

ROMEO FERREIRA DOS SANTOS

**A ARQUITETURA E A EFICIÊNCIA NOS USOS FINAIS DA ENERGIA
PARA O CONFORTO AMBIENTAL**

**Dissertação apresentada ao
Programa Interunidades de Pós-
Graduação em Energia (*IEE/EP/
IF/FEA*) da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título
de Mestre.**

São Paulo

2002

ROMEO FERREIRA DOS SANTOS

**A ARQUITETURA E A EFICIÊNCIA NOS USOS FINAIS DA ENERGIA
PARA O CONFORTO AMBIENTAL**

**Dissertação apresentada ao
Programa Interunidades de Pós-
Graduação em Energia (*IEE/EP/
IF/FEA*) da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título
de Mestre.**

Área de Concentração: Energia

**Orientador:
José Manuel de Vasconcelos Martins**

São Paulo

2002

Santos, Romeo Ferreira dos

A ARQUITETURA E A EFICIÊNCIA NOS USOS FINAIS DA ENERGIA PARA O CONFORTO AMBIENTAL. São Paulo, 2002.

87p.

Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (IEE/EP/IF/FEA) da Universidade de São Paulo. Área de Concentração: Energia.

1. A importância do conforto térmico na matriz energética brasileira. 2..Principais parâmetros que influenciam o desempenho energético em edificações. 3. Metodologia para determinação do desempenho energético em edificações. 4. O uso de simulações numéricas para avaliação da influência de parâmetros arquitetônicos no desempenho energético em edificações; análises e conclusões. 5. Comentários gerais e recomendações finais. Universidade de São Paulo. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. IEE/EP/IF/FEA II. Título

À minha esposa Kazue e aos meus
filhos Newton e Marcelo com carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. José Manuel de Vasconcelos Martins, pelas diretrizes seguras e permanente motivação.

Aos professores do Instituto de Eletrotécnica e Energia pelas informações e conhecimentos transmitidos; aos colegas e funcionários pela amizade e informações recebidas.

Ao amigo Prof. Dr. Fuad Daher Saad, pelas valiosas sugestões, constante incentivo e motivação; aos professores Paulo Yamamura, Cláudio Hyroyuki Furukawa e Denise Gomes dos Reis pelas amizades, estímulo e apoio.

À minha esposa Profa. Kazue Yamada Ferreira dos Santos, pela criteriosa revisão dos originais.

Aos meus filhos Newton e Marcelo pela colaboração e contribuição com recursos de informática para a execução deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como foco o estudo da influência dos principais parâmetros arquitetônicos de edificações comerciais nas demandas de energia elétrica para fins de condicionamento ambiental.

É feita uma análise da importância do conforto térmico na matriz energética brasileira face ao crescimento dos diversos setores da economia que se dá com uma exigência energética cada vez maior, mormente os setores comercial e público com intenso uso de aparelhos de ar condicionado.

São analisadas as leis e os principais mecanismos de como as trocas de calor ocorrem entre as edificações e o ambiente, e a complexidade de seu cálculo.

Discute-se a metodologia de simulações numéricas em computador para calcular-se as referidas trocas de calor e mostra-se como funcionam os programas e os procedimentos para o seu uso.

Foram feitas simulações visando avaliar a influência dos parâmetros arquitetônicos e os resultados obtidos apontam a sua importância nas trocas de energia em edificações, para minimizar-se o uso da energia elétrica na manutenção do conforto térmico.

Verifica-se que é primordial a utilização do método de simulações numéricas computacionais na avaliação da eficiência energética, como feito aqui, para que diferentes alternativas de projetos da edificação possam ser estudadas.

Sugere-se a realização de estudos, procurando-se alternativas arquitetônicas que minimizem a demanda de energia para fins de condicionamento ambiental e da viabilidade econômica das soluções propostas.

Finalmente, espera-se com este estudo despertar e fomentar o interesse na busca de soluções técnicas que permitam a economia de energia elétrica em edificações, minimizando os problemas de degradação ambiental e promovendo o desenvolvimento energético sustentável sem prejuízo do conforto térmico.

A B S T R A C T

The present work is a study focused on the influence of main architectonic parameters in energy demand of commercial buildings, for ambiental conditioning.

An analysis is made about the importance of thermal comfort in Brazilian energetic sector towards the growth of different economics sectors which need a great amount of energy, mainly in commercial and public ones, with intense use of conditioned air.

Physical laws and main mechanisms are analysed, and how heat interchanges occur between the inner and the outdoor of buildings, and the complexity of their calculation.

Discussions are made about the methodology of numerical simulations through the use of computer to calculate those heat interchanges and it is shown how the programs work and the procedures in their use.

Simulations have been done in order to evaluate the influence of those architectonic parameters; the obtained results indicate their importance in the interchanges of energy in buildings, in order to minimize the energy use in keeping thermal comfort.

It is verified that it is fundamental the use of numerical simulations through the use of computer in the evaluation of energetic efficiency, in this case, for the purpose of studying different alternatives of building designs.

They are suggested studies seeking for architectonic alternatives which can minimize energy demand for environmental conditioning, and the economic availableness of offered solutions.

Finally, it is hoped this work may awake and instigate architects and the profession in searching out technical solutions that permit energy use savings in buildings, minimizing problems of environmental degradation and promoting sustainable development without prejudice of thermal comfort.

SUMÁRIO

Lista de tabelas	
Lista de figuras	
Resumo	
“Abstract”	
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 O conforto térmico e a matriz energética brasileira.....	1
1.1.1 A evolução da oferta e da demanda de energia no Brasil.....	1
1.1.1.1 Energia em geral.....	1
1.1.1.2 Energia elétrica.....	3
1.1.2 A energia elétrica no setor de edificações comerciais e públicas.....	5
1.1.3 O suprimento de energia elétrica, opções de aumento de oferta e necessidades.....	6
1.1.3.1 Aumento da oferta de energia elétrica.....	6
1.1.3.2 Minimização da demanda de energia elétrica.....	7
1.1.4 Usos da energia elétrica nas edificações comerciais e públicas.....	8
1.1.5 Questões relacionadas à energia elétrica em edificações.....	8
1.1.5.1 Penetração do ar condicionado nos setores comercial e público.....	8
1.1.5.2 Situação atual dos projetos de ar condicionado.....	10
1.1.5.3 Energia e arquitetura da edificação.....	11
1.1.6 A economia de energia elétrica em condicionamento ambiental.....	11
1.2 Objetivos e metodologia.....	14

2 PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO

ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES.....	17
2.1 Conceito de eficiência energética em edificações.....	17
2.2 Parâmetros que não dependem da arquitetura da edificação.....	19
2.2.1 O clima.....	19
2.2.1.1 Conceito de clima.....	19
2.2.1.2 Tipos de clima.....	19
2.2.1.3 Os parâmetros climáticos.....	21
2.2.1.3.a Radiação solar.....	21
2.2.1.3.b Temperatura e umidade do ar (ambiente).....	22
2.2.1.3.c Movimentos do ar.....	24
2.2.1.4 O tratamento dos dados meteorológicos.....	25
2.2.2 As fontes de energia dentro da edificação.....	26
2.2.2.1 Iluminação artificial.....	26
2.2.2.1.a Aspectos gerais da iluminação.....	26
2.2.2.1.b Tipos de lâmpadas.....	27
2.2.2.2 Equipamentos e aparelhos.....	27
2.2.2.3 Condições de ocupação.....	28
2.2.3 As trocas de ar com o meio ambiente.....	28
2.2.4 As condições de operação do sistema de ar condicionado.....	28
2.3 Parâmetros que dependem da arquitetura da edificação.....	29
2.3.1 Os fechamentos opacos da envoltória.....	30
2.3.1.1 Condutividade térmica.....	30

2.3.1.2	Capacidade térmica.....	31
2.3.1.3	Absortância e refletância.....	32
2.3.2	Os fechamentos transparentes da envoltória da edificação.....	33
2.3.2.1	Função.....	33
2.3.2.2	Tipos de materiais utilizados nos fechamentos transparentes.....	34
2.3.2.2.a)	Vidro.....	34
2.3.2.2.b)	Protetores solares/sombras.....	36
2.3.2.2.c)	Plásticos translúcidos.....	37
2.3.2.3	Área transparente.....	38
2.3.3	A forma arquitetônica e a orientação geográfica.....	38
3	METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO	
	ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES.....	40
3.1	Os mecanismos envolvidos nas trocas de energia.....	40
3.1.1	A Primeira Lei da Termodinâmica.....	40
3.1.2	Os mecanismos de transferência de calor.....	43
3.1.2.1	Condução.....	43
3.1.2.2	Convecção.....	43
3.1.2.3	Radiação.....	44
3.2	Os métodos de cálculo de trocas de energia.....	45
3.3	Os métodos de simulação computacional.....	46
3.3.1	Como funcionam os métodos.....	46
3.3.2	Dados necessários à execução dos métodos computacionais.....	49

3.3.2.1	Descrição da edificação, das propriedades e das características dos materiais construtivos.....	49
3.3.2.2	Descrição da ocupação.....	50
3.3.2.3	Descrição do sistema de ar condicionado.....	50
3.3.2.4	Descrição dos equipamentos de ar condicionado.....	51
3.3.2.5	Descrição das condições de exposição ao clima.....	51
3.3.2.6	Descrição dos dados para análise de viabilidade econômica.....	51
3.3.2.7	Seleção dos dados de saída.....	52
3.3.3	Os programas existentes de simulação.....	52
3.3.3.1	O programa NBSLD (National Bureau of Standards – Load Determination).....	53
3.3.3.2	O programa DOE-2.....	53
3.3.4	O programa Visual DOE-2.5.....	54
3.3.4.1	Descrição do programa Visual DOE-2.5.....	55
3.3.4.2	Os pontos fortes do programa Visual DOE-2.5.....	63
4	O USO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS ARQUITETÔNICOS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES; ANÁLISES E CONCLUSÕES.....	64
4.1	Descrição da edificação escolhida.....	64
4.1.1	Parâmetros arquitetônicos.....	64
4.1.2	Propriedades e características dos materiais construtivos.....	65
4.1.3	Ocupação da edificação.....	65

4.1.4	Operação da edificação.....	65
4.1.5	Sistemas de ar condicionado, de aquecimento de água e planta central.....	66
4.2	Procedimento para realização das simulações.....	67
4.3	Influência dos diversos parâmetros no desempenho energético; análises e conclusões.....	68
4.3.1	Área envidraçada.....	68
4.3.2	Absortância (cor) da envoltória.....	70
4.3.3	Forma.....	71
4.3.4	Massa (espessura) das paredes.....	73
4.3.5	Temperatura do ar.....	74
4.3.5.1	Temperatura no interior.....	74
4.3.5.2	Operação do sistema de ar condicionado... ..	75
4.3.6	Localização.....	76
4.3.7	Uma edificação comercial otimizada.....	78
	5 COMENTÁRIOS GERAIS E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	80
	BIBLIOGRAFIA.....	85

LISTA DE TABELAS

1.1	Potencial de economia de energia elétrica no setor comercial.....	12
2.1	Propriedades de alguns materiais de construção.....	31
2.2	Variação da absorvância X cores.....	33
2.3	Valores típicos de propriedade de alguns vidros.....	36
2.4	Coefficiente de sombreamento de vidro combinado.....	37
2.5	Valores típicos de propriedades de plásticos translúcidos.....	38
4.1	Parâmetros básicos.....	67
5.1	Quantidade de Carbono por kWh.....	79

LISTA DE FIGURAS

1.1	Evolução da OIE e do PIB.....	2
1.2	Relação OIE/PIB.....	2
1.3	Relação OIE/POP.....	2
1.4	Evolução da demanda final de energias (total e elétrica).....	3
1.5	Evolução das demandas de energia em TWh.....	4
1.6	Evolução das relações (energia elétrica/PIB).....	5
1.7	Estatísticas de vendas de ar condicionado central	9
3.1	Diagrama dos programas de simulação computacional.....	48
3.2	1ª pasta “Project”.....	56
3.3	2ª pasta “Blocks”.....	56
3.4	3ª pasta “Zones”.....	57
3.5	4ª pasta “Facades”.....	57
3.6	5ª pasta “Systems”.....	58
3.7	5ª pasta a) “System Editor”.....	58
3.8	5ª pasta b) Sistema de aquecimento de água.....	59
3.9	5ª pasta c) “Central Plant Editor”.....	59
3.10	6ª pasta Sistema HVAC.....	60
3.11	Seleção de dados de saída (relatórios).....	62
3.12	Tipo de ocupação e dados de operação.....	62
4.1	Planta e corte da edificação adotada.....	64
4.2	Esquemas de ocupação.....	66

4.3	Influência da área envidraçada da edificação.....	68
4.3.a	Potências de pico em função da área envidraçada.....	69
4.3.b	Influência da posição geográfica.....	69
4.3.c	Potências em função da posição da parede com área envidraçada.....	70
4.4	Influência da cor externa da envoltória.....	70
4.4.a	Potências de pico em função da cor.....	71
4.5	Influência da forma da edificação.....	72
4.5.a	Potências de pico em função da forma.....	73
4.6	Influência da massa (espessura) das paredes.....	73
4.6.a	Potências de pico em relação às espessuras das paredes.....	74
4.7.a	Influência da temperatura do ar no interior da edificação.....	75
4.7.b	Potências de pico em função da temperatura do ar no interior.....	75
4.8.a	Influência da variação ΔT da temperatura (“setpoint”) do ar interior.....	76
4.8.b	Potências de pico em função da variação do ΔT	76
4.9	Influência dos climas locais.....	77
4.9.a	Potências de pico em relação aos climas locais.....	77
4.10	Edificações otimizada e não otimizada.....	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 O conforto térmico e a matriz energética brasileira

Para um melhor entendimento da importância do conforto térmico⁽¹⁾ na matriz energética, inicialmente, será apresentada, nesta introdução, uma breve visão da:

- evolução da oferta e da demanda de energia em geral;
- relação da energia com o PIB (Produto Interno Bruto) e com a população brasileira;
- evolução e participação da energia elétrica na demanda de energia em geral e a demanda nos diversos setores da economia do Brasil;
- evolução dos setores comercial e público, e a estreita correlação entre o conforto térmico e a demanda de energia nas edificações desses setores;
- problemática para o crescimento do setor elétrico brasileiro.

1.1.1 A evolução da oferta e da demanda de energia no Brasil

1.1.1.1 Energia em geral

De acordo com dados do Balanço Energético Nacional – BEN 2000– ano base 1999, no período de 1984-1999, a evolução do setor energético acompanhou o crescimento da economia do país, havendo um forte paralelismo entre a oferta interna de energia **(OIE)** e o produto interno bruto **(PIB)** do Brasil. Essa evolução observou uma taxa média anual de 4,2% e um comportamento diferenciado entre

(1) “**Conforto térmico** pode ser compreendido como um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de calor a que está submetido o corpo for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites, pode-se dizer que o homem sente conforto térmico”. ASHRAE 1993 American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

as décadas de 1980 e 1990 como mostra a **figura 1.1**:

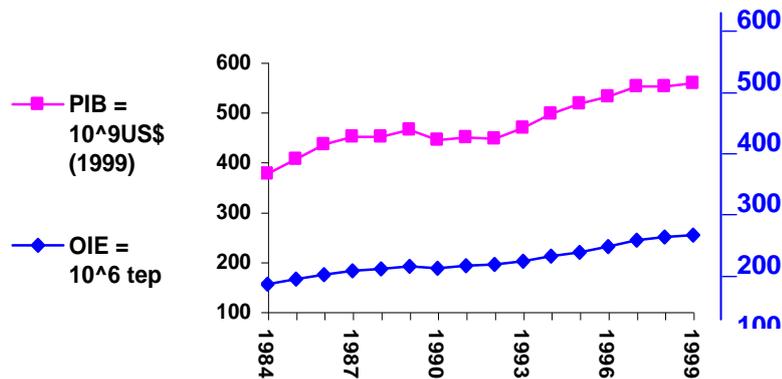


Figura 1.1: Evolução da OIE e do PIB

Nas **figuras 1.2** e **1.3** é mostrado como a oferta interna de energia (**OIE**) está relacionada com o crescimento da economia (**PIB**) e com o crescimento da população (**POP**), no período (1984/1999). Nos dois casos, os comportamentos são semelhantes:

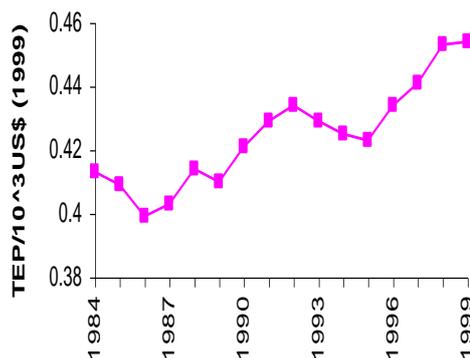


Figura 1.2: Relação OIE/PIB

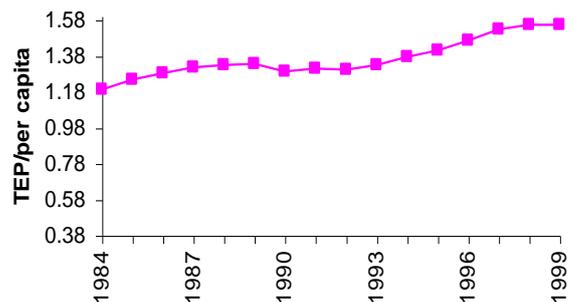


Figura 1.3: Relação OIE/POP

- O crescimento da economia se deu com uma exigência maior de OIE por unidade de PIB, isto é, a evolução da necessidade energética medida a partir da variação média da oferta interna de energia (OIE) em relação à do PIB (**OIE/PIB**) é da ordem de **0,8% a.a.** no período de 1984 a 1999;

- A população também cresceu necessitando-se de maior OIE /habitante, pois a evolução da necessidade energética medida a partir da variação média da oferta interna de energia (OIE)/per capita é da ordem de **2,0% a.a.**, no referido período. Ressalta-se, aqui, "...o cuidado que deve ser tomado ao se utilizar indicadores per capita, em virtude do caráter extremamente desigual da distribuição de renda no Brasil. Os indicadores per capita escondem a desigualdade."(BERMANN, 2002).

1.1.1.2 Energia elétrica

Nessa evolução da demanda final total, destaca-se a energia elétrica que teve sua participação aumentada de **32,9%** em 1984, para **39,5%** em 1999, com um crescimento, no período, de **97%** (de 46,4 tep para 91,3 tep), o que corresponde a um aumento médio de **4,6% a.a.** (vide **figura 1.4**):

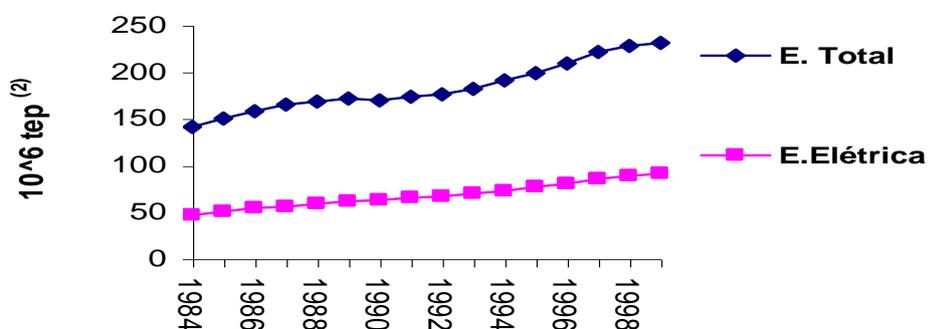


Figura 1.4: Evolução da demanda final de energias (total e elétrica)

(2) 1 MWh = 0,290 tep, equivalente calórico do kWh = 3132 kcal correspondente a uma quantidade virtual de óleo com eficiência média de geração térmica de 27,5%. (BEN 2000 - ano base 1999).

Em termos de **TWh**, a demanda total de energia nos diversos setores da economia , já de **158,5 TWh** em 1984, alcançou a casa dos **315 TWh** em 1999 (cerca de 100% a mais), (vide **figura 1.5**).

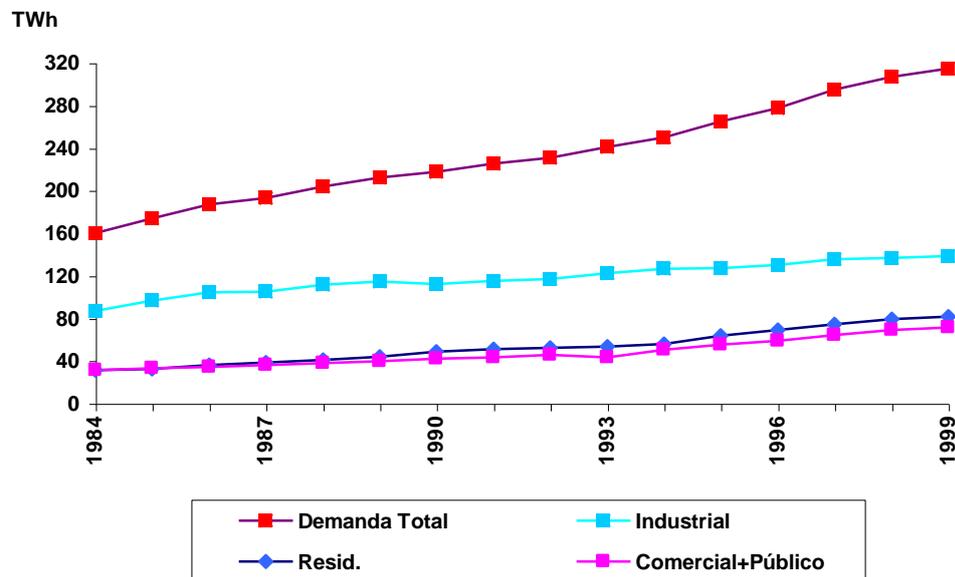


Figura 1.5: Evolução das demandas de energia em TWh

Para atender essa evolução de demanda, o setor elétrico do Brasil teve de aumentar , no mesmo período, a sua capacidade instalada de geração, **41,2 GW**, em 1984, contando com **68,2 GW** em operação, em dezembro de 1999.

Esse crescimento da demanda de energia elétrica no país se deve principalmente:

- à substituição de outros energéticos (lenha, carvão vegetal) pela eletricidade;
- ao aumento de segmentos industriais energointensivos;
- ao aumento da população nos centros urbanos, na década de 1980;
- ao desenvolvimento ocorrido no setor comercial com a modernização de serviços nos últimos anos da década de 1990.

1.1.2 A energia elétrica no setor de edificações comerciais e públicas

Conforme os dados do BEN 2000, a participação dos setores comercial e público na demanda total de energia do país, que era de **6,9%** (9761×10^3 tep), em 1984, passou para **9,6%** (22254×10^3 tep), em 1999, o que corresponde a um aumento de **128%** no período. Nessa demanda dos referidos setores, a energia elétrica tem uma participação de **92%** (71,2 TWh) e corresponde a **22,6%** da demanda total (315 TWh) de eletricidade do Brasil.

A **figura 1.6** mostra a evolução das relações entre demanda total de energia elétrica pelo PIB brasileiro **[(EE Total)/PIB]** e a demanda dos setores de edificações comerciais e públicas pelo PIB desses setores. **[(EEcomercial e público) / PIB setores]:**

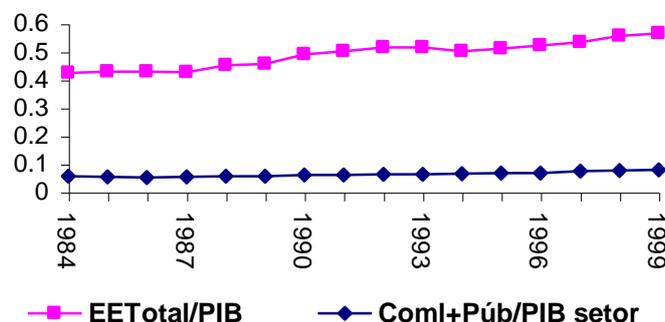


Figura 1.6: Evolução das relações (energia elétrica/PIB)

Observa-se que a evolução econômica dos setores de edificações comerciais e públicas se deu com uma intensidade de energia elétrica de **1,43** para cada unidade do PIB desses setores, maior que a do país como um todo (**1,32**).

Essa demanda de energia elétrica “continuou refletindo a expansão, a modernização dos serviços e o uso mais intenso de aparelhos de ar condicionado, além da abertura de grandes centros comerciais.” (BEN – 2000).

Porém, ao longo do tempo, verifica-se estar havendo um aumento da ineficiência energética uma vez que para cada unidade de PIB está se

necessitando de mais energia conforme mostrado nas curvas representativas das evoluções no período 1984-1999. Isso deveria ser ao contrário; com a atual preocupação de economia de energia era de se esperar que essas curvas tivessem uma inflexão no sentido de diminuir.

1.1.3 O suprimento de energia elétrica, opções de aumento de oferta e necessidades

Num curto prazo, a necessidade de expansão do potencial elétrico instalado torna-se evidente, para atender a demanda futura de energia elétrica e evitar medidas de racionamento como as verificadas recentemente. Porém isso vai exigir uma alavancagem de capitais hoje escassamente disponíveis. Além dessa barreira financeira, a expansão do setor elétrico brasileiro enfrenta outros problemas para:

1.1.3.1 Aumento da oferta de energia elétrica

- no Brasil, aproximadamente 90% da energia elétrica é proveniente de usinas hidroelétricas e os grandes potenciais a aproveitar encontram-se, em sua maior parte, na região Amazônica e nas bacias dos rios Paraná e Uruguai. A implantação de empreendimentos hidrelétricos nessas regiões envolvem questões ambientais e sociais;
- a instalação de usinas termelétricas provoca impactos ambientais devido à emissão do gás CO₂, considerado o maior responsável pelo efeito estufa (aquecimento global do planeta Terra);
- as fontes alternativas foram muito pouco desenvolvidas considerando o potencial existente. Por exemplo, a **cogeração** com potencial da ordem de 4000 MW, utilizando bagaço de cana, e uma capacidade instalada

aproximada de 30%; a **eólica**, com um potencial estimado de 30 GW e uma capacidade instalada de geração de energia da ordem de 60%; a **energia solar**, com um potencial abundante no Brasil, mas que exige uma grande quantidade de painéis fotovoltaicos para suprir necessidades futuras de energia elétrica (BERMANN, 2002).

1.1.3.2 Minimização da demanda de energia elétrica

Devido às dificuldades de instalação de novas usinas elétricas, há que se pensar em formas de minimizar a demanda de energia elétrica sem que haja diminuição das atividades econômicas.

Entre as alternativas possíveis, tem-se:

- a utilização de tecnologias mais eficientes nos processos de conversão de energia: força motriz (motores por indução); ar condicionado e iluminação (lâmpadas fluorescentes); refrigeração entre outros;
- implementação de programas nacionais de combate ao desperdício, por exemplo:

-“PROCEL nas Escolas” - projeto de educação ligado à ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S. A.;

-“CONPET na Escola” ligado à PETROBRÁS – Petróleo Brasileiro S. A..

Cabe ressaltar, porém, que a adoção desses programas tornou-se mais difícil com o processo de privatização, principalmente, do setor energético (separação das atividades de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica). Na atual conjuntura, as empresas de distribuição de eletricidade não possuem nenhuma motivação para a sua implementação, embora sejam obrigadas a destinar 1% da receita operacional anual ao

desenvolvimento de ações com o objetivo de incrementar a eficiência no uso e na oferta de energia elétrica. Mas a implementação dessas ações encontra dificuldades na falta de mecanismos de controle social sobre a aplicação daqueles recursos financeiros (BERMANN, 2002).

1.1.4 Usos da energia elétrica nas edificações comerciais e públicas

A demanda de energia elétrica no setor de edificações pode ser dividida nas seguintes partes:

- energia elétrica utilizada no beneficiamento, fabricação, elevação e instalação de materiais na fase de construção da edificação;
- energia elétrica utilizada em função da ocupação e na operação dos edifícios: equipamentos e aparelhos de uso comercial e público, elevadores e bombas, e, de forma mais intensiva (cerca de 60% da demanda de eletricidade dos setores), em sistemas de iluminação e de condicionamento ambiental.

1.1.5 Questões relacionadas à energia elétrica em edificações

1.1.5.1 Penetração do ar condicionado nos setores comercial e público

Os setores comercial e público são os que mais se utilizam de sistemas de ar condicionado devido:

- ao crescimento e à modernização da área de serviços;
- à construção de grandes centros comerciais;
- à ampliação do horário de funcionamento do comércio;
- à necessidade de redução de níveis de ruído e melhoria das condições de conforto nos recintos de trabalho para aumentar a produtividade.

Isso é mostrado pelo aumento de **350%** nas vendas de equipamentos de ar condicionado na década de 90, conforme estatísticas representadas na **figura 1.7:**

1.7:

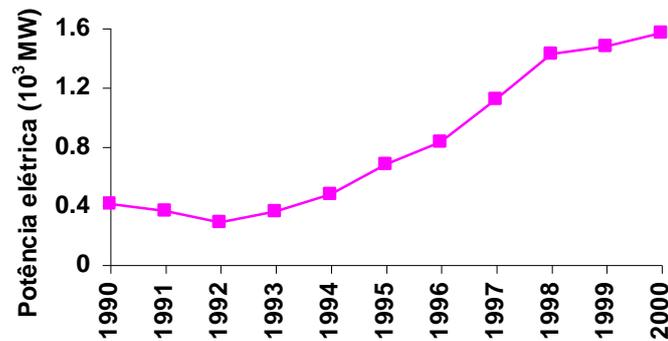


Figura 1.7: Estatísticas de vendas de ar condicionado central ⁽³⁾

Observa-se que a potência elétrica total de sistemas centrais de ar condicionado, vendidos nos últimos oito anos da década de 90, praticamente quintuplicou. Ao se considerar todos os equipamentos vendidos ainda em condições de uso, a potência equivalente total (cerca de **8900 MW**) corresponde quase à da hidroelétrica de Itaipu (**12000 MW**). Supondo um fator de carga de 40% (**3500 MW**) dessa potência instalada em operação, tem-se uma demanda de energia elétrica de aproximadamente **30,5 TWh/ano** para fins de ar condicionado. Isso, por exemplo, comparando com a demanda total (**71,2 TWh**) de energia elétrica no ano de 1999 dos setores comercial e público, corresponde a quase **50%** só com ar condicionado.

(3) Fonte: ABRAVA - Associação Brasileira de Ventilação e Ar Condicionado.

1.1.5.2 Situação atual dos projetos de ar condicionado

Hoje, as questões relacionadas a:

- demanda;
- problemática de suprimento;
- necessidades de economia de energia elétrica

são conhecidas e constituem também desafios para o setor de edificações. Porém a implementação de metodologias para avaliação de desempenho energético está no começo. Comumente, as edificações, além de não atenderem as condições de conforto térmico, envolvem demanda excessiva de energia elétrica. Essa situação, em geral, resulta de uma regulamentação que está mais voltada a fornecer diretrizes gerais, sem abordar especificamente os aspectos do desempenho energético das edificações que ficam sob a responsabilidade do projetista. No caso da norma ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 6401 (1980), - “Instalações centrais de ar condicionado para conforto – parâmetros básicos de projeto” – são estabelecidos procedimentos para a elaboração de projetos de sistemas de ar condicionado, não envolvendo a avaliação do desempenho energético da edificação. Prevalecem, dessa forma, regras como a da concepção construtiva/consumo, agravada pela indiferença e mesmo desconhecimento por parte do projetista das técnicas e metodologias modernas de simulações computacionais para análise da eficiência energética das edificações projetadas.

1.1.5.3 Energia e arquitetura da edificação

O desempenho energético do sistema de condicionamento ambiental e de iluminação das edificações está diretamente relacionado ao clima, às características construtivas, à ocupação e ao tipo de sistema de ar condicionado. Esses itens se interagem de maneira complexa no espaço e no tempo e tornam o funcionamento do sistema “edifício-instalação-usuário” dinâmico devido à multiplicidade das perturbações ambientais no tempo. É necessário o conhecimento dessa flutuação das perturbações para se determinar o desempenho energético da edificação e a obtenção do conforto térmico. Ademais, o desempenho está ligado às trocas de calor de uma edificação com o meio ambiente e essas, por sua vez, dependem de:

- parâmetros meteorológicos (temperatura ambiente, velocidade dos ventos, radiação solar, umidade relativa) do local de instalação da edificação;
- condições de ocupação e de operação da edificação.

1.1.6 A economia de energia elétrica em condicionamento ambiental

Em pesquisa de campo, conforme constatado por MASCARÓ, J.L.; MASCARÓ, L. (1992):

- “20 a 30% da energia consumida seriam suficientes para o funcionamento da edificação;
- 30 a 50% da energia consumida são desperdiçados por falta de controles adequados da instalação, por falta de manutenção e também por mau uso;
- 25 a 45% da energia são consumidos indevidamente por má orientação da edificação e por desenho inadequado de suas fachadas, principalmente”.

Outros estudos existentes, aplicados à demanda final de energia por setor econômico, incorporam modelo de previsão do potencial de economia de energia, quando considerada a eficiência energética dos equipamentos mais modernos. Por exemplo, para o setor comercial, esses estudos mostram ser possível diminuir a demanda de energia em até 50%, com projetos de edifícios energeticamente eficientes (BEN 2000).

Na **tabela 1.1** está resumido o potencial de economia de energia elétrica nos subsetores dos setores comercial e público com relação aos dois usos finais: iluminação e ar condicionado que, atualmente, mais demandam energia elétrica:

Tabela 1.1: Potencial de economia de energia elétrica no setor comercial

Subsetor	Iluminação	Ar Condicionado
Edifícios de escritório	10-12%	30%
Shopping Centers	10-12%	30%
Supermercados	15-20%	40-45%
Hotéis	10-12%	4-5%
Hospitais	15-20%	10-12%

Fonte: Eletrobrás – Procel (1998)

Sabendo-se que os parâmetros ligados ao desempenho energético mudam rapidamente no tempo, torna-se difícil sua determinação manualmente de modo interativo. Dessa forma, no estudo da dinâmica do sistema “edifício-instalação-usuário”, há necessidade de se trabalhar com programas de computador que foram desenvolvidos para essas aplicações e que serão vistos adiante e utilizados neste trabalho.

Os erros de projeto, geralmente, estão presentes em uma edificação alheia e desvinculada das condições climáticas; da sua disposição nos locais; na sua orientação; na composição de sua envoltória, sobretudo, nas suas coberturas. (MASCARÓ, J.L.; MASCARÓ, L. 1992).

Atualmente, com a incorporação do paradigma de desenvolvimento sustentável, vai-se exigir que as soluções de projetos também demonstrem um impacto sócio-ambiental aceitável com a adoção de procedimentos que visem aumentar a eficiência energética da edificação. Destarte, contribui-se, assim, para assegurar e melhorar as condições de sustentabilidade do meio ambiente, aumentando a produtividade, diminuindo custos, reduzindo a contaminação decorrente das emissões e conservando os recursos naturais (BERMANN; MARTINS, 2000). Para isso o projetista/arquiteto deve se preocupar em desenvolver estratégias relacionadas à demanda de energia das edificações projetadas, em particular, as comerciais e as públicas, utilizando métodos de simulações numéricas computacionais para a avaliação do seu desempenho energético.

Basicamente foram todos esses fatos e problemas analisados que motivaram o presente trabalho como uma contribuição:

- para minimizar a demanda da energia elétrica no setor de edificações comerciais e públicas, com a utilização de técnicas computacionais para avaliação quantitativa das demandas de energia das edificações desses setores;

- para sensibilizar os arquitetos e profissionais da área de edificações da necessidade de internalizar soluções energéticas eficientes em seus projetos.

Principalmente porque, na maioria das vezes, o usuário final da edificação não tem informações, ou lhe falta conhecimento quanto às questões ligadas:

- à problemática de suprimento de energia elétrica;
- à escassez de recursos para expansão do setor elétrico;
- à eficiência energética das edificações;
- aos impactos sociais e ambientais que a construção de novas usinas podem trazer.

1.2 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Este trabalho objetiva mostrar quantitativamente a importância dos parâmetros construtivos, da localização, bem como da operação do ar condicionado de edificações comerciais e públicas, sobre a demanda de energia elétrica para fins de condicionamento ambiental, utilizando método de simulação numérica computacional.

Procurar-se-á desenvolvê-lo de forma didática, para atrair a atenção de arquitetos e profissionais da área de edificações sobre os principais parâmetros e as razões pelas quais eles afetam o desempenho energético das referidas edificações.

Para isso este trabalho está sendo dividido nos capítulos seguintes:

Capítulo 2: são apresentados os principais parâmetros que influenciam o desempenho energético em edificações, destacando:

- Os parâmetros que **não dependem** da arquitetura da edificação: as variáveis climáticas; as fontes de energia dentro da edificação (condições de ocupação e operação da edificação etc.); as trocas de calor com o meio ambiente; as condições de operação do sistema de ar condicionado;
- Os parâmetros que **dependem** da arquitetura da edificação:
 - os fechamentos opacos da envoltória (condutividade térmica ligada aos materiais da envoltória; capacidade térmica ligada à massa e ao calor específico da envoltória e responsável pela inércia térmica; absorvância da envoltória da edificação);
 - as aberturas da envoltória (vidro; área envidraçada, tamanho e posição na envoltória; proteções solares/sombras);
 - a forma arquitetônica e a orientação geográfica.

Capítulo 3: são discutidos os mecanismos envolvidos nas trocas de energia e os métodos de cálculo dessas trocas, abordando:

- a 1ª Lei da Termodinâmica;
- os mecanismos de transferência de calor (condução, convecção, radiação);
- os métodos de simulação numérica com o uso de computadores para cálculo das trocas de energia térmica da edificação com o meio exterior, destacando os itens:
 - como funcionam;
 - dados necessários à sua execução;
 - os programas de simulação numérica computacionais, dando ênfase ao programa VisualDOE-2.5, utilizado nas simulações para desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 4: é mostrado o uso de simulações numéricas para avaliação da influência de parâmetros arquitetônicos no desempenho energético em edificações; as análises e as conclusões. Entre esses parâmetros:

- a área envidraçada e a posição na envoltória;
- a absortância da radiação solar;
- a massa (espessura) das paredes;
- a forma, a localização e a orientação geográfica da edificação;
- a temperatura do ar no interior;
- a operação do sistema de ar condicionado.

Capítulo 5: são apresentados comentários gerais, adicionais, e recomendações finais sobre implementação das propostas que levem à eficiência energética em edificações, no Brasil.

Bibliografia

2 PRINCIPAIS PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES

2.1 Conceito de eficiência energética em edificações

A edificação tem como princípio abrigar o homem nas suas diversas atividades, (trabalho, lazer, habitação) proporcionando conforto, segurança e satisfação. Os três parâmetros: solidez, utilidade e beleza têm caracterizado as edificações ao longo do tempo. No período clássico, Vitruvius entendia a arquitetura como um espaço habitável que deveria equilibrar os aspectos estruturais, funcionais e formais”.(LAMBERTS, 1997)

Esse conceito de espaço tem sido alterado com o passar dos anos para atender as necessidades do homem em constantes mudanças de acordo com as exigências e dinâmica das civilizações. Com a Revolução Industrial (século XVIII), novos tipos de materiais foram desenvolvidos, por exemplo, aço e concreto armado. Assim:

- a alvenaria de pedra foi gradativamente substituída pelo concreto;
- as áreas envidraçadas ganharam espaço na envoltória das edificações;
- diversos sistemas de iluminação e de ar condicionado foram desenvolvidos, surgindo as monumentais edificações, mas desvinculadas de conceitos e princípios ligados à economia de energia.

Com a crise do petróleo nos anos 70, começou a preocupação com o uso mais eficiente da energia na busca pela redução da sua demanda. Na arquitetura, as medidas para reduzir a demanda de energia passaram a ser praticadas, principalmente, através da automação de controles da iluminação artificial e o

uso da luz natural. Os estudos da influência de parâmetros arquitetônicos e climáticos sobre o desempenho energético começaram a constar dos currículos de cursos de arquitetura e a ser alvo de preocupação de projetistas.

Para que se compreenda melhor a importância desses estudos conforme proposto nos objetivos e que fazem parte da motivação desta dissertação, a seguir são apresentadas algumas considerações e o conceito de eficiência energética.

Entende-se que a eficiência num processo de conversão de energia é medida pela razão entre a energia útil requerida em um processo e a energia total fornecida a ele. Quanto maior essa relação, maior é a **eficiência energética** do processo. Geralmente o resultado é dado em porcentagem e indica a parte da energia de entrada efetivamente usada para a realização do objetivo do processo considerado. Aplicando-se esse conceito, diz-se que uma edificação é energeticamente mais eficiente que outra quando proporciona as mesmas condições de conforto com menor demanda de energia.

Na avaliação da eficiência energética de uma edificação é necessário conhecer, entre outros, os seguintes parâmetros:

- climáticos;
- arquitetônicos;
- construtivos;
- ocupacionais;
- operacionais.

Esses parâmetros são analisados a seguir, neste capítulo, enfatizando sua influência na demanda de energia em edificações.

2.2 Parâmetros que *não dependem* da arquitetura da edificação

2.2.1 O clima

2.2.1.1 Conceito de clima: normalmente, o clima é conceituado como sendo a condição média da variação diária dos parâmetros meteorológicos em uma dada região, baseada em medições durante muitos anos.

O clima depende principalmente dos seguintes parâmetros:

- radiação solar;
- temperatura do ar;
- umidade do ar;
- movimento do ar (velocidade e direção)

que, além de se alterarem ao longo das 24 horas do dia e ao longo do ano, variam com a latitude, altitude e outras características locais. Por exemplo, atenuação da radiação solar devido a nuvens, ventos, precipitações de chuva etc.

2.2.1.2 Tipos de clima:

Para caracterizar o clima das diversas regiões do globo, este é dividido em zonas de climas similares, chamadas regiões climáticas. No Brasil, dada a sua grande extensão territorial e a sua localização entre dois trópicos, vários tipos diferentes de clima são identificados. Como neste trabalho a análise de demandas de energia é para edificações em diversas regiões do Brasil; a seguir são apresentadas as principais características de seus climas⁽⁴⁾:

(4) Fontes: LAMBERTS, 1997; IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1978.

- Clima equatorial (quente úmido): compreende toda a Amazônia com temperaturas médias entre 24°C e 26°C: chuva abundante e bem distribuída (2500 mm/ano);

- Clima tropical: verão quente e chuvoso; inverno quente e seco; temperaturas médias acima de 20°C; chuvas oscilam entre 1000 mm/ano e 1500 mm/ano; compreende grandes áreas de Mato Grosso, Tocantins, Maranhão e Ceará;
- Clima tropical de altitude: estende-se entre o norte do Paraná e o sul do Mato Grosso do Sul, e nas regiões mais altas do planalto atlântico; verão com chuvas mais intensas (entre 1000 mm/ano e 1800 mm/ano) e inverno com ocorrência de geadas; temperaturas médias na faixa de 18°C a 22°C;
- Clima tropical atlântico: regiões litorâneas. Temperaturas médias entre 18°C e 26°C; chuvas concentradas no verão (1200 mm/ano), para regiões mais ao sul; no inverno e outono, para regiões de menores latitudes (próximas ao equador);
- Clima subtropical (temperado): compreende a região sul do país; temperaturas médias abaixo de 20°C; chuvas bem distribuídas (entre 1500 mm/ano e 2000 mm/ano). Inverno rigoroso nas áreas mais elevadas (montanhosas);
- Clima semi-árido: região mais seca do país, compreende parte do interior do Nordeste; temperaturas médias altas (em torno de 27°C); chuvas escassas (menos de 800 mm/ano).

2.2.1.3 Os parâmetros climáticos

2.2.1.3.a) Radiação solar

A Terra recebe constantemente energia oriunda do Sol, em forma de ondas eletromagnéticas, chamada radiação solar. Essa energia resulta de reações termonucleares no interior daquela estrela (é a mesma forma de energia que dá origem às bombas termonucleares aqui na Terra e oriunda do núcleo de hidrogênio). A energia liberada nessas reações atravessa as diversas camadas constituintes do Sol e aparece na superfície deste, como radiação eletromagnética, cujo espectro corresponde ao da radiação do corpo negro a 6000 K.

Ao topo da atmosfera terrestre chega uma intensidade de radiação solar de 1353 W/m^2 , chamada “constante solar”. Dessa radiação:

- parte dela vem diretamente para a superfície da Terra (radiação direta);
- parte é absorvida (absorção pelo ozônio, pelos vapores d’água etc.) e espalhada por partículas contidas na atmosfera (radiação difusa);
- parte retorna ao espaço, por reflexão ou após absorção e reemissão pela atmosfera.

Considerando que a radiação solar na superfície da Terra é um fator importante na determinação das condições climáticas, sua medida é feita em estações meteorológicas para as diversas latitudes, época do ano e hora do dia. Dessa medição são elaboradas tabelas de insolação média para uma determinada localidade.

A radiação solar que atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre compreende um espectro com uma composição aproximada:

- 1% a 5% de ultravioleta (UV);
- 41% a 45% de luz visível (LV);
- 52% a 60% de infravermelho (IV).

A parcela de UV, de comprimento de onda entre 290 nm e 380 nm⁽⁵⁾, não representa uma fonte de calor ou de luz, mas necessita certos cuidados na sua aplicação quando se trata do ser humano. Exposição prolongada causa eritema, bronzeamento e irrita os olhos (conjuntivites). A radiação na faixa de comprimento de onda de 320 a 380 nm atravessa a maioria dos tipos de vidros. Nessa faixa tem a característica de causar fluorescência ou reação fotoquímica em certos materiais.

As radiações solares, de comprimentos de onda entre 380 e 760 nm, são perceptíveis pelo olho humano na forma de luz (garantem as condições de iluminação natural dos ambientes).

A parcela de radiação infravermelha, de comprimento de onda de 780 nm a 2500 nm, não é perceptível pelo olho humano, e representa uma fonte de calor. Acima de 2500 nm a 3000 nm têm-se radiações infravermelhas longas que são emitidas pelos corpos aquecidos pela radiação solar, por exemplo, o solo do entorno das edificações ou por outras próximas etc.

2.2.1.3.b) Temperatura e umidade do ar (ambiente)

O fator mais importante que afeta a temperatura ambiente é a movimentação de grandes massas de ar na atmosfera (frentes frias). Além disso, a temperatura do ar em uma dada região depende também das características locais (vegetação, topografia e altitude) que influenciam a forma como a radiação solar é absorvida pelo solo.

A temperatura dependerá além da movimentação da massa de ar, também da

(5) nm = nanometro (1 nm = 10⁻⁹ m).

época do ano. Isso porque haverá maior ou menor incidência de radiação solar na superfície da Terra, causada pela sua órbita elíptica em torno do Sol e à inclinação do seu eixo em relação ao plano de sua trajetória.

Outro fator importante na determinação das condições climáticas locais é a presença de vapor d'água na atmosfera terrestre, formando uma mistura gasosa em estado de superaquecimento. Esse vapor é proveniente da evapotranspiração dos vegetais e da evaporação da água contida nos mares, rios, lagos e no solo.

A quantidade em peso de vapor d'água contido em uma unidade de volume de ar (g/m^3) é definida como **umidade absoluta** do ar. Diz-se que o ar está saturado quando contém o peso máximo de umidade (vapor d'água) compatível com sua temperatura. Nesse estado o vapor encontra-se no limite de saturação ou no estado de vapor saturado seco.

Define-se, então, a **umidade relativa (UR)** do ar como a relação entre o peso de vapor d'água contido em um metro cúbico (1 m^3) de ar úmido e o peso de vapor que conteria caso estivesse saturado. Isso equivale a dizer que a umidade relativa é uma porcentagem da umidade absoluta de saturação:

$$\text{UR} = \frac{\text{Umidade absoluta}}{\text{Capacidade máxima de o ar reter vapor d'água}} \times 100.$$

Esses vapores d'água, quando presentes na atmosfera, se aquecem com a radiação solar durante o dia e bloqueiam a saída da radiação do solo à noite.

Assim:

- Nas regiões quentes e úmidas, é pequena a variação da temperatura diurna-noturna (em torno de 10°C);

- Nas regiões quentes e secas, é maior a variação da temperatura diurna-noturna (em torno de 15°C);
- Nas regiões frias tanto o calor como o frio apresentam certo rigor, dependendo da umidade relativa do ar, da variação da temperatura diária e anual e da quantidade de radiação recebida, principalmente, no verão e no inverno, além dos índices relativos à pluviosidade.

O comportamento da temperatura e da umidade do ar, ao longo do ano, pode ser conhecido através dos dados climáticos obtidos nas normais climatológicas, para um determinado local.

2.2.1.3.c) Movimentos do ar

O ar é uma camada gasosa que envolve o planeta constituindo a chamada atmosfera terrestre. Junto à superfície da Terra, ele tem uma composição em volume, aproximadamente de:

- Nitrogênio (N₂).....: 78%;
- Oxigênio (O₂).....: 21%;
- Dióxido de carbono (CO₂): 0,03%;
- Vapores d'água (H₂O).....: 0,47%;
- Outros gases.....: 0,50%.

Além desses gases, outros materiais particulados (poeira, fuligem etc.), bactérias e odores são encontrados em suspensão na atmosfera, em concentrações diferentes de local para local e conforme mudanças meteorológicas (chuvas, ventos etc.).

A movimentação do ar, também chamada de vento, é um fenômeno ocasionado, principalmente, pelas diferenças de temperatura entre as massas

de ar. A massa de ar mais fria (com densidade maior), localizada na parte mais alta da atmosfera, tende a deslocar-se para o solo, substituindo a massa de ar mais quente (aquecida pela radiação solar e com densidade menor) que se movimenta para a parte superior. A velocidade e a direção do vento sofrem influência da topografia da região (acidentes geográficos), da vegetação e das edificações.

2.2.1.4 O tratamento dos dados meteorológicos

A quantificação da variação no tempo, dos dados meteorológicos de uma localidade é feita através de medidas, em estações meteorológicas. Por exemplo, no Brasil, os dados climáticos mais difundidos são as normais climatológicas (1961-1990), publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Essas normais fornecem dados compostos por valores médios e extremos de dias típicos de verão e inverno.

O Núcleo de Pesquisa em Construção (NPC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) elaborou as cartas bioclimáticas para as principais cidades do Brasil (LAMBERTS, 1997). Estas foram baseadas em modelos desenvolvidos nos Estados Unidos (USA), utilizando, para as localidades estudadas:

- O Ano Climático de Referência (TRY, do inglês “Test Reference Year”), que possui fatores climáticos típicos de um dado local, obtidos através de médias dos seus valores máximos e mínimos, registrados ao longo de muitos anos;
- As normais climatológicas.

Esses dados foram utilizados nas simulações apresentadas mais adiante nesta dissertação.

2.2.2 As fontes de energia dentro da edificação

A energia no interior depende da função da edificação e resulta de:

- Processos envolvendo uso final da energia como: iluminação artificial, aparelhos e equipamentos utilizados na execução das diversas atividades;
- Condições de ocupação (número de ocupantes, horários de ocupação, atividades exercidas).

As energias térmicas oriundas dessas fontes são fundamentais para se determinar o desempenho energético das edificações. Por esse motivo a seguir será caracterizada cada uma delas.

2.2.2.1 Iluminação artificial

2.2.2.1.a) Aspectos gerais da iluminação

A participação da iluminação no consumo de energia elétrica em edificações dos setores comercial e público é da ordem de 24% (PROCEL – ELETROBRÁS -1998).

As condições de iluminação de um ambiente são baseadas na norma ABNT NBR 5413 – Iluminância de interiores. Essa norma fornece procedimentos para que num determinado local se tenha:

- Iluminância suficiente;
- Boa distribuição de iluminâncias;
- Ausência de ofuscamento;
- Contrastes adequados (distribuição de iluminâncias).

Do ponto de vista da conversão de energia envolvida no processo de iluminação, deve-se utilizar a energia de entrada em lâmpadas já que parte é convertida em luz e parte é transformada em calor (não utilizável). Ambas se integram à energia total injetada dentro da edificação.

2.2.2.1.b) Tipos de lâmpadas

Existem dois tipos principais de lâmpadas:

- **Lâmpadas incandescentes:** convertem a energia em luz pelo aquecimento de um filamento com a passagem de corrente elétrica, provocando aumento de temperatura capaz de emitir radiação no espectro visível. Elas têm eficiência energética baixa, cerca de 7% da energia elétrica consumida é transformada em luz, o restante é convertido em calor;
- **Lâmpadas de descarga gasosa:** a luz é oriunda da descarga elétrica em um gás (geralmente, mercúrio ou vapor de sódio) contido em tubo de vidro com dois eletrodos em suas extremidades. Esse tipo de lâmpada requer dispositivos auxiliares como reatores e “starters” para se obter a descarga elétrica. A eficiência energética desse tipo de lâmpada é maior que a do tipo incandescente. A conversão em luz é da ordem de 25% da energia consumida pela lâmpada. Além disso, o seu reator também transforma energia em calor (cerca de 25% da energia elétrica consumida pela lâmpada).

2.2.2.2 Equipamentos e aparelhos

Os motores e componentes dos aparelhos e equipamentos convertem parte da energia em calor, que depende da potência elétrica instalada e do tempo de

uso, na execução das diversas atividades dentro das edificações.

2.2.2.3 Condições de ocupação

O corpo humano processa a queima das calorias existentes nos alimentos pelo processo conhecido como metabolismo. Parte da energia resultante é utilizada na realização de trabalho, o restante dela é transformado em calor. Esse calor, transformado continuamente, deve ser eliminado do corpo por meio de mecanismos termorreguladores, para a temperatura interna do organismo permanecer constante. Se, em determinado momento, a taxa do metabolismo não é compensada pelo calor transferido para o ambiente, ocorre um armazenamento de energia e a temperatura do corpo varia. Além disso, o corpo troca calor com o ar interior e a quantidade trocada depende da:

- Atividade exercida;
- Vestimenta utilizada;
- Temperatura, umidade e movimento do ar interior.

2.2.3 As trocas de ar com o meio ambiente

A renovação do ar interior de uma edificação é efetuada para provisão de oxigênio, eliminação do gás carbônico (CO₂) e de odores indesejáveis; em geral, é considerada a taxa de renovação conforme a norma ABNT NB-10. A renovação pode ser feita através de portas ou frestas existentes na edificação. Sempre que acontece a renovação, pode ocorrer ganho ou perda de calor, dependendo da temperatura e da umidade do ar no interior e no exterior da edificação.

2.2.4 As condições de operação do sistema de ar condicionado

A operação do equipamento de ar condicionado está relacionada à escolha da

temperatura do ar no interior da edificação.

Para o conforto térmico a norma brasileira ABNT NBR 6401 fornece faixas de valores de temperatura e de umidade relativa do ar para ambientes condicionados. As normas ANSI/ASHRAE 55-92 (ASHRAE 1995) e ISO (International Standardization Organization) 7730 (ISO, 1984) fornecem procedimentos para avaliação e estabelecimento das condições ambientais que caracterizam as exigências humanas de conforto térmico.

Normalmente, fixa-se uma temperatura T ("setpoint") dentro da faixa de conforto e se varia a diferença (ΔT) de temperaturas em torno de T em que o equipamento de ar condicionado vai ligar ou desligar.

2.3 Parâmetros que dependem da arquitetura da edificação

A forma de projetar e construir as edificações tem uma grande influência em seu desempenho energético. Torna-se necessário conhecer o papel que cada um dos elementos estruturais desempenha nas trocas de energia da edificação com o ambiente. Para esse estudo são consideradas as duas partes distintas da envoltória:

- Fechamentos opacos;
- Fechamentos transparentes

que diferem entre si pela capacidade de transmitir uma parcela significativa da radiação solar para o interior da edificação.

A intensidade das trocas de energia através desses fechamentos será função:

- da intensidade da radiação solar incidente;
- das propriedades térmicas (principalmente, condutividade e capacidade térmica) dos materiais da envoltória;

- da absorvância (cor) dos fechamentos opacos;
- das temperaturas interna e externa da edificação;
- da transmitância dos fechamentos transparentes.

2.3.1 Os fechamentos opacos da envoltória

Esses fechamentos constituem a parte da envoltória que não transmite diretamente a radiação solar para o interior da edificação. Nesses casos, a transmissão de calor ocorre quando há uma diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa da envoltória. O calor flui sempre da superfície mais quente para a mais fria e influencia a eficiência energética das edificações.

A transmissão de calor entre o interior e o exterior da edificação depende das propriedades térmicas dos materiais utilizados na construção do seu fechamento.

2.3.1.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica (k) é uma propriedade característica de cada material e representa a quantidade (ΔQ) de calor que atravessa uma área (A) unitária de um material de superfícies paralelas e espessura (L) unitária, em um tempo (t) unitário, quando se estabelece uma diferença de temperaturas ($\Delta T = T_2 - T_1$) de uma unidade entre as suas superfícies, ou

$$k = \frac{\Delta Q \cdot L}{\Delta T \cdot A}$$

dada em: W/m.K (watt por metro vezes kelvin).

A relação: $k/L =$ condutância térmica do material (W/m². K)

Pode-se conhecer a quantidade de energia transmitida pela parede de uma edificação num certo tempo (t), simplesmente multiplicando a condutividade térmica (k) pela área (m²) da superfície da parede, pelo tempo (t), pela diferença de temperatura (ΔT) e dividindo-se pela espessura (L) da parede:

$$\Delta Q = k \cdot t \cdot \frac{(\Delta T \cdot A)}{L} \quad \text{Eq. (2-1)}$$

sendo a potência térmica $P = \Delta Q/t =$ a quantidade de energia térmica transmitida por unidade de tempo, tem-se: $P = k \cdot \frac{(\Delta T \cdot A)}{L}$

É comum utilizar-se a relação $R = L/k$, chamada de **resistência térmica**, que é uma característica dos materiais em resistir à passagem de calor, medida em: m².K/W.

Na **tabela 2.1**, têm-se os valores típicos de condutividade térmica de alguns materiais de construção:

Tabela 2.1: Propriedades de alguns materiais de construção

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (k) (W/m.K)	Calor específico (c) (J/kgK)
Concreto seco	2243	1,3	837
Tijolo/telha de barro	1922	0,7	837
Aço baixo teor de carbono	7800	45	450
Alumínio	2700	230	900
Madeira dura	720	0,16	1256
Vidro	2700	1,16	795
Policarbonato	1200	0,20	1110
Acrílico	1190	0,18	1500

Fonte: Biblioteca do programa de simulação numérica computacional VisualDOE-2.5.

2.3.1.2 Capacidade térmica

A **capacidade térmica (C)** de um determinado material de fechamento opaco é definida como a quantidade de calor (Q) necessária para produzir um aumento (ΔT) de temperatura numa massa (M) do material. Ela depende de

uma característica do material denominada de **calor específico (c)**. Ele é definido como a quantidade (Q) de energia térmica, necessária para um incremento unitário de temperatura em uma unidade de massa de um material, e expresso: J/kg . K (joule por quilograma vezes kelvin). Portanto, a capacidade térmica do material em termos de calor específico é igual a **C=M.c**. Na **tabela 2.1** têm-se valores típicos de calor específico para os materiais de construção nela relacionados.

Uma característica importante da envoltória relacionada à sua capacidade térmica é a propriedade chamada **inércia térmica**. Quanto maior a inércia térmica de um corpo, menor será a variação de sua temperatura para uma determinada quantidade de calor fornecida. Na arquitetura, se uma parede tem inércia térmica muito grande, uma elevação significativa na temperatura do ar exterior, de modo a aumentar a injeção de calor na edificação, ocasiona pequena mudança de temperatura no seu interior. Essa propriedade está ligada à massa e ao calor específico do material da envoltória.

2.3.1.3 Absortância e refletância

A radiação solar ao atingir os fechamentos opacos é, em parte, absorvida pela superfície exterior e transformada em calor, em quantidade que depende de uma propriedade do material denominada **absortância (α)** e que está ligada à cor da superfície externa da envoltória da edificação. A parcela, que não é absorvida, é refletida de volta para o ambiente; essa propriedade é denominada de **refletância**.

A absortância, em geral, apresenta as variações em função da cor conforme **tabela 2.2**:

Tabela 2.2: Variação da absorvância x cores

Cores	Absortância (α)
Escuras	0,7 a 0,9
Médias	0,5 a 0,7
Claros	0,2 a 0,5

Se a absorvância de uma envoltória for igual a 0,5, por exemplo, significa que 50% da radiação incidente no fechamento opaco é absorvida e transformada em calor, aumentando a temperatura da superfície externa e 50% é refletida de volta para o meio exterior da edificação.

2.3.2 Os fechamentos transparentes da envoltória da edificação

Compreendem as janelas, portas, clarabóias e quaisquer outros elementos transparentes da envoltória, e são responsáveis pelas principais trocas térmicas pela capacidade de transmitir uma parcela significativa da radiação solar para o interior da edificação.

2.3.2.1 Função: a utilização dos fechamentos transparentes na arquitetura serve a vários propósitos:

- Permitir a transmissão da luz natural para fins de iluminação adequada ao ambiente;
- Proporcionar a entrada de calor em clima muito frio para fins de aquecimento;
- Permitir a ventilação natural em edificações não condicionadas;
- Permitir o conforto visual;
- Expressar beleza e arte à edificação.

2.3.2.2 Tipos de materiais utilizados nos fechamentos transparentes

Os materiais transparentes comumente utilizados nas fachadas e coberturas das edificações são os vidros e plásticos translúcidos, como os policarbonatos e acrílicos.

2.3.2.2.a) Vidro

O vidro é um produto mineral composto de vários tipos de óxidos entre eles:

- SiO_2 : componente principal (70 a 73% em peso) com efeito vitrificante;
- NaO_3 e K_2O : fundentes (13 a 15% em massa), responsáveis pela transparência, brilho e tempo de elaboração;
- CaO : estabilizante e principal responsável pela resistência mecânica;
- B_2O_3 : componente que melhora fluidez, índice de refração da luz, resistência a produtos químicos, e diminui coeficiente de dilatação térmica.

Vários outros óxidos são também utilizados na preparação dos vidros para formar cristais (Li_2O), acelerar fusão (P_2O_5), aumentar a tenacidade (ZnO), e permitir a coloração do vidro como no caso de alguns óxidos metálicos.

Os vidros utilizados na arquitetura são geralmente classificados pelo tipo de tratamento térmico, por exemplo:

- Vidro recozido: submetido a um tratamento térmico de recozimento para alívio de tensões internas;
- Vidro temperado: obtido a partir do vidro recozido que é aquecido até o estado de plastificação, em seguida resfriado bruscamente (choque térmico) ao ar. Isso confere a propriedade de despedaçar-se quando rompe;

- Vidros especiais (refletivos, termoabsorventes, fotocromáticos etc.) que são mais ou menos sensíveis à passagem da radiação solar.

A **transmitância de luz** é uma das mais importantes propriedades do vidro, que permite a passagem direta de uma fração da radiação solar, no espectro visível, incidente no fechamento transparente da envoltória da edificação.

A **condutância térmica** ou **Valor U**, utilizado em tabelas técnicas de fabricantes de vidro, mede o quão bem um vidro em particular conduzirá o calor ou isolará o ar aquecido ou resfriado do ambiente construído. O vidro apresenta condutância em geral alta, devido ao fato de sua espessura ser relativamente fina, proporcionando uma grande troca de energia entre a edificação e o meio ambiente.

A **emissividade térmica** designa quão bem um vidro reirradia uma onda longa de energia infravermelha. Normalmente, a emissividade dos vidros simples é da ordem de 0,84, podendo ser menor quando revestidos com películas de baixa emissividade.

A soma das parcelas de transmissão direta pelo vidro mais a parcela da energia absorvida e reirradiada para o interior é denominada **fator solar (FS)**

Quando se quer minimizar essa troca térmica, utiliza-se **vidro duplo**, com câmara de gás intermediária, normalmente, ar ou argônio, pelo fato de serem bons isolantes térmicos (baixa condutividade térmica).

O **coeficiente de sombreamento** é definido pela relação entre o ganho de calor solar através de um determinado vidro, sob condições ambientais específicas, e o ganho de calor solar através de um vidro de referência nas mesmas condições. O vidro de referência conforme ASHRAE (1981) é o vidro

estirado incolor de 3,175mm de espessura e resistência mecânica duas vezes maior que a do vidro comum, com transmitância de 0,87.

Na **tabela 2.3** são apresentadas, a título comparativo, valores típicos dessas propriedades para alguns tipos de vidro:

Tabela 2.3: Valores típicos de propriedades de alguns vidros

Tipo de vidro	Coefficiente de sombreamento	(U-Factor) Condutância W/m ² K	Transmitância térmica
Simples , verde, espessura = 3mm	0,83	6,31	0,82
Idem 6mm	0,71	6,17	0,75
Simples, cinza, 3mm	0,83	6,31	0,61
Idem 6mm	0,69	6,17	0,43
Baixo teor de ferro 3mm	1,05	6,31	0,91
Duplo; simples 3mm; espaçados :12,7mm com ar	0,71	2,79	0,74
Idem com argônio	0,71	2,61	0,74
Idem 6mm com ar	0,57	2,74	0,66
Idem com argônio	0,57	2,56	0,66
Idem cinza 3mm com ar	0,71	2,79	0,55
Idem com argônio	0,70	2,61	0,55
Idem 6mm com ar	0,54	2,74	0,38
Idem com argônio	0,54	2,56	0,38
Idem simples 3mm+ película de baixa emissividade	0,66	1,83	0,71

Fonte: Biblioteca do programa de simulação numérica computacional VisualDOE-2.5.

2.3.2.2.b) Protetores solares/sombras

Os protetores da radiação solar, geralmente, são utilizados para impedir que a radiação solar direta atinja em demasia, principalmente no verão, as superfícies transparentes da envoltória. Eles podem ser externos ou internos ou, em áreas envidraçadas, podem ser utilizados entre os vidros, no caso de vidro duplo.

Os itens mais importantes em um protetor são:

- tipo de protetor;
- posição e orientação do protetor em relação à envoltória;

- latitude da localidade.

Para permitir uma comparação entre diversos tipos de vidro e sua combinação com diferentes tipos de protetor, a ASHRAE (1981) introduziu o conceito de **coeficiente de sombreamento (CS)**. Este é definido como a razão entre o fator solar (transmissão direta + parcela da energia absorvida e retransmitida para o interior da edificação) e a mesma grandeza correspondente ao vidro padrão, definido como: vidro 3mm, incolor, não sombreado .

A **tabela 2.4** reúne valores típicos de coeficientes de sombreamento para vidro simples (claro comum), de 3mm de espessura, combinado com diferentes soluções de persiana, cortina ou brise:

Tabela 2.4: Coeficiente de sombreamento de vidro combinado

Proteção da Janela	Coeficiente de Sombreamento
vidro comum + persiana interna cor clara	0.55
vidro comum + persiana interna cor escura	0.68
vidro termoabsorvente e persiana	0.40
vidro comum + cortina de tecido/trama aberta/cor clara	0.60
vidro comum + cortina de tecido/trama cerrada/cor clara	0.45
vidro comum + cortina de tecido/trama cerrada/cor escura	0.63
toldo cor média ou escura e vidro aberto	0.20
toldo cor clara e vidro aberto	0.12

Fonte: Banco de dados de vidros -site <http://www.usp.br/fau//cecace/index.html>

2.3.2.2.c) Plásticos translúcidos

Em geral, os substitutos comuns do vidro são os plásticos. Eles resultam de combinações de polímeros, que são substâncias químicas orgânicas básicas, provenientes do beneficiamento dos subprodutos do petróleo. Os principais plásticos transparentes utilizados na envoltória das edificações são os **acrílicos** e os **policarbonatos**.

Uma das vantagens dos plásticos sobre os vidros é a facilidade com que podem ser trabalhados. Além dessa, há outra vantagem em relação ao peso de até 33% menor que os equivalentes à base de vidro.

Na **tabela 2.5** são apresentados valores típicos de propriedades desses plásticos:

Tabela 2.5: Valores típicos de propriedades de plásticos translúcidos

Plástico	Transmitância	Calor específico	Condutividade térmica
Acrílicos	Até 0,92	1,47 a 1,6 kJ/kg.K	0,17 a 0,22 W/m.K
Policarbonatos	Até 0,90	1,195 a 1,26kJ/kg.K	0,19 a 0,21 W/m.K

Fonte: Banco de dados de vidros - site <http://www.usp.br/fau/cecace/index.html>

2.3.2.3 Área transparente

Área transparente é um tipo de fechamento que pode compreender janelas, portas, paredes, telhas e qualquer outro elemento transparente da envoltória da edificação.

A exposição à radiação solar da área transparente depende da sua posição na envoltória e do seu tamanho, pelo fato de a trajetória do sol na abóboda celeste ser diferente conforme a orientação geográfica, a latitude da localidade da edificação e a época do ano.

2.3.3 A forma arquitetônica e a orientação geográfica

Numa edificação, as trocas de energia com o meio ambiente estão relacionadas, dentre outros parâmetros, à sua forma arquitetônica.

Um dos aspectos dessas trocas está ligado à área da envoltória exposta à radiação solar. À proporção que essa área aumenta, ocorrem maiores trocas de energia devido à maior exposição à radiação solar.

Portanto, em regiões quentes é importante que a área exposta à radiação solar seja a menor possível.

Ressalte-se que a maior área da envoltória e a sua posição geográfica determinam o maior contato com as massas de ar externo, o que ocasiona trocas de energia mais intensas da edificação com o meio ambiente, pelo processo de convecção definida mais adiante.

3 METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES

O conhecimento de como ocorrem as trocas de energia em uma edificação com o meio ambiente é de fundamental importância para a avaliação da sua eficiência energética. Portanto, neste capítulo são analisados os principais mecanismos de troca de energia com o ambiente e, também, como os cálculos são efetuados na prática.

3.1 Os mecanismos envolvidos nas trocas de energia

Para determinação das trocas de energia, a edificação pode ser considerada como o espaço interno útil, delimitado por uma envoltória (paredes e telhados) que é responsável pelos ganhos ou perdas de energia entre o ambiente interno e o meio externo.

3.1.1 A Primeira Lei da Termodinâmica

As trocas de energia são regidas por uma das leis mais básicas da natureza, que é a 1ª Lei da Termodinâmica, chamada Lei da Conservação da Energia (a energia total de um sistema não pode ser nem criada nem destruída, mas só convertida de uma forma para outra). De maneira mais detalhada, é representada pela equação:

$$E_{\text{sol}} + E_{\text{ocup}} + E_{\text{ar cond.}} = E_{\text{arm.}} + E_{\text{sai}} \quad \text{Eq. (3-1)}$$

em que:

$E_{\text{sol}} + E_{\text{ocup}}$ = energias na edificação e oriundas:

- da radiação solar incidente na sua envoltória e transmitida para dentro;

- das pessoas que ocupam a edificação, dos equipamentos e/ou aparelhos utilizados no interior desta e dos sistemas de iluminação artificial;

E_{sai} = energia que sai da edificação para o meio ambiente;

E_{arm} = energia armazenada nos componentes da edificação;

$E_{\text{ar cond.}}$ = energia trocada pela edificação com o ambiente via sistema de ar condicionado.

Todas essas energias são trocadas em forma de calor ou energia térmica. Elas mudam no tempo e dependem, basicamente, da diferença de temperaturas entre os meios interno e externo, além das propriedades e características dos materiais da envoltória.

Pela equação Eq. (2-1), que rege as trocas de energia térmica de uma edificação, e considerando que $\Delta T = (T_{\text{edif.}} - T_{\text{amb.}})$, ela pode ser escrita:

$$\Delta Q = k \cdot \frac{A}{L} \cdot (T_{\text{edif.}} - T_{\text{amb.}}) t \quad \text{Eq. (3-2),}$$

Q = quantidade de energia térmica trocada pela edificação com o meio ambiente;

k = constante que depende das características da envoltória;

A = área da envoltória

L = espessura da envoltória;

$T_{\text{edif.}}$ = temperatura do interior da edificação.

$T_{\text{amb.}}$ = temperatura do meio ambiente;

t = tempo considerado.

Observa-se na Eq. (3-2) que:

- para a temperatura externa (T_{amb}) menor que a do interior (T_{edif}), o Q é positivo, significando que a edificação está cedendo energia térmica para o meio ambiente;
- para (T_{amb}) maior que (T_{edif}), o Q é negativo, significando que a energia está entrando na edificação.

Como a potência (P) é a quantidade de calor trocada por unidade de tempo, ela é também proporcional à diferença de temperaturas. Assim, para um intervalo pequeno de tempo dt , tem-se pela Eq. (3-2):

$$P = \frac{\Delta Q}{dt} = k \cdot \frac{A}{L} \cdot (T_{edif} - T_{amb}) \quad \text{ou:}$$

$$(3-3) \quad P dt = \Delta Q = k \cdot \frac{A}{L} \cdot (T_{edif} - T_{amb}) dt \quad \text{Eq.}$$

Partindo do pressuposto que a edificação tenha componente armazenador de energia térmica, considerando para os instantes t_0 e t_1 o intervalo de temperaturas ($T_1 - T_0$), a equação de conservação de energia [Eq. (3-1)] pode ser escrita para um intervalo pequeno de tempo dt :

$$P_{sol} \cdot dt + P_{ocup} \cdot dt + P_{ar\ cond} \cdot dt = M \cdot c_p \cdot (T_1 - T_0) + k \cdot (T_{edif} - T_{amb}) \cdot dt$$

onde:

M = massa da envoltória;

c_p = calor específico do material da envoltória;

$M \cdot c_p$ = capacidade térmica do componente armazenador.

Dividindo-se por dt , tem-se a equação do balanço energético da edificação:

$$P_{sol} + P_{ocup} + P_{ar\ cond} = M \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} + k \cdot (T_{edif} - T_{amb}) \quad \text{Eq. (3-4)}$$

3.1.2 Os mecanismos de transferência de calor

A constante k da Eq. (3-3) depende de três mecanismos que ocorrem nas trocas de energia térmica com o meio ambiente e são classificados em:

- Condução;
- Convecção;
- Radiação.

3.1.2.1 Condução: ocorre em um material ou em materiais que estão em contato entre si. A transmissão de calor via mecanismo de condução é efetivada através de transferência de energia de movimento (energia cinética) entre as moléculas do material.

O mecanismo de condução da energia térmica é compreendido como uma troca de energia cinética em que as moléculas com energia cinética maior elevam a temperatura das moléculas cuja energia cinética e temperatura são menores. Dessa maneira o calor vai se propagando ao longo do material. Por exemplo, a superfície externa de uma edificação ao ser aquecida pela radiação solar transmite, através da envoltória, o calor obtido na superfície externa para a interna, pelo mecanismo da condução.

3.1.2.2 Convecção: é a passagem de calor de uma região a outra de um fluido (por exemplo, o ar) por efeito do movimento das partículas do mesmo.

Essa movimentação do ar pode ter duas origens denominadas:

- **convecção forçada**, em que, por mecanismos externos, o ar é forçado a se movimentar no ambiente;
- **convecção natural**, em que a troca de calor é oriunda do movimento de

massas mais aquecidas de ar que estejam em posição inferior, para regiões mais altas da atmosfera, ocupando o lugar das massas mais frias que descem para as regiões inferiores sob a ação da gravidade.⁽⁶⁾ Essa movimentação do ar em contato com a superfície externa da envoltória provoca as trocas de energia térmica da edificação com seu entorno.

Por exemplo, se a temperatura da superfície externa da envoltória for maior que a do entorno, as moléculas de ar em contato com essa superfície se aquecem pelo mecanismo da condução. Uma vez aquecidas e estando na parte inferior da atmosfera, elas sobem e a massa de ar frio da parte superior desce sob a ação da gravidade, iniciando o processo da convecção. No caso de a temperatura do ar exterior ser maior, as suas moléculas transferem, por condução, parte da energia cinética para as da superfície externa da envoltória, aquecendo-a. Esta, por sua vez, transmite por condução a energia absorvida para a superfície interna e daí para o ar do recinto da edificação.

3.1.2.3 Radiação: A radiação é um processo de emissão contínua de energia pela superfície de corpos aquecidos, denominada **energia radiante**. Ela se propaga em forma de ondas eletromagnéticas. Nas temperaturas mais próximas à ambiente os comprimentos de onda (λ) são na região do espectro do infravermelho.

A emissão de energia radiante por um corpo depende da temperatura e de uma propriedade dos materiais chamada **emitância**. Assim, quanto maior a emitância para uma determinada temperatura do corpo, maior a energia irradiada por ele.

(6) Quando a temperatura de um corpo aumenta, seu volume aumenta; mas a densidade é a relação da massa pelo volume, este aumentando e a massa mantendo-se constante, a densidade diminui.

3.2 Os métodos de cálculo de trocas de energia

Para a determinação das trocas de energia térmica da edificação com o entorno,

parte-se, basicamente, da 1ª Lei da Termodinâmica, utilizando-se a Eq. (3-4):

$$P_{\text{sol}} + P_{\text{ocup}} + P_{\text{ar cond}} = M \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} + k \cdot (T_{\text{edif}} - T_{\text{amb}}).$$

Todas as variáveis que mudam com o tempo não têm como ser representadas por funções analíticas, como no caso da equação acima em que as potências mudam com o tempo, não se podendo resolvê-la analiticamente. Nesse caso tem-se de partir para métodos numéricos computacionais.

Existem métodos simplificados de cálculos que dão uma estimativa das trocas de energia, porém para uma determinação mais precisa foram desenvolvidos métodos de simulação numérica com o uso de programas de computador que a resolvem.

- **Métodos simplificados:** neles, as trocas de energia térmica são calculadas admitindo-se situações de regime permanente, em que as trocas não variam com o tempo. Para o inverno, o cálculo da energia máxima que se tem de injetar na edificação é feito determinando-se a média das temperaturas mínimas que podem ocorrer nos meses mais frios. A partir do conhecimento do coeficiente de troca (condutividade térmica) e da área da envoltória, determina-se quanto de energia térmica sai da edificação, energia essa que deve ser reposta pelo sistema de ar condicionado. Para o verão, faz-se um processo similar, estima-se a temperatura média das máximas que se espera ocorrer nos meses

quentes. Conhecendo-se as propriedades térmicas e a área da envoltória, calcula-se a quantidade de calor que é transferida para o interior da edificação. A partir daí, estima-se a quantidade de calor a ser retirada pelo sistema de ar condicionado.

Na ausência dessas temperaturas médias, são atribuídos valores para condições de inverno e de verão encontrados em manuais ou normas técnicas (Norma ABNT NBR 6401) de localidades cujo clima é parecido ao do local onde o projeto da edificação é analisado.

De maneira geral, na determinação da energia trocada com o ambiente, os resultados não são tão precisos porque as trocas de calor ocorrem em regime transitório (variam com o tempo).

- **Métodos de simulação com o uso de programas de computador:** neles os cálculos são efetuados levando-se em conta as mudanças com o tempo das diversas variáveis envolvidas nas trocas de energia.

3.3 Os métodos de simulação computacional

3.3.1 Como funcionam os métodos

A equação Eq.(3-4), cujos termos representam variáveis que mudam com o tempo, a sua solução envolve cálculo diferencial e integral que para ser resolvida são usados os programas de simulação numérica em computador.

Eles partem de condições iniciais fornecidas, relativas a uma determinada hora de um dia do ano, de tal maneira que a temperatura no interior da edificação seja constante em um pequeno intervalo de tempo dt (por exemplo: seja $t_0 =$ zero hora do dia 1º de janeiro em que a temperatura do ar interior da edificação $T_{edif} = 20^{\circ}\text{C}$, a umidade relativa = 50%, as condições de ocupação e

de operação = zero e a troca de energia $dQ = 0$). Com base nesse conjunto de condições iniciais das variáveis e na Eq. (3-4):

$$P_{\text{sol}} + P_{\text{ocup}} - P_{\text{ar cond}} = M \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} + k \cdot (T_{\text{edif}} - T_{\text{amb}}),$$

considerando-se o intervalo de tempo $dt = 1$ hora:

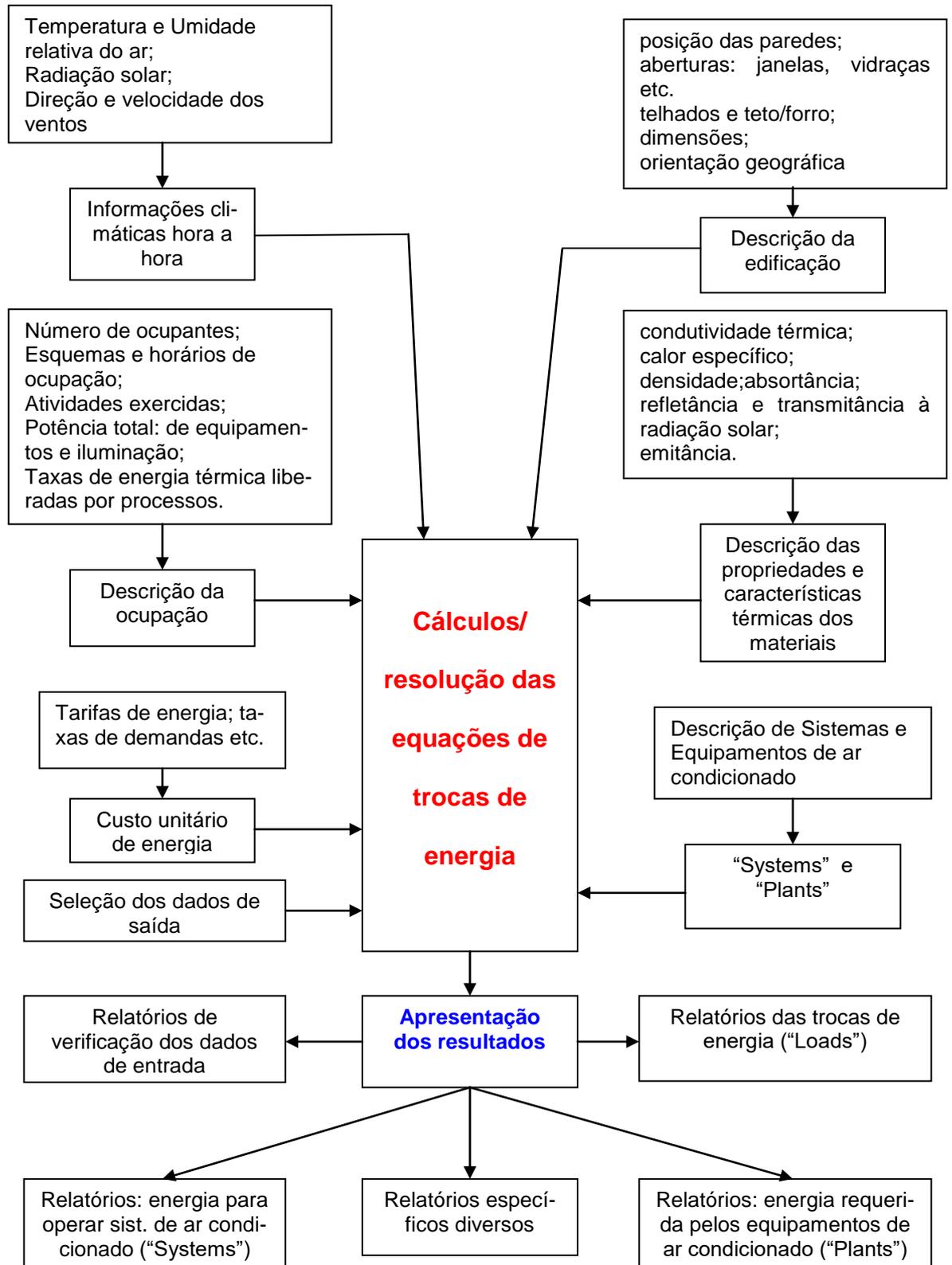
$$M c_p (T_1 - T_0) = P_{\text{sol}} + P_{\text{ocup}} + P_{\text{ar cond}} - k \cdot (T_{\text{edif}} - T_{\text{amb}}),$$

calcula-se para a hora seguinte a potência necessária do ar condicionado de maneira que $(T_1 - T_0) = 0$ e a temperatura no interior da edificação seja mantida sempre constante.

Os novos valores das variáveis passam a ser as condições iniciais para calcular-se a potência necessária para a segunda hora. Assim, o programa vai efetuando o cálculo para cada hora do dia, ou do mês, ou do ano.

O diagrama da **figura 3.1**, a seguir, mostra como os programas de simulação são compostos e os diversos dados de entrada necessários, descritos a seguir:

Figura 3.1: Diagrama dos programas de simulação computacional



3.3.2 Dados necessários à execução dos métodos computacionais

Os dados a serem fornecidos aos programas de computador para avaliar o desempenho energético de uma edificação estão classificados em dois grandes blocos, segundo suas características:

- os que não variam no tempo: características construtivas da edificação;
- os que mudam com o tempo:
 - os fatores climáticos;
 - a ocupação da edificação.

Além desses, tem-se um terceiro bloco:

- o sistema de ar condicionado: características básicas do sistema (individual, central etc.) e equipamentos.

3.3.2.1 Descrição da edificação, das propriedades e das características dos materiais construtivos

Na descrição da edificação, os principais dados a serem inseridos nos programas são:

- a posição das paredes;
- as aberturas: janelas, vidraças e outros;
- os telhados e teto/forro;
- as dimensões dos componentes;
- a orientação geográfica etc.

Além desses dados, as propriedades e características relativas aos componentes da edificação e seus materiais construtivos, também precisam ser informadas aos

programas de simulação:

- a condutividade térmica;
- o calor específico;
- a densidade;
- a absorvância;
- a refletância e a transmitância à radiação solar;
- a emitância da envoltória etc.

3.3.2.2 Descrição da ocupação

O modo de ocupação da edificação, seja pelas pessoas, seja pelos equipamentos, deve ser especificado incluindo a sua variação no tempo, porque responde por uma parte das trocas de energia, assim:

- o número de ocupantes;
- os esquemas e horários de ocupação e/ou de funcionamento;
- os tipos de atividades exercidas (função da edificação);
- a potência total relativa a equipamentos (elétricos, a gás etc.) e iluminação;
- o custo unitário de energia (tarifas);
- etc.

3.3.2.3 Descrição do sistema de ar condicionado

Como as edificações operam com uma temperatura do ar interior constante (prefixada), elas têm um sistema de condicionamento artificial. Para isso, os programas de simulação têm diversos sistemas de ar condicionado implantados em um de seus módulos (“Systems”), que são, comumente, utilizados nas edificações com ambientes condicionados. Dessa forma, é suficiente o usuário conhecer qual o tipo de ar condicionado que ele vai utilizar e selecioná-lo no programa de simulação.

3.3.2.4 Descrição dos equipamentos de ar condicionado

Outros dados a serem informados aos programas de simulação são os relativos às características dos equipamentos de ar condicionado, por exemplo: condensadores, evaporadores, aquecedores, compressores, ventiladores, bombas, tubulações, serpentinas resfriadoras e desumidificadoras, controles do ar condicionado, materiais refrigerantes etc. As características principais desses equipamentos/máquinas são traduzidas para os programas por um de seus módulos: “Plants”.

3.3.2.5 Descrição das condições de exposição ao clima

As condições de exposição da edificação ao clima local, tais como:

- os valores horários da temperatura e da umidade relativa do ar exterior;
- a quantidade e variação da radiação solar incidente na edificação;
- a direção e velocidade média dos ventos predominantes na localidade do projeto da edificação etc.

são dados necessários à execução dos cálculos pelos programas.

O conjunto desses dados climáticos é traduzido para o programa através do seu módulo processador: “Weather”.

3.3.2.6 Descrição dos dados para análise de viabilidade econômica

Os programas de simulação, em geral, contêm um módulo adicional que, a partir das energias calculadas anteriormente e fornecendo as suas tarifas, taxas de

descontos e período de tempo, permitem:

- calcular os custos com energia na edificação;

- analisar a viabilidade econômica de alternativas para se otimizar a edificação em termos de economia de energia, cujos custos de produção são conhecidos.

3.3.2.7 Seleção dos dados de saída

Os programas fornecem vários tipos de dados de saída desde os mais complexos até os mais resumidos e estão agrupados em:

- relatórios de verificação para se saber se todos os dados de entrada foram inseridos corretamente;
- relatórios sumários de cálculos de:
 - energia trocada (“loads”);
 - energia para operação de sistema de ar condicionado;
 - energia que os equipamentos de ar condicionado necessitam;
- relatórios sobre energia trocada por um determinado elemento da envoltória;
- relatório detalhado, hora a hora, de trocas de energia etc.

Para que os programas executem os cálculos das trocas de energia (“loads”) de uma edificação, os dados que lhes são fornecidos precisam ser convertidos em uma linguagem específica (arquivos binários) de computadores. Para isso os programas possuem um módulo (BDL – Building Design/Description Language) encarregado de fazer tal conversão.

3.3.3 Os programas existentes de simulação

Ao longo dos anos, vários programas de computador surgiram com a preocupação de implementar os métodos descritos de simulação numérica.

Esses programas permitem calcular as quantidades de energia térmica trocadas com o ambiente, hora a hora, através de metodologias próprias. A grande vantagem de usá-los é a rapidez com que os cálculos são efetuados, permitindo que sejam feitas alterações na edificação e a resposta do programa seja dada em poucos minutos.

Dentre os programas existentes, podem ser citados:

3.3.3.1 O programa NBSLD (National Bureau of Standards – Load Determination) (KUSUDA, 1976): foi desenvolvido no National Bureau of Standards – EUA - atual NIST (National Institute of Standards and Technology). Esse programa permite o cálculo, hora a hora, da temperatura e da umidade do ar interior e das temperaturas das superfícies interiores e exteriores de todos os elementos componentes do ambiente. Além disso, fixando-se um valor constante para a temperatura do ar interior, determina-se a troca de energia térmica para condicionamento da edificação (AKUTSU, 1998).

3.3.3.2 O programa DOE-2: foi desenvolvido no Laboratório Lawrence de Berkeley (LBL 1980) com assistência do Laboratório de Los Alamos e sob contrato do Departamento de Energia Americano (DOE).

É considerado um dos mais completos e dos mais adequados para a avaliação do desempenho energético de edificações condicionadas e um dos primeiros programas de domínio público.

Além dos cálculos das trocas de energias e de todas as energias a serem injetadas ou retiradas da edificação, o programa fornece, na saída, as potências elétricas máximas (de pico). Em função desses resultados, permite

dimensionar o tamanho do equipamento de ar condicionado em termos de potência necessária. Ele permite, também:

- calcular o custo anual de energia destinada para fins de ar condicionado;
- fazer uma avaliação de viabilidade econômica como, por exemplo, se for conhecido o custo de construção de duas alternativas de projeto para se otimizar o desempenho energético da edificação, pode-se calcular o custo do ciclo de vida de cada uma delas.

Inicialmente, o programa DOE-2 foi desenvolvido em linguagem Fortran para uso em computadores de grande porte.

Estudos realizados mostram que os resultados dos cálculos executados com diversos programas são próximos entre si (AKUTSU, M. 1998).

3.3.4 O programa VisualDOE-2.5

Nos programas de simulação existentes há cerca de 15 a 20 anos atrás, a manipulação e a inserção dos dados de entrada necessários à execução dos cálculos era uma tarefa trabalhosa e demorada.

Com a crescente disponibilidade de microcomputadores do tipo PC (Personal Computer), aqueles programas foram sendo convertidos para que pudessem ser rodados em microcomputadores.

Com o advento do sistema operacional “Windows”, os programas de simulação foram adaptados a esse sistema de “janelas”, para a entrada de dados, tornando a sua interface gráfica mais amigável e facilmente utilizável pelos usuários.

Várias versões surgiram do programa DOE-2, que passaram a ser vendidas pelos órgãos que detêm os direitos da versão. Como exemplo, entre os

programas existentes no mercado, que possuem embutido o programa DOE-2, um deles é o VisualDOE-2.5. O que este faz é traduzir para o DOE-2 os dados de entrada e de saída. Com isso elimina a necessidade de conhecer e decorar comandos para gerar os referidos dados. A seguir, é descrito com mais detalhes o programa VisualDOE-2.5 por ter sido o escolhido para a execução das simulações necessárias ao desenvolvimento desta dissertação.

3.3.4.1 Descrição do programa VisualDOE-2.5

O programa se compõe de diversos módulos e o principal (Graphic Editor) subdivide-se em seis pastas onde se definem o projeto básico e as suas variações:

- **1ª pasta:** onde são inseridos os dados gerais sobre o projeto (“Project”), entre eles: nome, local em que será implantado, descrição resumida do projeto, analista responsável, ano de construção, região climática, posição azimutal da fachada principal da edificação, tarifas de energia e de combustíveis, taxas de descontos, período de tempo em anos relativo à energia economizada, considerado no cálculo de custo do ciclo de vida do projeto etc., conforme mostrado na **figura 3.2** a seguir.
- **2ª pasta:** onde se modela a edificação: forma geométrica; quantidade de pisos; tipos de teto e de telhado; dimensões; materiais construtivos; os blocos (“Blocks”) que são grupos contíguos de regiões localizadas no mesmo nível (pisos) da edificação e com certas propriedades comuns tais como: construções do piso e do teto, altura entre eles etc. Esses blocos podem estar empilhados

Name: T1 São Paulo 1450

Address: IEE - USP

Description: Análise de Desempenho Energético mantendo Condições de Conforto Térmico: Temperatura: $18 < T < 24$ C; Umidade Relativa: $50 < UR < 70$ %

Energy Analyst: Romeo Ferreira dos Santos

Era Built: 1989 to present

SIC Code: 0

Climate Zone: São Paulo

Front Azimuth: 0 degrees

Electric Rate: A-1

Discount Rate: 10 %

Fuel Rate: GNR-1

Project Life Cycle: 20 years

Holiday Set: None

Project | Blocks | Zones | Facades | Systems | Zone Air

Figura 3.2: 1ª pasta "Project"

quando se tem uma edificação com mais de um piso (vide Figura 3.3).

Block 1

Name: Block #1

Number Floors: 1

FFHt: 4.25

Roof: ROOFR050%

Perimeter Depth: 3

PlnHt: 1.25

Ceiling: Suspended Ceiling

Width: 44

Depth: 22

X: 0

Floor: Simulated Slab

Y: 0

Int Floor: FLOORR050%

Partitions: Partition

Level: Level 1

Plenum

Dimensions are in meters.

Project | **Blocks** | Zones | Facades | Systems | Zone Air

Figura 3.3: 2ª pasta "Blocks"

- **3ª pasta:** em que se selecionam: tipos de zona condicionada de cada bloco; potências totais de equipamentos e iluminação; número de pessoas que ocupam a edificação; esquemas de ocupação; controle de luz natural; taxa de

infiltração de ar etc. (vide **Figura 3.4**).

Zone Totals*	
LPD	20,841 W
EPD	7,744 W

Fig. 3.4: 3ª pasta “Zones”

- **4ª pasta:** na qual se modela cada fachada (frente, fundo, laterais direita e esquerda) da edificação, características dimensionais, posição e quantidades de janelas nas paredes, áreas envidraçadas e tipo de vidro, sombreamentos, material das paredes (protetores solares) etc. (vide **Figura 3.5**).

Fig.3.5: 4ª pasta “Facades”

- **5ª pasta:** em que são escolhidos os sistemas de ar condicionado ou sistema

de aquecimento de água ou editor de planta central para a edificação (vide

Figura 3.6):

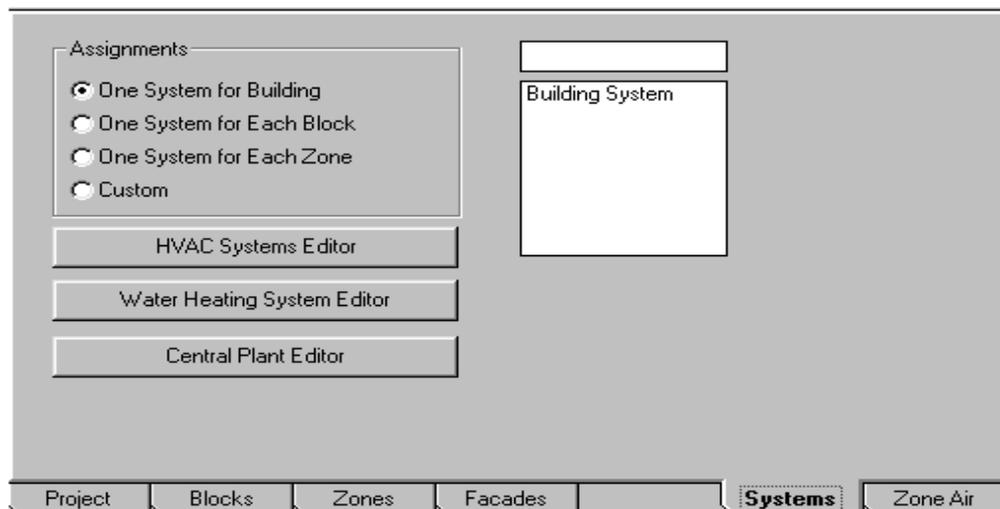


Fig. 3.6: 5ª pasta “Systems”

- **Subpasta 5ª a):** em que é definido o tipo de sistema de ar condicionado; ano de fabricação; características (com ou sem: economizador, umidificador, pré-aquecedor etc.), esquema de funcionamento; controle por zona etc. (vide **Figura 3.7)**

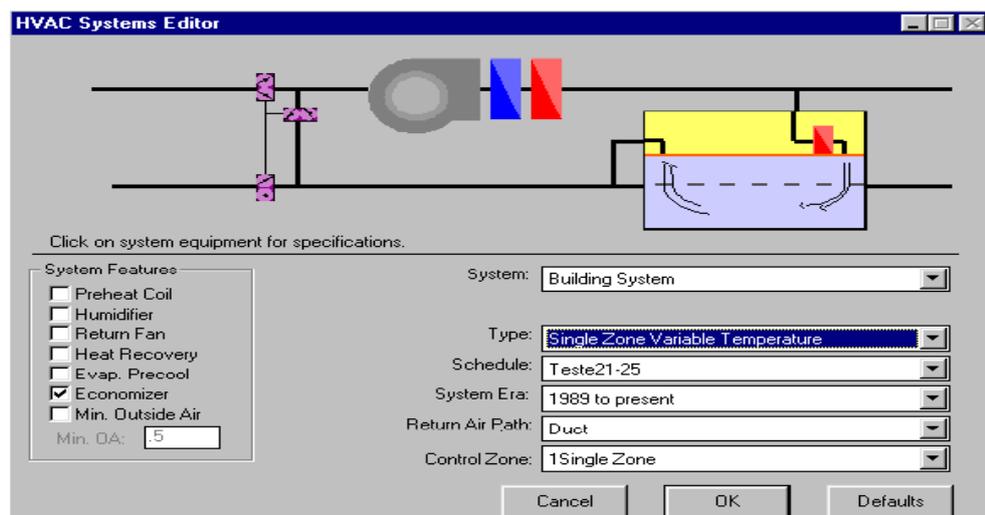


Fig. 3.7: 5ª pasta a) “System Editor”

- **Subpasta 5ª b):** em que são definidas as características do sistema de aquecimento de água, tais como: elétrico ou a gás etc.; esquema de funcionamento; temperatura da água; coeficiente de perdas, picos de consumo; características da bomba etc. (vide **Figura 3.8**):

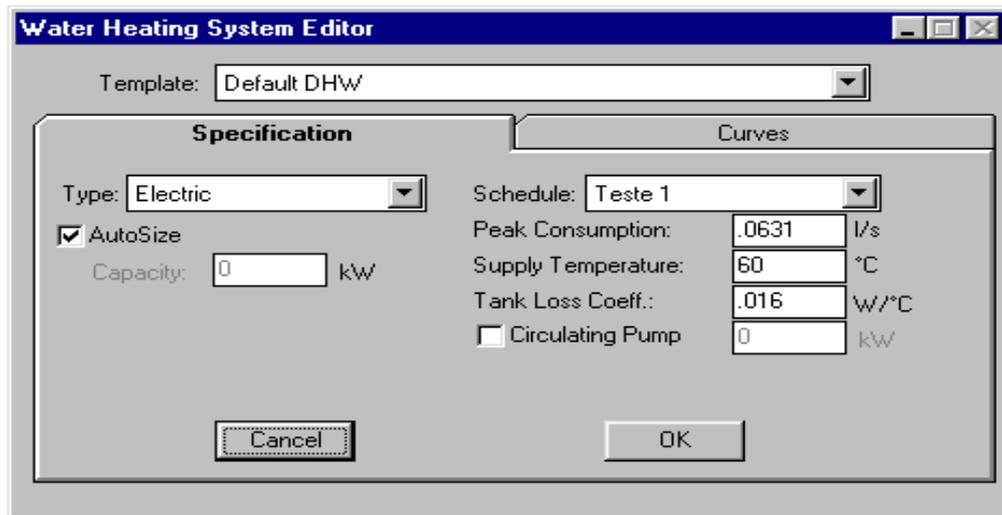
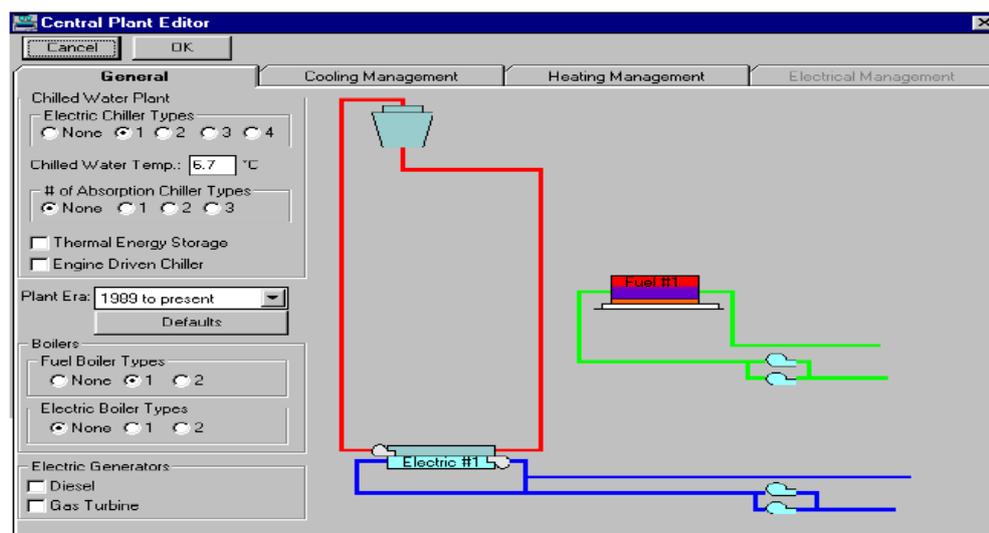


Fig. 3.8: 5ª pasta b) Sistema de aquecimento de água

- **Subpasta 5ª c)** em que são especificados as quantidades e tipos de “chiller” e de “boiler” elétricos; geradores elétricos; ano da planta etc.



(Figura 3.9):

Fig.3.9: 5ª pasta c) Central Plant Editor

- **6ª pasta:** na qual se especificam as informações sobre os sistemas HVAC (“Heating, Ventilation and Air Conditioning System”), tais como: quantidade de regiões condicionadas, suprimento de ar (fluxo total, fluxo/área, troca de ar/hora etc.), volume de ar externo injetado no recinto, tipo de termostato e intervalo de variação da temperatura (“setpoint”) etc. (vide **Figura 3.10**)

Fig.3.10: 6ª pasta Sistema HVAC

O programa VisualDOE-2.5 possui um segundo módulo (“Plant Only Runs”) que permite fazer outras simulações a partir daquelas já realizadas, sem que seja necessária uma nova descrição da edificação, o que facilita a comparação de várias alternativas de instalações de sistema de ar condicionado.

Além desses dois módulos descritos, o programa possui mais outros sete módulos que permitem:

- visualizar os dados de componentes, propriedades e características de materiais já existentes na biblioteca do programa;
- inserir esquemas de ocupação, dados de componentes ou características e propriedades de materiais diferentes dos existentes na biblioteca do programa.

Esses módulos são:

- “Schedule Maker”: permite criar esquemas e calendários com informações diárias e horárias; inserir datas de feriados e as estações do ano que apresentam alteração de demanda energética; caracteriza a ocupação da edificação etc.;
- “Construction Builder”: através dele pode-se inserir, modificar ou verificar os elementos, as propriedades e as características de materiais construtivos existentes;
- “Fenestration”: permite visualizar, copiar ou inserir uma abertura da envoltória, sua composição, dimensões, materiais etc.;
- “Weather”: permite adicionar ou modificar um tipo de clima dentre aqueles existentes no módulo do programa;
- “Utilities Rate”: através dele pode-se inserir tarifas de energia, combustíveis etc. ou verificar as existentes na biblioteca;
- “Equipment Editor”: pode-se por meio dele adicionar, apagar, modificar ou apenas visualizar as características dos elementos de sistemas de ar condicionado ou de aquecedores de água ou de equipamentos centrais existentes no módulo;
- “Run Setup”: através dele pode-se escolher, entre centenas de opções, os relatórios com dados de saída que interessam ao usuário

(fig. 3.11):

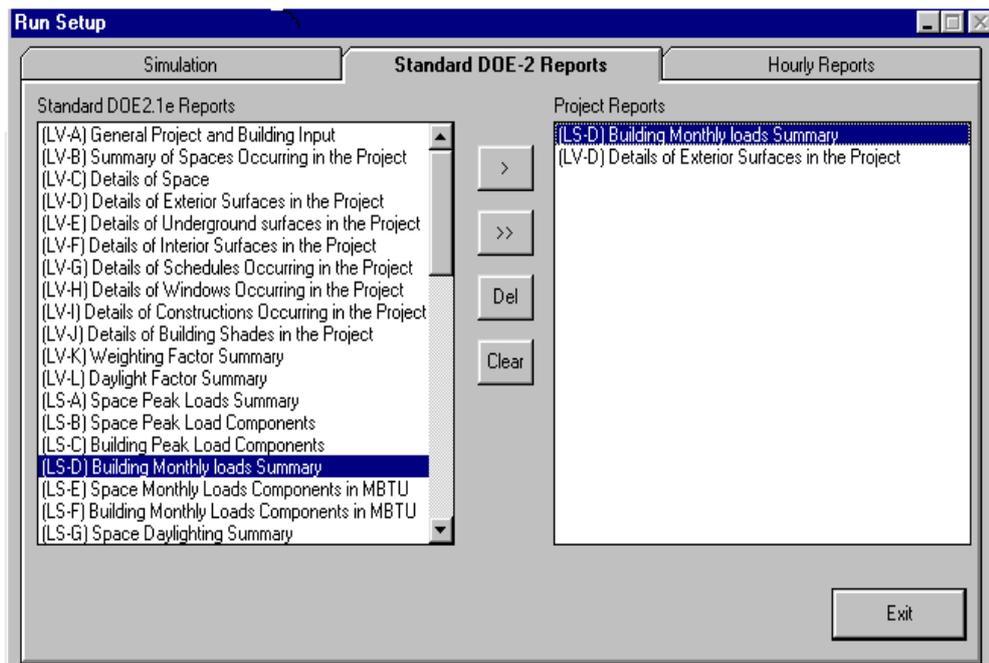


Fig. 3.11: Seleção de dados de saída (relatórios)

Na figura 3.12, a seguir, é mostrado, a título de exemplo, um tipo de ocupação e dados de operação onde se tem a reunião de todos os esquemas e outras informações associadas para usos distintos e que caracterizam a ocupação:

Figura 3.12: Tipo de ocupação e dados de operação

3.3.4.2 Os pontos fortes do programa VisualDOE-2.5

O programa possui como pontos fortes:

- alta flexibilidade que permite a simulação dos mais diferentes tipos de edificação;
- facilidade na inserção ou selecção de dados de entrada e de saída devido à interface amigável que o seu sistema de “janelas” proporciona;
- obtenção de informações detalhadas sobre as trocas de energia dos diversos componentes de uma edificação com o ambiente;
- possibilidade de utilização de diferentes tipos de sistema de ar condicionado para se estudar o melhor dentre eles.

4 O USO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS ARQUITETÔNICOS NO DESEMPENHO ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES; ANÁLISES E CONCLUSÕES

Foi escolhida uma edificação comercial para mostrar quantitativamente a influência dos principais parâmetros envolvidos nas trocas de energia em seu desempenho energético, conforme proposto nos objetivos. Para fazer as simulações numéricas computacionais foi utilizado o programa VisualDOE-2.5, já apresentado anteriormente.

4.1 Descrição da edificação escolhida

A edificação é isolada (sem sombra no seu entorno), sem paredes internas, cuja planta e corte são mostrados na **figura 4.1**:

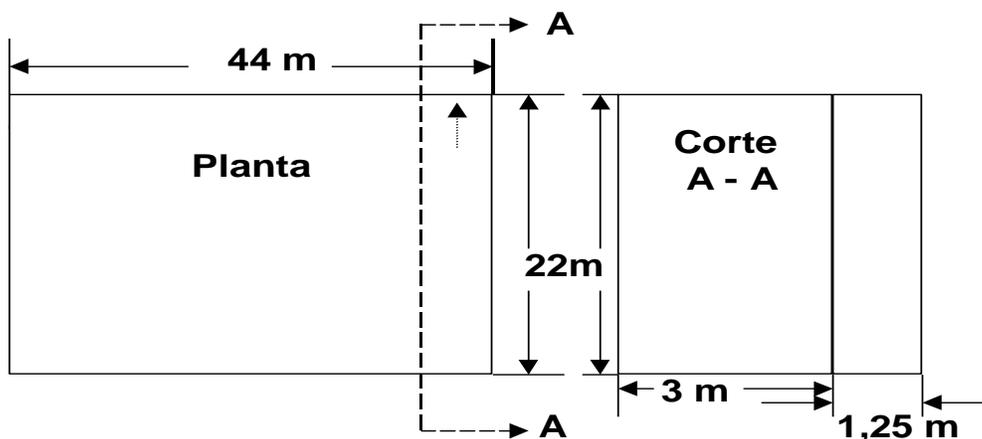


Fig. 4.1: Planta e corte da edificação adotada

Ela apresenta as seguintes características construtivas:

4.1.1 Parâmetros arquitetônicos

- Área útil de piso = 968 m²;
- Piso em laje maciça de concreto, com 150 mm de espessura;
- Paredes de concreto, sem revestimento;

- Forro e telhado em laje maciça, de concreto, com 102 mm de espessura; distância entre o forro e o telhado (“plenum height”) = 1,25 m;
- Distância do piso ao teto (pé-direito) = 3,00 m;
- Janelas (área envidraçada) de vidro simples com 3,00 mm de espessura, sem sombreamento (sem dispositivos de proteção solar); 30% da área da parede.

4.1.2 Propriedades e características dos materiais construtivos

- O material básico utilizado para as paredes, forro, telhado e piso é o concreto cujas características são:
 - Condutividade térmica = 1,31 W/m.K;
 - Densidade = 2243 kg/m³;
 - Calor específico = 837 J/kg.K;
- As características do vidro, utilizado nas aberturas da envoltória são:
 - Tipo simples, verde, com espessura = 3,00 mm;
 - Transmitância = 0,82;
 - Emitância = 0,84;
 - Condutância térmica (U-Factor) = 6,31 W/m².K

4.1.3 Ocupação da edificação

- Número de ocupantes = 80 pessoas, de forma que se tem uma área útil para cada ocupante = 12,10 m²/pessoa;
- Esquema de ocupação = das 6 às 18 horas, o ano inteiro, exceto domingos e feriados (vide **figura 4.2**).

4.1.4 Operação da edificação

- Potência elétrica instalada: usualmente, é expressa por unidade de área

fazendo-se, separadamente, a somatória das potências de todos os

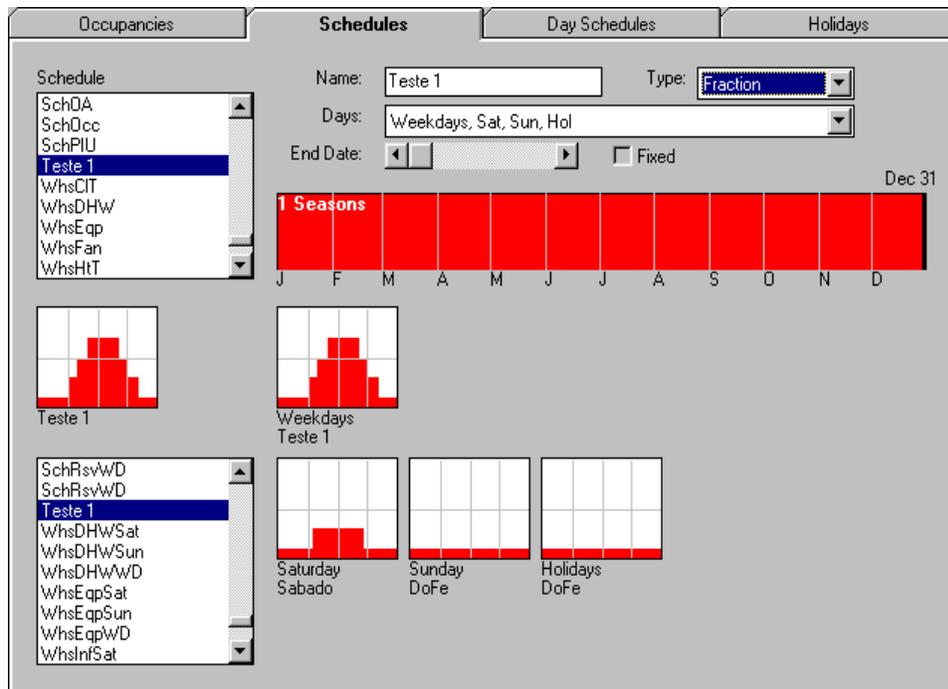


Fig. 4.2: Esquemas de ocupação

equipamentos e de todos os sistemas de iluminação existentes no seu interior e dividindo-as pela área útil da edificação:

- Aparelhos e equipamentos = $8,00 \text{ W/m}^2$;
- Sistemas de iluminação = $21,5 \text{ W/m}^2$;
- Horário de funcionamento = das 6 às 18 horas (coincidindo com o de ocupação).

4.1.5 Sistemas de ar condicionado, de aquecimento de água e planta central

Para executar o cálculo da quantidade de energia trocada ("loads") entre a edificação e o meio ambiente, que é suficiente para fins deste trabalho, o programa exige que sejam escolhidos um sistema ("System") e os equipamentos ("Plants") de condicionamento de ar, independentemente de seus tipos uma vez que não afetam as cargas térmicas trocadas ("Loads"). Assim, foram escolhidos

os tipos mais simples existentes na biblioteca do programa utilizado (VisualDOE-2.5), com seus dados-padrão (“default value”), que o próprio programa especifica. Exceção feita para os valores da temperatura do ar interior da edificação e das temperaturas máxima e mínima de operação do sistema de ar condicionado, que são parâmetros analisados neste trabalho.

4.2 Procedimento para realização das simulações

Na **tabela 4.1** estão reunidos os valores dos parâmetros básicos e as condições utilizadas nas simulações computacionais numéricas realizadas para as condições climáticas de **São Paulo**:

Tabela 4.1: Parâmetros básicos

Parâmetro	Características		
Forma	Retangular: 44m X 22m	Maior dimensão: direção leste-oeste	Térrea
Piso	Área útil = 968 m ² Espessura=150mm	Lajes de concreto	Absortância (cor): 50%
Paredes	Espessuras=102mm		Condutividade térmica: 1,31 W/m.K
Telhado:			Densidade: 2243 kg/m ³
Forro			Calor específico: 837 J/kg.K
Espaço forro-telhado	1,25m		
Altura: piso-teto	3,00m		
Janela: vidro simples, claro	Área: 30% da área das paredes	distribuídas nas 4 paredes	Sem sombreamento
Vidro: espessura de 3mm	Condutância (U-factor): 6,31 W/m ² .K	Transmitância: 0,82	Emitância: 0,84
Condições de utilização	Das 6 às 18 horas 12,1m ² /pessoa	Iluminação: 21,5 W/m ²	Equipamentos: 8,0 W/m ²
Temperatura do ar interior	T = 22°C ("setpoint")	Dispersão ΔT = 4°C	
Infiltração de ar	0,2 trocas/hora		
Umidade relativa	40 a 60%		

4.3 Influência dos diversos parâmetros no desempenho energético; análises e conclusões

Os resultados obtidos nas avaliações contempladas neste trabalho estão sintetizados nas respectivas figuras mais adiante, em que é representada, graficamente, a influência de cada um dos parâmetros arquitetônicos analisados.

4.3.1 Área envidraçada: atribuindo valores de **0%** a **100%** em relação à área da parede; os resultados observados estão na **figura 4.3**.

Nota-se que um aumento de **100%** na área envidraçada da edificação implica no aumento de **68%** na demanda de energia elétrica para fins de condicionamento ambiental.

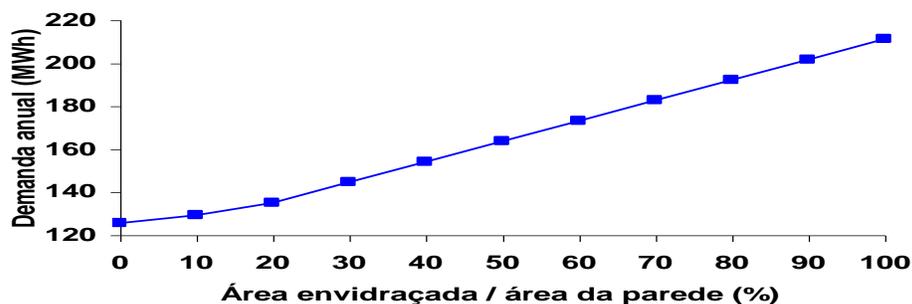


Fig. 4.3: influência da área envidraçada da edificação

Isso ocorre porque uma área envidraçada maior significa uma incidência da radiação solar maior, aumentando a energia térmica no interior da edificação, o que leva o sistema de ar condicionado a trabalhar mais para retirar essa energia.

Na **figura 4.3.a** são mostradas as potências de pico para resfriamento em função da variação da área envidraçada da edificação. Verifica-se que ao aumentar a área envidraçada, a potência, praticamente, dobra passando de, aproximadamente, **50 kW** para **90 kW**. Isso mostra a necessidade de um custo maior de investimento inicial em sistema de ar condicionado.

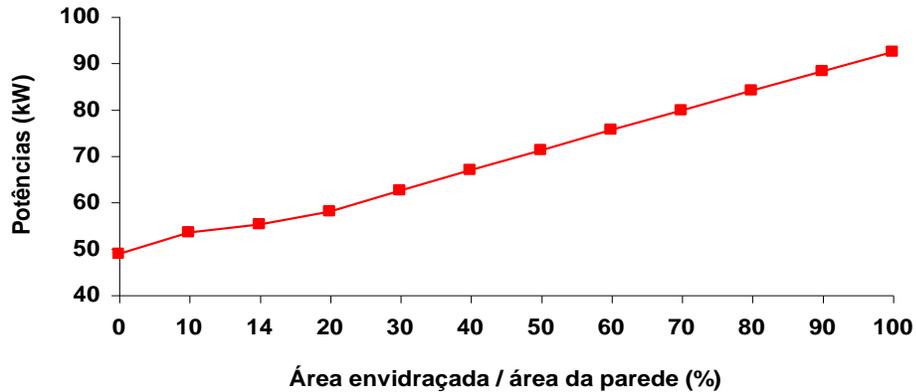


Fig. 4.3.a: Potências de pico em função da área envidraçada

Na **figura 4.3.b** é mostrada a influência da área envidraçada quando se tem janelas apenas em uma das paredes e alterando-se a sua posição geográfica:

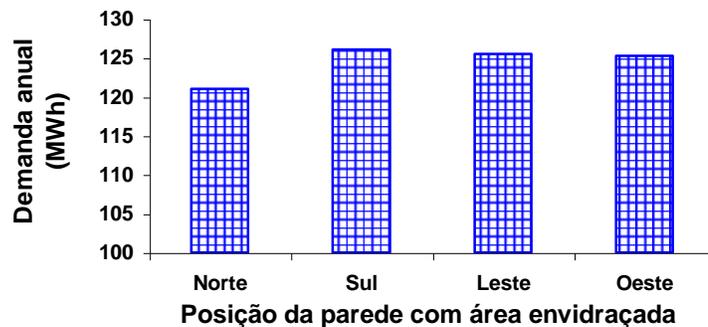


Fig. 4.3.b: Influência da posição geográfica

Observa-se que a menor demanda de energia se obtém com a área envidraçada na parede voltada para o Norte. Isso ocorre porque a área envidraçada nessa posição recebe menor radiação solar devido ao movimento de rotação da Terra e à inclinação de seu eixo em relação ao plano formado pela sua trajetória em torno do Sol.

Na **figura 4.3.c** é mostrada a variação da potência de pico em função da posição da parede que contém a área envidraçada. Observa-se que, quando a área envidraçada está na parede voltada para o Leste, a potência de pico aumenta em

quase **10%** em relação às demais posições. Isso é devido à maior incidência de radiação solar conforme já mencionado.

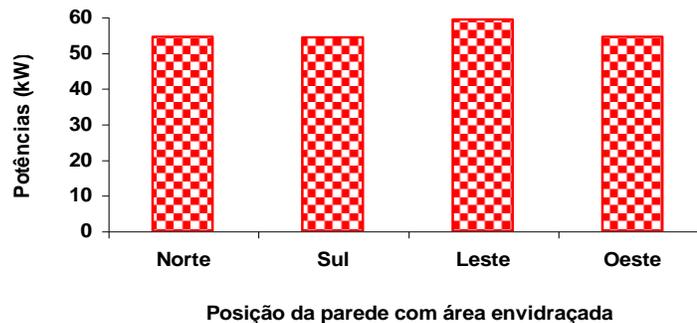


Fig. 4.3.c: Potências em função da posição da parede com área envidraçada

4.3.2 Absortância (Cor) da envoltória: atribuindo-se valores de **0%** a **100%** e

tomando-se dois valores de área envidraçada: **14%** e **70%**, os resultados obtidos estão na **figura 4.4**:

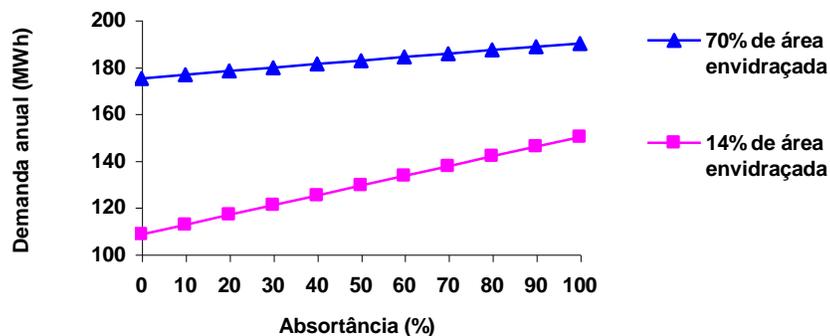


Fig. 4.4: Influência da cor externa da envoltória

Quando se tem uma área envidraçada grande, significa que há pouca parede (fechamento opaco). Neste caso a influência da cor é pequena, como mostrado na figura acima: para área envidraçada de **70%** a diferença de demanda de energia é de apenas **8,5%**.

Se a área envidraçada for pequena (**14%**), tem-se muito mais parede (fechamento opaco), tornando-se mais importante a sua cor (absortância). Assim, na edificação de cor escura, que absorve muita radiação do sol (absortância = **100%**), ou de

uma cor clara que não absorve praticamente radiação solar (absortância = **0%**), obtém-se uma diferença de demanda de energia de **38%**.

Na **figura 4.4.a** são mostradas as potências de pico cuja variação se assemelha àquela das demandas de energia, em relação à cor da envoltória e quando se tomam os dois valores de área envidraçada: **14% e 70%**:

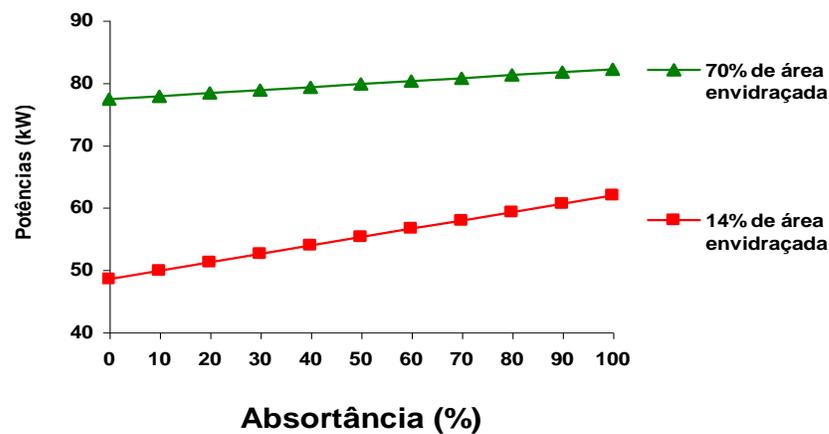


Fig. 4.4.a: Potências de pico em função da cor

4.3.3 Forma: a avaliação é feita para a edificação tendo a mesma área total útil, porém distribuída em diversos pavimentos (andares), e tomando-se dois valores de área envidraçada: **14% e 70%**..

À proporção que se aumenta o número de andares da edificação, aumenta-se a sua demanda de energia, conforme mostra a **figura 4.5**.

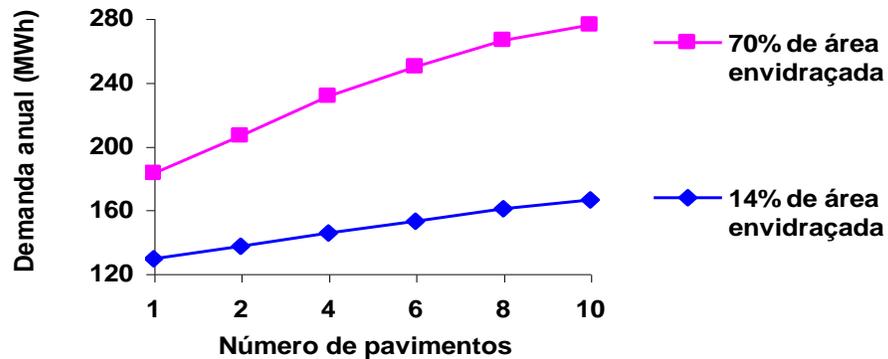


Fig. 4.5: Influência da forma da edificação

Nota-se também que, ao se aumentar o número de andares, a importância da área envidraçada sobre a demanda de energia fica significativamente maior; para uma edificação de 10 andares, praticamente, a demanda duplica, conforme se verifica na referida figura. Isso acontece porque na edificação térrea as trocas de calor com o ambiente ocorrem em maior intensidade pelo telhado. Na edificação em andares, as paredes e suas áreas envidraçadas, principalmente, recebem maior incidência de radiação solar, aumentando a energia total térmica no interior, obrigando, nesse caso, o ar condicionado a trabalhar mais para retirá-la.

Na **figura 4.5.a** são mostradas as potências de pico correspondentes à variação do número de pavimentos da edificação. Observa-se que os maiores aumentos das potências de pico ocorrem quando se aumenta a área envidraçada da edificação. Em relação ao aumento da absorvância (cor) da envoltória, as variações das potências são menos significativas.

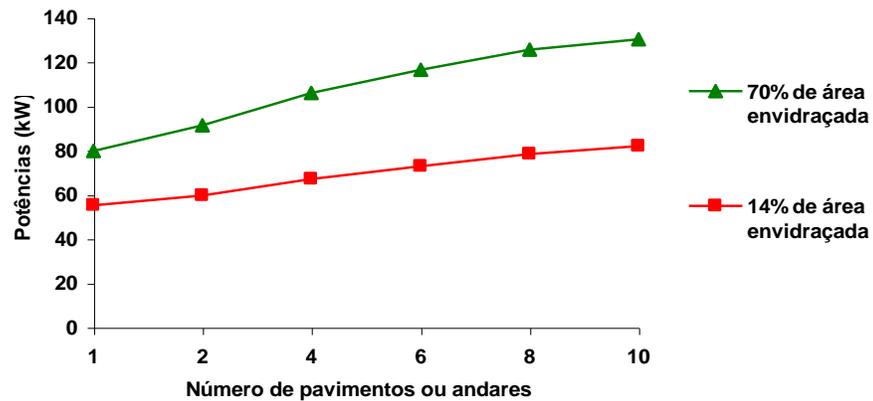


Fig. 4.5.a: Potências de pico em função da forma

4.3.4 Massa (espessura) das paredes

A avaliação foi feita considerando-se paredes de espessuras: **102 mm**; **203 mm** e **305 mm**, e os resultados são mostrados na **figura 4.6**:

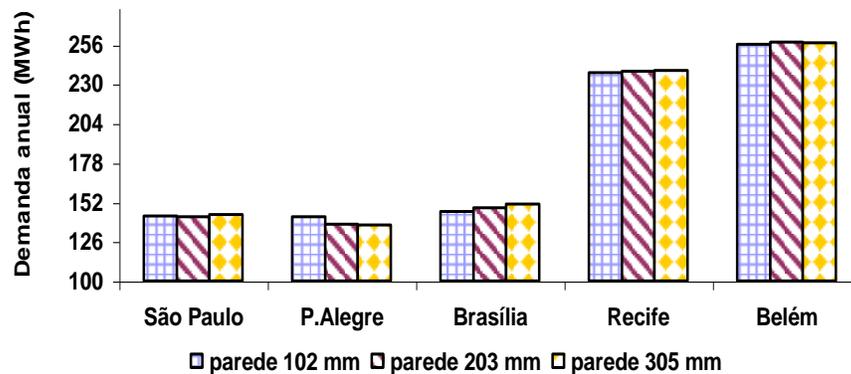


Fig.4.6: Influência da massa (espessura) das paredes

Nota-se que há uma pequena diminuição da demanda de energia para a localidade de Porto Alegre (cerca de 4%). Em regiões mais quentes ocorre aumento da demanda, mas em percentuais menores, de até 0,3% como na cidade de Belém. Isso acontece porque na edificação considerada a área do telhado é cerca de 2,4 vezes maior que a das paredes e a massa dele não foi alterada (mantida a espessura de 102mm). Nesse tipo de edificação térrea as

trocas de energia com o ambiente ocorrem em maior intensidade pelo telhado, como visto no item anterior.

Na **figura 4.6.a** são mostradas as potências de pico em função da variação da massa (espessura) das paredes:

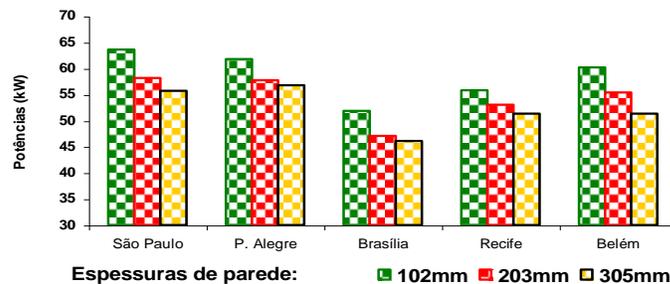


Fig. 4.6.a: Potências de pico em relação às espessuras das paredes

Verifica-se que para espessuras maiores das paredes as potências de pico diminuem para todas as localidades climáticas consideradas. Em Porto Alegre e Recife têm-se as menores diferenças de potência (**9%**); em Belém, a maior (**17%**). Portanto, em termos de demandas de energia as diferenças percentuais são pequenas, porém em relação às potências de pico têm-se diferenças muito maiores. Nesse caso, precisa-se fazer um estudo para verificar se o custo do aumento da espessura das paredes compensa o preço do equipamento de ar condicionado mais potente.

4.3.5 Temperatura do ar

4.3.5.1 Temperatura no interior: a demanda anual de energia como função da temperatura escolhida para o ar, no interior da edificação, é mostrada na **figura 4.7.a**. Como era de se esperar, há uma demanda maior de energia quando a edificação opera em temperaturas mais baixas. Ao se passar a temperatura de

20°C para 24°C, tem-se uma diminuição da ordem de 50% na demanda de energia. Isso ocorre porque ao aumentar a temperatura no seu interior, ela se aproxima da temperatura média (22°C) da

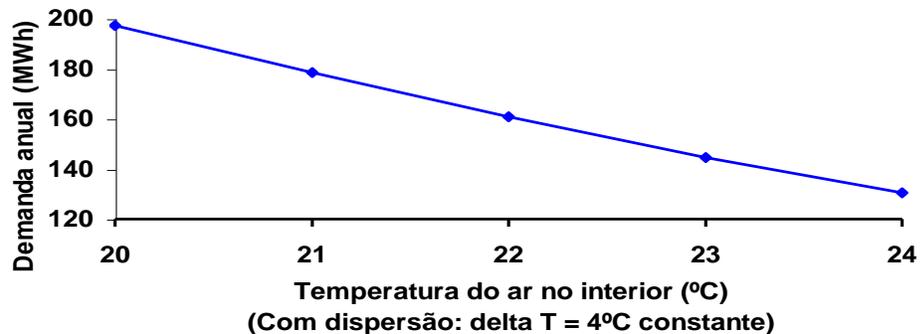


Fig. 4.7.a: Influência da temperatura do ar no interior da edificação

região climática de São Paulo. Assim, diminui a quantidade de calor trocado com o ambiente, fazendo com que o sistema de ar condicionado trabalhe menos.

Na **figura 4.7.b** são mostradas as potências de pico correspondentes à variação da temperatura do ar no interior da edificação:

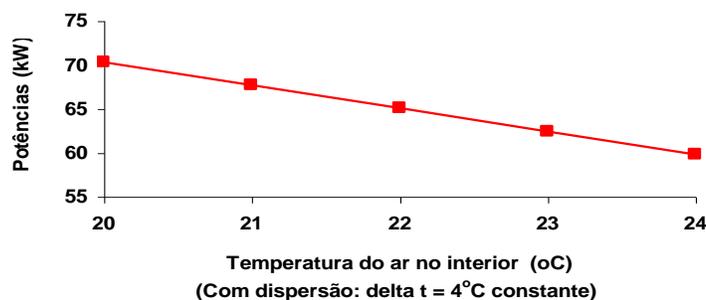


Fig. 4.7.b: Potências de pico em função da temperatura do ar no interior

4.3.5.2 Operação do sistema de ar condicionado: a temperatura do interior da edificação é selecionada a partir de ajuste do sistema de ar condicionado. Normalmente, fixa-se uma temperatura (**T**) e se varia a diferença (**ΔT**) de temperaturas na qual o equipamento de ar condicionado vai ligar ou desligar.

Neste item, como mostrado na **figura 4.8.a**, é apresentada a demanda de energia do sistema de condicionamento ambiental quando a temperatura (“setpoint”) de operação é fixada em $T = 22^{\circ}\text{C}$ e a diferença (ΔT) de temperaturas de ligar e

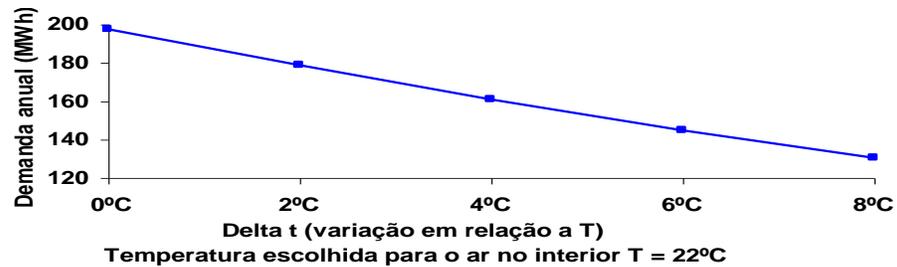


Fig. 4.8.a: Influência da variação ΔT da temperatura (“setpoint”) do ar interior

desligar o ar condicionado é variada de 2°C até 8°C . A demanda de energia diminui cerca de **50%** quando se aumenta a diferença de temperaturas, de 2°C até 8°C . O aumento da diferença de temperaturas (ΔT), aumenta o período de tempo em que o sistema de ar condicionado fica desligado.

Na **figura 4.8.b** são mostradas as potências de pico correspondentes à variação (ΔT) das diferenças de temperatura:

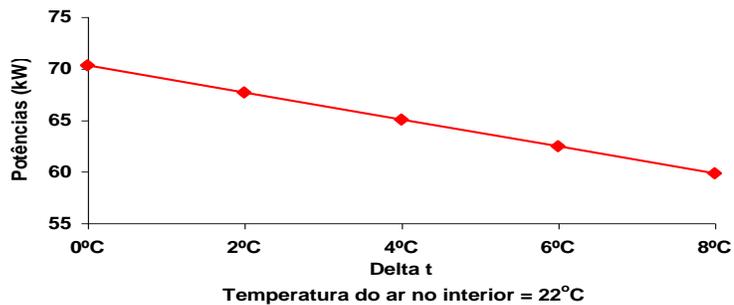


Fig. 4.8.b: Potências de pico em função da variação do ΔT

4.3.6 Localização: foram feitas as simulações da mesma edificação para vários locais diferentes do Brasil: **São Paulo, Porto Alegre, Brasília, Recife e Belém**. A **figura 4.9** mostra os resultados obtidos. Observa-se que um mesmo projeto de

edificação em locais diferentes pode provocar aumento de até **80%** da demanda de energia quando se compara Belém e Porto Alegre, por exemplo:

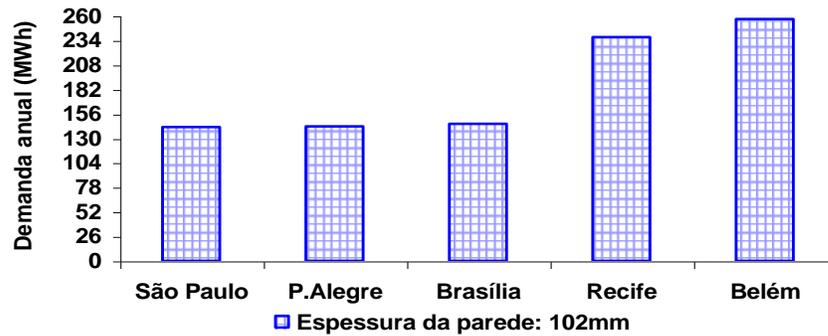


Fig. 4.9 Influência dos climas locais

Isso ocorre porque a insolação e as temperaturas médias anuais diferem muito entre si; no caso de Belém, nas trocas térmicas, basicamente, só há ganho de calor pela edificação o ano inteiro. Além disso, a umidade relativa é bastante alta (acima de 50%) e as temperaturas médias são maiores daquela fixada (“setpoint”) para operação do sistema de ar condicionado, exigindo que ele trabalhe mais para a manutenção do conforto térmico.

Na **figura 4.9.a** são mostradas as potências de pico para condicionamento da edificação em relação aos climas locais:

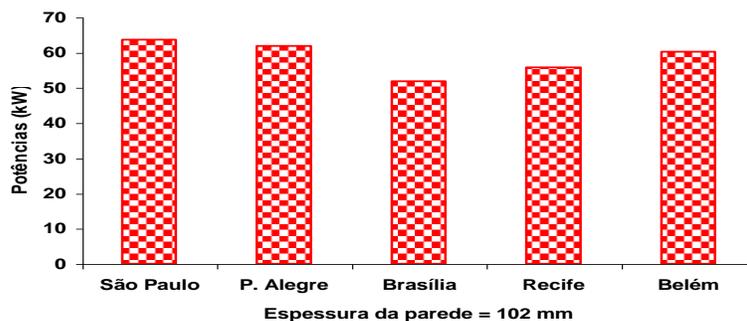


Fig. 4.9.a Potências de pico em relação aos climas locais

Observa-se que para regiões mais frias, como Porto Alegre e São Paulo, ocorrem potências de pico maiores; as menores são verificadas para Brasília. Como já citado anteriormente, o clima desta região proporciona as maiores diferenças de amplitude entre as temperaturas diurna e noturna, além da umidade relativa do ar externo ser baixa. Isso proporciona maior número de horas do ano confortáveis, de forma que o sistema de ar condicionado trabalha mais em apenas um determinado período com picos menores de potência.

4.3.7 Uma edificação comercial otimizada: apenas como ilustração, são calculadas as demandas de energia da edificação que apresentaria condições energéticas mais desfavoráveis, obedecendo aos parâmetros escolhidos para a envoltória e para a operação do ar condicionado; e outra que apresentaria as melhores condições energéticas; sempre para as duas localidades: São Paulo e Belém.

Nas duas situações climáticas, a diminuição de demanda de energia é significativamente elevada; quando se otimiza a edificação, pode-se chegar até a **50%** de economia anual na demanda de energia elétrica (vide **figura 4.10**):

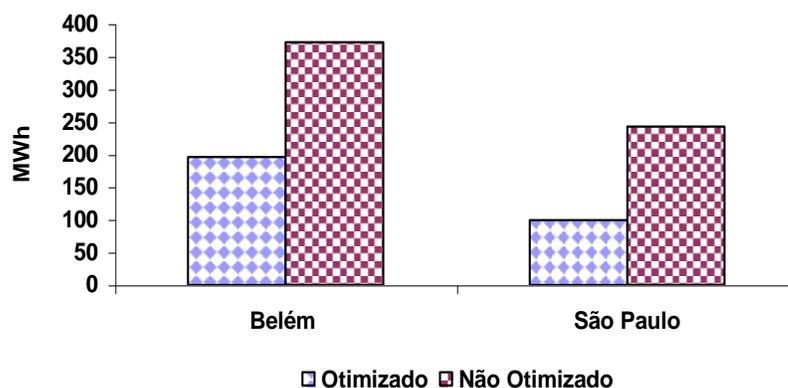


Fig. 4.10: Edificações otimizada e não otimizada

Para Belém a diferença da demanda anual de energia elétrica de uma edificação energeticamente ineficiente é da ordem de **176 MWh/ano** a mais quando comparada com a de uma eficiente.

Isso mostra que, independentemente da sua localização, deve-se fazer um esforço muito grande para otimizar uma edificação.

5 Comentários gerais e recomendações finais

Ficou claramente mostrado neste trabalho a influência dos parâmetros construtivos na demanda de energia em edificações comerciais ou públicas, para fins de ar condicionado.

Além do analisado e comentado, algumas recomendações gerais podem ser adicionadas ao que foi dito anteriormente.

5.1 Sabe-se que maior área envidraçada permite aumentar a iluminação natural em edificações, diminuindo-se, assim, a demanda de energia elétrica para fins de iluminação.

Porém, uma área envidraçada maior eleva substancialmente a demanda de energia para se manter a edificação condicionada.

Certamente, a economia de energia elétrica oriunda do uso menos intensivo de iluminação artificial não compensará esse aumento elevado de energia para condicionamento ambiental.

Neste caso, tem-se de fazer uma análise de quanto se economizaria de energia elétrica em iluminação e comparar ao eventual aumento de demanda de energia com o sistema de ar condicionado.

Do ponto de vista da demanda de energia em condicionamento ambiental, certamente, quanto menor a área envidraçada, menor a demanda de energia da edificação.

Recomenda-se, então, projetar a edificação de tal maneira que se tenha a menor quantidade possível de janelas, mas compatível com o conforto visual.

5.2 Por outro lado, na edificação com área envidraçada pequena, a importância da cor de sua envoltória torna-se maior. Isso quer dizer que, em climas tropicais, deve-se dar sempre preferência à utilização de cores claras e áreas envidraçadas menores possíveis.

À medida que a edificação vai envelhecendo, há uma tendência de a envoltória escurecer-se sob a ação das intempéries e da poluição. Isso, certamente, aumentará a demanda de energia do sistema de ar condicionado. Portanto, uma manutenção preventiva periódica na pintura é interessante para se manter a demanda de energia do sistema de ar condicionado dentro do padrão original de projeto da edificação.

5.3 O resultado apresentado na **figura 4.5** mostrou que uma edificação térrea e com menor área envidraçada tem uma demanda de energia menor que uma em vários andares e com área envidraçada maior.

Isso leva a recomendar, se o terreno permitir, a construção de edificação térrea e com menor área de fechamento transparente. Ela tem um desempenho energético mais eficiente em função da menor área envidraçada. Se houver necessidade de se construir uma edificação com mais de um andar, reforça-se a recomendação de se ter a menor quantidade possível de fechamento transparente.

5.4.1 Foi mostrado que se tem uma significativa economia de energia ao se operar o sistema de ar condicionado com temperaturas do ar interior mais altas.

Isso quer dizer que o simples fato de se regular a temperatura (“setpoint”) de operação do sistema de ar condicionado em um valor mais alto, pode-se reduzir a

demanda de energia elétrica e manter, ainda, as condições de conforto da maioria das pessoas que freqüentam a edificação.

5.4.2 Ficou clara a importância da escolha das condições de operação do ar condicionado. Além da temperatura (“setpoint”) mais alta do ar interior, deve-se escolher o maior intervalo (ΔT) possível de temperaturas em que o equipamento de ar condicionado liga e desliga, mas compatível com a sensação de conforto que a maioria das pessoas suporta no interior da edificação.

Cabe, aqui, uma sugestão aos fabricantes de equipamentos para instalações centrais de ar condicionado, deixar como opção ao usuário a regulagem da variação ΔT da temperatura (“set point”) de operação do sistema de condicionamento.

5.5 Do ponto de vista de demanda de energia, é importante que o projeto da edificação seja adequado a cada região. Assim, edificações em lugares diferentes terão formas, materiais, orientações, características (cor, por exemplo) da envoltória etc. diferentes. Caso contrário, um mesmo projeto de edificação em locais diferentes, como foi visto, pode provocar aumento de até **80%** da demanda de energia elétrica, por exemplo, quando se compara Belém e Porto Alegre.

5.6 Ao se projetar uma edificação energeticamente mais eficiente, não só a quantidade de energia usada por ela será menor como também será a potência instalada do sistema de ar condicionado, contribuindo para diminuir os custos de sua construção. A companhia distribuidora de energia elétrica também se beneficiará porque, se for necessário redimensionar a rede elétrica, o custo desse redimensionamento será menor.

5.7 Um aspecto muito importante a salientar é que, em geral, uma edificação mais eficiente energeticamente custa mais caro. Por exemplo, ao se diminuir a área de janelas envidraçadas dela, o seu custo aumenta, devido ao custo adicional da quantidade maior de fechamento opaco da envoltória.

Isso quer dizer que, ao se procurar construir edificações mais eficientes com a adoção de uma solução desse tipo, elas terão, em geral, custos iniciais maiores. Isso implicará numa avaliação econômica das soluções propostas procurando compatibilizar o aumento dos custos iniciais com a futura economia de energia da edificação.

5.8 É interessante salientar que uma das razões pelas quais se pode prever uma certa resistência à incorporação de soluções energeticamente eficientes, é exatamente o fato de a edificação ser construída por uma organização que está preocupada, basicamente, em construí-la a custo mais baixo. Portanto, eventualmente não está interessada em procurar soluções energeticamente eficientes para a edificação. Esta, por sua vez, poderá ser operada por uma outra organização, que irá responsabilizar-se pelo pagamento das contas de energia de uma edificação que não foi energeticamente bem projetada.

É importante, então, que haja uma conscientização por parte do construtor da edificação e de seu usuário final, no sentido de que se mostre a vantagem de ter custos iniciais mais altos, porém a sua operação terá um custo menor.

5.9 Há uma preocupação geral cada vez maior com a diminuição da demanda de energia elétrica em edificações. Uma das formas de se conseguir isso no setor comercial e público é através de projetos de edificações energeticamente

eficientes como mostrado neste trabalho. Para se projetar tais tipos de edificação é primordial a utilização de métodos de simulação numérica como foi feito aqui, desde a sua fase de projeto.

5.10 Para que se satisfaça a demanda de energia elétrica em edificações comerciais e públicas, será necessária a construção de novas usinas. Provavelmente, estas serão termelétricas (a gás natural) uma vez que os grandes potenciais hidroelétricos brasileiros a aproveitar encontram-se em regiões que envolvem questões ambientais e sociais difíceis de serem resolvidas, como visto anteriormente.

Essa necessidade de expansão do setor elétrico pode ser minimizada se todas as edificações, daqui para frente, forem projetadas energeticamente eficientes. Como mostrado no exemplo ilustrado na **figura 4.10**, a otimização de edificações, independentemente da sua localização, contribui significativamente para a redução da demanda de energia elétrica.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **Condicionador de ar doméstico – Determinação do coeficiente de eficiência energética** – MB-3341. Rio de Janeiro, 1990.

____. **Iluminância de interiores** – NBR 5413. Rio de Janeiro, 1992.

____. **Instalações centrais de ar condicionado para conforto - Parâmetros básicos de projeto** - NBR 6401. Rio de Janeiro, 1980.

____. **Unidade compacta ou divisível de condicionamento de ar “Self Contained” tipo industrial ou comercial – Especificação** – EB-269. Rio de Janeiro, 1969.
- 2 ABRAVA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO – **Estatísticas de vendas de ar condicionado central**. São Paulo – SP – Brasil. s.d.
- 3 AKUTSU, M. – **Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares** – Manual de procedimentos para avaliação. São Paulo, Publicação IPT 1732, 1987.

____. **Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil**, São Paulo, 170p. Tese (Doutorado), 1998– Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- 4 ALUCCI, M. P. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica**. São Paulo, 225p. Tese (Doutorado), 1993. – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
- 5 ANDERSON, B.; RIORDAN, M.. **The solar home book: heating, cooling and designing with the sun**. Harrisville, first printing, New Hampshire –

USA, 1976.
- 6 ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING - **Fundamentals Handbook**. New York, USA, 1985.
- 7 BERMANN, C.; MARTINS, O. S. **Sustentabilidade Energética no Brasil – Limites e possibilidades para uma estratégia sustentável e democrática**. 1. ed. Rio de Janeiro: projeto Brasil sustentável e democrático: FASE, 2000.
- 8 BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? Para quem?** – Crise e alternativas para um país sustentável. 1. ed., São Paulo, Ed. Livraria da Física, 2002.

- 9 BEVINGTON, R.; ROSENFELD, A. H. – **Energy for “Buildings and Homes** - Scientific American September, 1990 – Pages 77 to 86, Workshop: métodos de análise energética, coordenador Ildo Luis Sauer, IEEUSP, 1994.
- 10 COSTA, E. C. da, **Arquitetura ecológica – condicionamento térmico natural**. 1. ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1982.
- _____. **Física aplicada à construção – conforto térmico**. 4. ed. revisada, São Paulo, Edgard Blücher, 1998.
- _____. **Refrigeração**. 3. ed. – 4. reimpressão, São Paulo, Edgard Blücher, 1994.
- 11 ELETROBRAS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS AS - **Estimated Market for Energy Service Companies in Brazil**, relatório preparado por Otávio Mielnik com apoio financeiro da ELETROBRAS, PROCEL - BRACEL, 1998.
- 12 FROTA, A. B.; SHIFFER, S. R. – **Manual de Conforto Térmico – 2. edição –** São Paulo – Studio Nobel, 1995.
- 13 GOLDEMBERG, J. – **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. 1. edição, São Paulo, EDUSP, 1998.
- 14 GOLDEMBERG, J. et alii. **Energy for a sustainable world –** Nova Delhi, Wiley Eastern Limited, 1988.
- 15 HIRST, E. et alii. **Energy Efficiency in Buildings Progress & Promise**, 1. ed. Washington, F.M.O’Hara, Jr. Editor, 1986.
- 16 MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, **Passive Solar Buildings** Massachusetts – USA, I. Balcomb J. Douglas, 1988, vol. 7.
- 17 LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R.– **Eficiência energética na arquitetura**. 1. ed. São Paulo, PW Gráficos e Editores, 1997.
- 18 LEE, J. F.; SEARS, F. W. **Termodinâmica**. 2. ed. tradução de Borisas Cimbliris, Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico e EDUSP, 1969.
- 19 MASCARÓ, J.L.; MASCARÓ, L.E.R. – **Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios**.

2. edição, Porto Alegre, Sagra-DC Luzzatto, 1992.
- 20 MASCARÓ, L. R. de – **Energia na edificação** – estratégia para minimizar seu consumo – projeto. 2. ed. São Paulo, Projetos Editores, 1991.
- 21 MARTINS, J.M.V. et alii - **Estudo Comparativo dos Programas NBSLD e DOE-2** – IEE/USP/IPT – São Paulo – SP – Brasil, s/d.
- 22 MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA -**Balanco Energético Nacional 2000** – Ano Base 1999.
- 23 QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO. São Paulo, SINDUSCON-Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo, 2000.
- 24 RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física I**. 2. ed. tradução de Euclides Cavallari e Bento Afini Jr. 3. Reimpressão, Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico e EDUSP, 1969.
- 25 SANTOS, E. M. et alii. **Gás natural**: estratégia para uma energia nova no Brasil. 1.edição, São Paulo, ANNABLUME editora, 2002.
- 26 SERRA, R. **Arquitectura y climas**. 2. ed. Barcelona – Spain, Editorial Gustavo Gili, 2000.
- 27 SOUZA, R. de et alii. **Sistema de gestão da qualidade para empresas construtoras**. 1.ed. São Paulo, Editora Pini, 1995.
- 28 STOECKER, W. F.; JONES, J W. **Refrigeração e ar condicionado** – 2. ed. tradução de José M. S. Jabardo, reedição 1982, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1985.
- 29 WHITMAN, W. C.; JOHNSON, W. M. **Refrigeration & Air Conditioning Technology**. 3rd edition, North Carolina – USA, Delmar Publishers, 1995.