural, sem que ocorra um aumento significativo na temperatura interna. Lamberts et al. (1997, p. 31-32) também afirmam que a luz natural direta, erroneamente considerada inapropriada para iluminação devido à sua componente térmica, apresenta uma eficácia luminosa superior se comparada a fontes artificiais disponíveis, além de introduzir menor quantidade de calor por lúmen, medida de fluxo luminoso.

A transferência de calor para o interior da edificação pode ocorrer de cinco formas distintas conforme representado na figura 5, por radiação:

- a) solar direta (1);

- b) solar difusa (2);
- c) solar refletida pelo solo e pelo entorno (3);
- d) térmica emitida pelo solo aquecido e pelo céu (4);
- e) térmica emitida pelo edifício (5).

Através de aberturas na edificação, a radiação solar (onda curta) incide sobre os corpos, que se aquecem e também emitem radiação, porém na forma de onda longa. Para este comprimento de onda o vidro comporta-se como material opaco e bloqueia a sua saída, causando o fenômeno chamado efeito estufa, também ilustrado na figura 5 (LAMBERTS et al., 1997, p. 36).

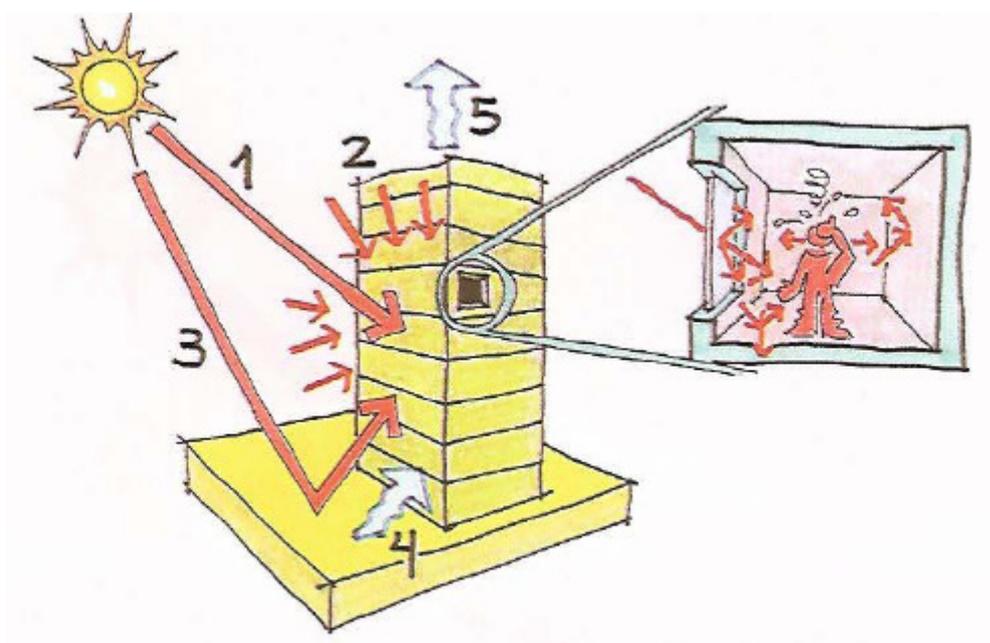


Figura 5: trocas de calor e efeito estufa
(LAMBERTS et al., 2011, p. 37)

O processo de ganho de calor por radiação de uma edificação difere de acordo com o tipo de material constituinte da envoltória. Paredes e estrutura de vedação são considerados materiais opacos, enquanto que janelas e clarabóis são classificadas como materiais transparentes.

3.4.1.1 Materiais opacos

O fluxo de calor nos materiais opacos ocorre do meio de maior temperatura para o de menor temperatura, podendo o processo ser dividido em três fases. Inicialmente a face externa da edificação receberá calor por radiação e convecção, havendo o incremento da temperatura desta superfície, cuja intensidade é diretamente dependente de duas características do material: sua refletividade e absorvidade, ou seja, sua capacidade de refletir e absorver respectivamente, o calor proveniente da radiação (LAMBERTS et al., 1997, p. 56-57). Valores da absorvidade de cores e superfícies são apresentados no quadro 1.

TIPO DE SUPERFÍCIE	α	
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05	
Chapa de alumínio (oxidada)	0,15	
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25	
Caiçãõ nova	0,12 / 0,15	
Concreto aparente	0,65 / 0,80	
Telha de barro	0,75 / 0,80	
Tijolo aparente	0,65 / 0,80	
Reboco claro	0,30 / 0,50	
Revestimento asfáltico	0,85 / 0,98	
Vidro comum de janela	Transparente	
Pintura	- branca	0,20
	- amarela	0,30
	- verde claro	0,40
	- "alumínio"	0,40
	- verde escuro	0,70
	- vermelha	0,74
	- preta	0,97

Quadro 1: absorvidade de cores e superfícies
(adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS
TÉCNICAS, 2005b, p. 8)

Na segunda fase, devido ao diferencial de temperatura entre o meio externo e interno, a troca de calor ocorre na forma de condução, sendo sua intensidade definida pela transmitância térmica do material, equivalente ao inverso da resistência térmica (LAMBERTS et al., 1997,

p. 57). O quadro 2 apresenta valores comuns de transmitância térmica de composições empregadas nas edificações.

ELEMENTO	TIPO	U (W/m ² K)
PAREDES	Tijolo 6 furos espessura 12,5 cm	2,39
	Tijolo 6 furos espessura 17 cm (deitado)	2,08
	Tijolo 8 furos rebocado 12,5 cm	2,49
	Tijolo 4 furos rebocado 12,5 cm	2,59
	Tijolo maciço aparente 9 cm	4,04
	Tijolo maciço rebocado 12 cm	3,57
	Tijolo maciço rebocado 26 cm	2,45
JANELAS	Vidro comum 3 mm	5,79
COBERTURA	Laje concreto 10 cm + fibrocimento	
	Verão - não ventilado	2,04
	Verão - bem ventilado	2,04
	Inverno - não ventilado	2,86
	Inverno - bem ventilado	3,89
	Laje concreto 10 cm + cerâmica	
	Verão - não ventilado	2,04
	Verão - bem ventilado	2,04
	Inverno - não ventilado	2,87
	Inverno - bem ventilado	3,89
	Forro pinus 1 cm + fibrocimento	
	Verão - não ventilado	2,00
Verão - bem ventilado	2,00	
Inverno - não ventilado	2,79	
Inverno - bem ventilado	3,75	

Quadro 2: transmitância térmica dos elementos
(adaptado de LAMBERTS et al., 1997, p. 60)

Durante a terceira fase a troca de calor ocorre entre a face interna e o meio interno da edificação, novamente por convecção e radiação. A emissividade do material influencia diretamente na quantidade de energia térmica que será transmitida (LAMBERTS et al., 1997, p. 59). O quadro 3 exhibe valores de emissividade de diversas superfícies.

TIPO DE SUPERFÍCIE	ϵ
Chapa de alumínio (nova e brilhante)	0,05
Chapa de alumínio (oxidada)	0,12
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)	0,25
Caiação nova	0,90
Concreto aparente	0,85 / 0,95
Telha de barro	0,85 / 0,95
Tijolo aparente	0,85 / 0,95
Reboco claro	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico	0,90 / 0,98
Vidro comum de janela	0,90 / 0,95

Quadro 3: emissividade de superfícies
(adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS
TÉCNICAS, 2005b, p. 8)

3.4.1.2 Materiais transparentes

De acordo com Lamberts et al. (1997, p. 64), materiais transparentes podem ser compreendidos como janelas, clarabóias ou qualquer outro elemento transparente da edificação, nos quais acontecem as principais trocas de calor de uma edificação, principalmente através da forma de radiação, devido à característica de transmissividade destes elementos. Com relação à parcela refletida pelo vidro, esta será maior à medida que o ângulo de incidência da radiação aumentar, enquanto que a parcela absorvida pelo interior do material poderá ser reemitida tanto para o meio externo quanto para o interno. Outros variáveis interferentes no comportamento da entrada de calor pelas aberturas são:

- a) orientação e tamanho da abertura;
- b) uso de proteções solares externas e internas;
- c) tipo de vidro.

Os vidros podem apresentar diferentes valores quanto às suas características ópticas, que são determinantes na troca de calor. Além disso, a quantidade de energia que o corpo absorve, reflete ou transmite depende do comprimento de onda incidente, podendo ser ondas curtas, como as ondas de radiação solar, ou longas, radiações infravermelhas emitidas por corpos

aquecidos. Sendo assim, os materiais foram classificados em cinco diferentes tipos (LAMBERTS et al. 1997, p. 66-67):

- a) vidro simples;
- b) vidro verde;
- c) películas e vidros absorventes;
- d) películas e vidros reflexivos;
- e) plásticos.

A escolha do tipo de material a ser utilizado no fechamento da envoltória é muito importante e deve visar a otimização da interação entre suas propriedades e as condições climatológicas do local do empreendimento. O quadro 4 apresenta valores de propriedades térmicas de diferentes tipos de vidros.

TIPO DE VIDRO	σ	α	ρ
Comum	0,85	0,07	0,08
Absorvente claro	0,52	0,41	0,07
Absorvente médio	0,31	0,63	0,06
Absorvente escuro	0,09	0,86	0,05
Refletor médio	0,25	0,42	0,33
Refletor escuro	0,11	0,42	0,47

Quadro 4: transmissividade, absortividade e refletividade de vidros (RIVERO³, 1986 apud LAMBERTS et al., 2011, p. 99)

3.4.2 Ocupação

Conforme explicam Lamberts et al. (2011, p. 6-7), o ganho de calor proveniente pelos ocupantes do ambiente provém do processo de metabolismo do corpo humano. O metabolismo pode ser compreendido como o processo de produção de energia interna, cujo excedente deve ser liberado para o ambiente externo, de modo a manter a temperatura do

³ RIVERO, R. **Arquitetura e clima**: condicionamento térmico natural. Porto Alegre: DC Luzzatto, 1986.

organismo em equilíbrio. A taxa de calor dissipada é função do tipo de atividade exercida pelo indivíduo e expressa em Met, energia dissipada por uma pessoa relaxada, equivalente a 58,15 W/m² de pele. O ganho total interno pela ocupação depende, portanto, da densidade de ocupação do ambiente, do tipo de atividade realizada e do seu período de duração.

Valores típicos de taxa de calor dissipado de acordo com o ambiente são apresentados no quadro 5, baseados na NBR 16401-1/2008, Instalações de Ar-Condicionado, Sistemas Centrais e Unitários: projeto das instalações. Contudo, devido à falta de estudos na área, o quadro apresentado na Norma é uma adaptação do *Fundamentals handbook*, da ASHRAE⁴, publicado em 2005, no capítulo 30 “*Nonresidential Cooling and Heat Load Calculations*”.

Nível de atividade	Local	Calor total liberado por um homem adulto (W)
Sentado, trabalho leve	Escritórios, hotéis	130
Atividade moderada em trabalhos de escritório	Escritórios, hotéis	140
Parado em pé, trabalhando moderado, caminhando	Loja de varejo	160
Trabalho pesado	Fábrica	470

Quadro 5: taxas típicas de calor liberado por pessoas
(adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS
TÉCNICAS, 2008, p. 53)

3.4.3 Equipamentos

Os equipamentos elétricos durante sua utilização liberam energia que contribuem para o ganho de calor interno da edificação. A NBR 16401-1/2008 apresenta valores expressos em W/m² para diferentes tipos de escritórios, apresentados no quadro 6.

⁴ *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*

Tipo de carga	Densidade (W/m ²)	Descrição do escritório
Leve	5,4	15,5 m ² por posto de trabalho
Média	10,7	11,6 m ² por posto de trabalho
Média/alta	16,2	9,3 m ² por posto de trabalho
Alta	21,5	7,7 m ² por posto de trabalho

Quadro 6: densidade típica de carga de equipamentos para diferente tipos de escritórios (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 56)

3.4.4 Iluminação

Frota (2001, p. 121) afirma que a conversão de energia elétrica em luz gera calor, que é dissipado, por radiação, para as superfícies circundantes, por condução, através dos materiais adjacentes, e por convecção para o ar. Lâmpadas incandescentes convertem apenas 10% de sua potência nominal em luz, enquanto que as fluorescentes convertem 25%.

A geração interna de calor varia de acordo com a luminosidade necessária em cada ambiente. Valores típicos são apresentados no quadro 7.

Local	Tipo de iluminação	Nível de iluminação (lux)	Potência dissipada (W/m ²)
Escritórios e bancos	Fluorescente	500	16
Lojas	Fluorescente	750	17
Residências	Incandescente	150	30

Quadro 7: taxas típicas de dissipação de calor pela iluminação (adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008, p. 54)

3.5 PROTEÇÕES SOLARES

Os ganhos térmicos de uma edificação podem ser significativamente reduzidos através do uso de proteções solares. Para o dimensionamento e posicionamento das mesmas deve-se utilizar do conhecimento do movimento aparente do sol percebido por um observador na Terra, objetivando-se a não permissão da entrada de raios solares no interior do ambiente durante as horas do dia e os meses do ano em que for necessário. Outro fator a ser levado em

consideração é a entrada de iluminação natural, que não deve ser prejudicada (LAMBERTS et al., 2011, p. 58).

Podem ser divididas em proteções internas e externas. Exemplos de proteções internas são as cortinas e persianas, soluções bastante flexíveis, porém pouco efetivas, pois não barram a entrada da radiação, ao mesmo tempo em que contribuem para o efeito estufa do ambiente. Proteções solares externas podem apresentar resultados satisfatórios, desde que bem dimensionadas, não interferindo na iluminação natural. São classificados em brises verticais e horizontais. Portanto, um brise será considerado eficiente quando impedir a entrada de raios solares no período desejado (LAMBERTS et al., 1997, p. 71).

3.6 NBR 15220/2005 – DESEMPENHO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

A NBR 15220, desempenho térmico de edificações, é dividida em 5 partes descritas abaixo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005a):

- a) parte 1: definições, símbolos e unidades;
- b) parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;
- c) parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- d) parte 4: medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;
- e) parte 5: medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Neste trabalho serão abordadas somente as partes 2 e 3.

A parte 2 dessa Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b) estabelece procedimentos para o cálculo das propriedades térmicas – resistência, transmitância e capacidade térmica, atraso térmico e fator de calor solar – de elementos e componentes de edificações. As equações apresentadas pela Norma determinam o fator de ganho de calor solar de uma edificação por seus elementos opacos e transparentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005b, p. 6)

Para elementos opacos a equação a ser utilizada é:

$$FS_o = 100 \times U \times \alpha \times R_{se} \quad (\text{equação 1})$$

Para elementos transparentes a equação a ser utilizada é:

$$FS_t = U \times \alpha \times R_{se} + \tau \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

FS_o = o fator solar de elementos opacos em porcentagem;

FS_t = o fator solar de elementos transparentes ou translúcidos;

U = transmitância térmica do componente ($W/m^2.K$);

α = absorptância à radiação solar – função da cor (adimensional);

R_{se} = resistência superficial externa ($m^2.K/W$);

τ = transmitância à radiação solar.

A parte 3 dessa Norma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c) propõe a divisão do território brasileiro em 8 zonas relativamente homogêneas quanto ao clima, estabelecendo assim o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, ilustrado na figura 6. Visando uma otimização no desempenho térmico de edificações, para cada zona são descritas recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo, com base em parâmetros e condições de contorno fixados, sendo eles:

- a) tamanho das aberturas para ventilação;
- b) proteção das aberturas;
- c) vedações externas (tipo de parede externa e tipo de cobertura);
- d) estratégias de condicionamento térmico passivo.

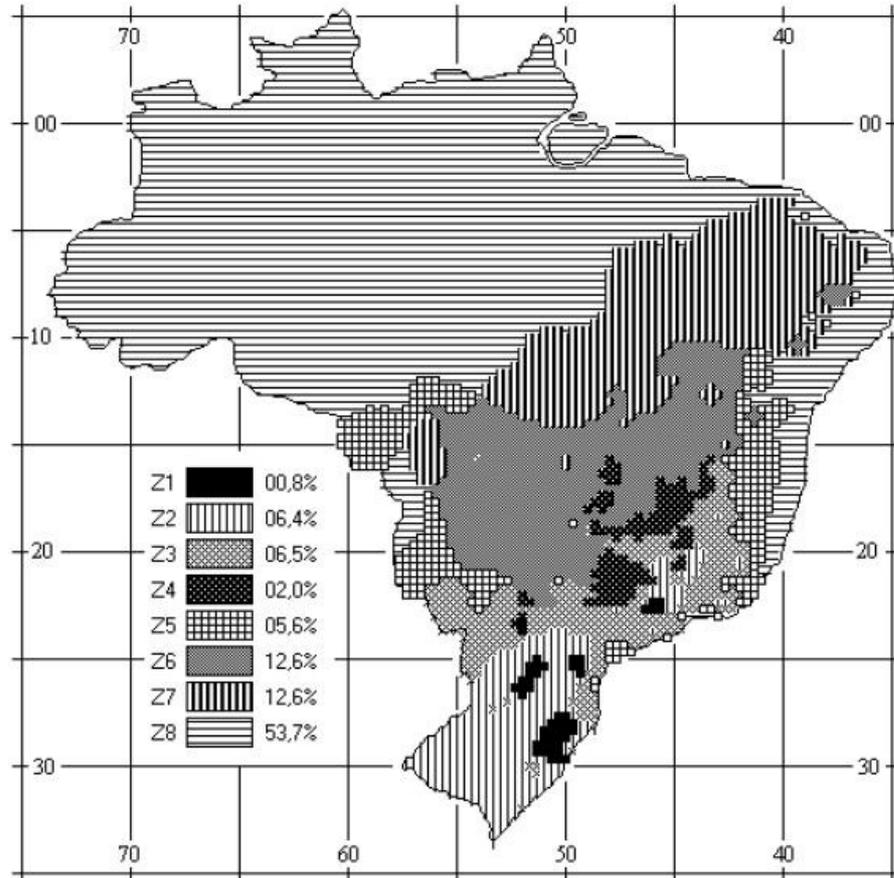


Figura 6: zoneamento bioclimático brasileiro
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c, p. 3)

Porto Alegre é enquadrada como pertencente à zona bioclimática 3. Para esta zona a Norma recomenda as seguintes diretrizes construtivas:

- a) abertura para ventilação: médias (quadro 8);
- b) sombreamento das aberturas: permitir sol durante o inverno;
- c) vedações externas: parede leve refletora e cobertura leve isolada (quadro 9);
- d) estratégias de condicionamento térmico passivo para o verão: ventilação cruzada;
- e) estratégias de condicionamento térmico passivo para o inverno: aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas (inércia térmica).

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$
Médias	$15\% < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

Quadro 8: aberturas para ventilação
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c, p. 17)

Vedações externas		Transmitância térmica - U W/m ² .K	Atraso térmico - ϕ Horas	Fator solar - FS _o %
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FS_o \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS_o \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FS_o \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30.FT$	$\phi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	$FS_o \leq 6,5$

NOTAS
1 Transmitância térmica, atraso térmico e fator solar (ver 02:135.07-001/2)
2 Aberturas efetivas para ventilação são dadas em percentagem da área de piso em ambientes de longa permanência (cozinha, dormitório, sala de estar).
3 No caso de coberturas (este termo deve ser entendido como o conjunto telhado mais ático mais forro), a transmitância térmica deve ser verificada para fluxo descendente.
4 O termo "ático" refere-se à câmara de ar existente entre o telhado e o forro.

Quadro 9: vedações externas
(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005c, p. 17)

3.7 ILUMINAÇÃO SUSTENTÁVEL

Dentro do contexto da sustentabilidade, o projeto de iluminação deve buscar o máximo aproveitamento da luz natural e, de acordo com a necessidade, complementado com iluminação artificial, com o objetivo de se alcançar edificações energeticamente eficientes. Esta combinação proporciona não somente uma redução no consumo de energia elétrica, como também melhora o conforto visual dos usuários (PEREIRA; MUELLER, 2007, p. 29).

Os mesmos autores (2007, p. 30) também salientam que a questão térmica não pode ser dissociada da questão luminosa. A adoção de vãos de grandes dimensões, para possibilitar maior entrada de luz natural, implica maiores ganhos e perdas de carga térmica da edificação, que se refletem na demanda energética do sistema de condicionamento de ar. Portanto, é

importante que o projetista analise soluções para o sombreamento das aberturas, como os brises verticais e horizontais.

A integração entre luz natural e artificial pode ser realizada através das seguintes ações (PEREIRA; MUELLER, 2007, p. 32):

- a) determinação da estratégia de controle (automação) que fará a ligação entre a disponibilidade de luz natural e o sistema de iluminação artificial;
- b) estabelecimento do layout das luminárias em sistemas independentes, de forma a complementar a luz natural ou atuar quando esta não estiver disponível;
- c) escolha de lâmpadas e acessórios energeticamente eficientes;
- d) escolha das luminárias apropriadas à estratégia de controle (automação).

Torres e Alavedra (2010, p. 1) afirmam que através de simulação energética é possível comprovar as reduções de consumo energético. Para tal, é necessário a divisão dos circuitos de iluminação, de modo que as luminárias das zonas periféricas junto às aberturas possam acender ou apagar automaticamente, de acordo com a luminosidade disponível, comandadas por sensores fotoelétricos.

4 SIMULAÇÃO ENERGÉTICA

Neste capítulo é dada atenção à importância de uma simulação energética, a qual propicia a análise de diversas configurações e auxilia no objetivo de projetar edificações com melhor desempenho energético. São detalhados os programas *Energyplus* e *Design Builder* e suas propriedades gerais.

4.1 ASPECTOS GERAIS

Segundo Melo (2007, p. 14), a utilização de simulações térmicas tem por objetivo representar os fluxos de calor e a interação entre o ambiente externo e uma edificação. Uma das vantagens das ferramentas computacionais é a simulação integrada de todos os sistemas e variáveis influentes no desempenho energético e a identificação do efeito de cada uma delas isoladamente, fornecendo a possibilidade de testar soluções mais eficientes sem a necessidade de intervir na edificação.

4.2 PROGRAMAS DE ANÁLISE COMPUTACIONAL

Dentre os programas disponíveis para simulação computacional e análise do desempenho térmico das edificações o mais difundido é o *Energyplus*. Conforme Melo (2007, p. 28) explica:

O programa *Energyplus* foi desenvolvido mediante a fusão dos programas *DOE2* e *BLAST*, com o intuito de criar uma ferramenta que permitisse a simulação da carga térmica e a análise energética de edificações e de seus sistemas. Este programa calcula a carga térmica necessária para aquecer ou resfriar um ambiente. O cálculo é baseado no comportamento térmico e energético da edificação, no clima em que a edificação está inserida e nos valores de cargas térmicas encontrados.

Dentre os pré-requisitos estipulados pelo Inmetro (BRASIL, 2009, p. 52) para validação de simulações energéticas, o principal deles é que o programa seja validado pelo Departamento

de Energia dos Estados Unidos, pelo método ANSI/ASHRAE *Standard* 140, o qual avalia a análise energética de edificações de programas computacionais. O *Energyplus* é um dos programas que atende a este e a todos os demais pré-requisitos.

Segundo Kirchheim (2010, p. 11-12):

A diferença entre o *Energyplus* e os outros simuladores se encontra basicamente em sua interface. Enquanto os softwares pagos possuem uma interface amigável, o *Energyplus* é considerado apenas um “motor” de simulação. A entrada de dados é feita através do preenchimento de dados numéricos em tabelas. Isso torna o processo de descrição da edificação demorado. Interfaces amigáveis permitem a inserção de superfícies (piso, teto e paredes) e sub-superfícies (portas e janelas) em editores gráficos, através de desenhos.

O programa *Design Builder* é uma destas interfaces amigáveis compatível com o *Energyplus*, através do qual é possível realizar a modelagem tridimensional de edificações, agilizando a entrada de dados a serem simulados. Além de informações detalhadas do desempenho termo energético, é possível a obtenção de imagens renderizadas do empreendimento em qualquer etapa do desenvolvimento do projeto. Após a definição de diversas configurações incluindo o tipo de sistema construtivo, sistema de iluminação e condicionamento de ar desejado, é possível aplicá-las às diferentes zonas de acordo com suas particularidades (DESIGN BUILDER, 2011).

4.3 CÁLCULO DA CARGA TÉRMICA

Para o cálculo da quantidade de energia e potência solicitadas, o software *Energyplus* utiliza o método do balanço energético nas zonas térmicas. A equação 3 descreve este algoritmo (UNITED STATES OF AMERICA, 2008, p. 4).

$$\left| \dot{Q}_{sys} \right| = \dot{Q}_{load} = \sum_{i=1}^{N_{st}} \dot{Q}_{si} + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} \cdot A_{si} \cdot (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\infty} - T_z)$$

(equação 3)

Onde:

$\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_{si}$ é a soma das cargas internas convectivas [W];

$\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_{c,si} \cdot A_{si} \cdot (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor convectiva das superfícies das zonas [W];

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{zi} - T_z)$ é a transferência de calor devido à mistura de ar da interzona [W];

$\dot{m}_{inf} \cdot C_{p,zi} \cdot (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor devido à infiltração de ar exterior [W];

$C_{p,z}$ é o calor específico do ar da zona [J/kg.K];

\dot{Q}_{si} é a carga térmica interna convectiva da superfície i [W];

$h_{c,si}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície i [W/m².K];

A_{si} é a área da superfície i [m²];

T_{si} é a temperatura da superfície i [K];

T_z é a temperatura média do ar da zona [K];

\dot{m}_i é a vazão mássica de ar da zona i [kg/s];

$C_{p,zi}$ é o calor específico do ar na zona i [J/kg.K];

T_{zi} é a temperatura média do ar da zona i [K];

\dot{m}_{inf} é a vazão mássica de ar de infiltração [kg/s];

T_{∞} é a temperatura ambiente do ar exterior [K];

\dot{Q}_{sys} é a potência do sistema de HVAC [W].

5 EDIFICAÇÃO ESTUDADA

Neste capítulo relata-se brevemente o prédio estudado, além da descrição de questões referentes à sua modelagem e posterior simulação.

5.1 EDIFÍCIO REAL

O prédio escolhido para o estudo tem previsão de entrega para julho de 2012 e situa-se na Rua Santa Cecília, no bairro Santana, em de Porto Alegre. Inicialmente projetado para ser um hotel, devido a fatores econômicos o projeto teve que ser alterado e modificado para receber salas comerciais, assim como salas de aula. No primeiro e segundo pavimentos estão alocadas áreas de administração da empresa responsável pela área educacional, além de lojas e salas de aula. O terceiro pavimento foi destinado para receber a área de estacionamento do empreendimento. Do quarto ao oitavo pavimento (tipo), a área em planta baixa sofre uma redução e é onde estão localizadas as salas comerciais. Esta área pode ser considerada como a torre e núcleo do edifício. A área da cobertura está junto ao oitavo pavimento e, acima desta, encontram-se a casa de máquinas e espaço destinado para o reservatório superior, totalizando uma área total de 2418 m². A fachada frontal da edificação tem orientação sudeste. A figura 7 ilustra o prédio descrito.



Figura 7: edifício real

Previsto em projeto, o prédio possui do quarto ao oitavo pavimento em sua área central um envidraçamento exterior, utilizando o sistema *spiderglass*, no qual uma estrutura portante garante a sustentação do peso próprio dos vidros além de permitir uma grande flexibilidade, propriedade muito importante quando considerados os efeitos de carga do vento em estruturas de grandes áreas envidraçadas. Além disso, o edifício apresenta muitas janelas em todos os ambientes, garantindo uma porcentagem de aberturas com relação às áreas de vedação considerável, atingindo 35% no pavimento tipo. Soluções construtivas deste tipo possibilitam a entrada de iluminação natural e calor proveniente da radiação solar, o que, dependendo do tipo de vidro e do ambiente interno, pode ser muito vantajoso, conforme será discutido no capítulo seguinte deste trabalho.

Soluções como proteções solares exteriores também foram utilizadas, exemplificadas pela marquise de dois metros de largura posicionada ao longo da periferia do segundo pavimento, protegendo as janelas do primeiro pavimento da insolação direta. Outra medida adotada visando uma melhor eficiência energética do edifício foi a utilização de uma camada de lã de rocha nas lajes expostas, tendo em vista melhorar o isolamento térmico das mesmas, diminuindo o ganho de calor das áreas diretamente abaixo.

Paredes externas e internas foram construídas em alvenaria convencional com blocos cerâmicos, revestidas com reboco e pintadas em ambos os lados. Os entrepisos são constituídas de camadas de laje de concreto armado, contrapiso e lajota cerâmica.

5.2 ESPECIFICAÇÕES DO MODELO

Todas as características construtivas descritas foram incorporadas ao modelo de simulação, porém devido a restrições da versão *trial* do *Design Builder*, foi possível somente a definição de 50 zonas distintas para simulação, considerando-se uma zona como um ambiente isolado por divisórias, reais ou virtuais. Sendo assim, foram tomadas as seguintes medidas para adequação à situação:

- a) lavabos dos pavimentos tipo foram desconsiderados, visto que sua contribuição seja em área ou geração de energia é pouco relevante;
- b) áreas de circulação vertical das escadas foram incorporadas às áreas dos elevadores;

- c) divisões internas entre escritórios, lojas e áreas administrativas não foram modeladas;
- d) estacionamento e o hall do terceiro pavimento não foram modelados, por serem áreas sem ocupação ou pouco relevantes para o estudo;
- e) foi multiplicado por quatro o resultado obtido com a simulação do quinto pavimento, assumindo-se que seu desempenho térmico é muito semelhante aos do quarto, sexto e sétimo pavimentos.

Os valores das propriedades dos materiais utilizados no edifício foram retiradas da NBR 15220-2/2005, Desempenho Térmico de Edificações e apresentadas no quadro 10. Para os diferentes ambientes foram definidas características próprias de ocupação, adaptadas das opções pré-configuradas do programa *Design Builder*, baseadas na *ASHRAE Handbook* (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 1993), conforme apresentado no quadro 11. Os dados climáticos de Porto Alegre utilizados na simulação, que são obtidos diretamente pelas opções do programa simulador, foram disponibilizados pela *Solar and Wind Energy Resource Assessment*.

Elemento construtivo	Componentes	Espessura (mm)	Massa Espec. (kg/m ³)	Cond. Térmica (W/m.°C)	Calor Específico (kJ/kg.°C)	Absorção solar (α)	Emissão Infrav. (ϵ)
Paredes externas 247 mm	pintura branca	1	-	-	-	0,3	0,9
	reboco	25	600	0,16	1	-	-
	alvenaria	190	1250	0,67	0,88	-	-
	reboco	25	600	0,16	1	-	-
	textura	5	1200	0,2	1	-	-
	pintura branca	1	-	-	-	0,3	0,9
Paredes internas 142 mm	pintura branca	1	-	-	-	0,3	0,9
	reboco	25	600	0,16	1	-	-
	alvenaria	90	1250	0,67	0,88	-	-
	reboco	25	600	0,16	1	-	-
	pintura branca	1	-	-	-	0,3	0,9
Lajes externas 202 mm	proteção mecânica	25	600	0,16	1	-	-
	impermeabilização	2	1000	0,23	1,46	-	-
	regularização	25	600	0,16	1	-	-
	lã de rocha	10	35	0,035	0,92	-	-
	concreto armado	140	2300	0,37	0,84	-	-
Lajes internas 200 mm	piso cerâmico	10	1800	0,4	1	0,3	0,9
	contrapiso	50	1300	0,5	1	-	-
	concreto armado	140	2300	0,37	0,84	-	-
Forros 10 mm	gesso simples	10	750	0,35	0,84	-	-
	pintura branca	-	-	-	-	0,3	0,9
Esquadrias PVC	perfil de PVC	2	1300	0,17	1	0,4	0,9
	camada de ar	50	1,2	0,024	1,012	-	-
	perfil de PVC	2	1300	0,17	1	0,4	0,9
Portas	madeira semi-oca	25	700	0,15	1,42	0,78	0,9

Quadro 10: propriedades térmicas dos materiais simulados

Atividade	Densidade (pessoas/m ²)	Metabolismo (W/pessoa)	Comp. e equip. (W/m ²)	Setpoint aquecimento (°C)	Setpoint refrigeração (°C)	Iluminação (W/m ²)
Recepção	0,1008	140	6,19	18	24	10
Escritório	0,111	123	12	18	24	20
Sala de aula	0,2034	140	5	18	24	15
Área de circulação	0,1173	140	1,85	18	24	5
Área não ocupada	0	0	0	10	30	7,5

Quadro 11: configuração das atividades simuladas

O prédio conforme o modelo é ilustrado pela figura 8.



Figura 8: edifício modelado

Para possibilitar o controle do aproveitamento da luz natural para iluminação de interiores foi criada uma zona periférica no entorno dos ambientes simulados. Uma divisória virtual de dois metros de largura, a qual não representa um obstáculo à livre troca de calor entre as zonas, foi adicionada ao modelo, conforme ilustrado na figura 9.

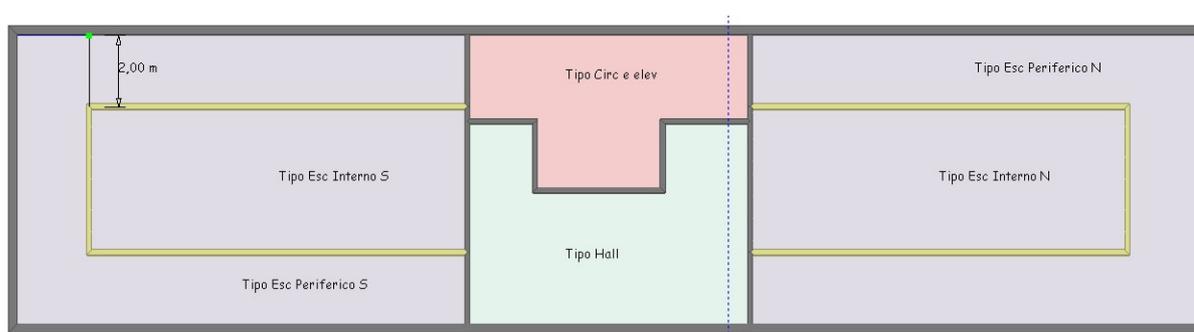


Figura 9: planta baixa do pavimento tipo

5.3 VARIAÇÕES NO MODELO

As variáveis escolhidas foram três tipos de vidro e o controle ou não da iluminação artificial. O controle é do tipo *on/off*, ou seja, quando a iluminação natural for suficiente para suprir a carga de iluminação de referência a lâmpada interna se desliga. O quadro 12 ilustra os vidros

simulados e suas propriedades de transmitância, baseados no catálogo da fabricante *Saint-Gobain*. Foram definidos então seis casos distintos, variando-se o tipo de vidro com ou sem o controle de iluminação, resumidos no quadro 13.

Vidros	Espessura (mm)	Transm. luz (%)	Transm. energia (%)	Transm. Térmica (W/m ² .K)
Simples float incolor	4	90	83	5,8
Simples de controle solar verde	6	12	7	5
Duplo forte isolante	4x6x4*	68	46	2,6
* = 4mm vidro externo, 6 mm de espaçamento preenchido com ar, 4 mm de vidro interno				

Quadro 12: propriedades dos vidros simulados

Caso	Vidro	Controle de iluminação
1	Simples float incolor 4 mm	Sem
2	Simples float incolor 4 mm	Com
3	Simples controle solar verde 6 mm	Sem
4	Simples controle solar verde 6 mm	Com
5	Duplo forte isolante 4x6x4 mm	Sem
6	Duplo forte isolante 4x6x4 mm	Com

Quadro 13: definição dos casos para simulação

6 RESULTADOS

Para melhor comparação do desempenho de cada caso dividiu-se a carga energética total pela área em planta da edificação, obtendo-se a medida kWh/m². Os dados gerais são apresentados nos quadros 14 e 15, divididos em ganhos de calor e demanda energética. Os maiores e menores valores foram destacados utilizando a coloração vermelha e verde, respectivamente.

Ganhos anuais de calor (kWh)	Iluminação	Computadores e equip.	Ocupação	Ganhos solares janelas exteriores	TOTAL (kWh/m ²)
Caso 1	119836	72078	44937	258823	205
Caso 2	73647	72078	44937	258823	186
Caso 3	119836	72078	44937	32928	112
Caso 4	76407	72078	44937	32928	94
Caso 5	119836	72078	44937	193454	178
Caso 6	74446	72078	44937	193454	159

Quadro 14: ganhos anuais de calor da edificação

Demanda energética anual (kWh)	Iluminação	Refrigeração	Aquecimento	TOTAL (kWh/m ²)
Caso 1	119836	240783	7237	152
Caso 2	73647	215568	8487	123
Caso 3	119836	202082	7980	136
Caso 4	76407	178798	9195	109
Caso 5	119836	239026	4761	150
Caso 6	74446	212240	5537	121

Quadro 15: demanda energética anual da edificação

A utilização do controle da iluminação interna é um sistema que se mostra bastante eficiente e de custo insignificante, quando diluído no custo total de execução de uma edificação. A análise da demanda energética anual do sistema de iluminação nos casos com e sem controle aponta uma redução de em média 38%. Se levada em conta somente a região periférica com alcance de 2 metros a partir da parede externa, para a qual os sensores estão configurados, este valor chega a atingir uma redução de 93%. O gráfico da figura 10 apresenta de forma compilada o desempenho do controle de iluminação nos diferentes casos

Corroborando com os resultados obtidos, Torres e Alavedra (2010, p. 6) utilizaram a estratégia de separação de circuitos de iluminação para a zona periférica de 4 torres de escritórios de 30 pavimentos cada em São Paulo, e demonstraram, através de simulações computacionais utilizando o software TAS, a redução das demandas energéticas para iluminação artificial na ordem de 30%.

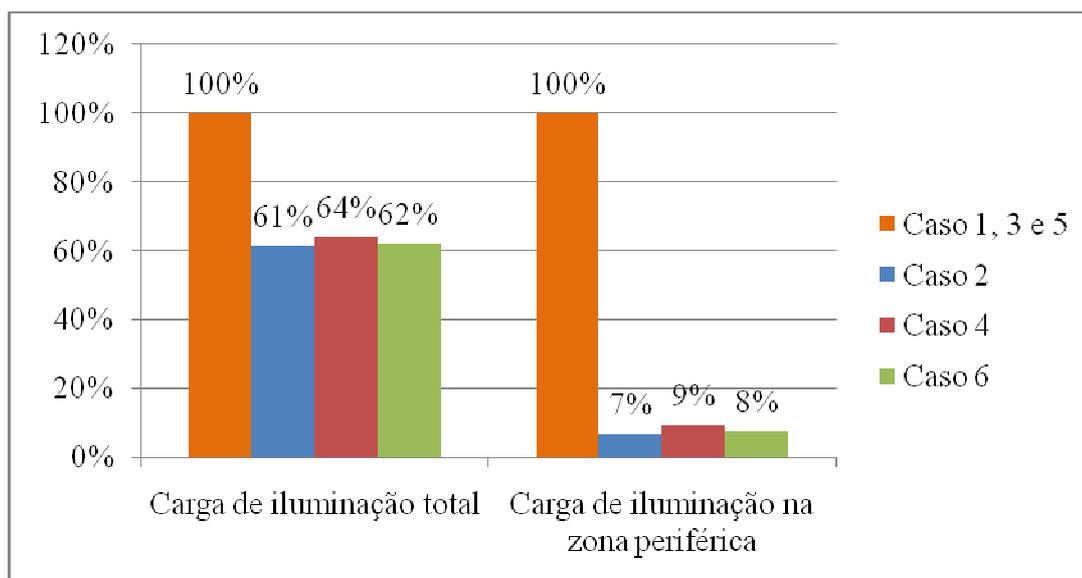


Figura 10: redução da demanda de iluminação total e na zona periférica

Os vidros propiciam a maior ou menor entrada de calor e luz natural devido às suas diferentes propriedades térmicas e solares. O aproveitamento da luz natural para iluminação interna diminui a demanda deste sistema, ao modo que necessariamente induz a maiores ganhos de calor que serão compensados pelo sistema de condicionamento de ar, portanto, faz-se necessário avaliar estas duas características conjuntamente.

Somente através do controle de iluminação artificial é possível ter a dimensão da influência de cada vidro no fator solar das janelas exteriores, ou seja, na porcentagem de energia solar incidente que atravessa a abertura e faz com que os sensores sejam ativados. Deste modo, para garantir uma análise apurada devem ser comparados os casos que se utilizam desta ferramenta: casos dois, quatro e seis.

Os gráficos das figuras 11 e 12 ilustram a relação entre os ganhos de calor de cada caso com as cargas dos sistemas de iluminação e de condicionamento de ar. Para explicitar a eficácia de

cada opção, os dados são expostos percentualmente, estipulando-se como padrão de consumo os valores obtidos no caso dois.

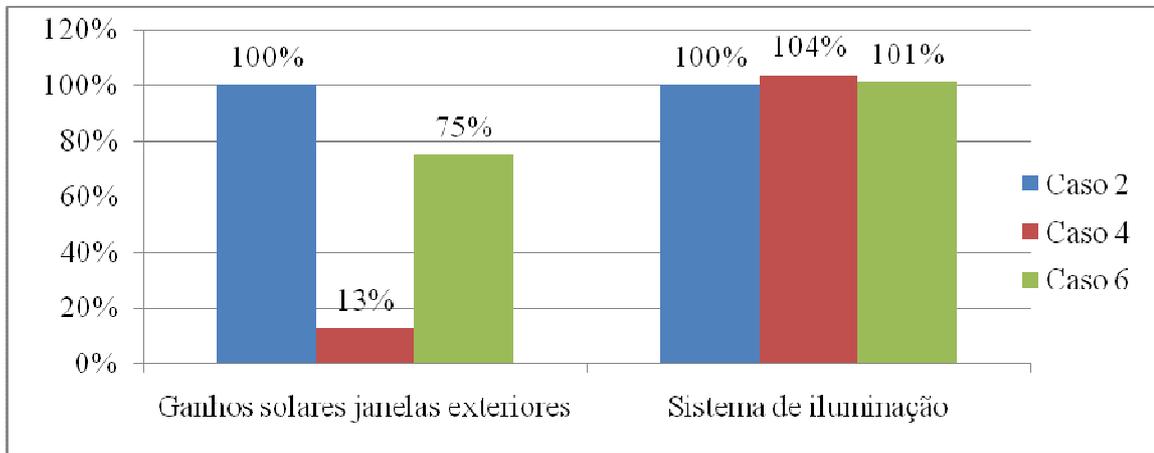


Figura 11: ganhos de calor pelas janelas x carga do sistema de iluminação

Por ser um vidro reflexivo, cujo valor de transmissividade solar está muito abaixo dos demais, o vidro utilizado no caso quatro permitiu ganhos solares de apenas 13% se comparado ao desempenho do vidro comum, empregado no caso dois, enquanto que o vidro do caso seis apresentou um percentual de 75%. Este dado influe diretamente na carga do sistema de iluminação, visto que quanto menor a entrada de luz natural, maior será o consumo elétrico de luz artificial. O caso dois, por consequência, consumiu 4% a menos do que o caso quatro e 1% a menos do que o caso seis.

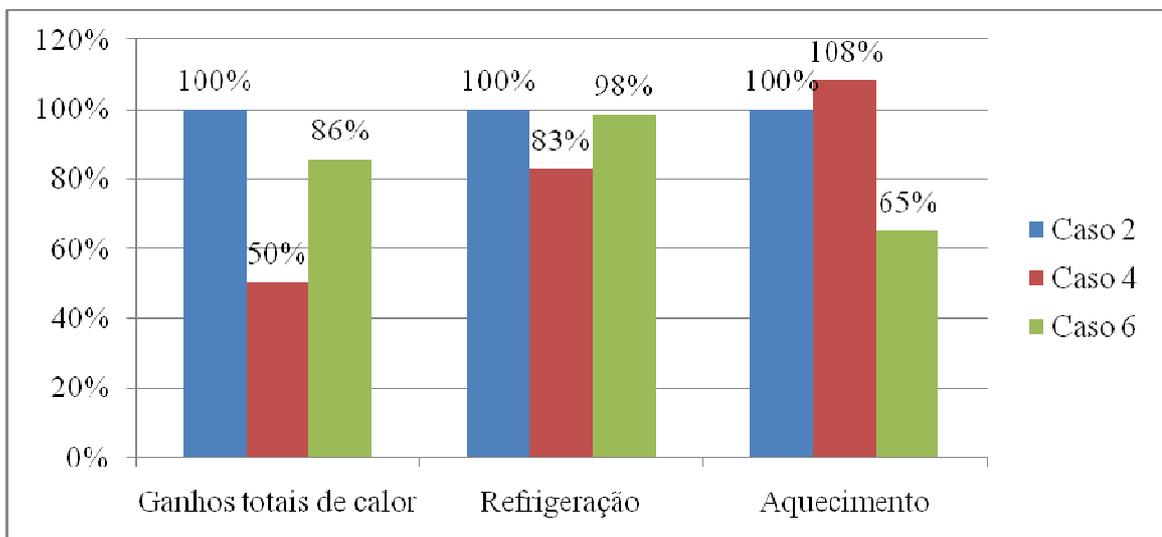


Figura 12: ganhos totais de calor x carga do sistema de condicionamento de ar

Contabilizando não somente os ganhos solares, mas também os provenientes da ocupação, dos equipamentos e da própria iluminação da edificação, os percentuais relativos dos casos quatro e seis representam 50 e 86%, respectivamente, dos ganhos totais de calor do caso dois, ilustrado na figura 12. Sendo assim, por conceder menor entrada de calor no edifício, os casos quatro e seis deveriam apresentar menor demanda do sistema de refrigeração e maior do sistema de aquecimento. Isto somente é válido para o caso quatro, posto que os dados do caso seis desmentem esta teoria.

Contraditoriamente, a carga do sistema de aquecimento do caso seis equivale a 65% do caso dois, enquanto que a carga do sistema de refrigeração é praticamente igual. Isto se deve ao fato que, por ser um vidro duplo forte isolante, este compromete a dissipação do calor interno para o exterior da edificação, ocorrendo de forma muito lenta, o que mantém o ambiente interno aquecido por tempo excessivo e justifica o comportamento observado na demanda do sistema de condicionamento de ar como um todo.

Uma característica de edificações comerciais é o alto ganho de calor interno quando comparado com edificações residenciais, devido à uma maior densidade de pessoas por metro quadrado, maior acúmulo de equipamentos e maior luminosidade requerida, o que fica confirmado quando comparadas as cargas para refrigeração e aquecimento do ar, conforme apresentado na figura 13.

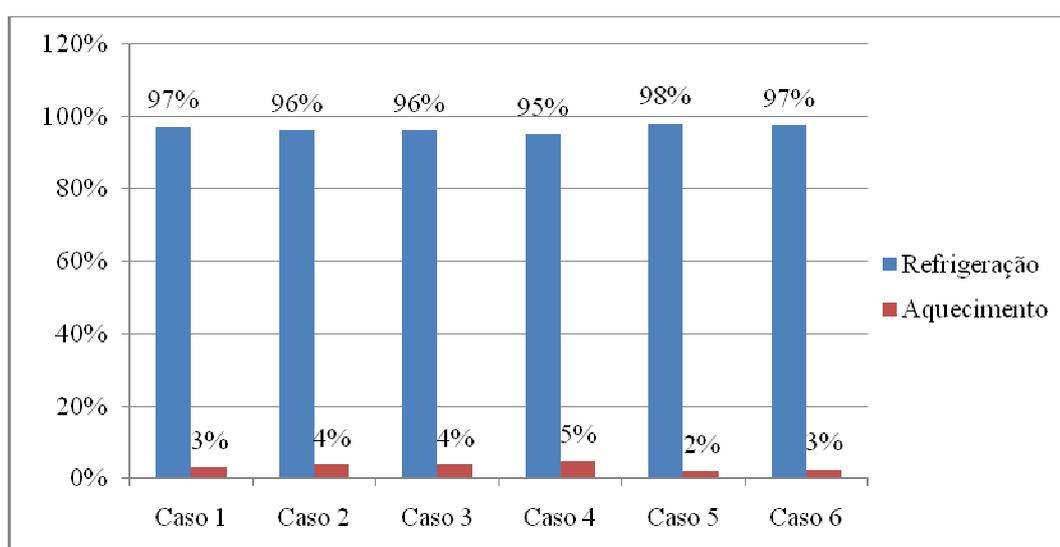


Figura 13: comparativo carga de refrigeração e aquecimento

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da ferramenta de simulação computacional foi possível analisar o impacto de duas variáveis de suma importância na demanda energética da edificação: o controle da iluminação artificial e o tipo de vidro empregado.

Quando avaliada individualmente a contribuição do tipo de vidro na redução do consumo energético, observa-se que a utilização do vidro duplo (casos cinco e seis), apesar de reduzir os ganhos de calor por radiação, não influenciou de forma significativa. Seu desempenho foi comparável ao obtido com o uso do vidro simples convencional de espessura 4 mm (casos um e dois), portanto, quando levados em conta os custos de investimento, fica totalmente descartada a opção por vidros duplos na edificação estudada. Por outro lado, o vidro simples reflexivo de 6 mm (casos três e quatro) reduziu em 11% a demanda energética total, apresentando-se como uma opção a ser analisada.

Quando analisado o potencial do uso de controle da iluminação, este se mostrou altamente vantajoso. Reduções significativas em torno de 38% no sistema de iluminação foram observadas, até mesmo quando utilizado em conjunto com o vidro reflexivo de controle solar (caso 4), indicando que o tipo de vidro utilizado não interfere em sua eficiência.

De forma geral, as configurações construtivas que apresentaram melhores resultados foram as dos casos dois, quatro e seis, casos nos quais havia o controle da iluminação. Dentre estes, o caso quatro obteve maior destaque, reduzindo a demanda total a 109 kWh/m².

Sugestão de tema para posteriores trabalhos referentes ao assunto seria a análise da viabilidade econômica para implantação das soluções descritas e estimação do tempo de retorno do investimento inicial.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 1993.

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

_____. **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. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

_____. **NBR 16401-1**: instalações de ar condicionado, sistemas centrais e unitários – parte 1: projetos das instalações. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria nº 163**, de 8 de junho de 2009. Regulamento técnico da qualidade do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos (RTQ-C). Brasília, DF, 2009. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/projetos/etiquetagem/comercial/downloads>>. Acesso em: 25 out. 2010.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2010**: ano base 2009. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2010.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de metodologia de avaliação da eficiência energética do envoltório de edificações não-residenciais**. 2008. 196 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DESIGN BUILDER. *Design Builder simulation*. Disponível em: <<http://www.designbuilder.co.uk/content/view/7/13/>>. Acesso em: 10 maio 2011.

ELETROBRÁS. **Avaliação do mercado de eficiência energética do Brasil**: sumário executivo ano base 2005. Rio de Janeiro, [2006?]. Disponível em: <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~roberto.sales/EFE/Eletobras-%20Procel/Relatorio_avaliacao_de_EE_Brasil_sumario%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2010.

_____. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso**: classe residencial relatório Brasil. Rio de Janeiro, 2007.

FROTA, A. B. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

KIRCHHEIM, T. A. **Simulação computacional do desempenho energético e luminoso de uma sala comercial em um edifício situado em Porto Alegre, RS.** 2010. 39 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LAMBERTS, R.; PEREIRA, F.; DUTRA, L. **Eficiência energética na Arquitetura.** São Paulo: PW Editores, 1997.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPST, A. L.; CARLO, J. C.; BATISTA, J. O.; MARINOSKI, D. L.; NARANJO, A. **Desempenho Térmico de Edificações.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV5161%20Apostila-v2011.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2010.

MELO, A. P. **Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais.** 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PAPST, A. L. **Uso de inércia térmica no clima subtropical:** estudo de caso em Florianópolis – SC. 1999. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PEREIRA, D. C. L.; MUELLER, C. M. **Iluminação e sustentabilidade:** a integração entre luz natural e artificial. *Lume Arquitetura*, São Paulo, n. 26, p. 28-35, jun/jul 2007.

PINHEIRO, A. P. B. **Envoltória é decisiva para a economia de energia.** 2010. Disponível em: <<http://engenhariaarquitectura.com.br/wp/?p=5121>>. Acesso em: 18 nov. 2010.

TORRES, M. C. A.; ALAVEDRA, P. **Simulación energética computacional para la certificación aqua de un conjunto de edificios de oficinas en Sao Paulo – Brasil.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. 3. 2010, São Paulo. **Anais...** FEC-UNICAMP, 2010.

UNITED STATES OF AMERICA. *Department of energy. Energyplus engineering reference.* Washington, DC, 2010. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Núcleo de pesquisa em construção. laboratório de eficiência energética em edificações. **Eficiência energética em edificações.** Florianópolis, 2010. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/eficiencia-energetica-em-edificacoes>>. Acesso em: 14 dez. 2010.