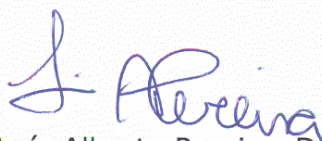


"REDUÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO PARÂMETROS CONSTRUTIVOS VISANDO O
CONFORTO TÉRMICO"

MARTA GARCIA BALTAR

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.



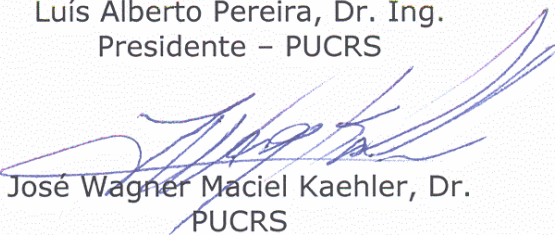
Luís Alberto Pereira, Dr. Ing.
Orientador

Flávio Antonio Becon Lemos, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

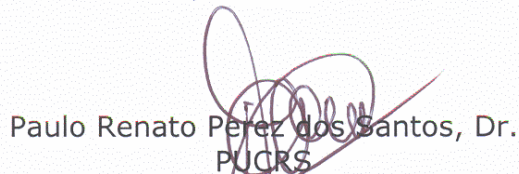
Banca Examinadora:



Luís Alberto Pereira, Dr. Ing.
Presidente - PUCRS



José Wagner Maciel Kaehler, Dr.
PUCRS



Paulo Renato Perez dos Santos, Dr.
PUCRS



Paulo Otto Beyer, Dr.
UFRGS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Redução da Demanda de Energia Elétrica
utilizando Parâmetros Construtivos visando ao
Conforto Térmico**

**Dissertação submetida à
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.**

MARTA GARCIA BALTAR

Porto Alegre, agosto de 2006.

Agradecimentos

Ao meu orientador Luís Alberto Pereira, por sua imensa dedicação durante todas as fases de elaboração desta dissertação.

Ao meu co-orientador José Wagner Maciel Kaehler, pela orientação e acima de tudo pela confiança depositada em mim, oportunizando-me este mestrado.

A todos os professores, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela amizade, informações e conhecimentos transmitidos. Especialmente aos meus ex-colegas Christian e Marislaine, pelo coleguismo e apoio nas disciplinas que juntos cursamos.

A todos os colegas do Grupo de Gestão de Energia, principalmente aos mais que colegas e sim amigos: Adriano, Alexandre, Cícero, Everton, Fábio, Fernanda, Lothar, Marcos, Marlon e Odilon e de forma muito especial a minha grande amiga Zuleika, companheira em todas as horas. Muito obrigada a vocês por toda ajuda e maravilhoso convívio.

Ao meu ex-colega, hoje meu noivo, Marcelo por todo amor, carinho, compreensão e incentivo, mas acima de tudo pela paciência com minhas angústias durante todo este percurso.

Aos meus pais, Cândida e Roberto, por todo amor e carinho dedicados ao longo da minha vida, por terem me incentivado a fazer mestrado e por me ensinarem a nunca desistir dos meus ideais, além de serem sempre pais presentes em minha vida.

A minha segunda mãe Lelê por toda amizade, amor, carinho, preocupação e por fazer todas as minhas vontades quando vou para casa.

As minhas irmãs, Márcia e Marília, por serem muitas vezes mais que irmãs e sim minhas melhores amigas, me ajudando e socorrendo em todos os momentos que precisei.

Aos meus cunhados, Alexandre e Guilherme, pela amizade e contribuição com os recursos de informática. Ao Xandi não poderia deixar de agradecer de uma forma muito especial por ter sido também um ótimo colega e algumas vezes até professor.

Aos meus avós e todos os demais familiares e amigos que me motivaram para a realização desse mestrado.

A família Luz Alves por ter me acolhido e proporcionado uma ótima convivência, fazendo com que a saudade de casa fosse amenizada.

Ao engenheiro mecânico Fábyo que mesmo sem me conhecer se dispôs a me ajudar no manuseio do programa *Energypius*, tornando-se um amigo sempre pronto para me auxiliar quando novas dúvidas surgiam.

A AES Sul pelo financiamento deste mestrado.

Ao Hospital Bruno Born pela permissão do uso dos dados e realização do levantamento nos quartos particulares.

Resumo da Dissertação apresentada a PUCRS como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Redução da Demanda de Energia Elétrica utilizando Parâmetros Construtivos visando ao Conforto Térmico

Marta Garcia Baltar

Agosto de 2006.

Orientador: Luís Alberto Pereira, Dr. -Ing.

Co-orientador: José Wagner Maciel Kaehler, Dr.

Área de Concentração: Sistemas de Energia.

Linha de Pesquisa: Planejamento e Gestão de Sistemas de Energia.

Projeto de Pesquisa Vinculado: Gestão de Energia em Programas Anuais de Eficiência Energética e Promoção do Uso Racional de Energia.

Palavras-chave: demanda de energia elétrica, conforto térmico, parâmetros construtivos.

Este trabalho tem por objetivo avaliar a influência de parâmetros construtivos na demanda e consumo de energia elétrica para fins de condicionamento térmico ambiental. Os parâmetros construtivos avaliados englobam tipos de vidros, cores externas das fachadas e revestimento nas paredes internas. As análises são realizadas através do programa de simulação termoenergética *EnergyPlus* e avaliadas a partir de um método desenvolvido para analisar a eficácia das alternativas construtivas. As avaliações são realizadas tendo como base a edificação do Hospital Bruno Born, localizado em Lajeado, Rio Grande do Sul. A análise visa minimizar o consumo de energia elétrica no sistema de ar condicionado e atender todos os requisitos de conforto e assepsia de treze quartos de internação do estabelecimento hospitalar, de acordo com os índices de temperatura especificados na NBR-6401. Visando averiguar as condições do ambiente térmico e o consumo de energia elétrica, são avaliados os índices de conforto térmico, as temperaturas internas e a potência necessária do ar condicionado de expansão direta para cada um dos treze quartos de internação do hospital, verificando o consumo energético das alternativas utilizadas e a relação custo-benefício da melhor alternativa. Através das simulações constatou-se que com a utilização de materiais eficientes termicamente as trocas térmicas do interior com o exterior são minimizadas, diminuindo o consumo energético do sistema de ar condicionado.

Abstract of Dissertation presented to PUCRS as one of the requirements to obtain
Masters Degree in Electrical Engineering.

Reduction of the Demand of Electric Energy using Building Parameters for Thermal Comfort

Marta Garcia Baltar

August 2006.

Advisor: Luís Alberto Pereira, Dr. -Ing.

Co-advisor: José Wagner Maciel Kaehler, Dr.

Concentration Field: Systems of Energy.

Line of Research: Planning and Management of Systems of Energy.

Linked Research Project: Energy Management in Annual Programs for Energy Efficiency
and Promotion of Rational Use of Energy.

Keywords: demand of electric energy, thermal comfort, building parameters.

The purpose of this study is to evaluate the influence of building parameters on the electrical energy demand and consumption for air-conditioning. The building parameters evaluated were: glass types and exterior colors used to cover external and internal walls. The analysis was performed using EnergyPlus, thermo-energetic simulation program, and evaluated with a method developed to determine the efficiency of the building alternatives. The evaluation was performed based on the building of the Bruno Born Hospital, in Lajeado, Rio Grande do Sul. The main objective is to minimize the electrical energy consumption of the air-conditioning system and at the same time fulfill the comfort and sterilization requirements of the thirteen hospitalization rooms of the hospital, according to temperature indexes specified in NBR-6401. With the purpose of assessing the thermal environmental conditions and energy consumption, thermal comfort indexes, internal temperature and the necessary air-conditioning power for each of the hospitalization room were evaluated. The energy consumption of the used alternatives and the cost benefit ration were assessed. Through simulation, the results showed that with the use of thermal efficient materials, temperature exchanges between internal and external areas are minimized, lowering energy consumption of the air-conditioning system.

Sumário

Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1. Apresentação.....	1
1.2. Objetivos da Dissertação.....	2
1.3. Organização da Dissertação.....	3
1.4. Motivação.....	4
1.5. Estado da Arte	5
1.5.1. Histórico Energético Brasileiro	5
1.5.2. Consumo Energético em Edificações.....	6
1.5.3. Conforto Térmico no Setor Hospitalar	11
1.5.4. Alternativas Bioclimáticas de Projeto	12
1.5.5. Simulações utilizando Programas Computacionais.....	13
1.5.6. Eficiência Energética em Outros Países	16
1.6. Publicações Relacionadas ao Desenvolvimento da Dissertação	17
Capítulo 2 Conceitos.....	18
2.1. Introdução.....	18
2.2. Conforto Térmico	18

2.2.1.	Balanço Térmico.....	21
2.2.2.	Variáveis de Conforto Térmico.....	22
2.3.	Índices de Conforto Térmico	26
2.3.1.	Voto Médio Previsto – <i>PMV</i>	26
2.3.2.	Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas – <i>PPD</i>	27
2.4.	Comportamento Térmico dos Materiais	28
2.4.1.	Absortância.....	28
2.4.2.	Emissividade.....	29
2.4.3.	Transmitância	29
2.4.4.	Radiação Solar	29
2.4.5.	Propriedades Térmicas dos Materiais.....	31
Capítulo 3	Estudo de caso.....	34
3.1.	Introdução.....	34
3.2.	Edificação Estudada	35
3.3.	Análise Bioclimática.....	38
3.3.1.	Programa <i>Analysis Bio</i>	40
3.4.	Programa <i>EnergyPlus</i>	42
3.4.1.	Algoritmos de Solução	44
3.4.2.	Arquivo Climático.....	45
3.4.3.	Dias de Projeto	45
3.4.4.	Dados Avaliados com o Programa <i>EnergyPlus</i>	46

3.5. Método Utilizado.....	47
3.5.1. Método de Análise dos Resultados.....	48
Capítulo 4 Simulações	50
4.1. Introdução.....	50
4.2. Hospital Bruno Born	50
4.2.1. Zonas Térmicas	52
4.2.2. Fontes de Calor	52
4.3. Caso 1 - Condição Real.....	56
4.3.1. Sistema de <i>HVAC</i> do Caso 1	56
4.3.2. Características Construtivas do Caso 1	57
4.3.3. Análise dos Resultados da Simulação do Caso 1	58
4.4. Caso 2	61
4.4.1. Sistema de <i>HVAC</i> do Caso 2.....	62
4.4.2. Análise dos Resultados da Simulação do Caso 2	63
4.5. Caso 3 - Tipo de Vidro.....	67
4.5.1. Sistema de <i>HVAC</i> do Caso 3.....	68
4.5.2. Análise dos Resultados das Simulações do Caso 3.....	71
4.6. Caso 4 - Pintura Externa	73
4.6.1. Sistema de <i>HVAC</i> do Caso 4.....	74
4.6.2. Análise dos Resultados das Simulações do Caso 4.....	75

4.7. Caso 5 - Revestimento Interno	78
4.7.1. Sistema de HVAC do Caso 5.....	78
4.7.2. Análise dos Resultados das Simulações do Caso 5.....	80
4.8. Caso 6 – Caso Ótimo.....	82
4.8.1. Sistema de HVAC do Caso 6.....	83
4.8.2. Análise dos Resultados da Simulação do Caso 6	84
Capítulo 5 Análise Econômica	87
5.1. Introdução.....	87
5.2. Viabilidade Econômica	88
Capítulo 6 Conclusão	93
6.1. Sugestões de Trabalhos Futuros	95
Bibliografia.....	96
ANEXO 1 Projeto 02: 135.07-001 - Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1	102
ANEXO 2 Projeto 02: 135.07-002 - Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2	113
ANEXO 3 Características técnicas gerais de aparelhos Springer	141
ANEXO 4 Eficiência Energética em Edificações – Pôster.....	144
ANEXO 5 Indústria da Construção Civil e Eficiência Energética – Artigo	146
ANEXO 6 Uso de Recursos Naturais para Redução de Consumo de Energia Elétrica em Edificações – Resumo e Artigo	153

Lista de Símbolos

A_C	Área corporal	(m ²)
m_C	Massa corporal	(kg)
h	Altura	(m)
Met	Metabolismo	(W/m ²)
Cnd	Condução	(W/m ²)
Cnv	Convecção	(W/m ²)
Rad	Radiação	(W/m ²)
M	Taxa metabólica	(W/m ²)
RQ	Quociente de respiração	-
Q_{O_2}	Taxa volumétrica de consumo de oxigênio a 0°C	(L/s)
I_{cl}	Resistência térmica das vestimentas	(clo)
I_{clu}	Resistência térmica parcial dos componentes das vestimentas	(clo)
L_f	Espessura da vestimenta	(mm)
A_g	Superfície do corpo coberta	(m ²)
trm	Temperatura média radiante	(°C)
t_g	Temperatura de globo	(°C)
t	Temperatura do ar	(°C)
V	Velocidade do ar	(m/s)
ε	Emissividade solar	-
d	Diâmetro do globo	(m)
P_a	Pressão parcial de vapor d'água	(Pa)
UR	Umidade relativa	%
P_{sat}	Pressão de saturação	(Pa)
PMV	Voto médio previsto	-
Qt	Carga térmica atuante sobre o corpo	(W/m ²)

f_{cl}	Fator de vestimentas	-
t_{cl}	Temperatura exterior da vestimenta	(°C)
h_c	Coeficiente de convecção	(W/m ²)
PPD	Porcentagem de pessoas insatisfeitas	-
RS	Radiação solar incidente	(W/m ²)
α_s	Absortância solar	-
ρ_s	Refletividade solar	-
τ_s	Transmitância solar	-
ρ	Densidade de massa aparente	(kg/m ³)
m	Massa	(kg)
v	Volume	(m ³)
λ	Condutividade térmica	(W/m.K)
Q	Quantidade de calor	(J)
L	Espessura	(m)
ΔT	Varição de temperatura	(K)
A	Área	(m ²)
c	Calor específico	(kJ/kg.K)
C	Capacidade térmica	(J/K)
τ_v	Transmitância solar visível	-
ρ_{sv}	Refletividade solar visível	-

Lista de Figuras

Figura 1.1. Participação de cada estado no consumo de energia elétrica da Região Sul do país, no setor comercial, ano de 1995 (GWh)	7
Figura 1.2. Consumo de energia elétrica em edificações por setor.....	8
Figura 1.3. Usos finais no setor residencial	8
Figura 1.4. Usos finais nos setores público e comercial	8
Figura 1.5. Energia elétrica consumida.....	16
Figura 1.6. Emissão de CO ₂	16
Figura 2.1. Trocas de calor e índices de perda.....	21
Figura 2.2. Balanço térmico do corpo humano	22
Figura 2.3. Relação de <i>PPD</i> com <i>PMV</i>	27
Figura 2.4. Radiação solar incidente em um corpo opaco.....	29
Figura 2.5. Radiação solar incidente em um corpo transparente	30
Figura 2.6. Comportamento de alguns vidros frente á energia radiante.....	30
Figura 3.1. Planta baixa da área analisada do Hospital Bruno Born	36
Figura 3.2. Interface do programa <i>Analys Bio</i>	38
Figura 3.3. Dados climáticos de Porto Alegre e Lajeado.....	40
Figura 3.4. Carta bioclimática de Porto Alegre originada pelo <i>Analysis Bio</i>	41
Figura 3.5. Interface principal do programa <i>EnergyPlus</i>	43
Figura 3.6. Interface do editor do programa <i>EnergyPlus</i>	43
Figura 3.7. Momento de simulação do programa <i>EnergyPlus</i>	44

Figura 4.1. Vistas isométricas: (a) frente oeste e (b) frente leste do setor analisado.....	51
Figura 4.2. Índices de <i>PMV</i> de um dia de inverno (caso 1)	58
Figura 4.3. Índices de <i>PMV</i> de um dia de verão (caso 1)	59
Figura 4.4. Temperaturas internas de um dia de inverno (caso 1)	59
Figura 4.5. Temperaturas internas de um dia de verão (caso 1).....	60
Figura 4.6. Demanda de energia elétrica de um de inverno (caso 1).....	60
Figura 4.7. Demanda de energia elétrica de um dia de verão (caso 1).....	61
Figura 4.8. Consumo mensal de energia elétrica (caso 1)	61
Figura 4.9. Índices de <i>PMV</i> de um dia de inverno (caso 2)	63
Figura 4.10. Índices de <i>PMV</i> de um dia de verão (caso 2)	64
Figura 4.11. Índices médios de <i>PMV</i> – Condição Real x Caso 2	64
Figura 4.12. Temperaturas internas de um dia de inverno (caso 2)	65
Figura 4.13. Temperaturas internas de um dia de verão (caso 2).....	65
Figura 4.14. Demanda de energia elétrica de um de inverno (caso 2).....	66
Figura 4.15. Demanda de energia elétrica de um dia de verão e um de inverno (caso 2).....	66
Figura 4.16. Consumo mensal de energia elétrica (caso 2)	67
Figura 4.17. Consumo mensal de energia elétrica (diferentes tipos de vidros).....	71
Figura 4.18. Demanda de energia elétrica de um de inverno – S5 x Caso 2	72
Figura 4.19. Demanda de energia elétrica de um de verão – S5 x Caso 2	72
Figura 4.20. Consumo mensal de energia elétrica – S5 x Caso 2.....	73
Figura 4.21. Consumo mensal de energia elétrica (diferentes cores de pintura externa).....	76
Figura 4.22. Demanda de energia elétrica de um de inverno – Cor BRANCA x Caso 2.....	76
Figura 4.23. Demanda de energia elétrica de um de verão – Cor BRANCA x Caso 2	77

Figura 4.24. Consumo mensal de energia elétrica – Cor BRANCA x Caso 2.....	77
Figura 4.25. Consumo mensal de energia elétrica (diferentes revestimentos internos).....	80
Figura 4.26. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno – EPS 60 mm x Caso 2	81
Figura 4.27. Demanda de energia elétrica de um dia de verão – EPS 60 mm x Caso 2	81
Figura 4.28. Consumo mensal de energia elétrica – EPS 60 mm x Caso 2.....	82
Figura 4.29. Consumo mensal de energia elétrica – Caso Ótimo x Caso 2 x Condição Real	84
Figura 4.30. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno – Caso Ótimo x Caso 2.....	85
Figura 4.31. Demanda de energia elétrica de um dia de verão – Caso Ótimo x Caso 2	85
Figura 4.32. Consumo mensal de energia elétrica – Caso Ótimo x Caso 2.....	86

Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Consumo médio de energia elétrica em edifícios públicos e comerciais	9
Tabela 1.2. Consumo médio de energia elétrica por setores	9
Tabela 1.3. Consumo médio de energia elétrica por uso final.....	10
Tabela 1.4. Potencial de economia de energia elétrica no setor comercial	10
Tabela 2.1. Escala de sensação térmica de sete pontos	27
Tabela 3.1. Condições internas para o verão – Temperatura de bulbo seco.....	35
Tabela 3.2. Condições internas para o inverno – Temperatura de bulbo seco	35
Tabela 3.3. Dados do Hospital Bruno Born para cada quarto	37
Tabela 3.4. Informações horárias constantes em um arquivo climático.....	39
Tabela 3.5. Estratégias bioclimáticas para Porto Alegre originadas pelo <i>Analysis Bio</i>	41
Tabela 4.1. Área e volume de cada zona térmica.....	52
Tabela 4.2. Ocupação de cada zona térmica de frente oeste (Q1 à Q6).....	53
Tabela 4.3. Ocupação de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13)	53
Tabela 4.4. Equipamentos de cada zona térmica de frente oeste (Q1 à Q6)	55
Tabela 4.5. Equipamentos de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13).....	55
Tabela 4.6. Iluminação de cada zona térmica de frente oeste (Q1 à Q6)	55
Tabela 4.7. Iluminação de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13)	55
Tabela 4.8. Sistema de <i>HVAC</i> de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13).....	56
Tabela 4.9. Características termofísicas dos materiais construtivos (caso 1 – condição real)	57

Tabela 4.10. Características físicas e óticas do vidro utilizado (caso 1 – condição real).....	58
Tabela 4.11. Características dos sistemas de <i>HVAC</i> (caso 2).....	62
Tabela 4.12. Características físicas e óticas do vidro V2	68
Tabela 4.13. Alteração na característica do sistema de <i>HVAC</i> (vidro duplo 3 mm).....	69
Tabela 4.14. Características termofísicas dos materiais construtivos (pintura externa)	73
Tabela 4.15. Alteração na característica do sistema de <i>HVAC</i> (reboco verde claro).....	74
Tabela 4.16. Alteração na característica do sistema de <i>HVAC</i> (reboco verde escuro).....	75
Tabela 4.17. Características termofísicas dos materiais construtivos (pintura externa)	78
Tabela 4.18. Alteração na característica do sistema de <i>HVAC</i> (lã de rocha).....	79
Tabela 4.19. Características dos sistemas de <i>HVAC</i> (caso 6).....	83
Tabela 5.1. Cálculo do RCB - Cenário 1	90
Tabela 5.2. Cálculo do RCB - Cenário 2.....	91
Tabela 5.3. Cálculo do RCB - Cenário 3.....	91

Capítulo 1

Introdução

1.1. Apresentação

A maciça utilização de aparelhos de ar condicionado visando satisfazer o conforto térmico humano é um dos grandes problemas da sociedade moderna, pois acarreta um consumo energético excessivo. Esta necessidade deve-se ao fato de que grande parte das edificações apresentam partidos arquitetônicos e sistemas construtivos que não levam em conta as características da área e do clima, caracterizando um espaço que não satisfaz as necessidades básicas de conforto ambiental.

Nas edificações hospitalares, é fator primordial atender as condições mínimas de conforto térmico, uma vez que estas são essenciais para que o processo de cura e restabelecimento dos pacientes ocorra com tranqüilidade proporcionando bem estar. Portanto, a importância de manter condições de conforto térmico adequadas leva à necessidade de avaliar o comportamento de ambientes climatizados ou não.

Atualmente, a insuficiência de energia elétrica disponível faz com que se busque o máximo de conforto com o mínimo de energia, sendo este o objetivo do estudo aqui apresentado: analisar os índices de conforto térmico de um hospital, propondo soluções que atendem as necessidades de conforto térmico, proporcionando um ambiente agradável com o mínimo consumo energético.

1.2. Objetivos da Dissertação

A presente dissertação tem por objetivo estudar o comportamento termoenergético de edificações hospitalares, visando eficiência energética no sistema de condicionamento térmico ambiental, através do uso de parâmetros construtivos e sistemas eficientes que melhorem a climatização com o menor consumo de energia elétrica. A análise apresentada é baseada em um estudo de caso e simulações usando o programa *EnergyPlus* (versão 1.2.3.023), disponível no site www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/.

A influência sobre o conforto térmico e o consumo de energia dos seguintes parâmetros de construção é avaliada:

- aberturas externas com diferentes tipos de vidros;
- cores das fachadas;
- revestimentos internos com isolamento térmico.

Tendo em vista que o foco deste trabalho é o comportamento termoenergético dos quartos de internação hospitalar, o primeiro ponto foi a escolha da tipologia de edificação hospitalar a ser simulada. Sendo o Hospital Bruno Born, situado em Lajeado, área de concessão da AES Sul o escolhido como objeto do estudo de caso.

Através do programa de simulação computacional *EnergyPlus* foi possível simular e avaliar alternativas arquitetônicas que minimizem a demanda de energia para fins de condicionamento ambiental e atendam a todos os requisitos de conforto e assepsia dos quartos de internação do estabelecimento hospitalar, de acordo com os índices de temperatura especificados na NBR-6401. Os parâmetros avaliados são utilizados para possibilitar a diminuição do consumo de energia elétrica e conseqüentemente melhorar o perfil da curva de carga da edificação, com isto reduzindo as despesas operacionais com energia elétrica a níveis suportáveis pelo cliente, evitando em alguns casos a inadimplência e gerando saldo de caixa para utilização em outras necessidades hospitalares.

As simulações foram feitas utilizando dias de projeto (de verão e inverno) e arquivos climáticos anuais. Visando averiguar as condições do ambiente térmico e o consumo de energia elétrica da edificação, foi avaliado o índice de conforto térmico dos ocupantes, a temperatura dos quartos de internação, a potência necessária do ar condicionado de

expansão direta e o consumo energético de cada quarto de internação do hospital, verificando a relação custo-benefício das variantes utilizadas.

Os resultados do estudo feito mostram que com a utilização de diferentes tipos de vidros, cores nas fachadas e revestimentos internos com isolamento térmico, pode-se alterar tanto a potência requerida pelo sistema de condicionamento de ar, quanto o consumo elétrico anual. Outro resultado do estudo são as análises econômicas, que avaliam a viabilidade da utilização de diferentes materiais construtivos em *Retrofits*¹ e em novas construções civis.

A pesquisa, além de fornecer dados para propiciar aos ocupantes ambientes adequados, que oferecem um maior conforto ambiental, pode também contribuir para melhorar o aproveitamento da energia elétrica.

1.3. Organização da Dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos, sendo o primeiro capítulo introdutório, onde são apresentados os objetivos, a organização da dissertação e a motivação que levaram a realizar o estudo. Também no primeiro capítulo é realizada uma revisão da bibliografia sobre o tema abordado nesta dissertação.

O Capítulo 2 apresenta alguns conceitos tais como os de conforto térmico, índices de conforto térmico (*PMV* e *PPD*) e comportamento térmico dos materiais de construção, os quais são importantes para o entendimento dos capítulos seguintes.

O Capítulo 3 apresenta as características do hospital escolhido para realização do estudo de caso, Hospital Bruno Born de Lajeado, a avaliação bioclimática, a metodologia utilizada para avaliação da eficácia das medidas alternativas que diminuem o consumo energético e proporcionem melhores índices de conforto, assim como os programas utilizados para realizar as simulações computacionais.

¹ Termo utilizado no mercado imobiliário para denominar atualização e readequação de um empreendimento.

O Capítulo 4 descreve as simulações computacionais, onde são apresentados os resultados obtidos e suas respectivas análises, avaliando se os quartos de internação da edificação hospitalar estão de acordo com os índices de temperatura especificados na NBR-6401 e quais elementos construtivos possibilitam a diminuição do consumo de energia elétrica do estabelecimento hospitalar.

O Capítulo 5 analisa a viabilidade econômica da utilização das melhores alternativas construtivas em três cenários. O primeiro cenário apresenta um *Retrofit* nas esquadrias e vidros, revestimentos internos e pintura externa, o segundo cenário refere-se a um *Retrofit* nos vidros e revestimentos internos e o terceiro cenário analisa a hipótese da construção ser construída desde o princípio com materiais eficientes termicamente.

O Capítulo 6 finaliza a dissertação apresentando as conclusões obtidas através dos resultados e das análises das simulações computacionais, também neste último capítulo são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

A dissertação consta ainda de anexos de projetos de normas da ABNT relacionadas ao tema, disponibilizados pelo Laboratório de Eficiência Energética de Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LabEEE/UFSC), coordenado pelo Dr. Engº Roberto Lamberts, características técnicas gerais de aparelhos de condicionador de ar tipo mini-split, fabricados pela Springer e trabalhos publicados durante a realização desta dissertação.

1.4. Motivação

As principais motivações dessa dissertação foram:

- o fato de que atualmente, grande parte das construções, incluindo as do setor hospitalar, não levam em consideração os recursos da natureza, são construídos em concreto, sem proteções contra insolação, sem elementos construtivos termicamente eficientes e com ar condicionado, demandando elevado consumo de energia.
- no futuro as energias convencionais poderão ser escassas ou, como na crise dos anos 70, elevarem consideravelmente seus preços. Assim, faz-se necessário à adoção de medidas que proporcionam a racionalização no uso de energia elétrica,

eliminando desperdícios. A racionalização no uso de energia elétrica é uma tendência mundial, já adotada em diversos países.

- no Brasil, há uma diversidade dos usos finais de energia elétrica no setor público e comercial como o ar condicionado, iluminação, elevadores, bombas e equipamentos de escritório, sendo o sistema de condicionamento térmico ambiental um dos maiores responsáveis pelo consumo elevado de energia elétrica.
- não há muitos estudos semelhantes no Brasil e poucos trabalhos divulgados sobre este assunto.
- o conforto térmico é essencial em ambientes hospitalares, pois afeta diretamente a saúde dos pacientes.
- o estudo de caso foi realizado em um hospital que já possui alguns setores eficientizados pelo Grupo de Eficiência Energética da PUCRS, mas o setor dos quartos de internação, localizados no segundo andar do hospital, não possui eficientização no sistema de conforto térmico.

1.5. Estado da Arte

1.5.1. Histórico Energético Brasileiro

A crise energética surgiu após as duas grandes guerras mundiais, mas a partir de 1973, com a escassez de petróleo, atingiu seu ápice, fazendo com que o mundo tomasse medidas de redução de consumo de todos os derivados desse combustível fóssil. Tal fato parece não ter sido suficiente para que os projetistas de edificações se preocupassem com o consumo energético excessivo resultante da utilização de determinadas alternativas de projeto [1].

A conservação de energia e o uso responsável das fontes energéticas foram as alternativas encontradas por muitos países na década de 70 para a crise do petróleo. Esta crise deixou as fontes disponíveis na época com custos mais elevados e com períodos longos para implantação. Como consequência, o uso racional de energia passou a ser uma opção vantajosa, devido ao fato de que reduzindo o consumo de energia elétrica não haveria necessidade de realizar novas instalações de fontes de energia [2]. O avanço

tecnológico passou a oferecer equipamentos mais eficientes e a busca da eficiência energética passou a vigorar no cotidiano das empresas. O conceito de eficiência energética está estritamente vinculado ao processo disponibilizado, usos finais (força motriz, refrigeração) e serviços (aquecer ambientes, bombeamento d'água); ele se refere à cadeia energética como um todo, isto é, desde a extração (ex. extração de petróleo) ou transformação (ex. geração hídrica) até o uso final (ex. ar condicionado) [3].

Devido ao baixo custo da energia elétrica no Brasil, até alguns anos atrás, e devido a crença de que as fontes energéticas são inesgotáveis, projetistas e construtores via de regra realizam uma arquitetura universalista, com edificações desvinculadas das condições climáticas, da sua disposição nos locais, da sua orientação e da composição de sua envoltória. Isto acarreta um consumo elevado de energia nas edificações, devido às instalações elétricas e eletromecânicas. Do ponto de vista de demanda de energia, é importante que o projeto seja adequado a cada região, assim, edificações em lugares diferentes deveriam ter formas, materiais, orientações e características da envoltória diferentes (cor, por exemplo). Caso contrário, um mesmo projeto de edificação em locais diferentes, pode provocar aumento de até 80% da demanda de energia elétrica, por exemplo, quando se compara Belém e Porto Alegre [4].

1.5.2. Consumo Energético em Edificações

As etapas de estudos preliminares e anteprojetos são responsáveis por 50% do potencial de economia de energia. Entre os vários estágios do processo de edificação, um dos mais importantes é a definição da envoltória do edifício, caracterizada como um conjunto de elementos-limite entre o meio exterior e o meio interior, responsável pelo controle das necessidades energéticas. As características da envoltória do edifício encontram-se diretamente vinculadas ao consumo de energia e, evidentemente, caso estas não sejam pensadas de forma adequada, realizarão trocas térmicas significativas com o exterior, fazendo com que seja necessário o uso de equipamentos eletromecânicos para equilibrar a temperatura interior [5]. A busca por este equilíbrio térmico, assim como por corretos níveis de iluminância, é de fundamental importância para o bem-estar dos usuários do edifício [1].

Com um bom planejamento, é possível construir um edifício que demande 45% menos energia que outro com as mesmas características. Para tanto, é necessário adequar os recintos habitáveis às condições climáticas locais, usando materiais e técnicas

apropriadas, tendo em vista o uso racional de energia [6]. Existem também estudos aplicados à demanda final de energia por setor econômico, que incorporam modelos de previsão do potencial de economia de energia, quando considerada a eficiência energética dos equipamentos mais modernos. Para o setor comercial, por exemplo, estes estudos mostram ser possível diminuir a demanda de energia em até 50%, com projetos de edifícios energeticamente eficientes [7]. Porém, para que se possam obter edificações mais eficientes, há necessidade, primeiramente, de uma política nacional de racionalização de energia em habitações, como já pode ser visto em outros países. É também importante salientar a necessidade de conscientização por parte dos usuários das edificações no sentido de utilizar corretamente e sem desperdício a energia necessária [1].

Através de análises da evolução do uso da energia elétrica, pode-se perceber que, em edifícios comerciais, o consumo cresceu de 70 Wh por pessoa nos anos 60, para algo em torno de 600 Wh e 700 Wh por pessoa, nos anos 80 [8]. Observa-se que o consumo de energia elétrica na região sul do país, mais especificamente no setor comercial, vem aumentando de forma surpreendente, atingindo valores significativos entre todas as regiões brasileiras. Além disso, o estado do Rio Grande do Sul possui o índice mais alto entre os três estados da Região Sul (Figura 1.1), reforçando a necessidade de uma maior racionalização do consumo em edifícios [1].

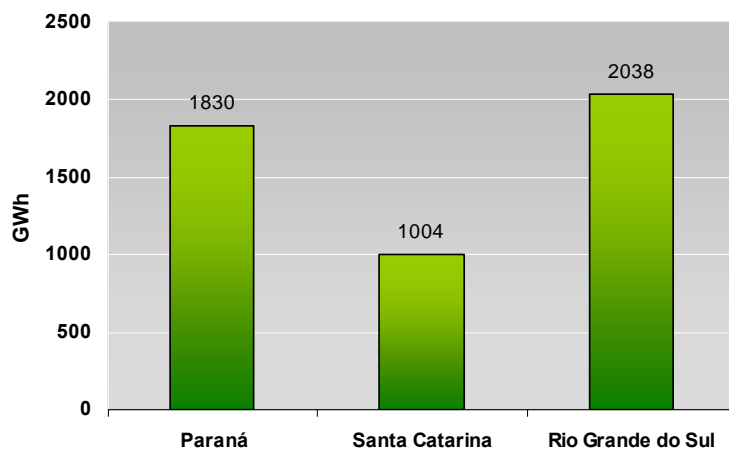


Figura 1.1. Participação de cada estado no consumo de energia elétrica da Região Sul do país, no setor comercial, ano de 1995 (GWh)

Fonte: [1]

O setor de edificações representa praticamente um consumo semelhante ao do setor industrial, o maior consumidor de energia elétrica no país. Em 1980, o consumo de energia elétrica cresceu de 47,5 GWh, ou seja, 38,7% do consumo total, para 118,5 GWh, representando 45% do total consumido no país em 1995 [9].

As edificações dos setores residencial, público e comercial consomem 42% do total de energia elétrica gerada no Brasil (Figura 1.2), utilizada em função da ocupação e operação das edificações, como elevadores, bombas, equipamentos de automação, iluminação e de forma mais intensiva em sistemas de condicionamento térmico ambiental. No setor residencial o sistema de aquecimento é responsável por 26% do consumo de energia elétrica e nos setores público e comercial o sistema de ar condicionado (aquecimento e resfriamento) é responsável por 48% (Figuras 1.3 e 1.4).

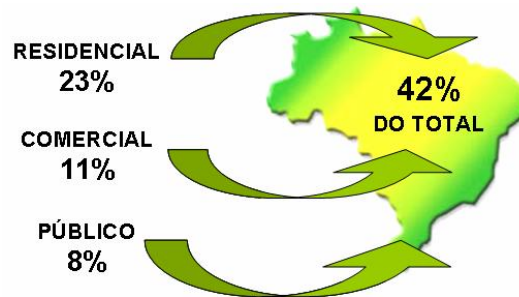


Figura 1.2. Consumo de energia elétrica em edificações por setor

Fonte: [10]

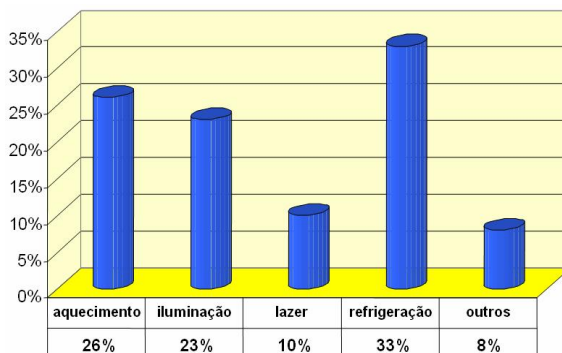


Figura 1.3. Usos finais no setor residencial

Fonte: [11]

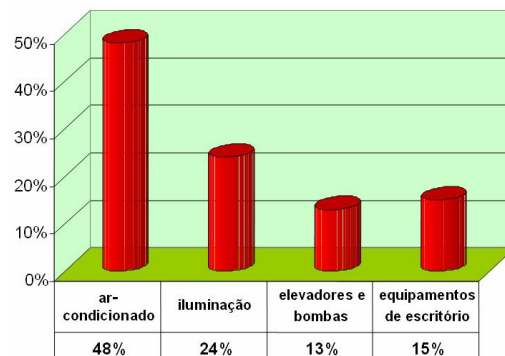


Figura 1.4. Usos finais nos setores público e comercial

Fonte: [6]

Devido ao fato do consumo de energia elétrica nos edifícios brasileiros ser pouco diagnosticado, somente algumas cidades possuem estes índices. A Tabela 1.1 mostra um

panorama do consumo médio de energia elétrica nas edificações públicas e comerciais do Brasil.

Tabela 1.1. Consumo médio de energia elétrica em edifícios públicos e comerciais

Autor	Cidade	Consumo (médio anual) kWh/m². mês
Mascaró (1983)	Porto Alegre (RS)	11,63
JWCA & CESP (1988)	São Paulo (SP)	17,00 *
Romero (1994)	São Paulo (SP)	5,08 **
Toledo (1995)	Florianópolis (SC)	10,88

* Apenas grandes edifícios de escritórios

** Edifícios do Campus Universitário Armando S. de Oliveira - USP

Fonte: [9]

A Tabela 1.2 mostra o perfil do consumo de energia elétrica em edifícios públicos e comerciais de Florianópolis (Santa Catarina), nos períodos seco (de maio a novembro) e úmido (de dezembro a abril). Observa-se que o setor hospitalar está entre os maiores consumidores de energia elétrica. A Tabela 1.3 mostra o consumo médio de energia elétrica por uso final, também em Florianópolis, onde existe um impacto acentuado da demanda associada ao conforto térmico, pois o consumo devido ao ar condicionado é elevado. Estes fatos salientam a importância de estudar o consumo de energia elétrica em relação ao uso de ar condicionado no setor hospitalar, onde o conforto térmico é essencial para a recuperação dos pacientes.

Tabela 1.2. Consumo médio de energia elétrica por setores

Setores	Média Anual (kWh/m².mês)	Média - Úmido (kWh/m².mês)	Média - Seco (kWh/m².mês)
Público	9,85	11,37	8,32
Bancos	7,87	9,49	6,26
Escolas	3,43	3,47	3,39
Hospitais	12,28	13,49	11,06
Mercados	13,94	15,67	12,22
Hotéis - Motéis	7,65	8,94	6,37
MÉDIA - TOTAL	9,17	10,41	7,94

Fonte: [9]

Tabela 1.3. Consumo médio de energia elétrica por uso final

Uso Final	Média Anual		Média - Úmido		Média - Seco	
	(kWh/m ² .mês)	%	(kWh/m ² .mês)	%	(kWh/m ² .mês)	%
Ar condicionado	4,55	42	6,17	49	2,92	32
Iluminação	3,79	35	3,79	31	3,79	41
Outros	2,54	23	2,54	20	2,54	27
TOTAL	9,25	100	12,50	100	9,25	100

Fonte: [9]

Como as condições climáticas e o consumo médio de energia elétrica de Porto Alegre (Rio Grande do Sul) assemelham-se a Florianópolis (Santa Catarina), considerou-se o consumo médio de energia elétrica por setores e por uso final de Santa Catarina como referência para o estudo.

A influência dos parâmetros arquitetônicos das edificações nas demandas de energia elétrica para fins de condicionamento ambiental também foram pesquisadas. Foi analisada a 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, principalmente pelo intenso uso de aparelhos de ar condicionado nos setores comercial e público. Os resultados obtidos mostram que os parâmetros construtivos contribuem para a redução da demanda de energia elétrica. A tabela 1.4 mostra 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 [4].

Tabela 1.4. 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: [4]

1.5.3. Conforto Térmico no Setor Hospitalar

Um aspecto importante relacionado ao consumo energético é o conforto térmico, caracterizado como o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa [12]. Porém conforme descrito por [13] conforto é uma sensação complexa, que não depende somente de parâmetros exteriores ao indivíduo, mas também de suas condições intrínsecas. Essa complexidade deve-se ainda ao fato de que o conforto humano se dividir em vários sub-domínios, dos quais se pode destacar o conforto térmico, visual e ergonômico, qualidade do ar interior e o ruído. O conforto térmico no interior das edificações é fundamental para o bem-estar dos ocupantes, devido ao fato de se refletir em maior e melhor produtividade na função desempenhada.

Os primeiros ambientes climatizados no setor hospitalar surgiram na década de 30, onde temperatura e umidade do ar eram controladas, proporcionando conforto térmico para as pessoas [14].

No período de 1990 - 2001 foram feitas análises sobre a qualidade do ar em ambientes hospitalares climatizados, devido ao fato de que a má qualidade do ar é um fator de risco para infecção hospitalar. Nestas análises foram encontrados dados que indicam que aparelhos e bandejas do sistema de ar condicionado de janela são as principais fontes de multiplicação microbiana, por formar biofilme e desencadear a cadeia de transmissão, evidenciando a necessidade de medidas de controle de qualidade do ar em ambientes hospitalares climatizados [15].

No Instituto de Psiquiatria de São Paulo, foi constatado que as condições de conforto térmico, acústico, luminoso e ergonômico devem ser adequadas, uma vez que podem ser coadjuvantes poderosos na ambiência terapêutica, assim como as texturas e as cores, proteção das fachadas com excesso de exposição solar, com quebrasóis adequados, adoção de divisórias com excelente isolamento térmico [16].

Pesquisas desenvolvidas em universidades e hospitais americanos comprovaram que a qualidade do ambiente hospitalar pode acelerar o processo de cura, reduzindo o tempo de internação e, conseqüentemente diminuindo os custos dos pacientes hospitalizados. Portanto, a preocupação em criar ambientes de qualidade em estabelecimentos de saúde, além de ser um benefício aos pacientes, é uma resposta à competitividade de mercado enfrentada pelas instituições [17].

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aprovou em 1980 a Norma Brasileira (NBR) 6401, que estabelece as condições mínimas exigidas para que se possam obter resultados satisfatórios em instalações de ar condicionado de um modo geral, onde casos especiais, como hospitais, computadores e outros, seriam objetos de normas específicas [18].

Para o tratamento de ar em estabelecimentos de assistência de saúde (EAS), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou a Norma Brasileira (NBR) 7256, que deve ser usada em ambientes hospitalares. Porém é estabelecido pela NBR 7256 e pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) que quartos de internação hospitalares devem ser atendidos pelos parâmetros básicos de projeto definidos na NBR 6401 [19] [20].

1.5.4. Alternativas Bioclimáticas de Projeto

Posteriormente ao estudo sobre o conforto térmico no setor hospitalar foram pesquisadas alternativas bioclimáticas para amenizar o consumo de ar condicionado nas edificações. A redução de consumo energético e a melhoria do conforto de seus ocupantes através de recursos naturais obtidos com a correta aplicação de elementos arquitetônicos e tecnologias construtivas que consumam menos energia é denominada arquitetura bioclimática [21].

Em regiões com verão quente e úmido e com freqüentes frentes frias, como acontece no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, foi estudado a utilização de inércia térmica em edificações, onde ficou constatado que esta alternativa além de ser uma estratégia importante para o inverno também tem efeito positivo no verão quando usado em fechamentos laterais das edificações [21].

Estudos realizados demonstraram que quanto maior a área envidraçada na fachada, maior o consumo energético do edifício durante sua utilização, devido à quantidade crescente de calor que passa através da janela e que é necessário retirar por meio de climatização artificial [22]. Para combater os ganhos de calor através dos vidros, foram desenvolvidos tipos especiais, de modo a reduzir a radiação que penetra através de janelas. São eles, entre outros:

- absorventes (ou atérmicos);
- reflexivos;
- duplos (com câmara de ar);

Através de simulações comparando os resultados obtidos da combinação entre diferentes tipos de vidro e tamanhos de aberturas, percebeu-se que a utilização de vidros que reduzem a transmissão de carga térmica no interior do edifício faz com que haja um aumento no consumo de energia elétrica para a iluminação artificial. Com isto constatou-se que do ponto de vista energético, para uma eficiente especificação do tipo de vidro e tamanho da abertura de uma determinada edificação deve ser dada maior atenção às suas características de transmitância térmica do que lumínica, devido o consumo energético proveniente da utilização de aparelhos de ar condicionado ser maior do que o de iluminação artificial [1].

1.5.5. Simulações utilizando Programas Computacionais

Para analisar as condições térmicas das edificações, os programas de simulações são ótimas alternativas, todavia, programas de simulação computacional necessitam ser validados, isto é, ter seus resultados comparados com outros programas da simulação da energia, através deste processo é possível verificar o grau de precisão do programa. O método adotado pela *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)* como norma para teste e avaliação de programas computacionais para análise energética de edificações, sob o título de *ASHRAE Standard 140* é o *BESTEST (Building Energy Simulation Test)* [23]. Um dos programas para análise energética de edifícios muito utilizado é o *EnergyPlus*, devido às vantagens e funcionalidades oferecidas.

O Departamento de Energia dos Estados Unidos utilizou o método *ANSI/ASHRAE Standard 140* para validar o programa *EnergyPlus*, utilizado neste trabalho. Foram simulados 18 casos, incluindo construções de baixa e alta inércia térmica, com e sem janelas em diversas exposições solares, com e sem proteção solar externa, com ou sem temperaturas pré-ajustadas, com ou sem ventilação noturna, e com ou sem sistema de condicionamento de ar. A carga anual e o pico para aquecimento e refrigeração previstos pelo *EnergyPlus* para 13 diferentes casos foram comparados com os resultados de 8 outros programas de simulação energética. O máximo e mínimo de modelos com temperaturas não controladas (*free-floating*) foram comparados por 4 diferentes casos. A condução no solo foi comparada apenas em um caso, em virtude das limitações dos outros programas. Baseado em 62 comparações isoladas de resultados, o *EnergyPlus* manteve-se dentro do intervalo de resultados de 8 outros programas para 58

comparações. Para os outros 4 casos que os resultados excederam os limites do intervalo, a variação foi menor que 5,6% [24].

Em [25], com o auxílio do programa *EnergyPlus*, foi analisado a influência termoenergética de 6 diferentes tipos de vidros com e sem película aplicados às fachadas de dois tipos de edificações com condicionamento de ar: uma de teste geométrico, denominada assim por possuir uma geometria incomum em edificações e outra de teste de sombreamento, denominada assim devido a presença de marquises em algumas janelas. Os resultados demonstraram que na edificação de teste geométrico com 12,5% de sua área das fachadas coberta por janelas, simplesmente aplicando película nos vidros pode-se reduzir em cerca de até 75% a taxa de transferência de calor instantânea pelas janelas e o fluxo de calor diário médio pelas janelas. Já na edificação de teste de sombreamento com 25% de sua área das fachadas coberta por janelas, este índice foi de 70%. Em relação à carga térmica, o uso de um tipo de película reduziu cerca de 8% a potência de ar resfriado na edificação de teste geométrico e cerca de 24% na edificação de teste de sombreamento.

Em [26], com o uso do *EnergyPlus*, foi dimensionado um sistema de ventilação com o propósito de melhorar as condições térmicas em um pavilhão industrial real em que não havia qualquer sistema no sentido de amenizar as condições de desconforto térmico. O autor fez simulações do pavilhão com e sem ventilação e avaliou o voto médio estimado (*PMV*). Para o inverno, os resultados mostraram que o conforto térmico era atingido mesmo sem ventilação. Já para o verão, com ou sem ventilação o *PMV* não atingiu região de conforto, porém com ventilação há uma significativa melhora nas condições térmicas do ambiente.

Através de simulações utilizando o programa *EnergyPlus* foram analisadas as condições de conforto térmico de uma edificação popular padrão, inserida em 4 cidades brasileiras. Os resultados obtidos para o conforto térmico nos dias analisados mostraram-se coerentes com as condições externas e internas da residência, indicando que o programa é um aplicativo confiável. Outra vantagem do programa é de permitir uma análise fácil quanto aos resultados de conforto térmico, pois ao seu término cria um arquivo no formato Excel de fácil aplicação. [27].

Também com o programa *EnergyPlus*, em [28] foram realizadas simulações para a implantação de um sistema central de climatização com aquecimento a gás em uma edificação comercial de alto consumo, onde foram simuladas e analisadas algumas

alternativas factíveis para reduzir a carga térmica da edificação, a fim de avaliar possibilidades de reduzir a potência necessária de equipamentos de climatização e, conseqüentemente, o consumo energético e os custos relacionados. Os resultados demonstraram que é possível reduzir significativamente a carga térmica de uma edificação e que o sistema central proposto apresentou um consumo energético menor que o de energia elétrica.

Para verificar se programa *EnergyPlus* representa bem o comportamento térmico de uma edificação, foi realizada uma comparação entre resultados computacionais, obtidos através do programa *EnergyPlus* e experimentos, medidos in loco, do comportamento térmico de um ambiente condicionado e um ambiente não condicionado. Para tanto, foram monitorados dados climáticos de radiação, velocidade do vento e temperatura, no período de 11 a 20 de janeiro de 2002 e produziu-se um arquivo climático. Simultaneamente, fez-se a aquisição das temperaturas de uma sala-teste, localizada no terceiro pavimento de um prédio na cidade de Porto Alegre, bem como das salas adjacentes. As temperaturas do ar de insuflamento e de retorno dos condicionadores de ar, localizados na sala-teste, foram medidas durante o dia, em seis dias do período de monitoramento. Mediu-se também a velocidade do ar de retorno e determinou-se a potência sensível de refrigeração. Os resultados da carga térmica e temperatura ambiente da sala-teste obtidos nas simulações foram comparados com os dados experimentais do período de monitoramento, concluindo-se que o programa *EnergyPlus* representa bem o comportamento térmico de uma edificação "termicamente pesada" para coeficiente de convecção detalhado, necessitando pesquisa para as demais edificações [29].

Foi realizado um estudo sobre a influência que alguns parâmetros têm no desempenho termoenergético de uma edificação com um sistema de condicionamento de ar do tipo expansão direta, visando auxiliar na busca por soluções que aumentem a eficiência energética das construções brasileiras. Para tal, foi utilizado o programa simulador *EnergyPlus*. Os resultados mostram que as orientações e os tipos de vidro alteram sensivelmente tanto a potência requerida pelo sistema de condicionamento de ar quanto os consumos elétricos anuais do sistema de condicionamento de ar, das lâmpadas e total; a análise econômica mostra que a utilização de película nos vidros é economicamente viável em boa parte dos casos avaliados; e a comparação da temperatura da face interna dos vidros estudados mostram diferenças significativas [30].

1.5.6. Eficiência Energética em Outros Países

O uso demasiado de energia elétrica é um problema de preocupação mundial, pois o uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão) em grandes quantidades faz com que sejam lançados gases (CO_2) e se acumulem na atmosfera gerando o efeito de estufa.

Em Tóquio foi construído um edifício comercial (*Earthport*) baseado no conceito de “poupar energia” durante todo seu ciclo de vida, onde se utilizou iluminação natural, ventilação natural, sistema de cogeração, uso da água da chuva e ecomateriais. Comparando o *Earthport* com um edifício comercial comum notou-se que com o uso de iluminação natural foi possível reduzir 55% o consumo de energia elétrica e com o uso da ventilação natural deixou-se de consumir 57% de energia elétrica. A idéia de construir um edifício com este conceito não foi simplesmente por uma questão de consumir menos energia elétrica, mas também reduzir a emissão de gases (CO_2) no ambiente global durante toda a vida do edifício. As Figuras 1.5 e 1.6 apresentam a comparação do *Earthport* com o edifício convencional, onde é possível notar a porcentagem de redução de energia elétrica e de CO_2 que o *Earthport* apresenta [31].

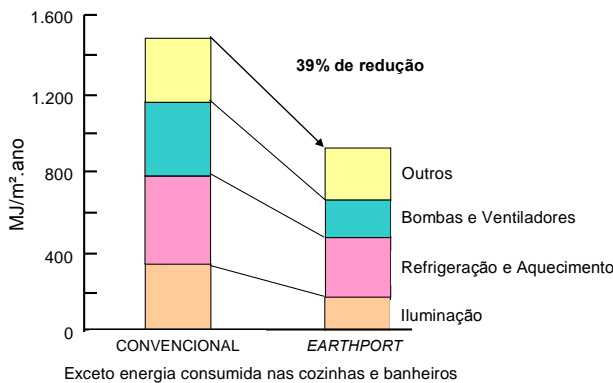


Figura 1.5. Energia elétrica consumida
Fonte: [31]

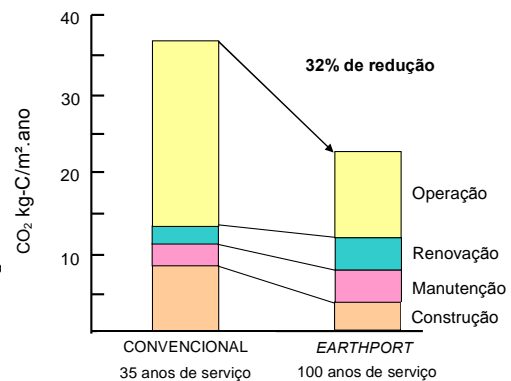


Figura 1.6. Emissão de CO_2
Fonte: [31]

A Companhia de Energia Elétrica de Tóquio (*TEPCO*) foi designada a reforçar a pesquisa e o desenvolvimento do uso racional de energia elétrica. Foram pesquisadas edificações que utilizassem recursos naturais e equipamento de alta-eficiência. Concluindo-se que com o uso de iluminação natural, ventilação, sistema de climatização através do armazenamento de gelo entre outros recursos de conservação de energia, o

consumo de energia elétrica reduziu 65%, além de reduzir extremamente cargas ambientais (CO₂) [32].

Na Argentina foram analisados o consumo de energia elétrica em edifícios com tipologias e tecnologias diferentes e sua interação com indicadores térmicos, esta comparação foi feita para avaliar a energia elétrica economizada pelo uso de técnicas solares passivas e pelo uso de resistência térmica nas envoltórias. Os resultados mostraram a alta correlação entre o consumo de energia elétrica e a energia dissipada pela envoltória do edifício. Os edifícios com tecnologias convencionais (sem proteção) alcançaram um valor mais alto do que o valor máximo estipulado para a região. A construção tecnologicamente aperfeiçoada pelo uso de uma envoltória eficiente, com vidro duplo, permitiu uma economia de energia em torno de 75% durante inverno. Os resultados confirmam que o uso de envoltórias eficientes contribui com a economia de energia elétrica além de se construir edificações sustentáveis [33].

1.6. Publicações Relacionadas ao Desenvolvimento da Dissertação

Durante o desenvolvimento desta dissertação, foram publicados os seguintes trabalhos:

- BALTAR, M. G., KAEHLER, J. W. M., PEREIRA, L. A. Eficiência Energética em Edificações. Pôster apresentado na 3º Jornada de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão da Urcamp, Congrega. Bagé, RS, Brasil, 2005.
- BALTAR, M. G., KAEHLER, J. W. M., PEREIRA, L. A. Indústria da Construção Civil e Eficiência Energética. Artigo publicado na Conferência Engenharia'2005 - Inovação e Desenvolvimento, Covilhã, Portugal, 2005.
- BALTAR, M. G., PEREIRA, L. A., KAEHLER, J. W. Uso de Recursos Naturais para Redução de Consumo de Energia Elétrica em Edificações. Artigo aprovado no CIDEL (Congreso Internacional de Distribución Eléctrica), a ser realizado em 27-29 de Novembro de 2006 em Buenos Aires, Argentina.

Capítulo 2

Conceitos

2.1. Introdução

O capítulo anterior apresentou os objetivos do estudo sobre o comportamento termoenergético de edificações hospitalares, a organização da dissertação, as motivações que levaram a realizar o estudo e uma revisão de bibliografias que apresentam assuntos referentes ao tema abordado nesta dissertação, onde foram utilizados conceitos que são detalhados neste capítulo. São apresentados os conceitos básicos sobre conforto térmico, índices de conforto térmico (*PMV* e *PPD*) e comportamento térmico dos materiais de construção. Estes conceitos serão utilizados no Capítulo 4 para avaliar os quartos de internação do Hospital Bruno Born, analisando se estão de acordo com os índices de temperatura especificados na NBR-6401 e quais elementos construtivos possibilitam a diminuição do consumo de energia elétrica do estabelecimento hospitalar.

2.2. Conforto Térmico

O homem é um animal homeotérmico, isto é seu organismo mantém constante a temperatura corporal. Essa temperatura é de ordem de 37°C, podendo variar de 36,1° a 37,2°C, sendo 32°C o limite inferior e 42°C o limite superior para sobrevivência [34] [35].

O organismo dos homeotérmicos pode ser comparado com uma máquina térmica, pois sua energia é obtida através de fenômenos térmicos. A energia térmica produzida pelo organismo humano advém de reações químicas internas, sendo importante a combinação do carbono, introduzindo no organismo sob a forma de alimentos, com o oxigênio, extraído do ar pela respiração. Este processo de produção de energia interna a partir de elementos combustíveis orgânicos denominado metabolismo [34].

A produção de calor através do metabolismo pode ser dividida em [36]:

Metabolismo basal – Refere-se aos processos automáticos de produção de calor para manutenção das atividades vitais;

Metabolismo muscular – Refere-se à produção de calor pelos músculos quando desenvolvem trabalho mecânico para a realização de determinada tarefa.

O metabolismo varia de acordo com a área corporal, sendo a área superficial aproximada de uma pessoa mediana de 1,8 m², considerando uma massa de 70 kg e altura de 1,70 m, [27] [37], podendo ser possível calcular esta área através da equação proposta por DuBois [38]:

$$A_c = 0,202 \times m_c^{0,425} \times h^{0,725} \quad \text{Equação 2.1}$$

onde: A_c - área corporal (m²)

m_c - massa corporal (kg)

h - altura (m)

Da energia obtida pelo metabolismo, cerca de 20% são utilizadas e o restante, 80%, liberada sob a forma de calor, podendo-se dizer que a “máquina humana” tem um rendimento energético reduzido ou pouco eficaz. Esta constatação mostra a importância de se proporcionar ao corpo as mais favoráveis formas de dispersar enorme quantidade de energia sem lhe causar desconforto. Em clima frio isto se torna fácil, pois calor é sinônimo de aconchego e conforto, entretanto em clima quente a tarefa é mais complexa [34] [35].

Dependendo da atividade que o ser humano executa a cada momento, há maior ou menor necessidade de dissipação de calor produzido pelo metabolismo. Este calor é

dissipado através de mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente envolvendo:

- **Trocas térmicas sensíveis** – Envolvem variações de temperatura (convecção², radiação³ e condução⁴).
- **Trocas térmicas latentes** – Provêm da mudança do estado líquido para vapor e do estado de vapor para líquido, sem variações de temperatura (evaporação⁵).

O calor perdido para o ambiente através das trocas secas é denominado calor sensível e é função das diferenças de temperatura entre o corpo e o ambiente. O calor perdido através das trocas úmidas é denominado calor latente e envolve mudanças de fase, o suor (líquido) passa para o estado gasoso através da evaporação.

O calor gerado pelo ser humano necessita ser dissipado continuamente, para que a temperatura corporal não suba e que se mantenha o equilíbrio térmico do corpo. Essa dissipação ocorre através da:

- **Pele** {
 - Perda sensível de calor, por convecção e radiação;
 - Perda latente de calor, por evaporação do suor e por difusão da umidade de pele.
- **Respiração** {
 - Perda sensível de calor, por convecção;
 - Perda latente de calor, por evaporação.

² Troca de calor entre dois corpos, sendo um sólido e outro fluido (líquido ou gás).

³ Mecanismo de troca de calor entre dois corpos (que guardam entre si uma distância qualquer) através de sua capacidade de emitir e de absorver energia térmica.

⁴ Troca de calor entre dois corpos que se tocam ou partes do corpo que estejam em temperaturas diferentes.

⁵ Mudança do estado líquido para o estado gasoso.

As formas de trocas de calor e os índices de perda de um ser humano despido é melhor representado na Figura 2.1.

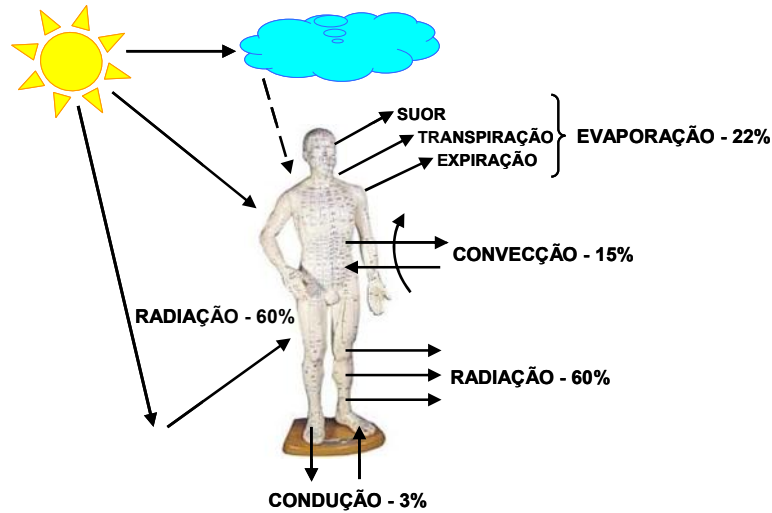


Figura 2.1. Trocas de calor e índices de perda
Fonte: [36]

2.2.1. Balanço Térmico

Estar em conforto térmico significa dissipar a quantidade de calor que está sendo produzida pelo corpo, sendo capaz de manter a temperatura interna do tórax em torno de 37°C. Na prática este conceito é difícil de ser atingido, pois o ser humano está constantemente realizando movimentos, alterando a taxa de dissipação de calor e conseqüentemente o equilíbrio com o meio ambiente [30].

A definição mais utilizada para conforto térmico é a descrita pela *International Organization for Standardization (ISO)*: “conforto térmico é o estado de espírito que expressa a satisfação com o ambiente térmico que envolve uma pessoa” [12]. A não satisfação pode ser causada pela sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente, conforme Figura 2.2. O balanço térmico pode ser descrito através da equação [36]:

$$Met - E_{vp} \pm C_{nd} \pm C_{nv} \pm Rad = 0$$

Equação 2.2

onde: *Met* - metabolismo (basal e muscular) (W/m^2)
Cnd - condução (contato com corpos quentes) (W/m^2)
Cnv - convecção (quando o ar está mais quente que a pele) (W/m^2)
Rad - radiação (proveniente do sol, céu e corpos quentes) (W/m^2)

} GANHOS

Cnd - condução (contato com corpos frios) (W/m^2)
Cnv - convecção (quando o ar está mais frio que a pele) (W/m^2)
Rad - radiação (proveniente do céu noturno e corpos frios) (W/m^2)

} PERDAS

O sinal positivo (+) da equação é utilizado quando ocorrem ganhos e o sinal negativo (-) as perdas.

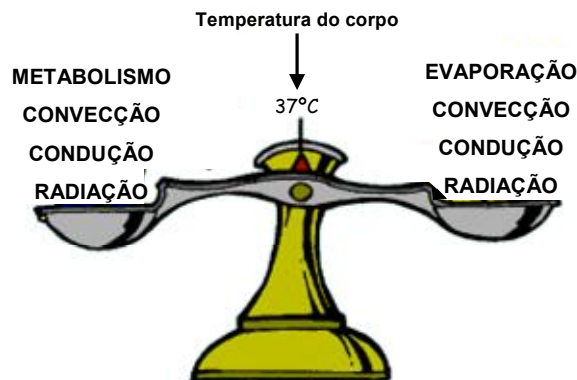


Figura 2.2. Balanço térmico do corpo humano
 Fonte: [36]

2.2.2. Variáveis de Conforto Térmico

As principais variáveis que influenciam na avaliação do conforto térmico são: taxa metabólica, resistência térmica das vestimentas, temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade relativa e velocidade do ar. As duas primeiras variáveis são chamadas de pessoais ou subjetivas, por não dependerem do ambiente, enquanto as outras são denominadas de variáveis ambientais. Variáveis como idade, sexo, raça, hábitos alimentares, peso, altura etc., também exercem influência nas condições de conforto de cada pessoa [35].

- **Taxa Metabólica**

É a taxa de energia gasta durante a realização de atividades físicas, variando conforme atividade, pessoa e condições na qual o trabalho é realizado, os valores do metabolismo podem ser extraídos de tabelas da *ISO* [12] [37], *ASHRAE* [23] ou através da equação [27]:

$$M = \frac{21 \times (0,23 \times RQ + 0,77) \times Q_{O_2}}{A_c} \quad \text{Equação 2.3}$$

onde: M - taxa metabólica (W/m²)

RQ - quociente de respiração, adimensional

Q_{O_2} - taxa volumétrica de consumo de oxigênio a 0°C e $P = 101325$ kPa (L/s)

- **Resistência Térmica das Vestimentas**

São responsáveis pela resistência às trocas de calor sensível entre o corpo e o ambiente ao seu redor, proporcionando um isolamento térmico da pele. Quanto maior a quantidade de roupas, maior o isolamento em torno do corpo e menores serão as perdas de calor.

As propriedades isolantes das vestimentas podem ser encontradas de três maneiras: medindo o seu efeito em um indivíduo, medindo o seu efeito em um manequim ou medindo o isolamento de cada peça individual e adicionando-a para o corpo inteiro [36]. Porém, o método mais utilizado é o uso de manequins [39].

A resistência térmica das vestimentas é expressa em m²K/W ou em clo, onde 1 clo equivale a 0,155 m²K/W. Para determinar a resistência térmica das vestimentas, utiliza-se a equação [27]:

$$I_{cl} = 0,835 \times \Sigma I_{clu} + 0,161 \quad \text{Equação 2.4}$$

onde: I_{cl} - resistência térmica das vestimentas (clo)

I_{clu} - resistência térmica parcial dos componentes das vestimentas (clo)

Os valores da resistência térmica parcial dos componentes das vestimentas podem ser extraídos de tabelas da *ISO* [12] ou *ASHRAE* [23], os valores de componentes não determinados nestas tabelas podem ser calculados através da equação [27]:

$$I_{clu} = (0,534 + 0,135 \times L_f) \times \left(\frac{A_g}{A_c} \right) - 0,0549 \quad \text{Equação 2.5}$$

onde: L_f - espessura da vestimenta (mm)

A_g - superfície do corpo coberta (m²)

A equação da resistência térmica das vestimentas, citada anteriormente, é referente a uma pessoa em pé, sendo nos horários em que as pessoas estão deitadas incrementado na equação da resistência térmica das vestimentas o valor da resistência térmica de uma pessoa deitada. Para determinar este incremento é utilizada a seguinte equação [27]:

$$\Delta I_{cl} = (0,748 \times A_{ch}) - 0,1 \quad \text{Equação 2.6}$$

onde: A_{ch} - área de contato (m²)

- **Temperatura do Ar**

É a temperatura de bulbo seco do ar que está em contato com o corpo de um indivíduo, expresso em °C. Para determinar a transferência de calor por convecção entre um indivíduo e o ambiente em que está inserido é necessário conhecer a temperatura do ar.

- **Temperatura Média Radiante**

É a média ponderada das temperaturas superficiais do ambiente. Também pode ser definida como a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a transferência de calor por radiação do corpo de um indivíduo é igual à transferência de calor radiante em um ambiente real não uniforme, expressa em °C.

O termômetro de globo negro é o instrumento freqüentemente utilizado para medir a temperatura média radiante. Porém, pode ser determinado um valor aproximado da temperatura média radiante através de valores observados da temperatura de globo, temperatura do ar e velocidade do ar ao redor do globo [40], conforme a equação [23]:

$$trm = \left[(t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times V^{0,6} \times (t_g - t)}{\varepsilon \times d^{0,4}} \times (t_g - t) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad \text{Equação 2.7}$$

onde: trm - temperatura média radiante (°C)

t_g - temperatura de globo (°C)

t - temperatura do ar (°C)

V - velocidade do ar (m/s)

ε - emissividade solar (0,95 para globo negro), adimensional

d - diâmetro do globo (m)

- **Umidade Relativa**

É a quantidade de vapor d'água contida no ar. Este vapor é formado pela evaporação da água, processo originado da mudança do estado líquido ao gasoso, sem modificação da sua temperatura. Também pode ser chamado de porcentagem de saturação do ar, é expresso em "Pa" e pode ser obtida pelas seguintes equações [23]:

$$P_a = UR \times P_{sat} \quad \text{Equação 2.8}$$

sendo:

$$P_{sat} = 1000^{16,6536} \times \frac{4030,183}{(t + 235)} \quad \text{Equação 2.9}$$

onde: P_a - pressão parcial de vapor d'água (Pa)

UR - umidade relativa, entre 0 e 1

P_{sat} - pressão de saturação (Pa)

- **Velocidade do ar**

É um parâmetro definido por sua magnitude e direção. No caso de ambientes térmicos, o que é considerado é a velocidade efetiva do ar, ou seja, a magnitude do vetor velocidade do fluxo no ponto de medição considerado [40]. Para determinar a transferência de calor por convecção e por evaporação é necessário conhecer a velocidade do ar.

2.3. Índices de Conforto Térmico

Para expressar a satisfação ou não de um grupo de pessoas em um ambiente térmico é utilizado um método de predição do conforto térmico, denominado voto médio previsto ou *PMV* (*Predicted Mean Vote*). Porém, mesmo quando o *PMV* de um ambiente for neutro, pode não ser satisfatório termicamente para todas as pessoas. Para considerar esta insatisfação, foi desenvolvida a metodologia da porcentagem de pessoas insatisfeitas, ou *PPD* (*Predicted Percent Dissatisfied*).

2.3.1. Voto Médio Previsto – *PMV*

Este método de avaliação de conforto térmico foi desenvolvido por Fanger [39] e é considerado o mais completo dos índices de conforto. O *PMV* é um índice em função da taxa metabólica e do balanço de calor de um indivíduo e pode ser calculado com a equação [38] [40]:

$$PMV = \left[(0,303^{(0,036 \times M)} + 0,028) \times Qt \right] \quad \text{Equação 2.10}$$

onde: *PMV* - voto médio previsto, adimensional

Qt - carga térmica atuante sobre o corpo (W/m^2)

A diferença entre o calor gerado pelo corpo e o trocado com o meio ambiente é denominada carga térmica e é expressa pela equação [40]:

$$Qt = M - 3,05 \times (5,73 - 0,007 \times M - P_a) - 0,42 \times (M - 58,15) - 0,0173 \times M \times (5,87 - P_a) - 0,0014 \times M \times (34 - t) - 3,96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273) \times 4 - (t_{rm} + 273) \times 4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t) \quad \text{Equação 2.11}$$

sendo:

$$f_{cl} = 1,05 + 0,1 \times I_{cl} \quad \text{Equação 2.12}$$

$$h_c = 2,38 \times (t_{cl} - t) \quad \text{Equação 2.13}$$

onde: *f_{cl}* - fator de vestimentas, adimensional

t_{cl} - temperatura exterior da vestimenta ($^{\circ}C$)

h_c - coeficiente de convecção (W/m^2)

O *PMV* consiste em um valor numérico que representa as respostas subjetivas de sensação de desconforto por frio e calor, sendo um índice representativo da sensação

térmica que utiliza uma escala de sete pontos [23] [38]. Na Figura 2.1 é possível notar que para a sensação térmica ser confortável o índice de *PMV* deve ser zero, sendo que para o frio é negativo e para o calor é positivo.

Tabela 2.1. Escala de sensação térmica de sete pontos

<i>PMV</i>	Sensação Térmica
+3	Quente
+2	Morno
+1	Levemente morno
0	Confortável
-1	Levemente frio
-2	Frio
-3	Gelado

Fonte: [23] [38]

2.3.2. Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas – *PPD*

O *PPD* estima a quantidade ou porcentagem de pessoas desconfortáveis termicamente. De acordo com a *ISO* [12] é recomendado que em espaços de ocupação humana o *PPD* seja menor que 10%, o que corresponde a uma faixa de -0,5 a +0,5 do índice representativo da sensação térmica (*PMV*). Na Figura 2.3 é possível observar a zona de conforto e a curva que foi originada relacionando os índices representativos da sensação térmica (*PMV*) com a porcentagem de pessoas desconfortáveis termicamente (*PPD*).

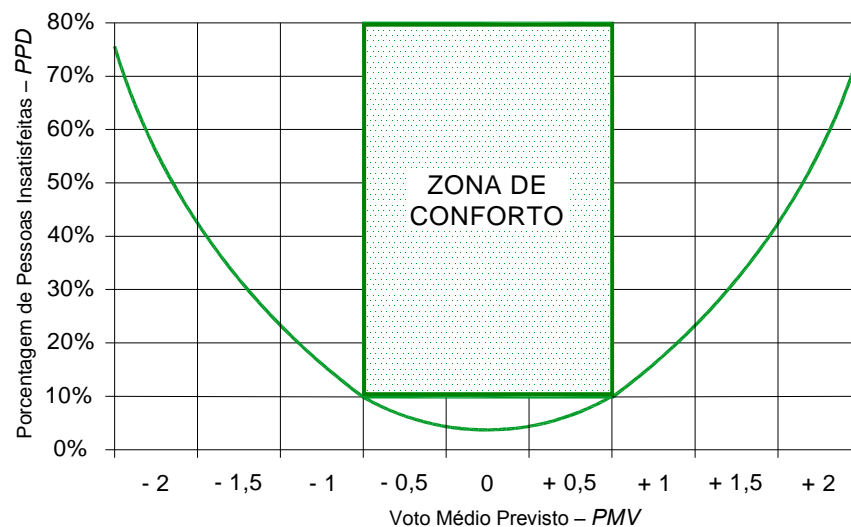


Figura 2.3. Relação de *PPD* com *PMV*

Fonte: [23] [27] [35]

Quando os valores de PMV são conhecidos é possível estimar o PPD através da equação [23] [38]:

$$PPD = 100 - 95 \left[- \left(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2 \right) \right] \quad \text{Equação 2.14}$$

onde: PPD - porcentagem de pessoas insatisfeitas, adimensional

2.4. Comportamento Térmico dos Materiais

Os materiais construtivos possuem grande influência no desempenho térmico e energético de uma edificação. Devido a isto, torna-se necessário conhecer as trocas de energia da edificação com o meio ambiente. A intensidade das trocas de energia ocorre através dos fechamentos (opacos ou transparentes) em função de fatores como: temperaturas internas e externas das edificações, absorvância, emissividade, transmitância, intensidade da radiação solar e propriedades térmicas dos materiais construtivos [34] [36].

Os fechamentos opacos constituem a parte da envoltória que não transmite diretamente a radiação solar para o interior da edificação. Nesse caso, a transmissão de calor ocorre quando há uma diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa da envoltória [4] [34]. Sendo que o calor flui sempre da superfície mais quente para a mais fria. [36].

Os fechamentos transparentes são as janelas, portas ou qualquer outro elemento transparente da envoltória da edificação. São responsáveis pelas principais trocas térmicas, pois transmitem uma parcela significativa de radiação solar para o interior da edificação [4] [34]. Os fechamentos transparentes têm geralmente alta transmitância térmica, ou seja, são bons condutores de calor [10].

2.4.1. Absortância

A absorvância (α) é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação incidente sobre esta mesma superfície [42].

2.4.2. Emissividade

A emissividade (ε) é o quociente da taxa de radiação emitida por uma superfície pela taxa de radiação emitida por um corpo negro⁶, à mesma temperatura [42].

2.4.3. Transmitância

A transmitância (τ) é definida como o quociente da taxa de radiação transmitida, isto é, que atravessa um elemento pela taxa de radiação incidente sobre este mesmo elemento [42].

2.4.4. Radiação Solar

A energia radiante que incide sobre um corpo opaco é em parte absorvida e em parte refletida, como se pode observar na Figura 2.4. A energia radiante absorvida se transforma em energia térmica ou calor e a refletida não sofre modificação alguma. A radiação solar incidente em corpos opacos pode ser calculada através da equação [35]:

$$RS = (\alpha_s \times RS) + (\rho_s \times RS), \text{ sendo } \alpha_s + \rho_s = 1 \quad \text{Equação 2.15}$$

onde: RS - radiação solar incidente (W/m^2)

α_s - absorptância solar (referente à cor)

ρ_s - refletividade solar

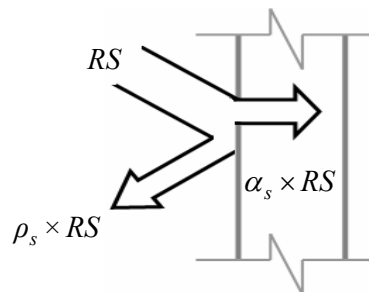


Figura 2.4. Radiação solar incidente em um corpo opaco

Fonte: [34] [35]

⁶ Objeto que absorve toda a radiação que nele incide: nenhuma luz o atravessa nem é refletida [44].

Quando a energia radiante incide sobre um corpo transparente ela é em parte absorvida, refletida e transmitida, como se pode observar na Figura 2.5. Um corpo ao receber energia radiante, reage seletivamente, o que significa que a quantidade de energia que absorve, reflete ou transmite depende do comprimento de onda do raio incidente. Com o vidro acontece um fenômeno similar como mostra a Figura 2.6. A radiação solar incidente em corpos transparentes pode ser calculada através da equação [35]:

$$RS = (\alpha_s \times RS) + (\rho_s \times RS) + (\tau_s \times RS), \text{ sendo } \alpha_s + \rho_s + \tau_s = 1 \quad \text{Equação 2.16}$$

onde: τ_s - transmitância solar

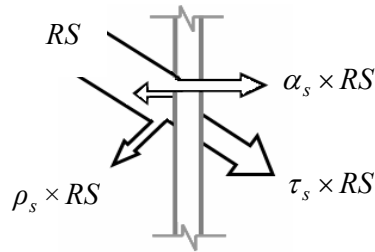


Figura 2.5. Radiação solar incidente em um corpo transparente
Fonte: [34] [35]

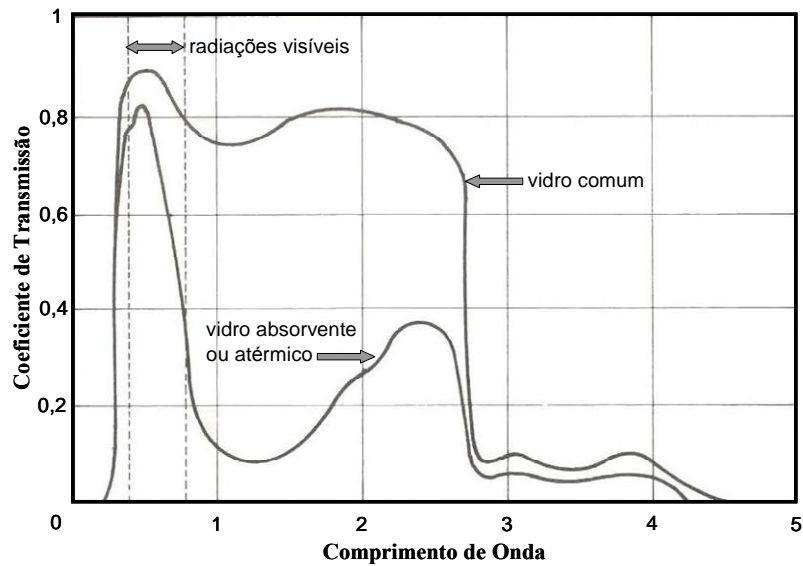


Figura 2.6. Comportamento de alguns vidros frente à energia radiante
Fonte: [35] [41]

2.4.5. Propriedades Térmicas dos Materiais

Os materiais construtivos são caracterizados devido a sua condutividade térmica (λ) e calor específico (c) em função de sua densidade de massa aparente (ρ).

- **Densidade de massa aparente**

É o quociente da massa pelo volume de um corpo, expresso em kg/m^3 [42], representada pela equação:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 2.17}$$

onde : ρ - densidade de massa aparente (kg/m^3)

m - massa (kg)

v - volume (m^3)

- **Condutividade Térmica**

É uma propriedade característica de cada material e representa a quantidade de calor⁷ que atravessa uma área unitária de um material de superfícies paralelas e espessura unitária, em um tempo unitário, quando se estabelece uma diferença de temperaturas entre as suas superfícies. A condutividade térmica de uma material é calculada através da equação [35]:

$$\lambda = \frac{Q \times L}{\Delta T \times A} \quad \text{Equação 2.18}$$

onde : λ - condutividade térmica (W/m.K)

Q - quantidade de calor (W)

L - espessura (m)

ΔT - variação de temperatura (K)

A - área (m^2)

⁷ Grandeza física que determina a variação na quantidade de energia térmica em um corpo, ou seja, determina a energia térmica que transitou para outro corpo ou que mudou de natureza [44].

Com frequência, a densidade é tomada como um indicador de condutividade, pois materiais com densidade elevada normalmente possuem condutividade também elevada, mas não existe uma relação direta entre as duas quantidades. A aparente relação é devida ao fato de o ar possuir uma condutividade baixa, e os materiais leves tendem a ser porosos, assim, contendo mais ar, possuindo menor condutividade [36].

- **Calor Específico**

É definido como a quantidade de calor que cada grama de uma substância necessita trocar para variar sua temperatura em 1°C. Quanto menor o calor específico de uma substância, mais facilmente ela pode sofrer variações em sua temperatura. É possível determinar o calor específico de uma substância a partir da quantidade de calor cedida a um corpo dessa substância, da variação térmica que ele sofre, e da massa deste corpo, através da equação [44]:

$$c = \frac{Q}{m \times \Delta T} \quad \text{Equação 2.19}$$

onde : c - calor específico (kJ/kg.K)

ΔT - variação de temperatura (K)

Também é possível determinar o calor específico de uma substância a partir da capacidade térmica⁸ de um corpo composto por ela e da massa desse corpo, através da equação [44]:

$$c = \frac{C}{m} \quad \text{Equação 2.20}$$

onde: C - capacidade térmica (J/K)

⁸ Quantidade de calor necessária para produzir um aumento de temperatura em uma massa do material e é calculada através da equação [44]:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad \text{Equação 7.1}$$

Uma característica importante das edificações 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. Nas edificações, 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 dos materiais construtivos [4].

As propriedades térmicas dos materiais construtivos, assim como a transmitância, absorvância e emissividade solar podem ser determinadas através de tabelas que constam no Projeto 02: 135.07-002 (2003) de norma da ABNT: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do calor solar de elementos e componentes de edificações. Este projeto de norma, bem como o projeto para definições dos termos utilizados são apresentados nos anexos 1 e 2.

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos relacionados com os intercâmbios térmicos entre o homem e o meio, governados por múltiplas variáveis, umas dependendo do próprio homem (idade, sexo, raça, hábitos alimentares, peso, altura, atividades que realizam e roupas que usam) e outras dos espaços habitados (temperatura média radiante, temperatura, velocidade e umidade do ar). Destacando que toda a energia produzida deve ser eliminada na quantidade exata, devido ao fato de que se a perda que ocorrer for insuficiente ocasionará a sensação de calor e se for em excesso, de frio. Para avaliar esta sensação é utilizado o método de predição do conforto térmico, denominado voto médio previsto ou *PMV*, que pode não ser satisfatório termicamente para todas as pessoas e que pode ser avaliado através de uma porcentagem de pessoas insatisfeitas ou *PPD*. Também foi apresentado neste capítulo a influência das propriedades térmicas dos materiais construtivos diante o desempenho térmico e energético das edificações, pois quando adequados às necessidades dos usuários consomem menor quantidade de energia para condicionamento térmico.

No próximo capítulo será apresentado o estudo de caso, onde serão descritas as características construtivas, ocupação, hábitos diários e equipamentos elétricos da edificação onde foi realizado o estudo. Serão também apresentados os programas computacionais utilizados, um para realizar a análise bioclimática do local e o outro as simulações termoenergéticas, assim como o método utilizado para avaliar o conforto térmico e o consumo energético da edificação estudada.

Capítulo 3

Estudo de caso

3.1. Introdução

O capítulo anterior descreveu os conceitos utilizados para analisar os materiais construtivos que possibilitam a diminuição do consumo de energia elétrica de uma edificação e proporcionam índices satisfatórios de conforto térmico para um grupo de pessoas em um determinado ambiente. Entretanto, para realizar estas análises é necessário conhecer as características da edificação onde foi realizado o estudo de caso. Neste capítulo é apresentado o hospital escolhido, Hospital Bruno Born de Lajeado/RS, suas características de construção, ocupação, ar condicionado, iluminação e hábitos hospitalares, o clima típico da região e as estratégias bioclimáticas que podem ser utilizadas para suprirem o percentual de desconforto. Para avaliar a eficácia das medidas alternativas que diminuem o consumo energético e proporcionam índices satisfatórios de conforto, foi desenvolvido um método que, a partir da curva de carga dos quartos hospitalares, avalia a utilização racional de elementos construtivos com base em simulações computacionais, sendo os resultados das alternativas de maior relevância avaliados e comparados.

3.2. Edificação Estudada

Para realizar o estudo de caso foi escolhido o Hospital Bruno Born como objeto de estudo, por estar situado em uma área de concessão da AES Sul, que possui uma parceria com o Grupo de Eficiência Energética da PUCRS realizando programas de Eficiência Energética em hospitais filantrópicos. Este hospital possui alguns setores eficientizados, porém o setor dos quartos de internação, localizados no segundo pavimento do hospital, não foram eficientizados, necessitando de uma análise no sistema de conforto térmico, devido ao fato de se tratar de quartos particulares e não oferecer conforto adequado aos usuários.

O hospital está localizado no município de Lajeado, Vale do Taquari, 117 km de Porto Alegre, RS e a 46,48 m da altura do mar, sendo está região de clima subtropical com temperaturas médias normalmente abaixo de 20°C.

O estudo de caso foi realizado no segundo pavimento do Hospital Bruno Born, setor onde se situam 13 quartos de internação particulares, totalizando uma área de 225,21 m², conforme a planta baixa apresentada na Figura 3.1. Outros dados relevantes são os dados referentes à construção, ocupação, ar condicionado, iluminação, equipamentos elétricos e hábitos do hospital, levantados *in loco* e descritos na Tabela 3.3. Com estes dados é possível determinar o consumo energético de cada quarto, assim como os níveis de conforto térmicos dos mesmos, verificando se estão de acordo com as temperaturas especificadas na NBR-6401, Tabela 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1. Condições internas para o verão – Temperatura de bulbo seco

TBS (°C) - Recomendável	TBS (°C) - Máxima
23 a 25	26,5

Fonte: [18]

Tabela 3.2. Condições internas para o inverno – Temperatura de bulbo seco

TBS (°C) – Recomendável
20 a 22

Fonte: [18]

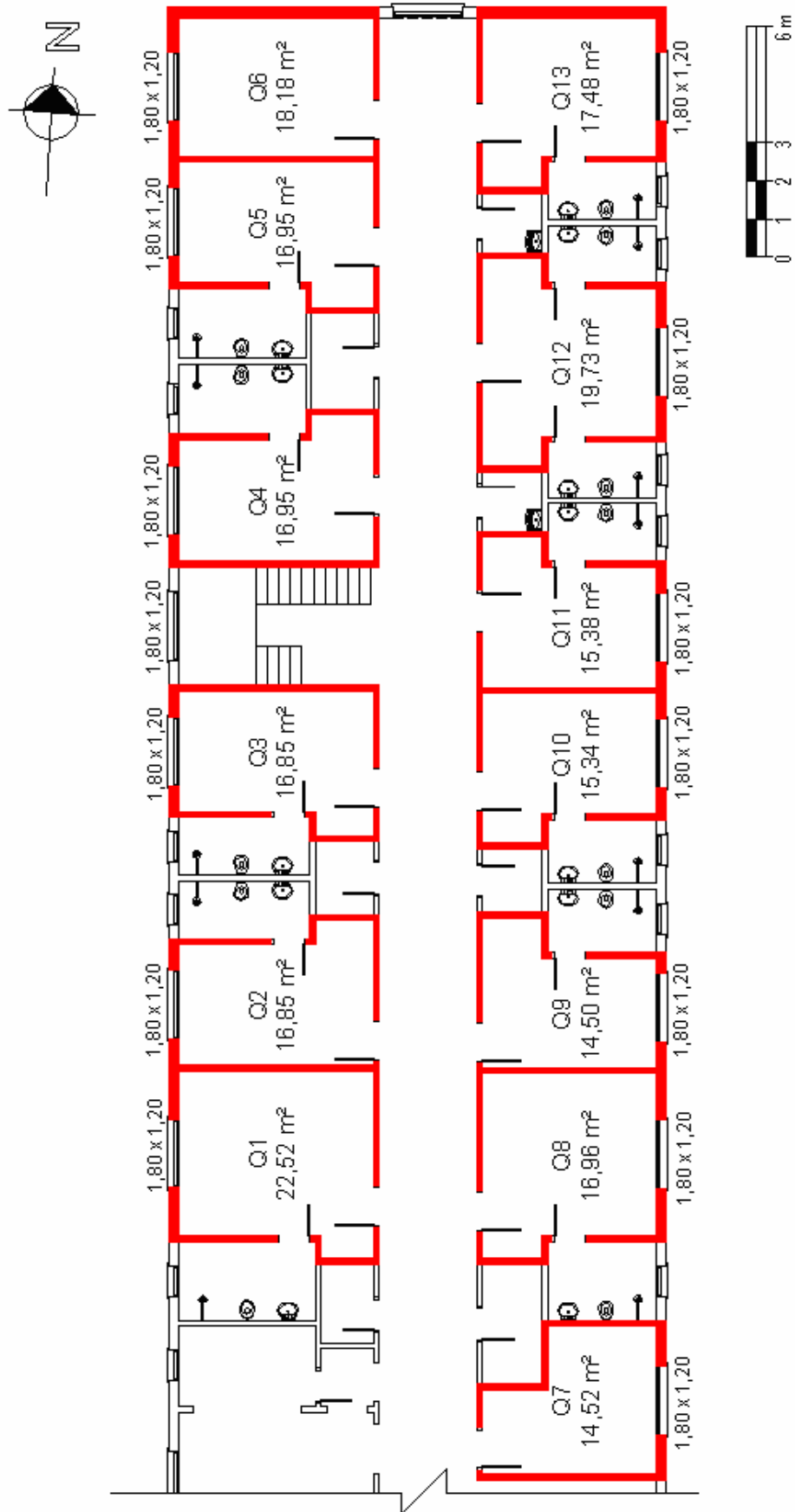


Figura 3.1. Planta baixa da área analisada do Hospital Bruno Born

Tabela 3.3. Dados do Hospital Bruno Born para cada quarto

	QUARTO 1 ao QUARTO 6 ABERTURAS OESTE	QUARTO 7 ao QUARTO 13 ABERTURAS LESTE
PAREDES EXTERNAS	rebocada na cor amarela - 3 cm tijolo maciço - 19 cm rebocada na cor branca - 3 cm	rebocada na cor amarela - 3 cm tijolo maciço - 19 cm rebocada na cor branca - 3 cm
PAREDES INTERNAS	rebocada na cor branca - 3 cm tijolo furado - 9 cm rebocada na cor branca - 3 cm	rebocada na cor branca - 3 cm tijolo furado - 9 cm rebocada na cor branca - 3 cm
PISO	reboco na cor azul - 3 cm laje de concreto -10 cm argamassa - 1 cm lajota - 1 cm	reboco na cor azul - 3 cm laje de concreto -10 cm argamassa - 1 cm lajota - 1 cm
FORRO	lajota - 1 cm argamassa - 1 cm laje de concreto -10 cm reboco na cor azul - 3 cm	lajota - 1 cm argamassa - 1 cm laje de concreto -10 cm reboco na cor azul - 3 cm
JANELA	vidro simples 3 mm	vidro simples 3 mm
PORTAS	madeira 3 cm	madeira 3 cm
Nº DE LEITOS	2	1
Nº DE FUNCIONÁRIOS	2	1
Nº DE VISITAS	2	2
ROTINA FUNCIONÁRIOS	2h/dia	1h/dia
ROTINA VISITAS	08h - 20h	08h - 20h 24h/dia
AR CONDICIONADO	_____	7500 Btu/h
FUNCIONAMENTO AR CONDICIONADO	_____	INVERNO - 08h - 15h 19h - 23h VERÃO - 09h - 21h
ILUMINAÇÃO	2 lâmpadas fluorescentes (32W) 2 lâmpadas compactas (16W)	2 lâmpadas fluorescentes (32W) 2 lâmpadas. fluorescentes (16W)
FUNCIONAMENTO ILUMINAÇÃO	INVERNO - lâmp. fluor. (32W) - 17 - 21h lâmp. compac. (16W) - 21 - 23h VERÃO - lâmp. fluor. (32W) - 19 - 21h lâmp. compac. (16W) - 21 - 23h	INVERNO - lâmp. fluor. (32W) - 17 - 21h lâmp. fluor. (16W) - 21 - 23h VERÃO - lâmp. fluor. (32W) - 19 - 21h lâmp. fluor. (16W) - 21h - 23h
EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	ventilador (65W)	frigobar (70W) televisão (60W)
FUNCIONAMENTO EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	VERÃO - ventilador - 12h - 23h	frigobar - 24h/dia televisão - 9 - 23h

3.3. Análise Bioclimática

A adoção de estratégias bioclimáticas, definidas como regras que se destinam a orientar a edificação tirando partido das condições climáticas de cada local, podem influenciar significativamente o desempenho de uma edificação em termos do conforto térmico no seu interior e, conseqüentemente, dos seus ocupantes. Como o consumo energético depende das condições de conforto que os ocupantes querem atingir, se a edificação estiver pouco adaptada ao clima será necessário maior consumo de energia para atingir as condições de conforto térmico pretendido, porém quando são utilizadas as estratégias bioclimáticas corretas, a edificação está mais próxima de atingir as condições de conforto térmico ou de diminuir os respectivos consumos energéticos para atingir esses fins.

Devido aos fatos apresentados anteriormente nota-se que é indispensável realizar uma análise bioclimática do local onde o Hospital Bruno Born está localizado, para que possam ser aplicadas estratégias bioclimáticas corretas. Para determinar estas estratégias bioclimáticas foi utilizado o programa *Analysis Bio*, desenvolvido pelo LabEEE/UFSC, que utiliza um arquivo climático para realizar as análises. Conforme a *ASHRAE* [49], existem duas fontes de arquivo climático, sendo elas: *Test Reference Year (TRY)* e *Typical Meteorological Year (TMY)*, entretanto para realizar a análise bioclimática com o programa *Analysis Bio* é utilizado o TRY, Figura 3.2.



Figura 3.2. Interface do programa *Analysis Bio*

A composição de um arquivo climático começa com a medição, em uma localidade, de uma série de dados meteorológicos horários por um longo período de tempo (10 anos ou mais). No caso de se medir durante 10 anos, por exemplo, haverá 120 meses medidos, ou seja, 10 janeiros, 10 fevereiros, e assim sucessivamente até dezembro. A partir de um tratamento estatístico dos dados, escolhem-se um a um os meses anuais que melhor representam o clima da localidade medida [30]. A compilação destes doze meses mais representativos é o arquivo climático, que consiste em dados climáticos horários apresentados em um formato padronizado, contendo informações para as 8760 horas do ano, Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Informações horárias constantes em um arquivo climático

Informação Climática	Unidade
Data e hora	-
Temperatura de bulbo seco	°C
Temperatura de orvalho	°C
Umidade relativa	%
Pressão atmosférica	PA
Radiação extraterrestre horizontal	Wh/m ²
Radiação extraterrestre direta	Wh/m ²
Radiação IV horizontal do céu	Wh/m ²
Radiação horizontal global	Wh/m ²
Radiação horizontal difusa	Wh/m ²
Radiação normal direta	Wh/m ²
Iluminação horizontal global	lux
Iluminação horizontal difusa	lux
Iluminação normal direta	lux
Claridade zenital	Cd/m ²
Direção do vento	°
Velocidade do vento	m/s
Índice de cobertura do céu (0 a 1)	-
Índice de opacidade do céu (0 a 1)	-
Visibilidade	Km
Altura das nuvens	m
Precipitação de água	mm
Profundidade da neve	cm
Número de dias sem cair neve	-

Fonte: [30]

O arquivo TRY utilizado nas análises foi obtido no site do LabEEEE/UFSC e são referentes à cidade de Porto Alegre no ano de 1954 [46], sendo esta referência utilizada

devido ao fato dos dados climáticos não apresentarem grandes divergências em relação à Lajeado e Porto Alegre nos anos atuais. Para realizar esta comparação foi feita uma média entre as temperaturas mínimas, máximas e médias dos anos de 2003, 2004 e 2005 das cidades de Lajeado e Porto Alegre, e, posteriormente confrontados com os dados da cidade de Porto Alegre no ano de 1954, conforme apresenta a Figura 3.3.

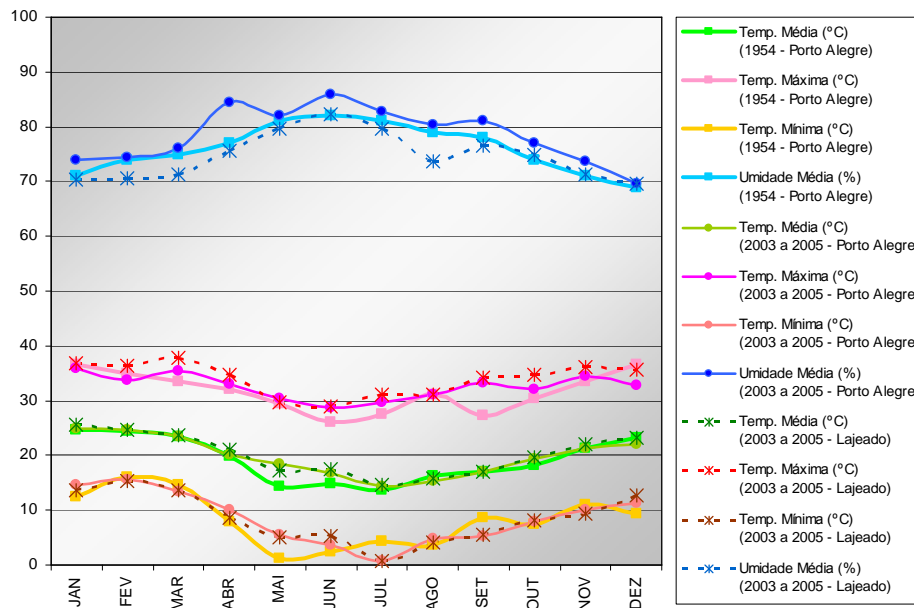


Figura 3.3. Dados climáticos de Porto Alegre e Lajeado

Fonte: [45] [46] [47]

3.3.1. Programa *Analysis Bio*

As estratégias bioclimáticas adequadas para a região do Hospital Bruno Born são determinadas pela carta bioclimática originada pelo programa *Analysis Bio*, que é desenhada sobre uma carta psicrométrica⁹, onde se pode obter a razão de umidade do ar¹⁰ (W [g/kg]) em função das temperaturas de bulbo seco¹¹ (TBS [°C]) e úmido¹² (TBU [°C]).

⁹ Diagrama que simplifica o estudo das propriedades do ar, tais como temperatura e umidade [36].

¹⁰ Conteúdo de vapor no ar [36].

¹¹ Temperatura do ar [36].

¹² Temperatura de saturação do ar, isto ocorre quando a umidade relativa do ar é 100% [36].

Observando a carta bioclimática de Porto Alegre, Figura 3.4, é perceptível a variação climática que ocorre ao longo do ano. A mancha alongada, constituída por pontos, representa cada hora do ano e percorre desde a região onde é indicado o aquecimento artificial até o início da zona de ar condicionado. Extraindo da carta os percentuais respectivos de cada zona, têm-se as estratégias bioclimáticas que devem ser adotadas para se obter conforto térmico nas edificações, onde 22,7% das horas do ano haverá conforto e 77,3% haverá desconforto, sendo 51,6% causado pelo frio e 25,7% pelo calor, Tabela 3.5.

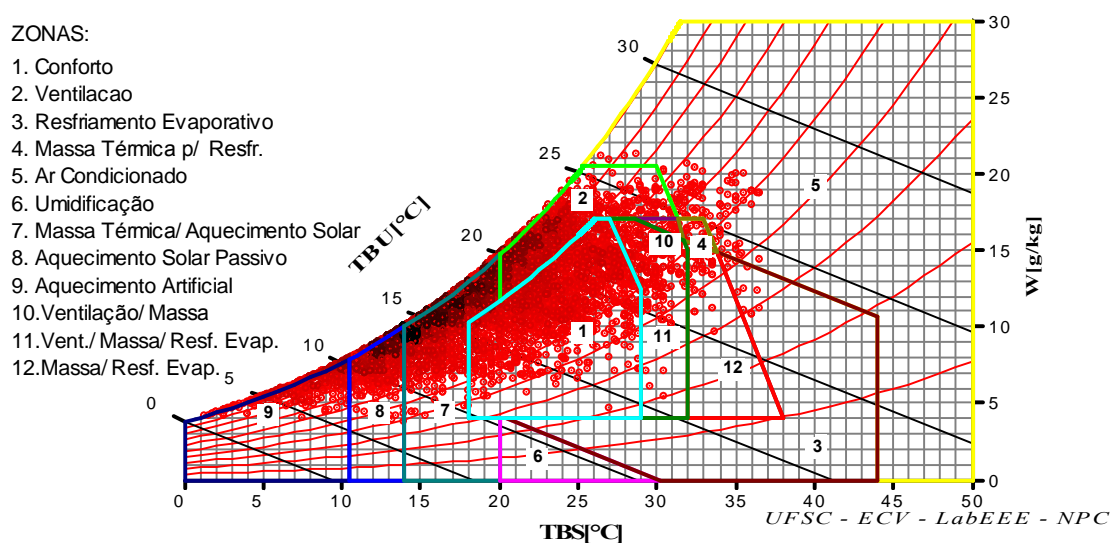


Figura 3.4. Carta bioclimática de Porto Alegre originada pelo *Analysis Bio*

Tabela 3.5. Estratégias bioclimáticas para Porto Alegre originadas pelo *Analysis Bio*

CONFORTO	22,7 %
DESCONFORTO	77,3 %
FRIO	51,6 %
Massa Térmica para Aquecimento Solar	33,8 %
Aquecimento Solar Passivo	11,8 %
Aquecimento Artificial	6,07 %
CALOR	25,7 %
Ventilação	23,3 %
Massa Térmica para Resfriamento	4,79 %
Resfriamento Evaporativo	4,46 %
Ar Condicionado	1,28 %

Sendo assim, as principais estratégias bioclimática a serem adotadas para proporcionar o conforto térmico no Hospital Bruno Born são [10] [35]:

- **Massa térmica para aquecimento solar** - Responsável por 33,8% do desconforto térmico causado pelo frio. Esta estratégia é utilizada com o uso do calor solar, que fica armazenado nas paredes das edificações e é devolvido para o interior do ambiente nas horas mais frias, quase sempre no período noturno;
- **Ventilação** - Responsável por 23,3% do desconforto térmico causado pelo calor. Esta estratégia melhora as condições internas, pois controlando a ventilação durante o dia pode-se reduzir o ingresso de ar quente e incrementar a ventilação noturna. Entretanto, esta estratégia é difícil de ser controlada, pois não depende da edificação e sim da rotina e saúde dos pacientes;
- **Aquecimento solar passivo** - Responsável por 11,8% do desconforto térmico causado pelo frio. Esta estratégia é realizada através de isolamento intenso, pois quanto mais baixas as temperaturas, mais perdas de calor ocorrerão;
- **Aquecimento artificial** - Responsável por 6,07% do desconforto térmico causado pelo frio. É representada por fontes energéticas como energia elétrica ou combustível, devido ao uso de equipamentos e instalações específicas, como ar condicionado.

3.4. Programa *EnergyPlus*

O programa computacional utilizado para realizar a análise energética (consumo e demanda de energia), o cálculo de carga térmica (dimensionamento do sistema de *HVAC - Heating, Ventilating and Air-Conditioning*) e o conforto térmico (temperatura interna e índice de *PMV*) dos quartos de internação da edificação hospitalar foi o *EnergyPlus*, programa de simulação de edificações oficial do Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Escrito em linguagem Fortran 90, o *EnergyPlus* reúne as melhores características e capacidades de outros 2 programas de simulação termoenergética, *BLAST* e *DOE-2*, possui estrutura modular bem organizada para facilitar a adição de rotinas, módulos e a comunicação com outros programas. A atualização do programa é feita regularmente e disponibilizada gratuitamente pela rede mundial de computadores. Como dito no Capítulo 1, a versão do *EnergyPlus* utilizada neste trabalho é a 1.2.3.023, lançada em outubro de 2005 [50].

A descrição total da edificação a ser simulada se encontra em arquivos de extensão IDF (*Input Data File*), própria do *EnergyPlus*. Arquivos que podem ser modificados utilizando um editor de textos qualquer ou o próprio editor de IDF que há no programa. Nestes arquivos podem-se fazer todas as alterações necessárias (geométricas, físicas, de equipamentos, da programação de ocupação, entre outras). A execução da simulação ocorre através de uma interface principal (*launcher*), que contém as instruções para execução das rotinas de cálculo do programa. Nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 pode-se ver a interface principal, do editor e um momento de cálculo do programa.

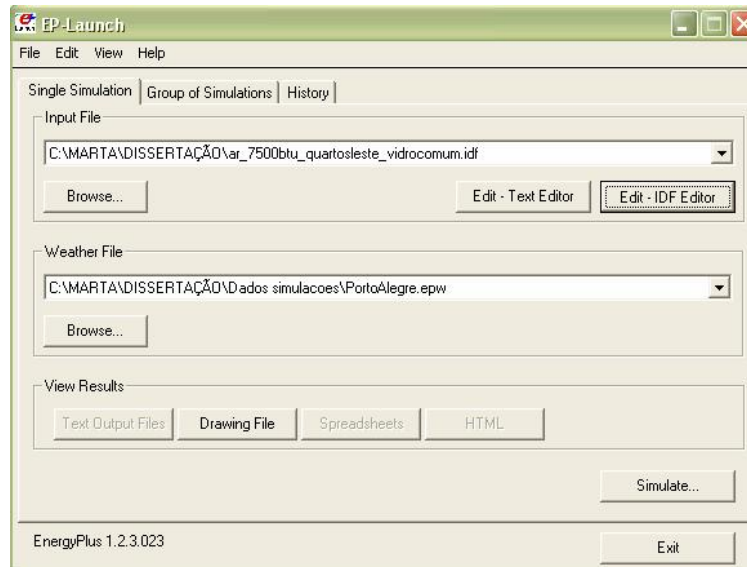


Figura 3.5. Interface principal do programa *EnergyPlus*

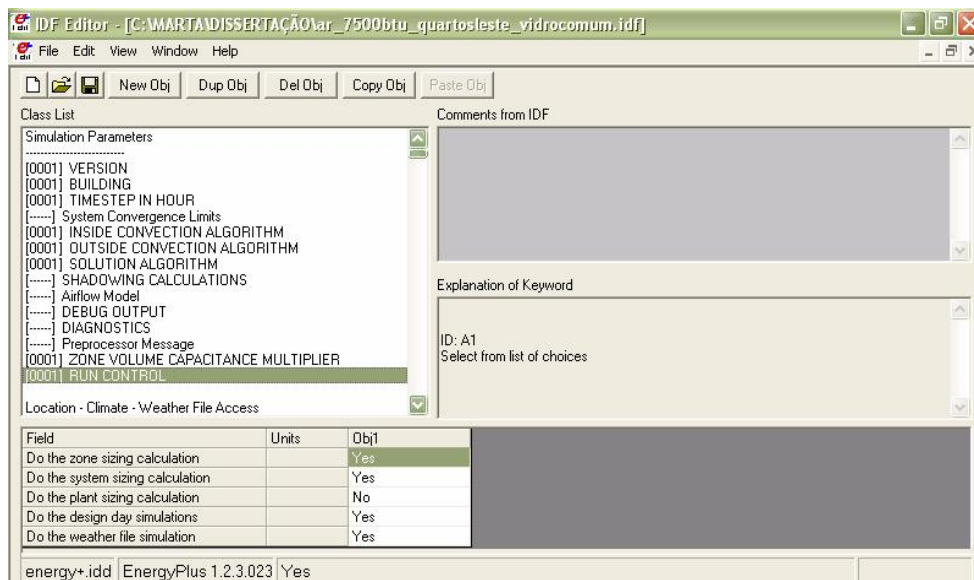
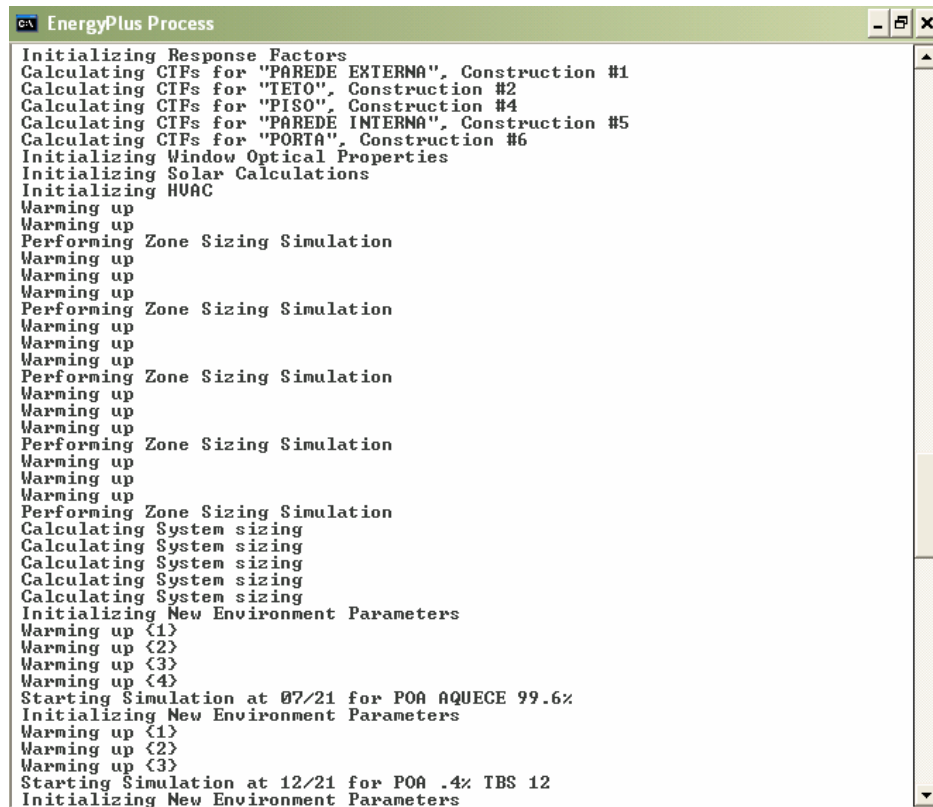


Figura 3.6. Interface do editor do programa *EnergyPlus*

The image shows a screenshot of a Windows command prompt window titled "EnergyPlus Process". The window contains a list of text-based progress messages. The messages include: "Initializing Response Factors", "Calculating CTFs for 'PAREDE EXTERNA', Construction #1", "Calculating CTFs for 'TETO', Construction #2", "Calculating CTFs for 'PISO', Construction #4", "Calculating CTFs for 'PAREDE INTERNA', Construction #5", "Calculating CTFs for 'PORTA', Construction #6", "Initializing Window Optical Properties", "Initializing Solar Calculations", "Initializing HVAC", "Warming up", "Performing Zone Sizing Simulation", "Calculating System sizing", "Initializing New Environment Parameters", "Starting Simulation at 07/21 for POA AQUECE 99.6%", and "Starting Simulation at 12/21 for POA .4% TBS 12". The window has standard Windows window controls (minimize, maximize, close) in the top right corner.

```
c:\ EnergyPlus Process
Initializing Response Factors
Calculating CTFs for "PAREDE EXTERNA", Construction #1
Calculating CTFs for "TETO", Construction #2
Calculating CTFs for "PISO", Construction #4
Calculating CTFs for "PAREDE INTERNA", Construction #5
Calculating CTFs for "PORTA", Construction #6
Initializing Window Optical Properties
Initializing Solar Calculations
Initializing HVAC
Warming up
Warming up
Performing Zone Sizing Simulation
Warming up
Warming up
Warming up
Performing Zone Sizing Simulation
Warming up
Warming up
Warming up
Performing Zone Sizing Simulation
Warming up
Warming up
Warming up
Performing Zone Sizing Simulation
Warming up
Warming up
Warming up
Performing Zone Sizing Simulation
Calculating System sizing
Calculating System sizing
Calculating System sizing
Calculating System sizing
Calculating System sizing
Initializing New Environment Parameters
Warming up <1>
Warming up <2>
Warming up <3>
Warming up <4>
Starting Simulation at 07/21 for POA AQUECE 99.6%
Initializing New Environment Parameters
Warming up <1>
Warming up <2>
Warming up <3>
Starting Simulation at 12/21 for POA .4% TBS 12
Initializing New Environment Parameters
```

Figura 3.7. Momento de simulação do programa *EnergyPlus*

3.4.1. Algoritmos de Solução

A escolha do algoritmo de solução seleciona o tipo de transferência de calor e massa (umidade) a ser utilizado nos elementos construtivos da edificação. O *EnergyPlus* possui três algoritmos de solução distintos [50]:

- **CTF** (*Conduction Transfer Function*) - Considera apenas o calor sensível e não leva em consideração o armazenamento ou difusão de umidade nos elementos de construção. É o algoritmo utilizado neste trabalho.
- **MTF** (*Moisture Transfer Function*) - Algoritmo de solução simultânea de transferência de calor e massa, considera a absorção de vapor na edificação.
- **EMPD** (*Effective Moisture Penetration Depth*) - Considera a difusão de calor sensível e o armazenamento de umidade nas superfícies internas, porém precisa de informações adicionais das características de umidade dos materiais.

3.4.2. Arquivo Climático

O arquivo climático (*weather file*) é utilizado para prever o consumo elétrico de uma edificação, seja o consumo do sistema de *HVAC*, o consumo do restante dos equipamentos elétricos ou o consumo total da edificação (soma dos dois anteriores). Arquivos climáticos são necessários quando se deseja simular um período do ano pré-definido pelo usuário (*run periods*) [50].

Na página oficial do *EnergyPlus* pode-se obter os arquivos climáticos de algumas cidades no formato *EPW (EnergyPlus Weather)*, próprio do *EnergyPlus*. Porém, o arquivo climático de Porto Alegre, utilizado neste trabalho, foi desenvolvido e obtido pelo Laboratório de Vapor e Refrigeração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Lafrig/UFRGS), coordenado pelo Dr. Eng^o Paulo Otto Beyer.

É importante salientar que o *EnergyPlus* não requer arquivos climáticos com 8.760 horas no caso de simulação de períodos curtos e permite gerar arquivos com frações de hora (por exemplo, quinze minutos) [29]. O programa ainda permite que o usuário escolha, no arquivo *IDF*, qual tipo de período será simulado: usando dias de projeto, arquivo climático ou os dois tipos simultaneamente, este último sendo utilizado neste trabalho.

3.4.3. Dias de Projeto

Os dias de projeto (*design day*) são utilizados para dimensionar o sistema de *HVAC* da edificação. Geralmente se utilizam dois dias de projeto, um para verão e outro para inverno, respectivamente para calcular carga térmica de refrigeração e aquecimento. Um dia de projeto pode ser definido, para o verão, como o dia do ano em que o sistema de *HVAC* mais solicita potência de refrigeração, e para o inverno, como o dia do ano em que o sistema de *HVAC* mais solicita potência de aquecimento.

Neste trabalho serão simulados dias de projeto estatísticos definidos pela *ASHRAE* [23]. Para garantir que o condicionamento de ar tenha rendimento satisfatório, trabalha-se com 0,4% de frequência de ocorrência cumulativa anual para o verão e 99,6% para o inverno. Isto significa que, no verão o sistema de condicionamento de ar não será capaz de manter a temperatura de projeto de verão do ambiente em no máximo 0,4% das 8760 horas do ano, e no inverno este sistema será capaz de manter a temperatura de projeto de inverno do ambiente em no mínimo 99,6% destas horas.

Durante o inverno é simulado o dia 21 de julho. É importante salientar que a *ASHRAE* considera a temperatura de bulbo seco constante ao longo do dia de projeto, além de considerar céu completamente nublado em todas as cidades [30].

No verão são simulados quatro dias de projeto, sendo eles: 21 de dezembro, 21 de janeiro, 21 de fevereiro e 21 de março. Os dados de dias de projeto de verão são rigorosamente iguais, porém as datas determinam posições solares diferentes, de modo que, por exemplo, em Porto Alegre, no mês de março, no qual ocorre o equinócio de outono, há uma maior insolação diária nas fachadas norte do que em dezembro, quando ocorre o solstício de verão [30].

3.4.4. Dados Avaliados com o Programa *EnergyPlus*

Neste trabalho são avaliados com o *EnergyPlus* os seguintes dados:

- **Índice de *PMV*** - Avalia o conforto térmico através do modelo de FANGER, descrito no Capítulo 2. O *PMV* consiste em um valor numérico que representa as respostas subjetivas de sensação de desconforto por frio e calor.
- **Temperatura interna** - Variação da temperatura do interior dos quartos de interinação (zonas térmicas) em função das diferentes combinações de parâmetros construtivos (ex. tipos de vidro, revestimentos) para manter o conforto térmico necessário nos ambientes.
- **Capacidade e potência nominal do sistema de *HVAC*** - Calcula a capacidade e a potência nominal de aquecimento e refrigeração necessária para adequar a edificação nas diferentes estações do ano.
- **Demanda de energia elétrica** - Determina a demanda horária de dois dias de projeto (um de verão e um de inverno), estas relacionadas ao sistema de *HVAC*, iluminação e equipamentos elétricos.
- **Consumo de energia elétrica** - Determina o consumo anual através do somatório do consumo mensal da edificação, estas também relacionadas ao sistema de *HVAC*, iluminação e equipamentos elétricos.

3.5. Método Utilizado

Para avaliar o conforto térmico e o consumo de energia dos quartos de internação do Hospital Bruno Born é feita uma caracterização detalhada da edificação, descrevendo as zonas térmicas a serem simuladas e as fontes de calor da edificação hospitalar, provenientes da ocupação, taxa metabólica, resistência térmica das vestimentas, equipamentos elétricos, iluminação, sistema de condicionamento de ar (*HVAC*) e das propriedades térmicas dos materiais construtivos. Posteriormente, alguns parâmetros construtivos (tipos de vidros, revestimentos internos e cores das fachadas) são modificados e avaliados.

O método utilizado para avaliação da eficácia dos parâmetros construtivos, constitui-se basicamente dos seguintes passos:

- 1º. Com os dados levantados *in loco* e descritos na Tabela 3.3, simula-se a condição real dos quartos de internação no *EnergyPlus*. Com os resultados desta simulação são elaborados gráficos e curvas de carga. Sendo os gráficos referentes as temperaturas internas dos quartos (um dia de inverno e um de verão) e aos índices de *PMV* (um dia de inverno e um de verão), medidos durante 24 horas de um dia típico de projeto de inverno e do pior dia de verão. A curvas de carga referem-se a demanda diária e ao somatório dos consumos elétricos do sistema de *HVAC*, iluminação e equipamentos elétricos, medidos mensalmente durante 1 ano, sendo este determinado pelo arquivo climático.
- 2º. Simula-se com os mesmos dados levantados *in loco* do 1º passo, porém com o sistema de condicionamento de ar em todos os quartos, funcionando de modo que as temperaturas internas sejam iguais as especificadas na NBR-6401, conforme Tabelas 3.1 e 3.2., isto é, de modo que todos os ocupantes estejam em conforto térmico. Com os resultados desta simulação são elaborados também gráficos e curvas de carga.
- 3º. Através de parâmetros construtivos como: aberturas externas com diferentes tipos de vidros, revestimentos internos com isolamento térmico e cores das fachadas, realizam-se simulações utilizando como base o arquivo do 2º passo.
- 4º. São comparados os resultados do 2º passo com os do 3º passo, verificando se através de diferentes elementos construtivos é possível consumir menos energia elétrica com o sistema de condicionamento térmico e manter os quartos em níveis satisfatórios de conforto, conforme a NBR-6401.

5°. É realizado um estudo de viabilidade econômica, verificando a relação custo-benefício dos melhores parâmetros construtivos.

3.5.1. Método de Análise dos Resultados

Todos os resultados obtidos com o uso do *EnergyPlus* são apresentados em planilhas no formato *CSV (Comma Separated Values)*, formato este que pode ser lido pela maioria dos editores eletrônicos de planilhas. Neste trabalho foi utilizado o *Excel*.

Os índices de *PMV* e temperaturas internas dos quartos de internação são obtidos através das planilhas que contêm resultados horários para cada zona, cada informação em uma coluna, considerando os cinco dias de projeto (um de inverno e quatro de verão). Os resultados apresentados neste trabalho referem-se a um dia de inverno e um dia de verão, sendo este caracterizado pelo dia mais quente dos quatro dias de verão, devido ao fato de que se os ocupantes estiverem em conforto e as temperaturas internas dos quartos obedeçam a NBR-6401 no dia mais quente, nos outros três dias os resultados também serão satisfatórios.

Em relação às potências dos sistemas de *HVAC* (refrigeração e aquecimento), as quais definem o custo de compra e instalação dos mesmos, as planilhas também possuem resultados horários para cada zona, cada informação em uma coluna, considerando também os cinco dias de projeto (um de inverno e quatro de verão). Os resultados das potências do sistema de *HVAC* são obtidos da seguinte forma:

- **INVERNO:** verifica-se a potência máxima de aquecimento que é solicitada em cada zona ao longo das 24 horas simuladas (um dia de projeto), ou seja, define-se a potência máxima em cada zona, em horários não necessariamente coincidentes.
- **VERÃO:** verifica-se a potência máxima de refrigeração que é solicitada em cada zona ao longo das 96 horas simuladas (quatro dias de projeto), ou seja, definem-se 13 potências máximas, uma para cada zona, em dias e horários não necessariamente coincidentes.

Entre essas duas formas de adquirir as potências máximas é realizada uma nova comparação, sendo o sistema de *HVAC* determinado pelo maior valor entre essas duas potências obtidas, conhecendo-se assim a capacidade nominal do sistema de *HVAC* disponibilizada pelos fabricantes.

Para obter resultados de consumos elétricos, que determinam os custos operacionais anuais da edificação hospitalar, é utilizado o arquivo climático e obtidos os resultados mensais:

- Consumo elétrico do sistema de *HVAC* (refrigeração e aquecimento);
- Consumo elétrico dos sistemas de iluminação e equipamentos;
- Consumo elétrico total da edificação (soma dos consumos anteriores).

Os equipamentos elétricos e a iluminação possuem consumo elétrico anual constante para quaisquer casos simulados, assim como as características de ocupação, taxa metabólica e resistência térmica das vestimentas.

Os resultados gráficos apresentados e analisados são referentes ao índice de *PMV*, temperatura interna, capacidade e potência nominal do sistema de *HVAC*, demanda e consumo de energia elétrica, descritos no Item 3.4.4.

Neste capítulo foram apresentadas as características construtivas, ocupação, sistema de condicionamento de ar, sistema de iluminação, hábitos diários e clima típico do Hospital Bruno Born, além da carta bioclimática gerada através do programa *Analysis Bio*, esta necessárias para avaliar quais parâmetros construtivos devem ser utilizados na edificação hospitalar para diminuir o consumo energético e proporcionar índices satisfatórios de conforto térmico nos quartos de internação. Esta avaliação além de possuir uma metodologia específica, apresentada também neste capítulo, é realizada através de resultados gerados pelo programa de simulação termoenergética *EnergyPlus*.

No próximo capítulo é realizada uma caracterização da edificação, assim como das zonas térmicas, fontes de calor e simulações realizadas com o *EnergyPlus*. Com os resultados obtidos nas simulações, apresentados em forma de gráficos, são realizadas análises que avaliam a eficácia dos parâmetros construtivos na redução da demanda de energia elétrica.

Capítulo 4

Simulações

4.1. Introdução

A partir das características construtivas, ocupação, equipamentos, hábitos diários, clima típico da região e estratégias bioclimáticas que podem ser utilizadas para propiciar um nível de conforto adequado nos quartos de internação do Hospital Bruno Born, apresentados no capítulo anterior, torna-se possível avaliar a eficácia do uso de diferentes elementos construtivos visando a diminuir o consumo energético e proporcionar índices satisfatórios de conforto térmico aos usuários dos quartos de internação. Este capítulo descreve as simulações computacionais feitas no *EnergyPlus* de forma a avaliar a influência de diversas alternativas construtivas. Também são apresentados os resultados obtidos e suas respectivas análises. Para isto inicialmente, faz-se uma caracterização detalhada da edificação estudada e dos parâmetros avaliados definindo os casos a serem simulados.

4.2. Hospital Bruno Born

O complexo hospitalar Bruno Born de Lajeado possui três andares e uma área total de 11962 m², entretanto para este estudo é analisada somente a área referente aos

quartos de internação, que situam-se no 2º andar e possuem uma área de 225,21 m², conforme planta baixa apresentada na Figura 3.1.

Na Figura 4.1 são mostradas as vistas isométricas do setor dos quartos de internação, com o objetivo de visualizar as 13 zonas térmicas, suas respectivas esquadrias externas e a orientação em relação ao norte verdadeiro. Os forros das zonas térmicas foram retirados das vistas isométricas (a e b) para proporcionar uma melhor visibilidade.

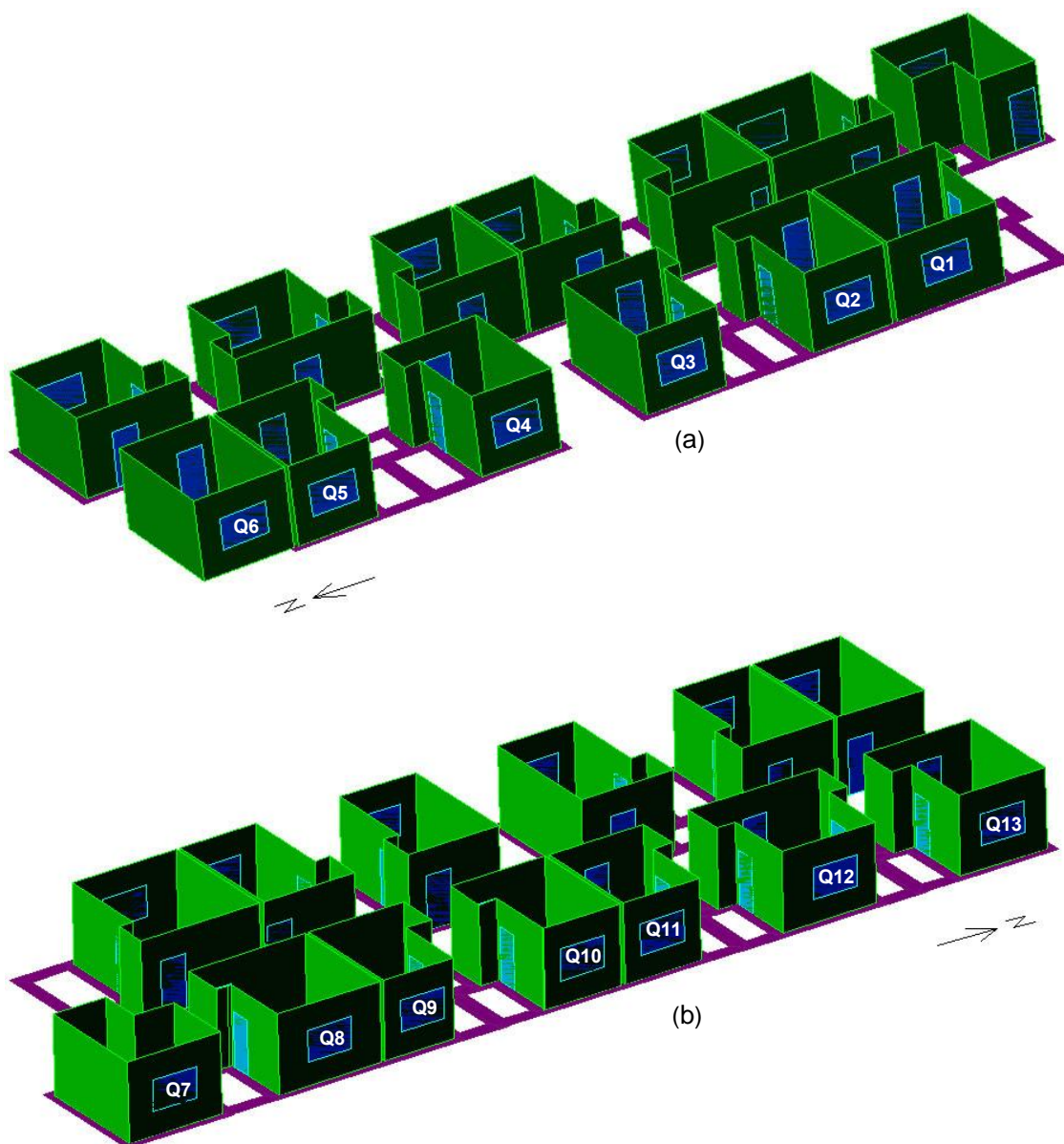


Figura 4.1. Vistas isométricas: (a) frente oeste e (b) frente leste do setor analisado.

4.2.1. Zonas Térmicas

Zonas térmicas são definidas no *EnergyPlus* como “um volume de ar a uma temperatura uniforme” [50]. Desta forma, cada zona térmica define um sistema independente de controle térmico. Dividir uma edificação em zonas térmicas possibilita analisar separadamente a resposta termoenergética de diferentes ambientes da mesma. Isto permite, por exemplo, identificar setores da edificação que demandam uma maior ou menor potência de condicionamento de ar, o que é impossível de ser obtido caso haja apenas uma zona térmica.

Foram estudadas 13 zonas térmicas na edificação, o que define 13 sistemas de condicionamento de ar independentes do tipo expansão direta, sendo a área e o volume de cada zona térmica descrita na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Área e volume de cada zona térmica

Zona Térmica	Área	Volume
Q1	22,52 m ²	69,812 m ³
Q2	16,85 m ²	52,235 m ³
Q3	16,85 m ²	52,235 m ³
Q4	16,95 m ²	52,545 m ³
Q5	16,95 m ²	52,545 m ³
Q6	18,18 m ²	56,358 m ³
Q7	14,52 m ²	45,012 m ³
Q8	16,96 m ²	52,576 m ³
Q9	14,50 m ²	44,950 m ³
Q10	15,34 m ²	47,554 m ³
Q11	15,38 m ²	47,678 m ³
Q12	19,73 m ²	61,163 m ³
Q13	17,48 m ²	54,188 m ³

4.2.2. Fontes de Calor

O calor gerado aos quartos de internação dependem da ocupação, taxa metabólica, equipamentos elétricos, iluminação, sistema de condicionamento de ar (*HVAC*) e as propriedades térmicas dos materiais construtivos. Quanto maior a geração de calor no inverno, menor é a potência necessária do sistema de aquecimento de ar. Quanto menor a geração de calor no verão, menor é a potência do sistema de resfriamento de ar.

As características de ocupação, taxa metabólica, resistência térmica das vestimentas, equipamentos elétricos e iluminação são iguais em todas as simulações e são descritas a seguir:

- **Ocupação**

O setor dos quartos de internação possui ocupação total de 64 pessoas, possuindo um máximo de 6 pessoas em cada zona térmica de frente oeste (Q1 à Q6) e um máximo de 4 pessoas em cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13). Esta ocupação ocorre diariamente, conforme as Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4.2. Ocupação de cada zona térmica de frente oeste (Q1 à Q6)

Período	Nº de ocupantes
0 às 8 h	2
8 às 9 h	4
9 às 10 h	6
10 às 16 h	4
16 às 17 h	6
17 às 19 h	4
20 às 0 h	2

Tabela 4.3. Ocupação de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13)

Período	Nº de ocupantes
0 às 8 h	2
8 às 10 h	3
10 às 11 h	4
11 às 20 h	3
20 às 0 h	2

- **Taxa metabólica**

Cada ocupante no período das 21 às 8 h possui uma taxa metabólica, conceituada no Item 2.2.2, de 40 W/m² por encontrar-se dormindo ou deitado, e no período das 8 às 21 h possui uma taxa metabólica de 60 W/m² por estar sentado [12]. Sendo a área superficial aproximada de uma pessoa mediana igual a 1,8 m², conforme descrito no Capítulo 2, cada ocupante ao estar dormindo ou deitado dissipa ao ambiente 72 W e ao estar sentado 108 W.

- **Resistência térmica das vestimentas**

A resistência térmica das vestimentas dos ocupantes, também conceituada no Item 2.2.2, sofre uma variação durante o período diurno (8 às 21 h) e noturno (21 às 8 h), tanto no verão quanto no inverno.

PERÍODO DIURNO – A resistência térmica das vestimentas (I_{cl}) é determinada pela equação 2.4, reescrita a seguir:

$$I_{cl} = 0,835 \times \Sigma I_{clu} + 0,161 \quad \text{Equação 2.4}$$

VERÃO: roupa íntima + bermuda + camisa manga curta + chinelo = 0,5 clo

INVERNO: roupa íntima + calça grossa + blusão grosso + jaqueta grossa + meia até a barriga da perna + sapato = 1,2 clo

PERÍODO NOTURNO – A resistência térmica das vestimentas (I_{cl}) é também determinada pela equação 2.4, porém é incrementado o valor da resistência térmica de uma pessoa deitada, determinada pela equação 2.6 e reescrita abaixo:

$$\Delta I_{cl} = (0,748 \times A_{ch}) - 0,1 \quad \text{Equação 2.6}$$

VERÃO (50% do corpo coberto): roupa íntima + pijama de manga curta + lençol com espessura de 1 mm + 50% do corpo em contato em contato com a cama = 1,35 clo

INVERNO (80% do corpo coberto): roupa íntima + pijama de manga longa + lençol com espessura de 1 mm + edredon com espessura de 1 cm + 50% do corpo em contato em contato com a cama = 3,3 clo

Todos os valores da resistência térmica das vestimentas foram extraídos da ASHRAE [23], com exceção do lençol e do edredon que por não constarem na tabela foram calculados pela equação 2.5, reescrita abaixo:

$$I_{clu} = \left(0,534 + 0,135 \times L_f\right) \times \left(\frac{A_g}{A_c}\right) - 0,0549 \quad \text{Equação 4.1}$$

- **Equipamentos elétricos**

Os equipamentos elétricos existentes no interior dos quartos de internação, exceto lâmpadas e sistema de HVAC, possuem uma potência nominal de 1300 W, cujo a

programação de funcionamento dos equipamentos elétricos são mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.4. Equipamentos de cada zona térmica de frente oeste (Q1 à Q6)

Período	Equipamentos	Potência nominal VERÃO
0 às 12 h	-	-
12 às 23 h	ventilador	65 W
23 às 0 h	-	-

Tabela 4.5. Equipamentos de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13)

Período	Equipamentos	Potência nominal VERÃO E INVERNO
0 às 9 h	frigobar	70 W
9 às 23 h	frigobar e televisão	130 W
23 às 0 h	frigobar	70 W

- **Iluminação**

As lâmpadas utilizadas são do tipo fluorescente tubular de 16 e 32 W e fluorescente compacta de 16 W, sendo a potência nominal de iluminação de 1248 W. A programação de funcionamento de iluminação de verão e de inverno diferem e são mostradas nas Tabela 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6. Iluminação de cada zona térmica de frente oeste (Q1 à Q6)

Período	Lâmpadas fluorescentes	Potência nominal VERÃO	Potência nominal INVERNO
0 às 17 h	-	-	-
17 às 19 h	tubular 32 W	-	64 W
19 às 20 h	tubular 32 W	64 W	64 W
20 às 21 h	tubular 32 W	64 W	64 W
21 às 22 h	compacta 16 W	32 W	32 W
23 às 0 h	-	-	-

Tabela 4.7. Iluminação de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13)

Período	Lâmpadas fluorescentes	Potência nominal VERÃO	Potência nominal INVERNO
0 às 17 h	-	-	-
17 às 19 h	tubular 32 W	-	64 W
19 às 20 h	tubular 32 W	64 W	64 W
20 às 21 h	tubular 32 W	64 W	64 W
21 às 22 h	tubular 16 W	32 W	32 W
23 às 0 h	-	-	-

As características do sistema de condicionamento de ar (*HVAC*) e as propriedades térmicas dos materiais construtivos, entre elas densidade de massa aparente, condutividade térmica, calor específico, absorvância solar e emissividade solar, sofrem variações nos casos simulados. Devido a isto, em cada simulação são descritas as características construtivas e do sistema de *HVAC*.

4.3. Caso 1 - Condição Real

A primeira simulação realizada foi a da situação atualmente existente, onde foram utilizados os dados do sistema de *HVAC* existente e as características construtivas levantadas *in loco*, detalhados a seguir.

4.3.1. Sistema de *HVAC* do Caso 1

O sistema de resfriamento e aquecimento é composto de um condicionador de ar de janela. Cada zona térmica com abertura para o leste (Q7 à Q13) possui um sistema de *HVAC* independente com capacidade nominal de refrigeração e aquecimento de 7500 Btu/h (2196,6 W) e potência nominal de 720 W, ligado durante 12 horas por dia. O horário de funcionamento é mostrado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8. Sistema de *HVAC* de cada zona térmica de frente leste (Q7 à Q13)

Período (h)	- verão -	- inverno -
0 às 8 h	-	-
8 às 9 h	-	ligado
9 às 15 h	ligado	ligado
15 às 19 h	ligado	-
19 às 21 h	ligado	ligado
21 às 23 h	-	ligado
23 às 0 h	-	-

Este sistema possui vazão de insuflamento de ar de 0,0958 m³/s por zona e renovação de ar de 0,0075 m³/s por pessoa, normalizada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) [51]. Neste caso o sistema de renovação de ar é feito pelo próprio condicionador de ar de janela.

4.3.2. Características Construtivas do Caso 1

Para fazer a simulação é necessário fornecer ao *EnergyPlus* a descrição das propriedades termofísicas dos materiais que compõem os elementos construtivos da edificação. As características dos materiais utilizados foram obtidas através do Projeto 02: 135.07-002, Lafrig/UFRGS ou pela própria biblioteca do programa.

A Tabela 4.9 descreve as camadas e os materiais utilizados no Hospital Bruno Born, além da densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ), calor específico (c), absorvância solar (α_s) e emissividade solar (ε) de cada material. A Tabela 4.10 descreve as propriedades físicas e óticas do vidro utilizado, referente à transmitância solar (τ), refletividade solar (ρ_s) interna e externa, transmitância solar visível (τ_v), refletividade solar visível (ρ_{sv}) interna e externa, emissividade solar (ε) interna e externa, além da condutividade térmica (λ).

Tabela 4.9. Características termofísicas dos materiais construtivos (caso 1 – condição real)

	Materiais	espessura (cm)	ρ (kg/m³)	λ (W/m.K)	C (J/kg.K)	α_s -	ε -
PAREDE EXTERNA	Reboco amarelo	2	1800	1,15	1000	0,3	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Tijolo maciço	19	1600	0,9	920	0,7	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Reboco branco	2	1800	1,15	1000	0,2	0,9
PAREDE INTERNA	Reboco branco	2	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Tijolo furado	9	1121,29	0,57	830	0,63	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Reboco branco	2	1800	1,15	1000	0,2	0,9
PISO	Reboco azul	2	1800	1,15	1000	0,4	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Concreto	10	977,12	0,81	830	0,65	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Lajota	1	2000	1,8	840	0,3	0,9
FORRO	Lajota	1	2000	1,8	840	0,3	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Concreto	10	977,12	0,81	830	0,65	0,9
	Argamassa	1	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Reboco azul	2	1800	1,15	1000	0,4	0,9
PORTA	Madeira	3	500	0,12	2300	0,3	0,9

Tabela 4.10. Características físicas e óticas do vidro utilizado (caso 1 – condição real)

Especificação do vidro		V1 - Vidro comum claro								
espessura (cm)	τ	ρ_s exterior	ρ_s interior	τ_v	ρ_{s_v} exterior	ρ_{s_v} interior	ε exterior	ε interior	λ (W/m.K)	
V1	0,3	0,837	0,075	0,075	0,898	0,081	0,081	0,84	0,84	0,9

4.3.3. Análise dos Resultados da Simulação do Caso 1

Variáveis pessoais (taxa metabólica e resistência térmica das vestimentas) e ambientais (temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade relativa e velocidade do ar) exercem influência nas condições de conforto térmico de cada pessoa. Para realizar esta análise nos quartos de internação foi utilizado o método de Fanger, denominado *PMV* (Figuras 4.2 e 4.3). De acordo com os índices de *PMV* nota-se que os ocupantes dos quartos Q1 à Q6 nunca se encontram na faixa de conforto, que pode variar de -0,5 a 0,5. Os índices de *PMV* dos quartos Q7 à Q13 oscilam, estando em conforto térmico durante todo o tempo que o ar condicionado está ligado.

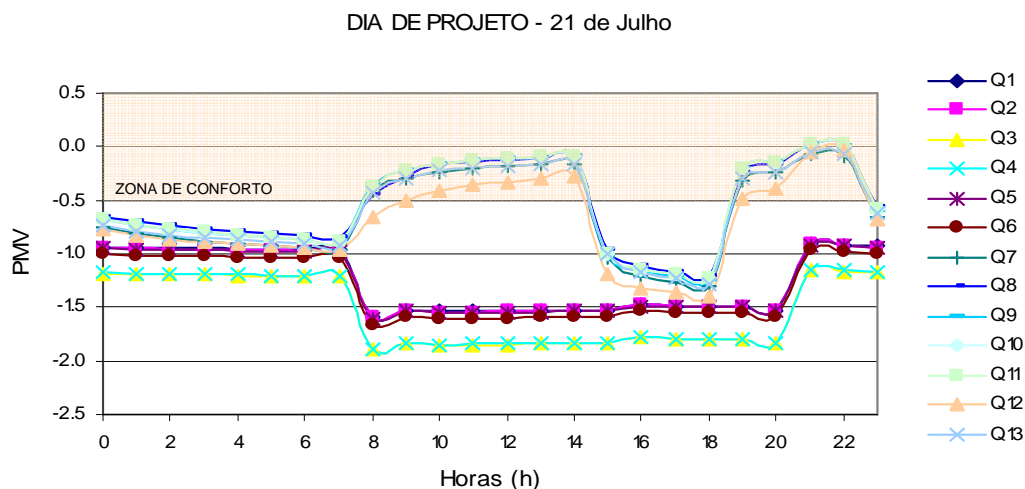


Figura 4.2. Índices de *PMV* de um dia de inverno (caso 1)

DIA DE PROJETO - 21 de Dezembro

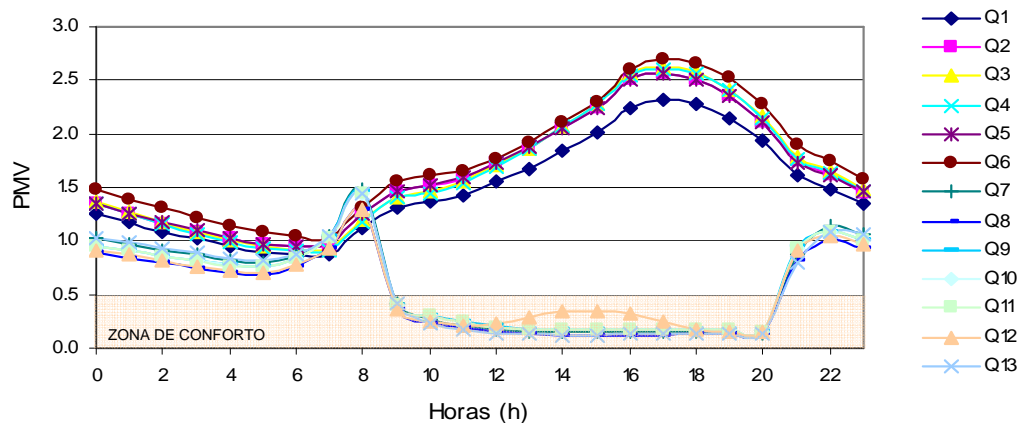


Figura 4.3. Índices de *PMV* de um dia de verão (caso 1)

A temperatura máxima nos quartos sem ar condicionado no inverno foi de 13,2°C às 17 horas e no verão a mínima foi de 25,1°C às 5 e 6 horas no quarto Q1. Nos quartos com ar condicionado no momento que estes não estão em funcionamento a temperatura máxima no inverno foi de 16°C às 15 horas e no verão a mínima foi de 24,7°C às 4 e 5 horas (Figuras 4.4 e 4.5). Comparando estas temperaturas com as recomendáveis pela NBR-6401, Tabela 3.1 e 3.2, nota-se que no período de inverno os quartos não possuem condições internas recomendadas em nenhum horário que o ar condicionado está desligado, com exceção do Q12, que em alguns horários mesmo com o ar condicionado ligado possui temperatura abaixo do recomendado, devido a capacidade do sistema estar mal dimensionada. No verão a situação é diferente, em algumas horas as temperaturas internas possuem condições apropriadas, pois segundo a NBR a temperatura máxima no verão pode ser 26,5°C, embora o recomendável é que varie de 23 a 25°C.

DIA DE PROJETO - 21 de Julho

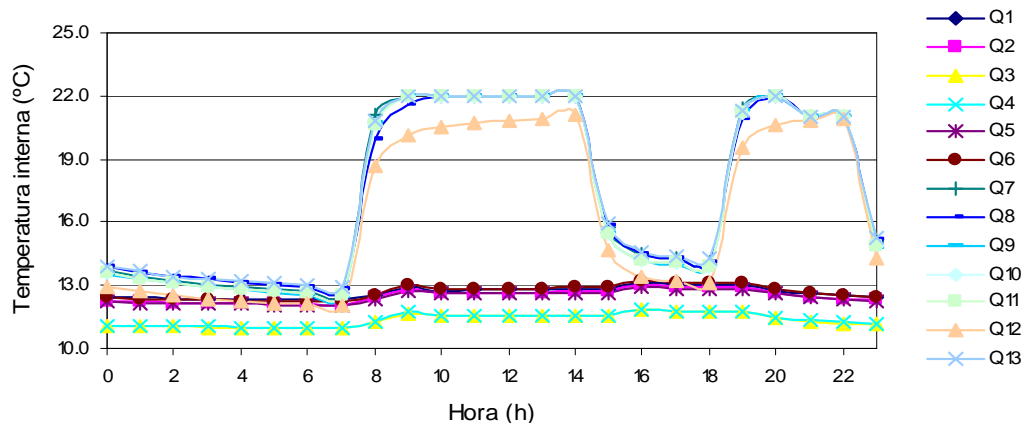


Figura 4.4. Temperaturas internas de um dia de inverno (caso 1)

DIA DE PROJETO - 21 de Dezembro

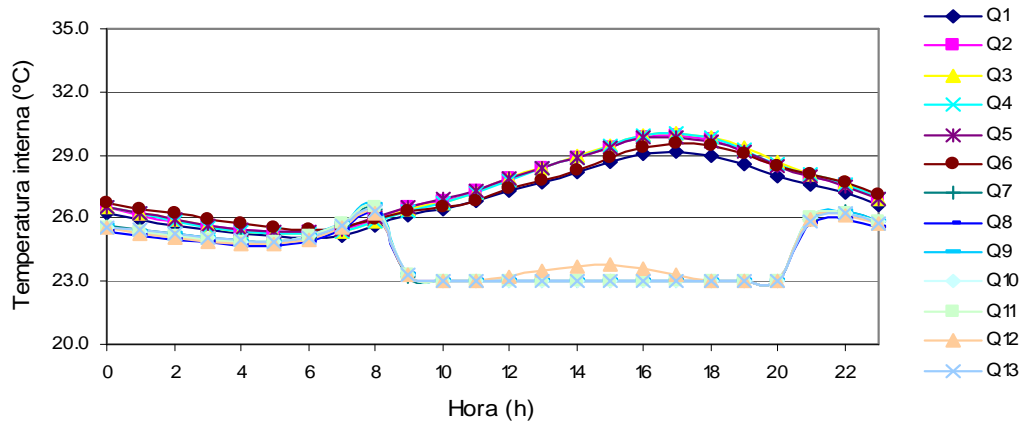


Figura 4.5. Temperaturas internas de um dia de verão (caso 1)

Outras análises importantes são referentes a demanda de um dia de inverno (Figura 4.6), um dia de verão (Figura 4.7) e ao consumo anual de energia elétrica (Figura 4.8), nestas análises o sistema de condicionamento de ar apresenta o maior valor de demanda e consumo energético, pois as curvas de cargas aumentam de maneira significativa devido a utilização do sistema de HVAC, tanto para aquecimento (2185 kWh/ano) quanto para refrigeração (3608 kWh/ano). O consumo anual dos quartos de internação foi de 11106 kWh, sendo o mês de Janeiro o de maior consumo, 1406 kWh e o de Outubro o de menor consumo, 597 kWh.

DIA DE PROJETO - 21 de Julho

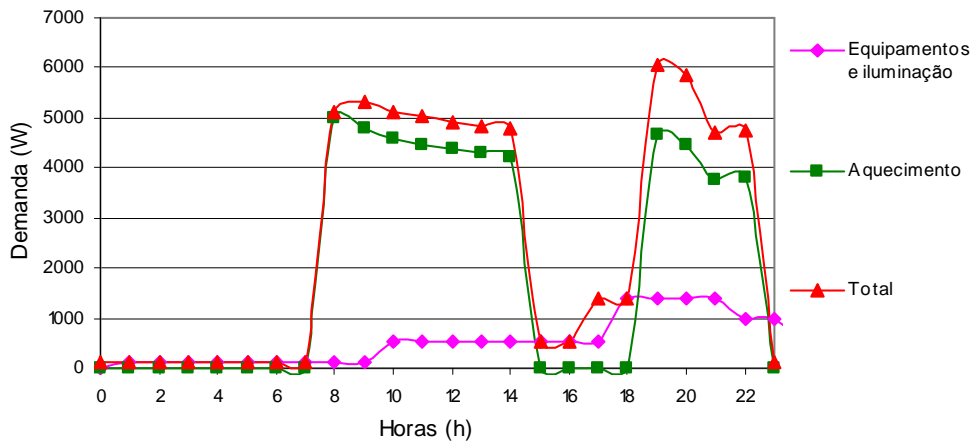


Figura 4.6. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno (caso 1)

DIA DE PROJETO - 21 de Dezembro

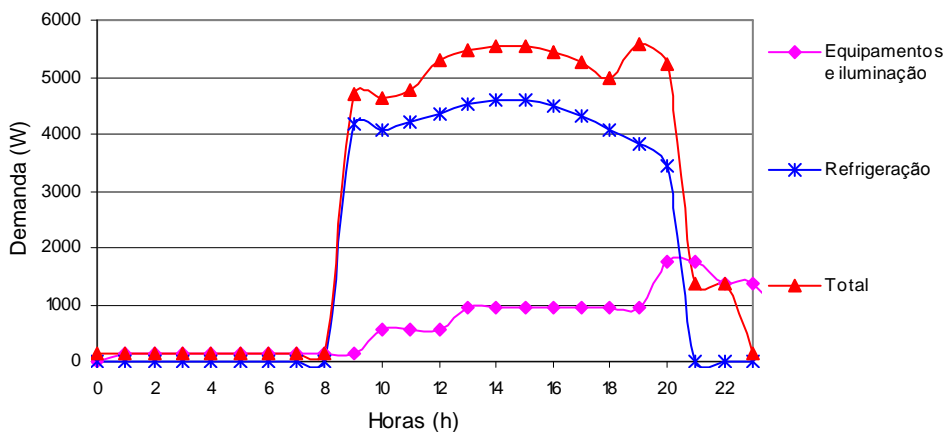


Figura 4.7. Demanda de energia elétrica de um dia de verão (caso 1)

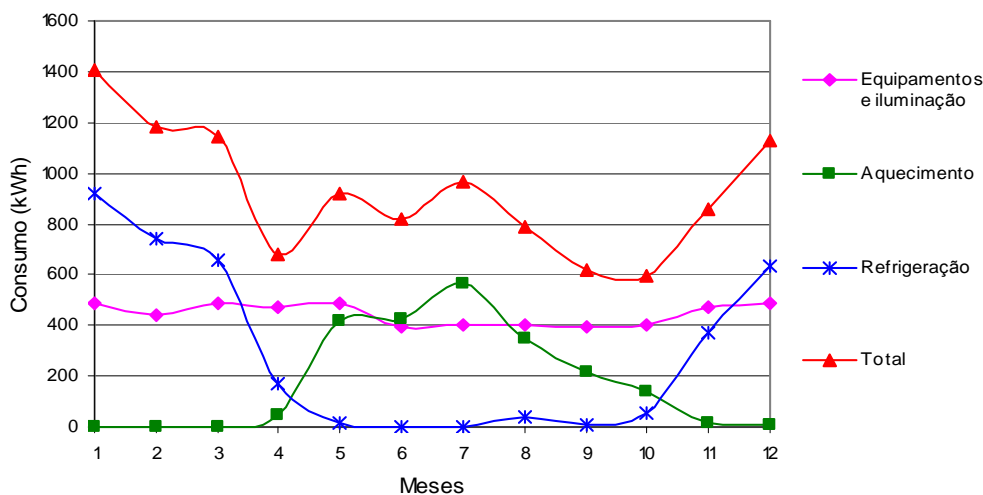


Figura 4.8. Consumo mensal de energia elétrica (caso 1)

4.4. Caso 2

Esta simulação foi realizada tendo como base o caso 1, condição real, sendo utilizadas as mesmas características construtivas levantadas *in loco* e detalhadas no Item 4.3.2. O sistema de HVAC foi modificado, sendo utilizado um modelo mini-split, devido ao fato de que com este sistema é possível instalar as partes ruidosas do equipamento (condensador) em áreas externas, deixando apenas a unidade evaporadora no interior dos ambientes, instalada no forro ou em paredes. Outro fator positivo do sistema mini-split é que os condensadores podem ser instalados em locais que não interfiram na fachada da edificação hospitalar, fazendo com que esta não seja poluída visualmente.

4.4.1. Sistema de HVAC do Caso 2

Devido aos benefícios apresentados anteriormente, o sistema de resfriamento e aquecimento foi simulado utilizando um modelo de condicionador de ar do tipo mini-split, de expansão direta e compressor rotativo.

As 13 zonas térmicas possuem um sistema de HVAC independente com capacidade e potência nominal calculada primeiramente de modo automático pelo *EnergyPlus*, de maneira que os quartos de internação permaneçam com as temperaturas recomendadas pela NBR-6401, Tabela 3.1 e 3.2, onde a temperatura do ar interna programada para o inverno é de 22°C no período diurno (8 às 21 h) e 21°C no período noturno (21 às 8 h) e no verão é de 23°C no período diurno e 24°C no período noturno.

A renovação de ar é mantida sempre a mesma, 0,0075 m³/s por pessoa, a fim de obedecer à normalização imposta pela Anvisa, porém como os condicionadores de ar do tipo mini-split não possuem renovação de ar, esta é garantida por um sistema de ventilação para renovação de ar forçada, dotado de um exaustor do tipo centrífugo instalado em cada zona térmica. A vazão de insuflamento de ar varia de caso a caso, pois dependem da capacidade do sistema de HVAC. Devido a isto, foi realizada uma primeira simulação que determina as capacidades necessárias para adequar cada zona nas diferentes estações do ano. Conhecendo estas capacidades foi realizada uma nova simulação utilizando a vazão de insuflamento de ar referente a capacidade do sistema HVAC que é comercializada, anexo 3. Os resultados finais destas análises estão descritos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Características dos sistemas de HVAC (caso 2)

Zona Térmica	Modelo	REFRIGERAÇÃO		AQUECIMENTO		Vazão de ar
		Capacidade Nominal	Potência Nominal	Capacidade Nominal	Potência Nominal	
Q1	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m ³ /s
Q2	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m ³ /s
Q3	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m ³ /s
Q4	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m ³ /s
Q5	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m ³ /s

Continuação Tabela 4.11

Q6	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m ³ /s
Q7	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m ³ /s
Q8	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m ³ /s
Q9	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m ³ /s
Q10	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m ³ /s
Q11	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m ³ /s
Q12	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m ³ /s
Q13	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m ³ /s

4.4.2. Análise dos Resultados da Simulação do Caso 2

Com esta simulação nota-se que os ocupantes encontram-se sempre na faixa de conforto, tanto no período diurno quanto no noturno, nos dois dias de projeto (21/Julho e 21/Dezembro), conforme Figuras 4.9 e 4.10. Nota-se também que os índices de *PMV* são praticamente uniformes em todos os quartos, há pouca variação de um quarto para outro, entretanto em algumas horas do dia o *PMV* dos quartos oscila, o que é normal, pois o *PMV* não depende somente da temperatura, mas também de outras variáveis ambientais e pessoais.

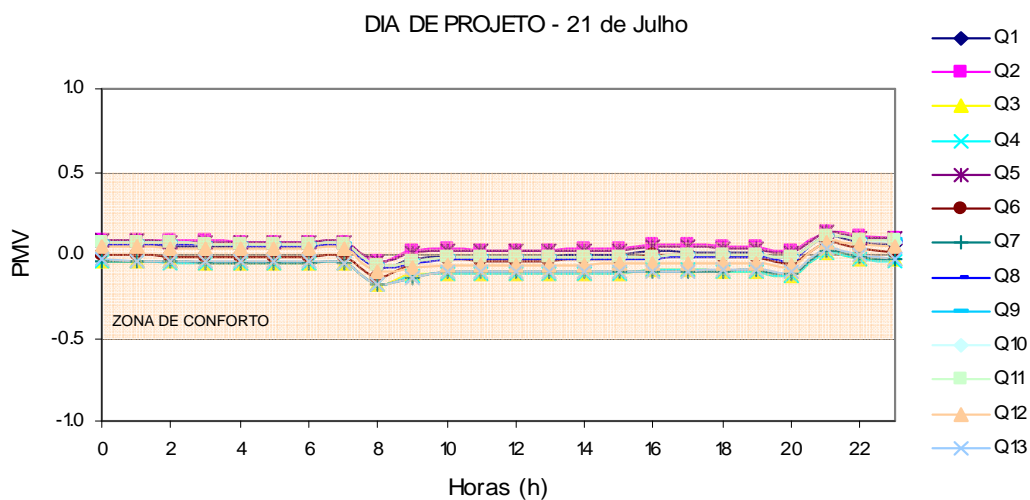


Figura 4.9. Índices de *PMV* de um dia de inverno (caso 2)

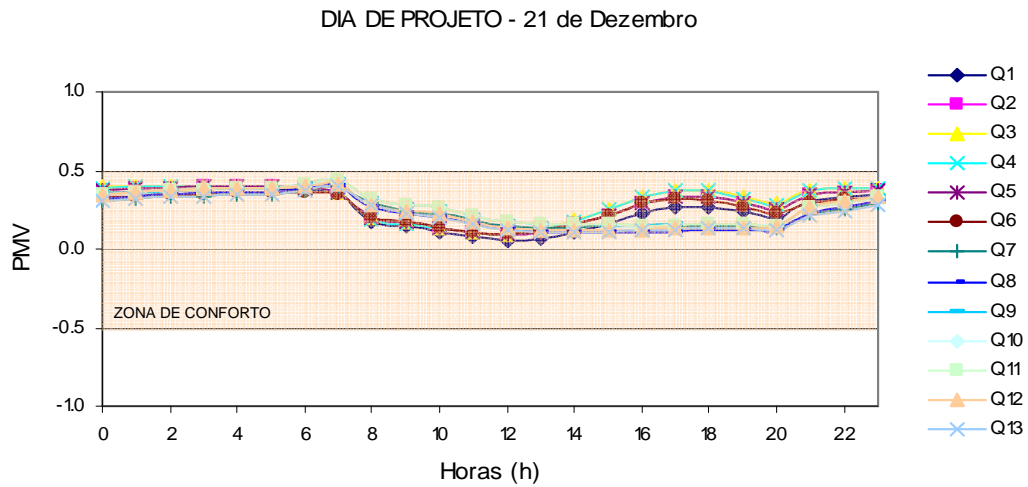


Figura 4.10. Índices de *PMV* de um dia de verão (caso 2)

Para expor a melhora significativa do nível de *PMV* do caso 2 em relação a condição real (caso 1) foi gerado um gráfico, utilizando as médias de *PMV* dos quartos em ambos os casos, apresentado na Figura 4.11. Com este gráfico fica claro que para atender as condições mínimas de conforto térmico dos quartos da edificação hospitalar é necessário ter ambientes climatizados, fato essencial para que o processo de cura e restabelecimento dos pacientes ocorra com tranquilidade proporcionando bem estar.

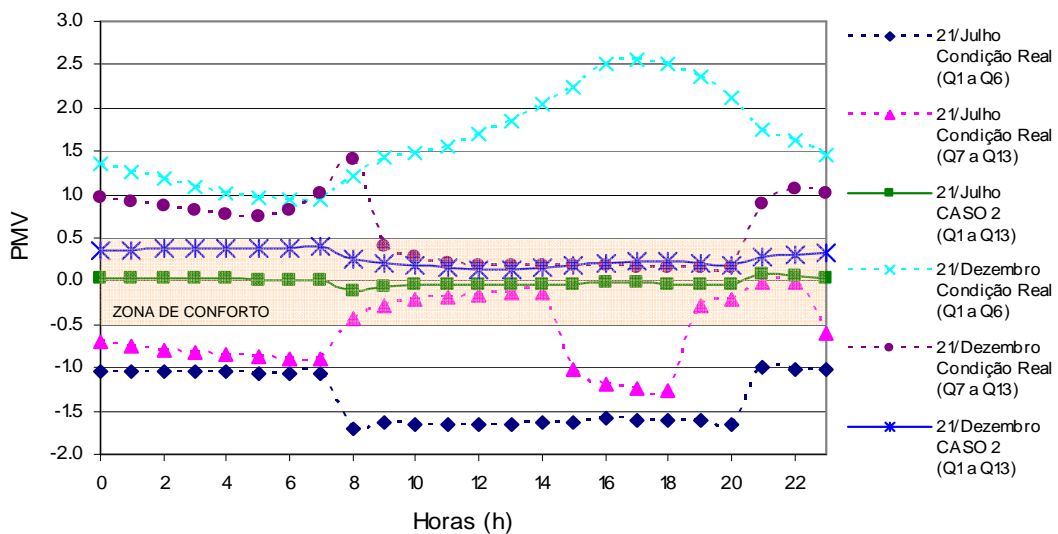


Figura 4.11. Índices médios de *PMV* – Condição Real x Caso 2

As temperaturas internas obedeceram plenamente as programações propostas para que permaneçam conforme as exigências da NBR-6401. Variando de 21 a 22°C no dia de projeto de inverno e de 23 a 24°C no dia de projeto de verão (Figuras 4.12 e 4.13). Estes resultados demonstram que as capacidades nominais dos condicionadores de ar estão bem dimensionadas.

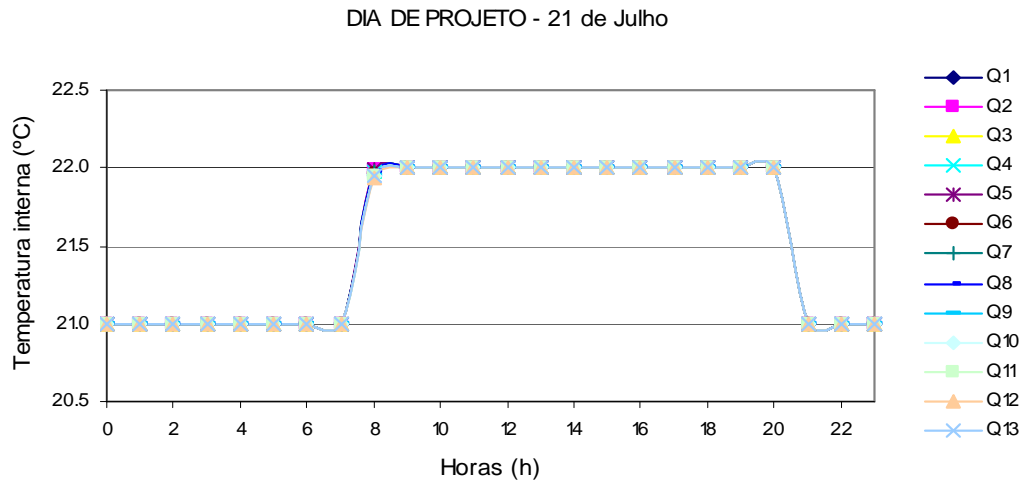


Figura 4.12. Temperaturas internas de um dia de inverno (caso 2)

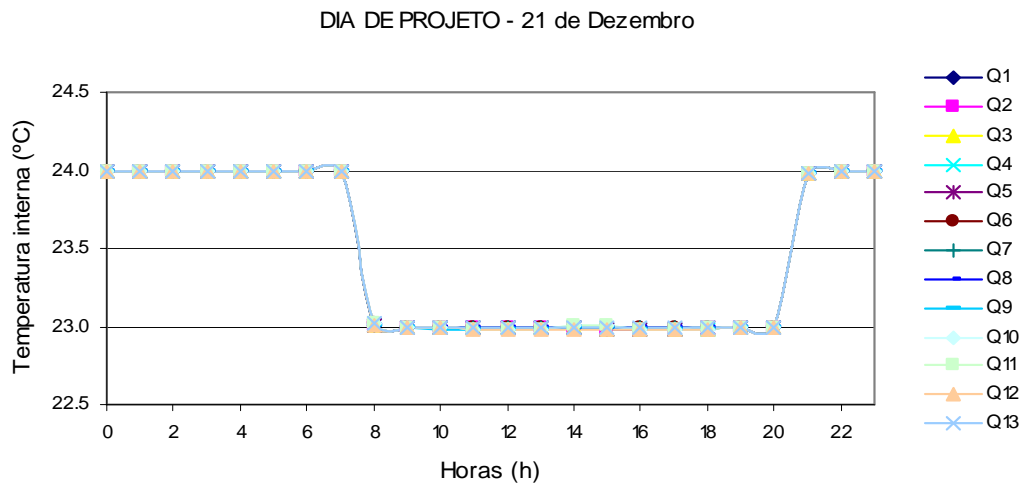


Figura 4.13. Temperaturas internas de um dia de verão (caso 2)

Analisando as Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, nota-se que o sistema de condicionamento de ar, assim como na condição real (caso 1), é o principal responsável pelo aumento da demanda e do consumo de energia elétrica, para aquecimento consome 9161 kWh/ano e

para refrigeração 7650 kWh/ano. O mês de Julho foi o de maior consumo, 2478 kWh e o de Abril o de menor consumo, 999 kWh. O consumo anual dos quartos de internação passou a ser de 21216 kWh, aumentando 10110 kWh em relação a condição real. A melhoria significativa de conforto térmico é acompanhada de um aumento de consumo. No entanto, é de extrema importância que edificações hospitalares possuam ambientes que visem ao conforto térmico dos ocupantes, uma vez que o bem-estar dos pacientes é prioridade.

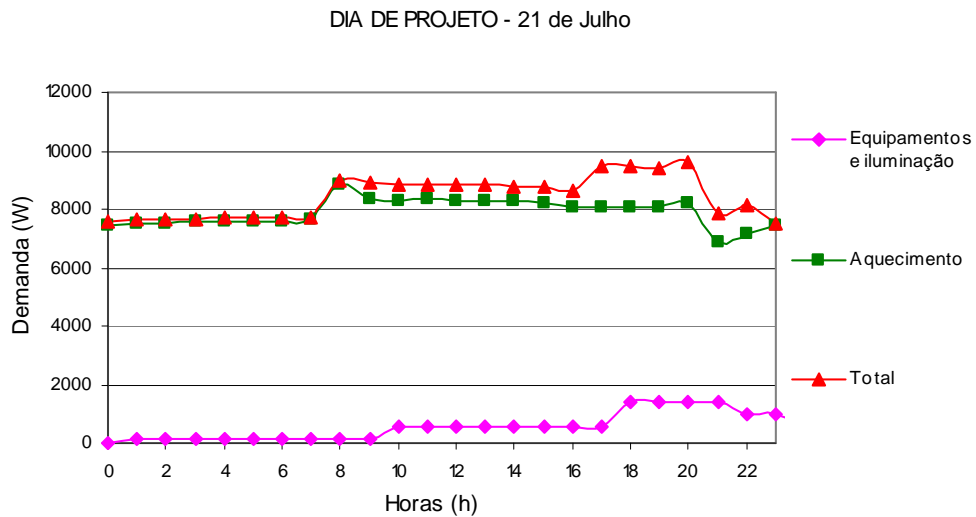


Figura 4.14. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno (caso 2)

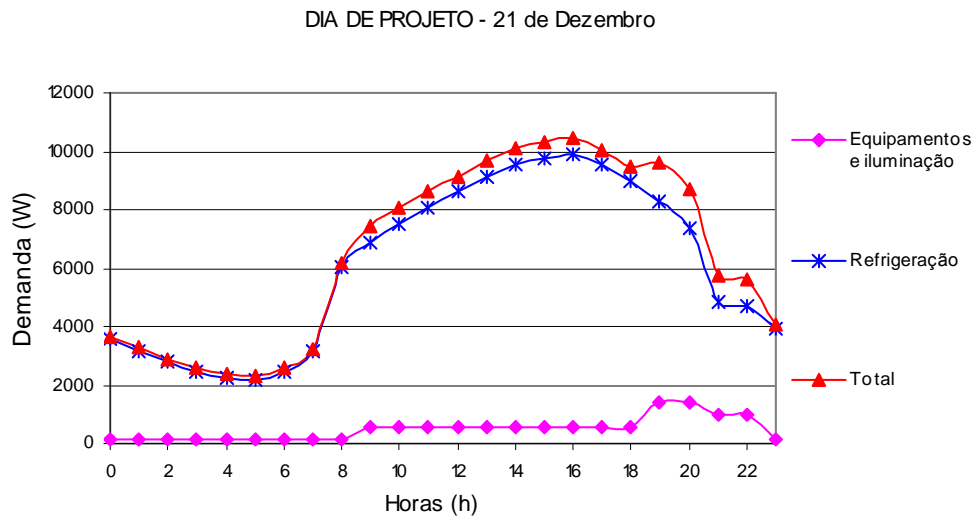


Figura 4.15. Demanda de energia elétrica de um dia de verão e um de inverno (caso 2)

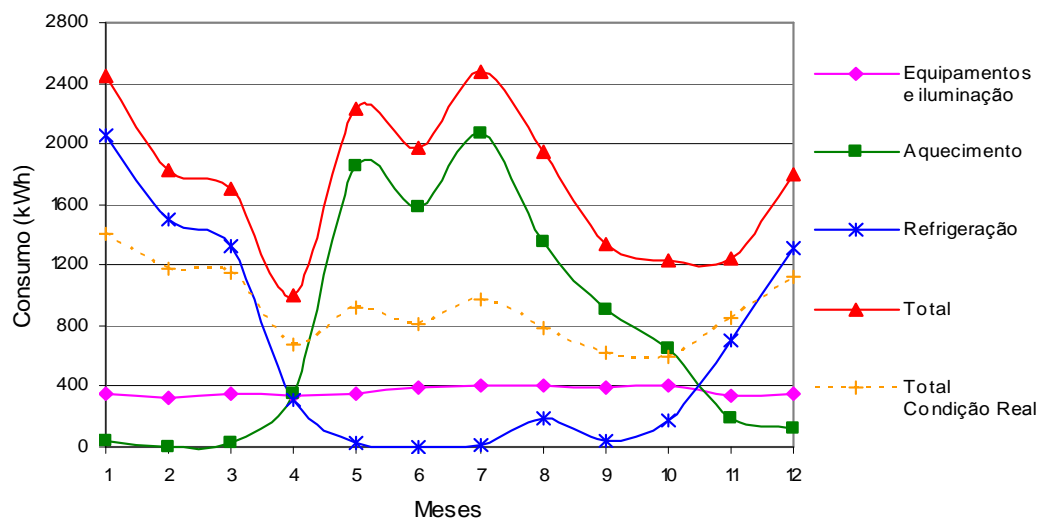


Figura 4.16. Consumo mensal de energia elétrica (caso 2)

Diante deste aumento de consumo a partir do uso do sistema de condicionamento de ar, principalmente no inverno, faz-se necessário a adoção de medidas que proporcionem a racionalização no uso de energia elétrica. Para isto, é avaliada a influência de alguns parâmetros construtivos na redução da demanda de energia elétrica.

4.5. Caso 3 - Tipo de Vidro

Estas simulações tiveram como base o caso 1, condição real, sendo utilizadas sempre as mesmas características termofísicas dos materiais construtivos (Tabela 4.9), havendo modificações nos vidros utilizados nas janelas. Foram simuladas 18 configurações de vidros, porém os melhores resultados foram provenientes do uso de vidros duplos, também conhecidos como vidro isolante ou insulado.

O conjunto de duas ou mais chapas de vidro intercaladas por uma câmara de ar ou gás, reduz as trocas térmicas dos vidros, realizadas através da condução, convecção e radiação, com o interior do ambiente.

Os tipos de vidros simulados foram os que exigiram menor potência nominal no sistema de HVAC e conseqüentemente menor demanda de energia elétrica, sendo estes:

- Vidro duplo comum 3 mm (V1) com 20 mm de ar entre um vidro e outro;
- Vidro duplo comum 6 mm (V2) com 14 mm de ar entre um vidro e outro;

- Vidro duplo comum 3 mm (V1) com 20 mm de argônio entre um vidro e outro;
- Vidro duplo comum 3 mm (V1) com 20 mm de xenônio entre um vidro e outro;
- Vidro duplo comum 3 mm (V1) com 20 mm de ar entre um vidro e outro em esquadria com vedação.

As características físicas e óticas do vidro comum 3 mm (V1) foi apresentada anteriormente na Tabela 4.10, sendo as do vidro comum 6 mm (V2) apresentadas na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Características físicas e óticas do vidro V2

Especificação do vidro		V2 - Vidro comum claro								
espessura (cm)	τ	ρ_s exterior	ρ_s interior	τ_v	ρ_{s_v} exterior	ρ_{s_v} interior	ε exterior	ε interior	λ (W/m.K)	
V2	0,6	0,775	0,071	0,071	0,881	0,0799	0,0799	0,84	0,84	0,9

4.5.1. Sistema de HVAC do Caso 3

De agora em diante todas as simulações realizadas possuem o sistema de resfriamento e aquecimento igual ao caso 2, tipo mini-split, de expansão direta e compressor rotativo. As programações de temperaturas e a renovação de ar também são as mesmas do caso 2.

Em todas as simulações o sistema de HVAC foi primeiramente calculado pelo *EnergyPlus*, para que nas simulações posteriores fossem utilizadas as vazões de insuflamento de ar e as capacidades do sistema de HVAC necessárias para manter os quartos de internação em níveis satisfatórios de conforto térmico, assim como aconteceu no caso ideal.

- **S1 - VIDRO DUPLO COMUM 3 mm (AR)**

O primeiro tipo de vidro analisado foi o vidro duplo 3 mm, sendo este constituído por:

- VIDRO EXTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1)

- 20 mm DE CÂMARA DE AR
- VIDRO INTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1)

Nesta simulação as características dos sistemas de *HVAC* são praticamente iguais as do caso 2, somente na zona térmica Q8 a potência nominal necessária para manter os ocupantes em conforto térmico diminuiu de 9000 Btu/h para 7000 Btu/h, conforme descrito na Tabela 4.13.

Tabela 4.13. Alteração na característica do sistema de *HVAC* (vidro duplo 3 mm)

Zona Térmica	Modelo	REFRIGERAÇÃO		AQUECIMENTO		Vazão de ar
		Capacidade Nominal	Potência Nominal	Capacidade Nominal	Potência Nominal	
Q8	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s

- **S2 - VIDRO DUPLO COMUM 6 mm (AR)**

O segundo tipo de vidro analisado foi o vidro duplo 6 mm, sendo este constituído por:

- VIDRO EXTERIOR COMUM CLARO 6 mm (V2)
- 20 mm DE CÂMARA DE AR
- VIDRO INTERIOR COMUM CLARO 6 mm (V2)

Nesta simulação as características dos sistemas de *HVAC* são exatamente as mesmas do vidro duplo comum 3 mm (S1).

- **S3 - VIDRO DUPLO COMUM 3 mm (ARGÔNIO)**

O terceiro tipo de vidro analisado foi o vidro duplo 3 mm com argônio, sendo este constituído por:

- VIDRO EXTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1)
- 20 mm DE CÂMARA DE ARGÔNIO
- VIDRO INTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1)

O argônio é um gás nobre de grande utilização na Europa, mas no Brasil ainda não é utilizado para constituir vidros duplos. As características dos sistemas de *HVAC* desta simulação permaneceram iguais as do vidro duplo comum 3 mm (S1).

- **S4 - VIDRO DUPLO COMUM 3 mm (XENÔNIO)**

O quarto tipo de vidro analisado foi o vidro duplo 3 mm com xenônio, sendo este constituído por:

- VIDRO EXTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1)
- 20 mm DE CÂMARA DE XENÔNIO
- VIDRO INTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1)

O xenônio é um gás tão nobre quanto o argônio encontrado com facilidade nas câmaras de vidros duplos na Europa, mas no Brasil também não é utilizado. Embora seja encontrado na bibliografia brasileira, não foi encontrado nenhum fornecedor de vidros duplos que utilize este gás. As características dos sistemas de *HVAC* do vidro duplo utilizando gás xenônio são as mesmas das do vidro duplo comum 3 mm (S1).

Os vidros com câmara de gases de xenônio e argônio apresentaram melhor isolamento térmico do que o ar, por serem mais pesados e possuírem menor condutividade térmica (λ), reduzindo as transferências por condução e convecção. Porém a melhor alternativa para utilização no estudo de caso é a câmara de ar, devido ao fato de ser fabricada por qualquer indústria de vidros duplos no Brasil.

- **S5 - VIDRO DUPLO COMUM 3mm (AR) EM ESQUADRIAS COM VEDAÇÃO**

Devido ao exposto anteriormente foram simulados vidros duplos com câmara de ar e não gás em uma esquadria com boa isolamento térmica, a constituição deste vidro é a mesma do vidro S1.

Este tipo de vidro apresentou o melhor desempenho devido a redução de infiltração de ar exterior para o interior no inverno e vice-versa no verão. Entretanto as características dos sistemas de *HVAC* desta simulação permaneceram as mesmas do vidro duplo comum 3 mm (S1).

4.5.2. Análise dos Resultados das Simulações do Caso 3

Todas as simulações com diferentes tipos de vidros mantiveram os ocupantes dos quartos de internação na faixa de conforto, exibindo resultados muito semelhantes aos do caso 2. Os índices de *PMV* não passaram da faixa de -0,5 e 0,5 em nenhuma das simulações.

As temperaturas internas em todas as simulações obedeceram as programações propostas, assim como no caso 2, variando de 21 a 22°C no dia de projeto de inverno e de 23 a 24°C no dia de projeto de verão, mantendo-se conforme as exigências da NBR-6401.

Estes resultados demonstram que as capacidades nominais dos condicionadores de ar estão bem dimensionadas, comprovando que com a utilização de vidros duplos é possível demandar menos energia elétrica, em certos casos até diminuir a capacidade dos condicionadores de ar, mantendo os quartos em conforto e com as temperaturas desejadas.

Os sistemas de condicionamento de ar, assim como nos casos 1 e 2 continuam apresentando os maiores valores de demanda e consumo de energia. Comparando os consumos anuais dos quartos de internação dos diferentes tipos de vidros, Figura 4.17, verificou-se que os vidros S1, S2, S3 e S4 levam a um consumo mensal e anual menor. O vidro S5 (vidro duplo comum 3 mm em esquadrias com vedação) leva ao menor consumo de energia, 19701 kWh/ano, diminuindo 1515 kWh/ano em relação ao caso 2. Isto representa uma economia anual de 7,14% em relação ao caso 2.

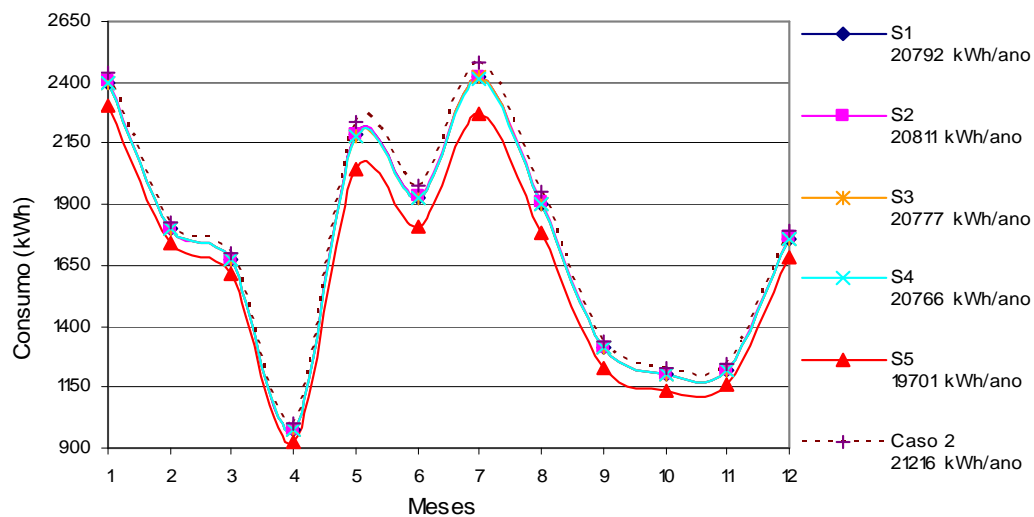


Figura 4.17. Consumo mensal de energia elétrica (diferentes tipos de vidros)

O vidro S5 possui menor demanda e consumo de energia elétrica em relação ao caso 2. Utilizando este vidro o sistema de aquecimento diminuiu 10,98%, consumindo 8155 kWh/ano e o de refrigeração diminuiu 6,64%, consumindo 7142 kWh/ano. O mês de Janeiro foi o de maior consumo, 2308 kWh e o de Abril o de menor consumo, 926 kWh, conforme mostram as Figuras 4.18, 4.19 e 4.20.

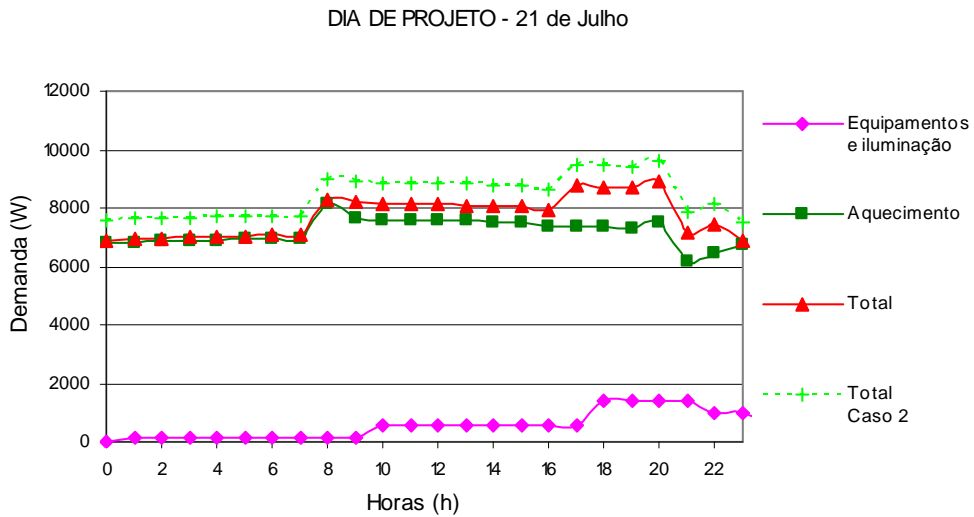


Figura 4.18. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno – S5 x Caso 2

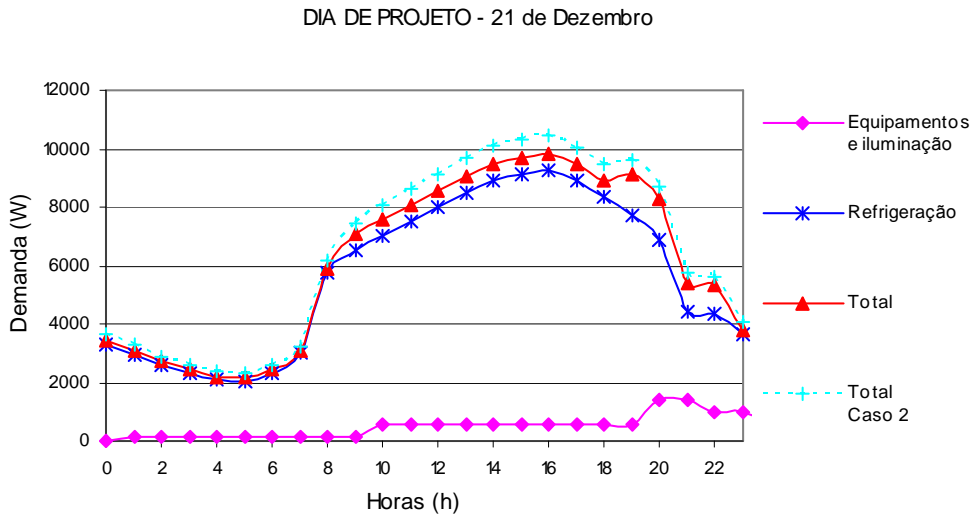


Figura 4.19. Demanda de energia elétrica de um dia de verão – S5 x Caso 2

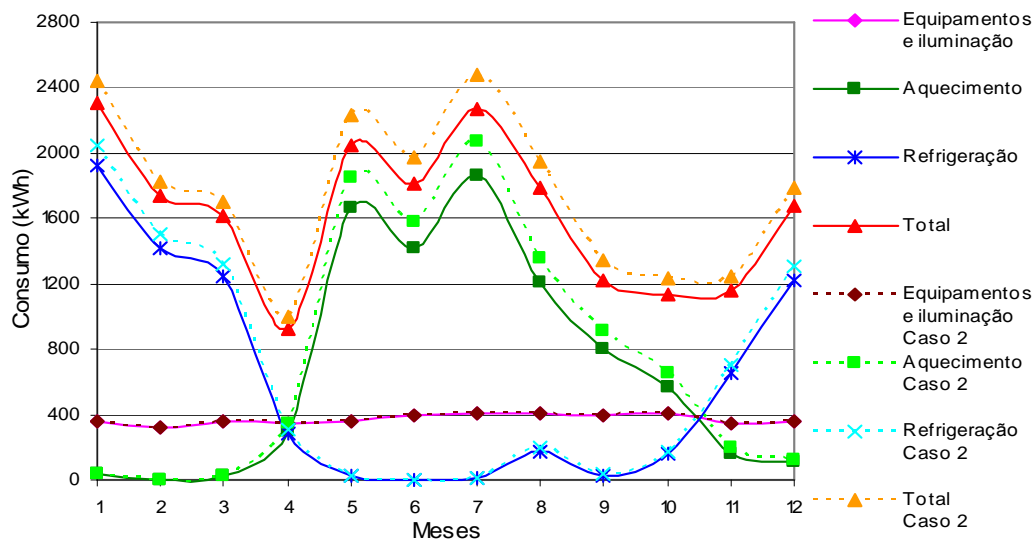


Figura 4.20. Consumo mensal de energia elétrica – S5 x Caso 2

Utilizando diferentes tipos de vidros foi possível diminuir a demanda e o consumo de energia do sistema de *HVAC*, mas existem outras medidas que proporcionam a racionalização do uso de energia elétrica, sendo estas avaliadas a seguir.

4.6. Caso 4 - Pintura Externa

Nestas simulações foram modificadas somente as cores das fachadas, as demais características termofísicas dos materiais construtivos permaneceram as mesmas da condição real (caso 1, Tabela 4.9). A cor original das fachadas é amarela e esta simulação considerou as fachadas na cor branca, verde claro e verde escuro, a única característica termofísica que modifica nestas cores é a absorvância solar (α_s), Tabela 4.14.

Tabela 4.14. Características termofísicas dos materiais construtivos (pintura externa)

	Materiais	espessura (cm)	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)	C (J/kg.K)	α_s -	ε -
PAREDE EXTERNA	Reboco branco	2	1800	1,15	1000	0,2	0,9
	Reboco verde claro	2	1800	1,15	1000	0,4	0,9
	Reboco verde escuro	2	1800	1,15	1000	0,7	0,9

A radiação solar incidente nas fachadas da edificação hospitalar, precisamente nos fechamentos opacos (paredes externas) tem uma parcela refletida e outra absorvida,

sendo esta determinada pela cor superficial. Se a absorvidade solar de um material é 0,2 significa que 20% da energia incidente sobre ele é absorvida e 80% é refletida.

4.6.1. Sistema de HVAC do Caso 4

Nestas simulações o sistema de HVAC, as programações de temperaturas e a renovação de ar permaneceram iguais às do caso 2.

O sistema de HVAC foi primeiramente calculado automaticamente pelo *EnergyPlus*, para que nas simulações posteriores fossem utilizadas as vazões de insuflamento de ar e as capacidades do sistema de HVAC necessárias para adequar cada zona nas diferentes estações do ano, proporcionando conforto térmico para os ocupantes.

- **REBOCO BRANCO**

As capacidades do sistema de HVAC foram exatamente iguais aos do caso 2, descritos na Tabela 4.11. A cor branca embora absorva menos energia da radiação solar do que a cor amarela, original do Hospital Bruno Born, não necessitou de maior capacidade no sistema de aquecimento.

- **REBOCO VERDE CLARO**

As capacidades do sistema de HVAC diferem um pouco do caso 2, descritos na Tabela 4.11. A cor verde clara por absorver mais energia da radiação solar do que a cor amarela necessitou de maior capacidade no sistema de resfriamento em alguns quartos com abertura para o leste, expostos ao sol da manhã, Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Alteração na característica do sistema de HVAC (reboco verde claro)

Zona Térmica	Modelo	REFRIGERAÇÃO		AQUECIMENTO		Vazão de ar
		Capacidade Nominal	Potência Nominal	Capacidade Nominal	Potência Nominal	
Q9	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q10	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q11	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s

- **REBOCO VERDE ESCURO**

Em alguns quartos as capacidades do sistema de *HVAC* aumentaram diferindo da Tabela 4.11. A cor verde escura absorve mais do que reflete energia da radiação solar, necessitando maior capacidade no sistema de resfriamento em alguns quartos com abertura para o leste ou que possuam duas paredes externas, Tabela 4.16

Tabela 4.16. Alteração na característica do sistema de *HVAC* (reboco verde escuro)

Zona Térmica	Modelo	REFRIGERAÇÃO		AQUECIMENTO		Vazão de ar
		Capacidade Nominal	Potência Nominal	Capacidade Nominal	Potência Nominal	
Q6	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q9	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q10	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q11	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q12	12000 Btu/h	12000 Btu/h 3516 W	1270 W	11500 Btu/h 3370 W	1270 W	0,1083 m³/s

4.6.2. Análise dos Resultados das Simulações do Caso 4

Os resultados dos índices de *PMV* e das temperaturas internas destas simulações foram praticamente os mesmos do caso 2. Os ocupantes dos quartos de internação mantiveram-se em conforto térmico, os índices de *PMV* não passaram de -0,5 e 0,5, faixa de conforto, em nenhuma zona térmica.

A cor branca é a que menos absorve energia da radiação solar. Como o maior consumo é referente ao aquecimento, utilizando esta cor não houve diminuição significativa na demanda e no consumo de energia elétrica. Utilizando cores de alta absorvância solar (α_s) no período de inverno o consumo com o sistema de aquecimento diminuiu, pois as paredes externas absorvem maior quantidade de calor solar possibilitando o aquecimento interno da edificação, entretanto o consumo no período de verão com o sistema de resfriamento aumentou demasiadamente, fazendo com que o consumo anual de energia elétrica seja maior utilizando cores de alta absorvância solar (α_s) nas paredes externas, Figura 4.21.

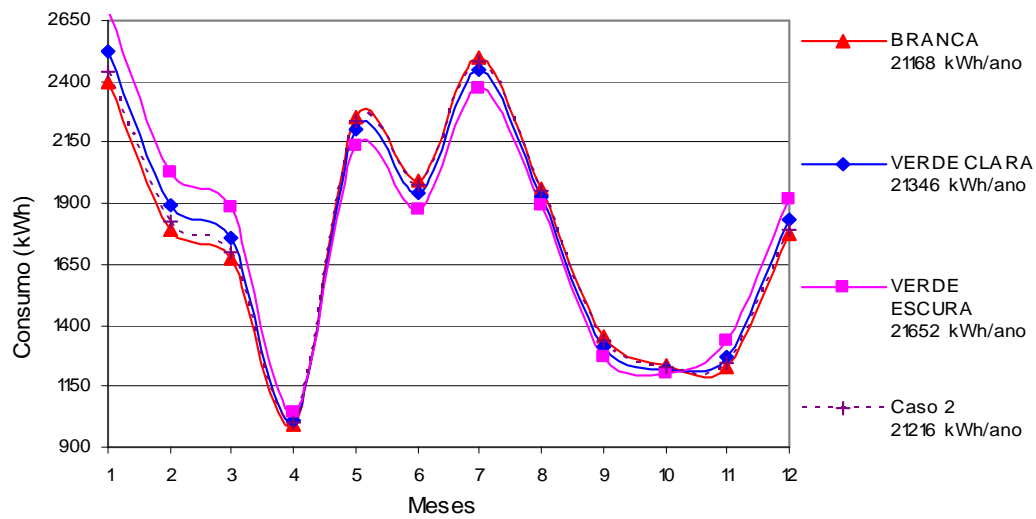


Figura 4.21. Consumo mensal de energia elétrica (diferentes cores de pintura externa)

Analisando as quatro cores da fachada (amarela, branca, verde clara e verde escura), a cor branca foi a mais viável para esta edificação em estudo. Ela apresentou o menor consumo energético, 21168 kWh/ano, 0,23% (48 kWh/ano) a menos do que no caso 2. Entretanto o consumo de aquecimento aumentou 1,67%, consumindo 9314 kWh/ano, mas a de refrigeração diminui 2,62%, consumindo 7450 kWh/ano. O mês de Julho foi o de maior consumo, 2501 kWh e o de Abril o de menor, 992 kWh. As Figuras 4.22, 4.23 referenciam os valores de demanda de um dia típico de inverno e um de verão e a Figura 4.24 os consumos mensais da utilização da fachada na cor branca comparando-a com os consumos do caso 2.

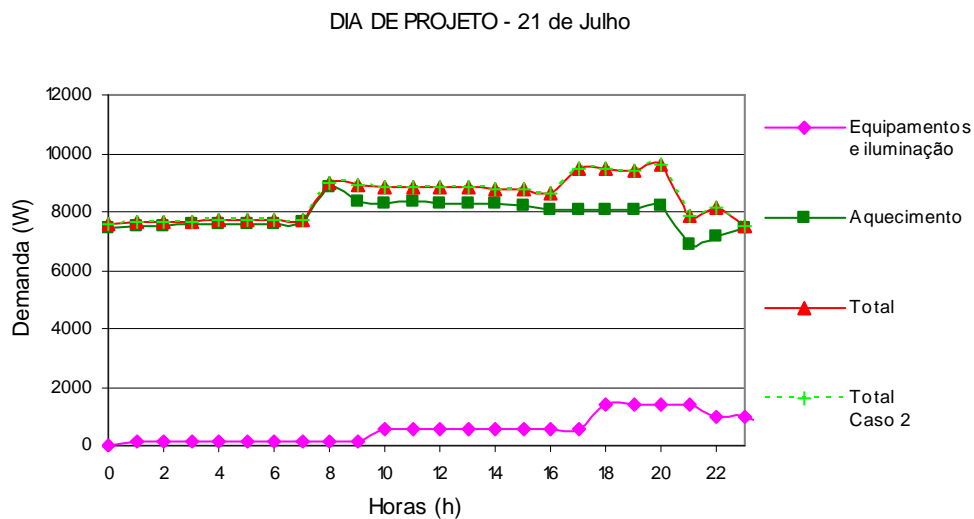


Figura 4.22. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno – Cor BRANCA x Caso 2

DIA DE PROJETO - 21 de Dezembro

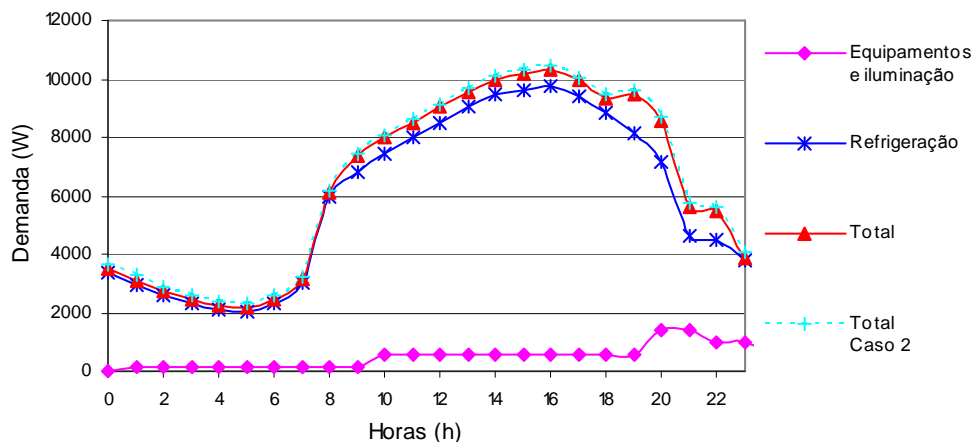


Figura 4.23. Demanda de energia elétrica de um dia de verão – Cor BRANCA x Caso 2

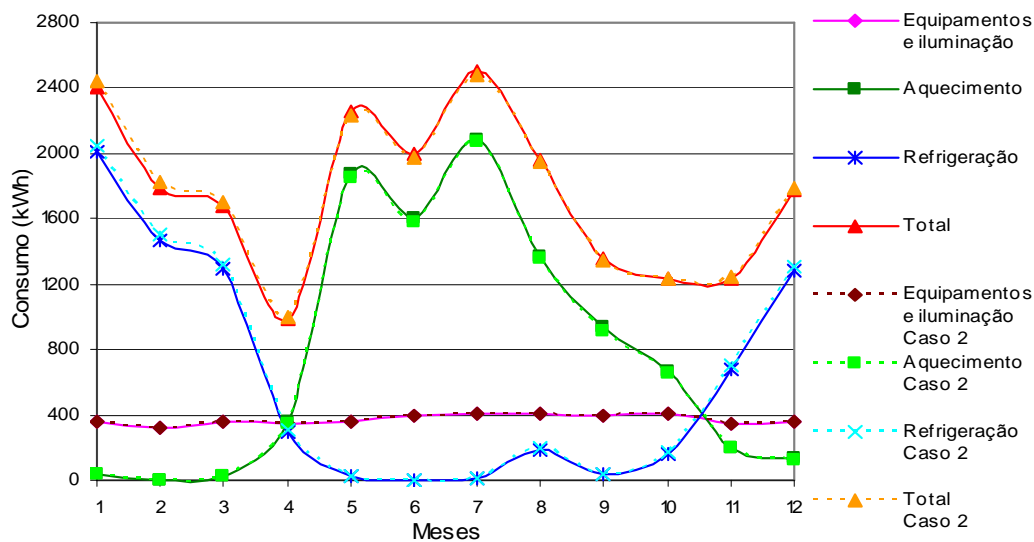


Figura 4.24. Consumo mensal de energia elétrica – Cor BRANCA x Caso 2

Pintando as fachadas externas na cor branca foi possível diminuir a demanda e o consumo de energia do sistema de resfriamento, conseqüentemente diminuindo a demanda e o consumo total da edificação hospitalar. Se esta alternativa construtiva for combinada com outras é possível diminuir ainda mais a demanda e o consumo de energia elétrica referente ao sistema de HVAC.

4.7. Caso 5 - Revestimento Interno

Nestas simulações o revestimento interno dos quartos de internação foi modificado, as demais características termofísicas dos materiais construtivos permaneceram as mesmas do caso 1, condição real (Tabela 4.9). Os revestimentos foram utilizados na parte interna das paredes externas. Foram utilizados revestimentos com baixa condutividade térmica (λ), propriedade que depende da densidade do material (ρ) e representa sua capacidade de conduzir menor ou maior quantidade de calor por unidade de tempo. Quanto maior for a condutividade térmica do material, maior será a quantidade de calor transferida entre as superfícies. Estes materiais foram utilizados a fim de dificultar os processos de trocas térmicas por condução, convecção e radiação (Tabela 4.17).

Tabela 4.17. Características termofísicas dos materiais construtivos (revestimento interno)

	Materiais	espessura (cm)	ρ (kg/m³)	λ (W/m.K)	C (J/kg.K)	α_s -	ε -
REVESTIMENTO INTERNO	Vermiculita	3	400	0,24	1000	0,85	0,9
	Gesso acartonado	1,25	750	0,35	840	0,2	0,9
	Lã de rocha	2	32	0,045	750	0,5	0,9
	Lã de vidro	2	12	0,045	700	0,5	0,9
	Poliestireno (EPS 20 mm)	2	15	0,04	1420	0,2	0,9
	Poliestireno (EPS 60 mm)	6	15	0,04	1420	0,2	0,9

4.7.1. Sistema de HVAC do Caso 5

O procedimento de cálculo do sistema de HVAC para os diferentes tipos de revestimentos internos permaneceu igual aos dos demais casos, apresentados anteriormente.

• VERMICULITA

A vermiculita é um mineral formado pela superposição de finíssimas lamínulas, que submetida a altas temperaturas sofre uma grande expansão de até quinze vezes do seu volume original. Os espaços vazios originados desta expansão volumétrica são preenchidos por ar, que conferem a ela certas características como leveza, isolamento

térmica e absorção acústica. Para utilizá-la como revestimento deve ser aplicada na proporção de 5:1 (vermiculita: cimento) com 25% de água sobre o volume vermiculita.

As capacidades dos sistemas de *HVAC* foram exatamente iguais aos do caso 2, descritos na Tabela 4.11.

- **LÃ DE ROCHA**

Este material analisado foi utilizado na espessura de 20 mm, tendo como acabamento final o gesso acartonado com espessura de 1,25 mm.

Nesta simulação a característica do sistema de *HVAC* da zona térmica Q8 modificou, diminuindo a capacidade necessária para manter os ocupantes em conforto térmico, de 9000 Btu/h para 7000 Btu/h, Tabela 4.18.

Tabela 4.18. Alteração na característica do sistema de *HVAC* (lã de rocha)

Zona Térmica	Modelo	REFRIGERAÇÃO		AQUECIMENTO		Vazão de ar
		Capacidade Nominal	Potência Nominal	Capacidade Nominal	Potência Nominal	
Q8	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s

- **LÃ DE VIDRO**

Nesta simulação a lã de vidro foi utilizada da mesma maneira que a lã de rocha, com a mesma espessura e acabamento, tendo o mesmo resultado no sistema de *HVAC*.

- **POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)**

É recomendado pelos fornecedores deste material utilizá-lo na espessura de 60 mm, porém para compará-lo com os demais foi simulado também na espessura de 20 mm. Ambos com acabamento final de gesso acartonado com espessura de 1,25 mm.

O sistema de *HVAC* teve o mesmo resultado das simulações anteriores, somente a zona térmica Q8 diminuiu a capacidade do sistema, de 9000 Btu/h para 7000 Btu/h, assim como a lã de rocha e a lã de vidro.

4.7.2. Análise dos Resultados das Simulações do Caso 5

Os resultados dos índices de *PMV* e das temperaturas internas destas simulações, assim como de todas as realizadas neste trabalho permaneceram de acordo com a NBR-6401, mostrando que os ocupantes dos quartos de internação mantiveram-se sempre em conforto térmico.

Estes resultados demonstram que através de materiais construtivos, com bom isolamento térmico, é possível manter os ocupantes em conforto térmico, diminuir a demanda e o consumo de energia nos sistemas de *HVAC*, e em alguns casos até utilizar condicionadores de ar com menor capacidade.

Os sistemas de condicionamento de ar, assim como em todos os outros casos apresenta a maior demanda e consumo de energia. Comparando os consumos dos quartos de internação, Figura 4.25, notou-se que a lã de rocha, lã de vidro e o poliestireno expandido 20 mm levam a um consumo de energia elétrica de forma semelhante, pois possuem a mesma espessura e igual ou parecida condutividade térmica (λ). A vermiculita diminuiu 1,76% o consumo anual de energia e foi a alternativa que menos economizou, o poliestireno expandido 60 mm foi a melhor alternativa, diminuindo 6,37% o consumo anual.

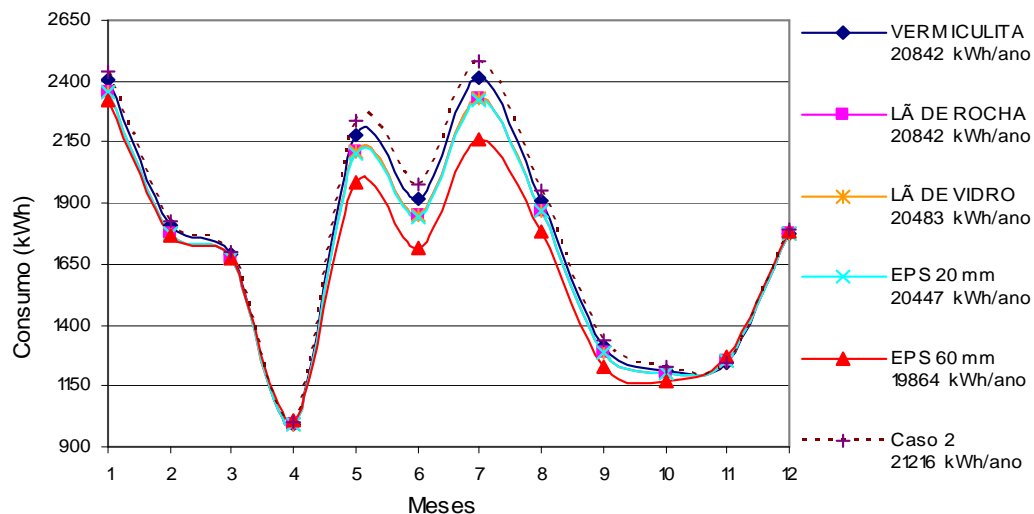


Figura 4.25. Consumo mensal de energia elétrica (diferentes revestimentos internos)

O poliestireno expandido 60 mm leva a um consumo anual de 19864 kWh, tendo o melhor desempenho térmico e energético, por ter maior espessura e conseqüentemente maior resistência térmica. As Figuras 4.26, 4.27 referem-se aos valores de demanda de um dia típico de inverno e um de verão e a Figura 4.28 aos consumos mensais da utilização desta alternativa comparando-a com os consumos do caso 2. O consumo com refrigeração comparado com o caso 2 aumentou 0,03%, consumindo 7452 kWh/ano, entretanto o sistema de aquecimento gerou uma economia anual de 10,8%, consumindo 7807 kWh/ano.

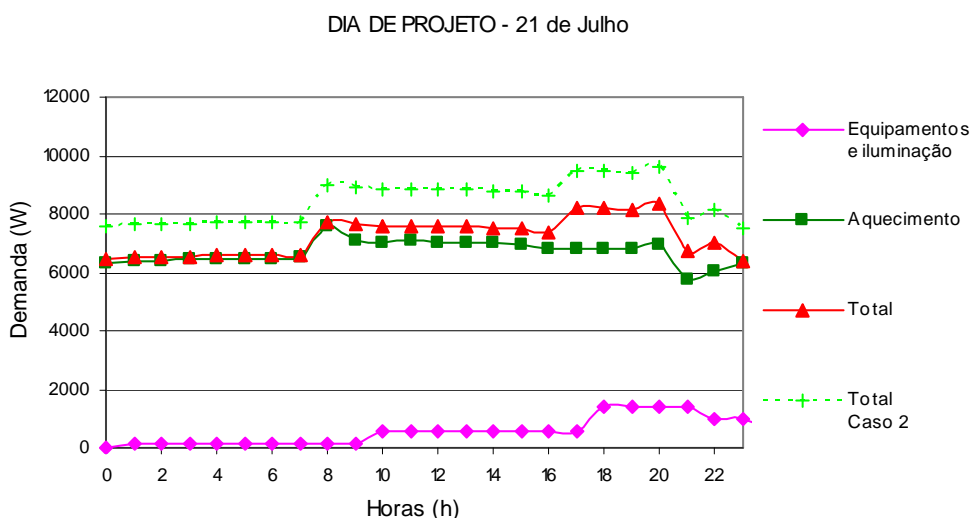


Figura 4.26. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno – EPS 60 mm x Caso 2

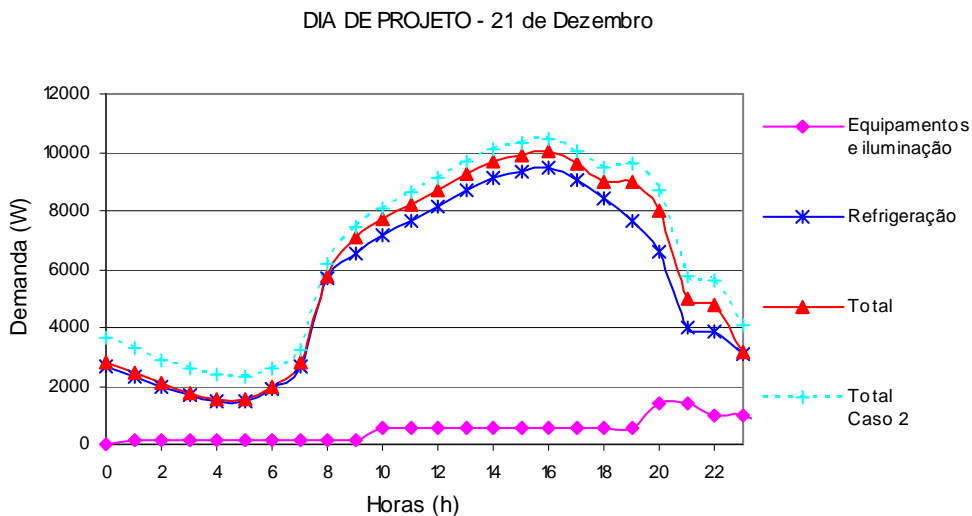


Figura 4.27. Demanda de energia elétrica de um dia de verão – EPS 60 mm x Caso 2

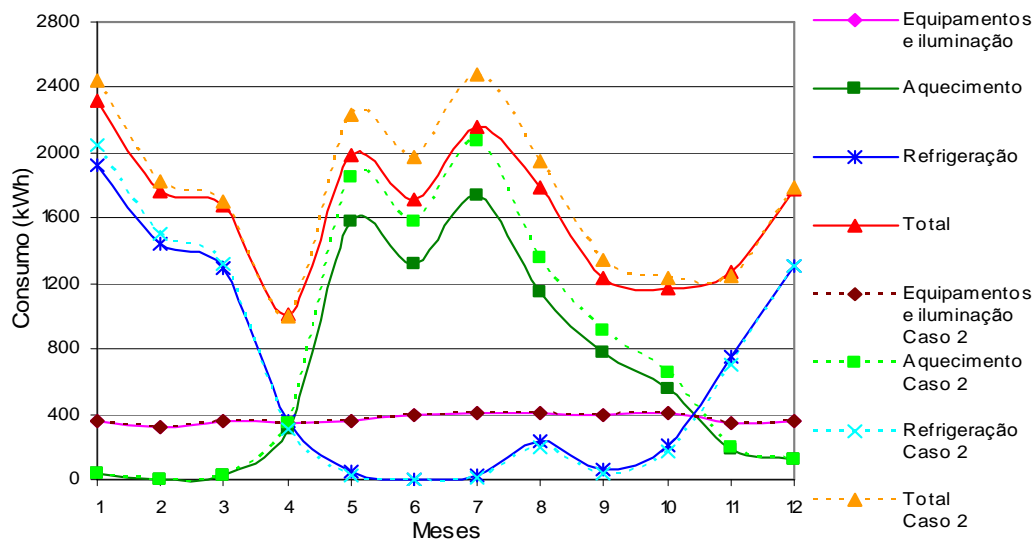


Figura 4.28. Consumo mensal de energia elétrica – EPS 60 mm x Caso 2

Devido ao elevado consumo do sistema de *HVAC* nos quartos de internação do Hospital Bruno Born foram simulados diversos parâmetros construtivos que proporcionassem racionalização no uso de energia elétrica. Unindo os melhores resultados de cada caso, foi montado o “caso ótimo”, sendo também o mais viável economicamente, pois utiliza materiais encontrados com facilidade em qualquer região do país.

4.8. Caso 6 – Caso Ótimo

O caso ótimo foi simulado utilizando vidros duplos com câmara de ar em uma esquadria com boa isolamento térmica, a constituição deste vidro é:

- VIDRO EXTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1) (Tabela 4.19).
- 20 mm DE CÂMARA DE AR
- VIDRO INTERIOR COMUM CLARO 3 mm (V1)

As paredes externas foram simuladas na cor branca, com o revestimento interno de poliestireno expandido (EPS) 60 mm.

As características destes materiais utilizados foram apresentadas nas Tabelas 4.9, 4.14 e 4.17.

4.8.1. Sistema de HVAC do Caso 6

O sistema de HVAC foi simulado da mesma maneira que todas as outras simulações, isto é, utilizando um modelo de condicionador de ar do tipo mini-split, de expansão direta e compressor rotativo em cada zona térmica, de maneira que os quartos de internação permaneçam com as temperaturas recomendadas pela NBR-6401. Para determinar a vazão de insuflamento de ar e a capacidade necessária para adequar cada zona nas diferentes estações do ano foi feita uma primeira simulação no *EnergyPlus*, após essa simulação foi realizada uma outra que apresentou os resultados descritos na Tabela 4.19. Alguns sistemas de HVAC permaneceram iguais aos do caso 2, sendo reescritos e sinalizados com um “asterisco”, os demais tiveram redução na potência nominal.

Tabela 4.19. Características dos sistemas de HVAC (caso 6)

Zona Térmica	Modelo	REFRIGERAÇÃO		AQUECIMENTO		Vazão de ar
		Capacidade Nominal	Potência Nominal	Capacidade Nominal	Potência Nominal	
Q1	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q2 *	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q3 *	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q4 *	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q5 *	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q6 *	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q7 *	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q8	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q9 *	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q10 *	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q11 *	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s
Q12 *	9000 Btu/h	9000 Btu/h 2637 W	950 W	8500 Btu/h 2491 W	950 W	0,1083 m³/s
Q13 *	7000 Btu/h	7000 Btu/h 2051 W	740 W	6500 Btu/h 1905 W	740 W	0,0889 m³/s

4.8.2. Análise dos Resultados da Simulação do Caso 6

Os índices de *PMV* e as temperaturas internas dos quartos de internação mantiveram-se em conforto térmico durante todo o tempo em que o ar condicionado encontra-se ligado.

Com esta análise é possível afirmar que empregando materiais construtivos com bom isolamento térmico, é possível diminuir as trocas térmicas do interior com o exterior no inverno e vice-versa no verão, mantendo assim os ocupantes do hospital em conforto térmico durante todas as estações do ano, além de diminuir a demanda e o consumo de energia elétrica dos sistemas de *HVAC*.

Comparando os consumos mensais do caso ótimo (caso 6) com o caso 2, Figura 4.29, constatou-se a diminuição significativa da curva de carga anual dos quartos hospitalares, gerando uma ação de Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD), denominado conservação de energia, caracterizado pelo aperfeiçoamento do uso final em processos e serviços energéticos. Nesta mesma Figura 4.29 os consumos mensais dos casos 2 e 6 são confrontados com o consumo da condição real (caso 1), situação em que o hospital utiliza ar condicionado de janela e os pacientes não se encontram em conforto durante as 24 horas do dia, nota-se que a curva de carga aumentou significativamente, mas como dito anteriormente a melhoria do conforto térmico no setor hospitalar é acompanhada com o aumento do consumo de energia.

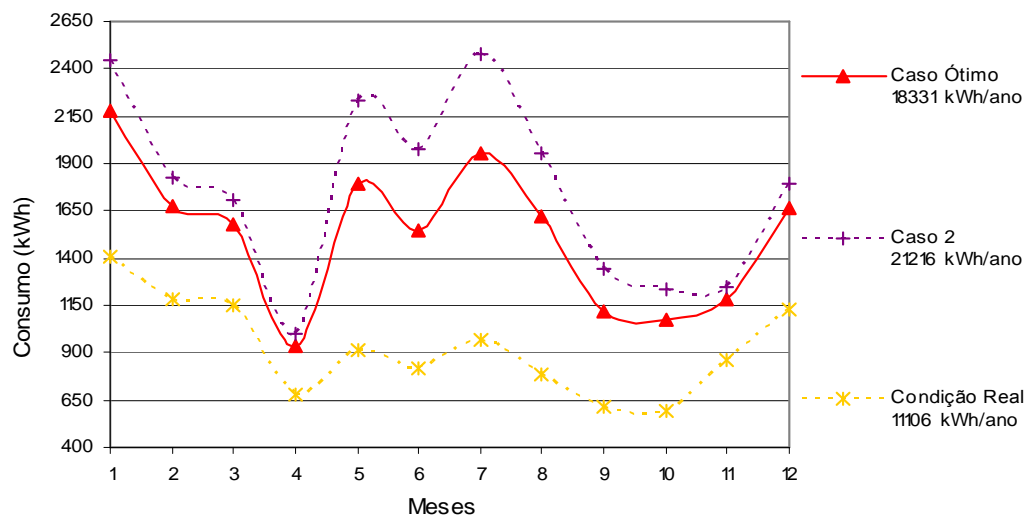


Figura 4.29. Consumo mensal de energia elétrica – Caso Ótimo x Caso 2 x Condição Real

As Figuras 4.30 e 4.31 referem-se aos valores de demanda de um dia típico de inverno e um de verão e a Figura 4.32 aos consumos mensais da utilização desta alternativa comparando-a com os consumos do caso 2. Com os gráficos destas figuras é possível observar que através da união dos melhores parâmetros construtivos (caso ótimo), o consumo anual de energia elétrica diminuiu 13,6%, consumindo 18331 kWh/ano, sendo o sistema de aquecimento responsável por 25,4% da economia anual, 6803 kWh/ano e o do sistema de refrigeração por 6,88%, 7142 kWh/ano. O mês de Janeiro foi o de maior consumo, 2181 kWh e o de Abril o de menor, 933 kWh.

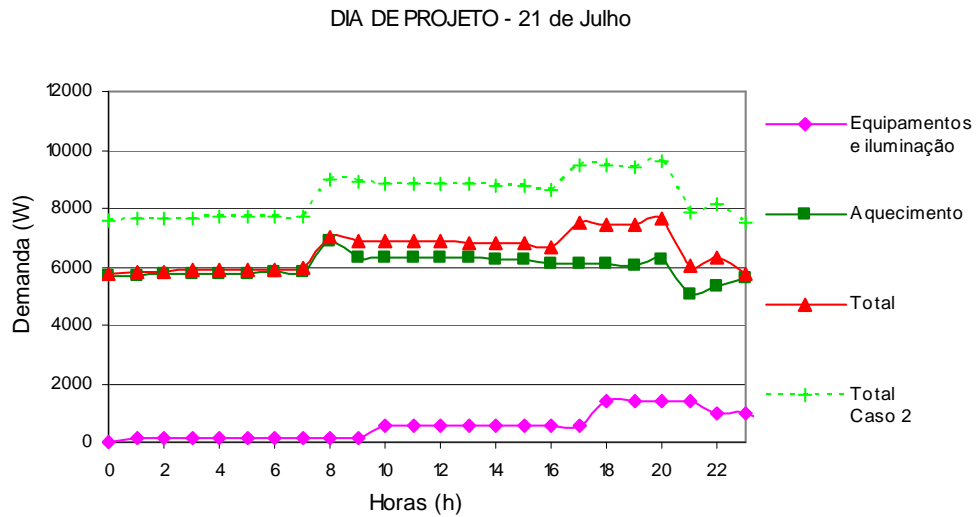


Figura 4.30. Demanda de energia elétrica de um dia de inverno – Caso Ótimo x Caso 2

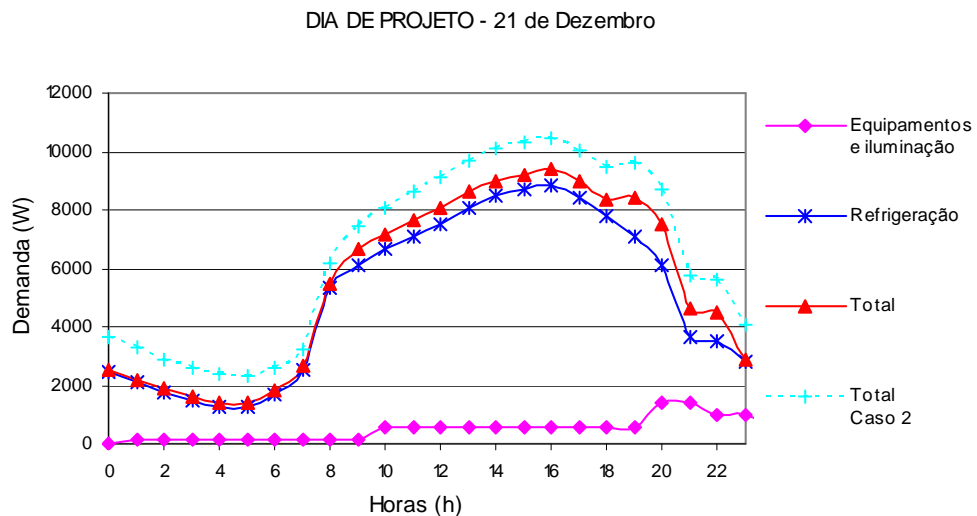


Figura 4.31. Demanda de energia elétrica de um dia de verão – Caso Ótimo x Caso 2

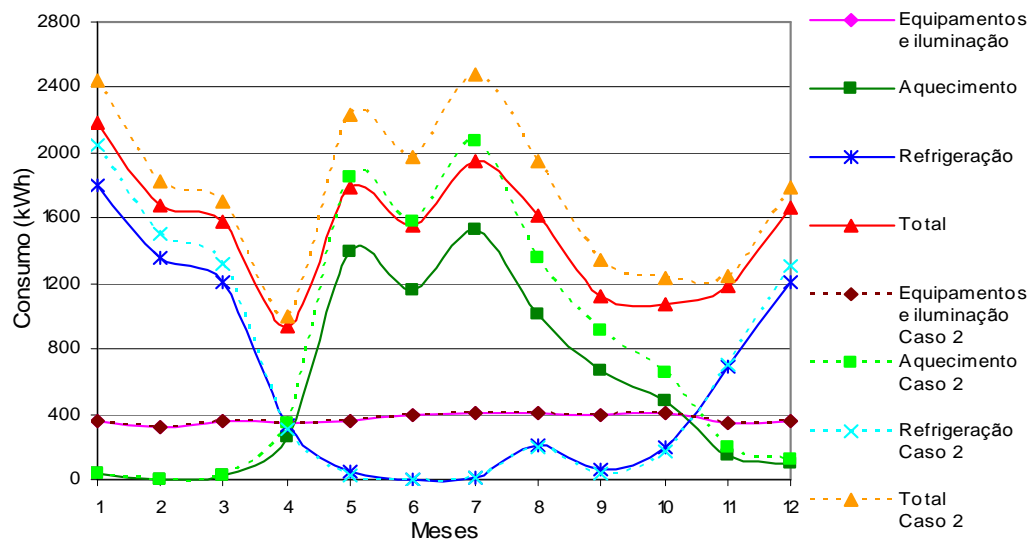


Figura 4.32. Consumo mensal de energia elétrica – Caso Ótimo x Caso 2

Com a utilização de vidros duplos com câmara de ar em uma esquadria com boa isolamento térmica, paredes externas na cor branca e revestimento interno de poliestireno expandido (EPS) 60 mm com acabamento em gesso acartonado (caso ótimo) nos 225,21 m² dos quartos de internação do Hospital Bruno Born, houve uma redução de 2,98 MWh no consumo anual, além da redução da demanda na ponta em 1,98 kW. Este menor consumo e demanda de energia foi possível devido a utilização de materiais eficientes termicamente, gerando o uso eficiente do sistema de condicionamento de ar.

Este estudo analisou alguns parâmetros construtivos e quantificou o potencial das melhores alternativas de projeto na redução de energia elétrica no sistema de HVAC, visando sempre o conforto térmico dos ocupantes dos quartos de internação da edificação hospitalar.

Capítulo 5

Análise Econômica

5.1. Introdução

O capítulo anterior apresentou as análises das simulações realizadas para diminuir o consumo energético no sistema de *HVAC*. Os 13 quartos de internação do Hospital Bruno Born, para estarem de acordo com a NBR-6401, consomem 21216 kWh/ano, porém com a utilização de materiais construtivos eficientes termicamente utilizados no caso ótimo, o consumo de energia foi reduzido para 18331 kWh/ano.

A fim de ampliar a análise foi realizado um estudo de viabilidade econômica, onde foram analisados 3 cenários, sendo eles:

- CENÁRIO 1 - Atualização e readequação da edificação hospitalar (*Retrofit*) nas esquadrias e vidros, revestimentos internos e pintura externa;
- CENÁRIO 2 - *Retrofit* nos vidros e revestimentos internos.
- CENÁRIO 3 - Utilização dos materiais construtivos eficientes termicamente desde a fase de construção.

São utilizados os mesmos parâmetros construtivos, os do caso ótimo: vidros duplos com câmara de ar em uma esquadria com boa isolamento térmica, paredes externas na cor

branca e revestimento interno de poliestireno expandido (EPS) 60 mm com gesso acartonado. As características destes materiais utilizados são apresentadas nas Tabelas 4.9, 4.14 e 4.17, do capítulo anterior.

5.2. Viabilidade Econômica

Para os cálculos da viabilidade econômica são utilizados os valores de redução de consumo aproximado de 1,83 MWh para o período seco e 2,63 MWh para o período úmido, e o valor de demanda retirada da ponta de 1,98 kW.

A quantificação dos ganhos econômicos resultantes dos 3 cenários foi realizada através do cálculo da relação custo-benefício (RCB) para a concessionária e para o cliente. A determinação do RCB é feita conforme o método descrito em [52], sendo os seguintes fatores considerados:

- O custo é o investimento total do projeto, distribuído em uma série uniforme durante a vida útil do projeto, multiplicado pelo fator de recuperação de capital (FRC), determinado pela equação:

$$FRC = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad \text{Equação 5.1}$$

onde: i - taxa de juros

n - tempo de vida útil do projeto

- O benefício é a energia conservada (MWh/ano) e a redução de ponta (kW).

O RCB da concessionária é calculado através da seguinte equação:

$$RCB = \frac{\textit{investimento total} \times FRC}{(EC \times CMG) + (RP \times CMTD)} \quad \text{Equação 5.2}$$

onde: EC - energia conservada (MWh/ano)

CMG - custo marginal de expansão de geração (R\$/MWh)

RP - redução de ponta (kW)

$CMTD$ - custo marginal de expansão de transmissão e distribuição (R\$/kW)

Para fins de análise, foram utilizados os seguintes critérios:

- Taxa de Desconto: 12% aa;
- Custo Marginal de Geração: R\$ 125,30 / MWh;
- Custo Marginal de Transmissão e Distribuição: R\$ 338,58 / kW;
- Fator de Carga Médio: 70% (relação entre a demanda média e a demanda máxima);
- Vida útil das esquadrias de vidros duplos: 30 anos;
- Vida útil dos revestimentos: 30 anos;
- Vida útil da pintura: 5 anos;
- Valor de mercado dos materiais construtivos avaliados.

O RCB do cliente é calculado utilizando os valores de tarifa conforme seu grupo tarifário. Sendo o Hospital Bruno Born um cliente horo-sazonal verde, para o cálculo da viabilidade foi levado em consideração que existem para esta modalidade duas tarifas aplicadas aos valores de consumo de energia (kWh), sendo uma aplicada ao consumo no horário de ponta e outra aplicada ao consumo no horário fora de ponta e uma única tarifa para ser aplicada à demanda de energia (kW) durante as 24 horas do dia. As tarifas de consumo de energia sofrem uma variação no período seco (maio a novembro) e no período úmido (dezembro a abril).

Para o valor total do projeto não foi agregado o custo do desenvolvimento do projeto de efficientização e da mão-de-obra para execução e acompanhamento da obra.

A relação RCB deve ser menor que 1, para que o projeto seja viável sob o aspecto da conservação de energia, o que, sob a ótica das concessionárias, significa ser mais econômico investir na ação de conservação do que na expansão do sistema [52].

• CENÁRIO 1

Analisa a viabilidade para *Retrofit* completo nos 13 quartos de internação. Neste cenário foi previsto a alteração das esquadrias e vidros, revestimentos internos e pintura externa nos 225,21 m² do estudo, partindo do pressuposto de que todas as esquadrias e vidros, revestimentos internos e pintura externa estejam em boas condições e dentro do limite da vida útil, necessitando serem trocadas somente para beneficiar a redução do consumo de energia e não para manutenção da edificação do hospital.

A Tabela 5.1 apresenta os valores referentes aos cálculos do RCB para o cliente e para a concessionária, onde é possível concluir que tanto para a concessionária quanto para o cliente o *Retrofit* não é uma opção viável financeiramente. Este fato ocorre devido ao valor investido ser maior do que o valor economizado em energia.

O estudo de viabilidade para este cenário resultou em um RCB de 2,83 para a concessionária e 1,95 para cliente e um investimento em materiais previsto de R\$ 22.884,59.

Tabela 5.1. Cálculo do RCB - Cenário 1

RCB CONCESSIONÁRIA							
Investimento (Revestimento) R\$	Investimento (Vidros Duplos) R\$	Investimento (Pintura) R\$	Investimento Total R\$	Energia Economizada MWh	Redução Demanda Ponta kW	Investimento Anualizado R\$	RCB
6.747,30	15.600,00	537,29	22.884,59	4,46	1,98	2.923,32	2,83

RCB CLIENTE							
Investimento (Revestimento) R\$	Investimento (Vidros Duplos) R\$	Investimento (Pintura) R\$	Investimento Total R\$	Energia Economizada MWh	Redução Demanda Ponta kW	Investimento Anualizado R\$	RCB
6.747,30	15.600,00	537,29	22.884,59	4,46	1,98	2.923,32	1,95

Mesmo com o RCB alto é importante salientar que o ambiente hospitalar deve ser um ambiente limpo, devendo estar sempre em manutenção. Outro aspecto que deve ser levado em consideração é que a recuperação do paciente é mais rápida se o ambiente oferecer qualidade. Devido a estes fatos foi realizado o segundo cenário, que analisa a viabilidade de um investimento apenas nos vidros e revestimentos.

• CENÁRIO 2

Neste cenário foi prevista a alteração somente dos vidros e revestimentos internos nos 225 m² do hospital, uma vez que a pintura externa e as esquadrias existentes no hospital precisam ser substituídas de todo modo, devido ao tempo de utilização e principalmente das condições não apropriadas das esquadrias tratando-se de quartos de internação particulares.

A Tabela 5.2 apresenta os valores referentes aos cálculos do RCB, onde mostram que a viabilidade para este cenário resultou em um RCB de 1,12 para a concessionária e 0,77 para o cliente e um investimento em materiais previsto de R\$ 9.347,30.

Tabela 5.2. Cálculo do RCB - Cenário 2

RCB CONCESSIONÁRIA						
Investimento (Revestimento) R\$	Investimento (Vidros Duplos) R\$	Investimento Total R\$	Energia Economizada MWh	Redução Demanda Ponta kW	Investimento anualizado R\$	RCB
6.747,30	2.600,00	9.347,30	4,46	1,98	741,59	1,12

RCB CLIENTE						
Investimento (Revestimento) R\$	Investimento (Vidros Duplos) R\$	Investimento Total R\$	Energia Economizada MWh	Redução Demanda Ponta kW	Investimento anualizado R\$	RCB
6.747,30	2.600,00	9.347,30	4,46	1,98	741,59	0,77

Neste cenário o RCB da concessionária continua não sendo viável, porém do ponto de vista do hospital o RCB possui uma mudança considerável, tornando o investimento sugerido viável. O que demonstra que se na hora da manutenção o hospital investir em materiais eficientes termicamente, proporcionará aos pacientes um alto índice de conforto térmico com um menor consumo energético.

• CENÁRIO 3

Este cenário se refere a hipótese de ser construído novamente um novo hospital, isto é, esquadrias, revestimento e pintura serem executadas utilizando materiais eficientes termicamente, desde a concepção do projeto.

Para este cenário o estudo de viabilidade resultou em um RCB positivo para ambos os lados, tanto para a concessionária, quanto para o hospital. O investimento em materiais eficientes termicamente previstos neste cenário é de R\$ 5.323,65 e o RCB da concessionária é de 0,72 e do cliente é de 0,50. A Tabela 5.3 apresenta os valores referentes aos cálculos do RCB.

Tabela 5.3. Cálculo do RCB - Cenário 3

RCB CONCESSIONÁRIA						
Investimento (Revestimento) R\$	Investimento (Vidros Duplos) R\$	Investimento Total R\$	Energia Economizada MWh	Redução Demanda Ponta kW	Investimento anualizado R\$	RCB
3.373,65	2.600,00	5.973,65	4,46	1,98	741,59	0,72

RCB CLIENTE						
Investimento (Revestimento) R\$	Investimento (Vidros Duplos) R\$	Investimento Total R\$	Energia Economizada MWh	Redução Demanda Ponta kW	Investimento anualizado R\$	RCB
3.373,65	2.600,00	5.973,65	4,46	1,98	741,59	0,50

Neste cenário 3 o RCB da concessionária e do cliente são viáveis. O que demonstra que se os materiais eficientes termicamente forem utilizados desde a concepção do projeto os investimentos são menores do que nos *Retrofits*.

Os resultados obtidos para os 3 cenários mostram que em projetos de *Retrofit* a solução de utilização de materiais construtivos eficientes termicamente não são viáveis para a concessionária, pois o custo dos investimentos é mais alto do que o custo da energia atual. Tendência que pode mudar devido o custo da energia no Brasil estar em constante crescimento. A utilização de materiais construtivos eficientes termicamente em projetos de *Retrofit* pelo lado do cliente é viável somente se a edificação estiver necessitando de manutenção, isto é, na medida que os materiais que estiverem em más condições ou inutilizáveis forem retirados, estes serão substituídos por materiais eficientes termicamente. Para ser viável a utilização de materiais construtivos eficientes termicamente tanto para a concessionária quanto para o cliente, estes materiais devem ser utilizados desde a fase inicial da construção, isto é, a hora de investir em materiais construtivos é desde o princípio.

Capítulo 6

Conclusão

Considerando a escassez de recursos hídricos e o fato do custo da energia elétrica estar em constante crescimento, todos os setores que utilizam energia de forma excessiva deveriam adotar medidas para seu uso racional. Um dos subsetores do setor comercial que mais consome energia elétrica é o hospitalar, onde existe um impacto acentuado da demanda associada ao conforto térmico, pois o consumo do sistema de ar condicionado é elevado. Este fato salienta a importância de estudar a demanda de energia elétrica em relação ao sistema de condicionamento térmico ambiental no setor hospitalar, onde o elevado consumo propicia a adoção de medidas que visam a utilização racional de energia elétrica.

Para o caso estudado do Hospital Bruno Born, onde o conforto térmico dos ocupantes só é obtido nos quartos que possuem ar condicionado especificamente nos horários em que os mesmos permanecem ligados, foram simulados casos que avaliaram as contribuições de parâmetros construtivos na redução do consumo de energia elétrica no sistema de condicionamento ambiental. As temperaturas de conforto, definidas pela NBR-6401, foram mantidas visando ao conforto térmico dos ocupantes dos quartos de internação.

Os parâmetros construtivos utilizados que apresentaram os melhores resultados foram: vidros duplos e revestimento interno de EPS 60 mm com gesso acartonado (massa térmica para aquecimento e resfriamento solar); pintura externa na cor branca

(aquecimento solar passivo); sistema de ar condicionado (aquecimento artificial). Os principais resultados das simulações que utilizaram estes parâmetros foram:

- CASO 2 – Utilizando ar condicionado durante todas as 24 horas do dia o consumo energético aumenta 91% em relação a condição real, porém a melhora significativa do conforto térmico é acompanhada de um aumento de consumo de energia elétrica.
- CASO 3 – Analisando várias configurações de vidros conclui-se que para o hospital em estudo, a estratégia de utilizar o conjunto de duas chapas de vidro de 3 mm intercaladas com câmara de ar de 20 mm apresentou o melhor resultado, pois proporcionou uma economia de energia elétrica de 7,14% ao ano em relação ao caso 2.
- CASO 4 – Analisando o efeito de quatro cores diferentes para a fachada (amarela, branca, verde clara e verde escura), conclui-se que utilizando a cor branca é possível diminuir 0,23% o consumo energético anual em relação ao caso 2. Esta diminuição ocorre devido a absorvância solar da cor branca ser menor do que a amarela (cor original), proporcionando assim um menor consumo no sistema de resfriamento. As demais cores (verde claro e verde escuro) consumiram menos energia elétrica no sistema de aquecimento, porém necessitaram maior consumo no sistema de resfriamento, o que significou maior consumo energético durante o ano.
- CASO 5 – Analisando cinco configurações de revestimento, concluiu-se que o poliestireno expandido (EPS) 60 mm com gesso acartonado possui o melhor desempenho térmico. Devido a sua espessura ele possui maior resistência térmica, gerando uma economia anual de energia elétrica de 10,8% em relação ao caso 2.
- CASO 6 – Utilizando os melhores parâmetros construtivos, resultantes dos casos 3, 4 e 5, foi possível diminuir a capacidade dos sistemas de HVAC de alguns quartos de internação e reduzir 13,6% do consumo anual de energia elétrica, sendo o sistema de aquecimento responsável por 25,4% da economia anual e o de refrigeração por 6,88%. Além da redução de 2,98 MWh no consumo anual de energia, comparando com o caso 2, a demanda retirada da ponta para o Hospital Bruno Born foi estimada em 1,98 kW.

Comparando os consumos mensais dos casos simulados (3, 4, 5 e 6) com o caso 2, concluiu-se que todos os casos geraram uma ação de Gerenciamento pelo Lado da

Demanda (GLD), denominado conservação de energia, caracterizado pelo aperfeiçoamento do uso final em processos e serviços energéticos.

Através da análise econômica do caso ótimo foi possível concluir que pelo lado da concessionária os projetos de *Retrofit* utilizando materiais construtivos eficientes termicamente não são viáveis, devido ao fato de que o custo da energia atual é mais baixo do que o custo dos investimentos com os materiais construtivos. Entretanto, para o cliente em alguns casos os projetos de *Retrofit* tornam-se viáveis. Por exemplo, se a edificação estiver necessitando de reforma para manutenção, ao invés de utilizar materiais construtivos não eficientes, fossem utilizados materiais mais eficientes termicamente.

A utilização de parâmetros construtivos eficientes termicamente torna-se viável pelo lado concessionária e do cliente quando o investimento em materiais é feito na hora da concepção e construção dos projetos arquitetônicos. Assim, o melhor momento para se utilizar e investir em materiais eficientes termicamente é na fase inicial do projeto de edificações, pois a diferença de preços de materiais eficientes e não eficientes compensa quando utilizados desde o princípio.

6.1. Sugestões de Trabalhos Futuros

- Avaliação das características dos materiais construtivos de forma mais aprofundada, através de medições físicas e observações comportamentais dos usuários da edificação hospitalar;
- Utilização e avaliação de outros materiais construtivos;
- Comparação entre duas edificações de mesma função e localização, porém uma eficiente termicamente e a outra não;
- Avaliação de projetos de eficiência energética de outros usos finais e/ou setores.
- Avaliação de películas escuras e/ou espelhadas nos vidros, principalmente em fachadas orientadas para leste e oeste;
- Avaliação de proteções solares internas, como cortinas, persianas e/ou brises solares, principalmente em fachadas orientadas para leste e oeste;
- Avaliação da combinação do uso de películas nos vidros e proteções solares internas, principalmente em fachadas orientadas para leste e oeste.

Bibliografia

- [1] FERNANDES, A. E. P., *As Torres Envidraçadas e o Consumo Energético*. II Encontro Nacional e I Encontro Latino Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, Gramado, 2001.
- [2] BALESTIERE, J. A. P., *Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor*. Editora da UFSC, Florianópolis, 2002.
- [3] KAEHLER, J. W. M., *Un outil d'Aide à la Décision et de Gestion des Actions pour la Maîtrise de la Demande d'Énergie - de la Conception au Développement*, Tese de Doutorado - Ecole Nationale Superieure des Mines, Paris, 1993.
- [4] SANTOS, R. F., *A Arquitetura e a Eficiência nos Usos Finais da Energia para o Conforto Ambiental*. Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (IEE/EP/IF/FEA) da Universidade de São Paulo. Área de Concentração: Energia. São Paulo, 2002.
- [5] HIRST, E., *Energy Efficiency in Buildings - Progress e Promise*. Jr. Editor, Washington, 1986.
- [6] PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia. *Manual de Conservação de Energia Elétrica – Prédios Públicos e Comerciais*. Eletrobrás, 1994.

- [7] PATUSCO, J. A. M. (Coord.), *Balanço Energético Nacional*, Ministério das Minas e Energia. Brasília, 2003.
- [8] MAWAKDIYE, A., *Edifícios inadequados*. Técnica: PINI, ano 5, nº. 33, São Paulo, 1998.
- [9] TOLEDO, L. M. A., *Diagnóstico Energético: Arquitetura e Eficiência Energética*. Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- [10] LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R., *Eficiência Energética na Arquitetura*. PW Editores, São Paulo, 1997.
- [11] AAE - Agência para aplicação de energia, *Manual de Administração de Energia*. São Paulo, 1997.
- [12] ISO 7730 - International Organization for Standardization. *Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. 1994.
- [13] GRADE, M., LIMA, L., *Ambientes de conforto e consumo energético*. Departamento de Engenharia Mecânica, Secção de Ambiente e Energia. Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal, 2001.
- [14] FERNANDES, A. T.; FERNANDES, M. A. V.; RIBEIRO, N. F. *Infecção Hospitalar e suas Interfaces na Área da Saúde*. Atheneu, São Paulo, 2000.
- [15] AFONSO M. M., TIPPLE A. F. V., SOUZA A. C. S., PRADO M. A., ANDERS P. S., *A qualidade do ar em ambientes hospitalares climatizados e sua influência na ocorrência de infecções*. Revista Eletrônica de Enfermagem, vol. 06, nº. 02, Goiânia, 2004.
- [16] SERRA, G., *O Instituto de Psiquiatria*. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

- [17] LINTON, P. E., *Creating a total healing environment*. Symposium on Healthcare Design, San Diego. Innovations in Healthcare Design: selected presentations from the first five Symposia on Healthcare Design. New York, 1995.
- [18] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR 6401 - Instalações centrais de ar-condicionado – Parâmetros básicos de projeto*. Rio de Janeiro, 1980.
- [19] _____, *NBR 7256 – Tratamento de ar em Estabelecimentos Assistências de Saúde (EAS) – Requisitos para Projeto e Execução das Instalações*. Rio de Janeiro, 2005.
- [20] ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Diário Oficial da União. *Resolução RDC nº. 50 de 21 de fevereiro de 2002*. Brasília, 2002.
- [21] PAPST, A. L., *Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC*. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [22] MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. E. R., *Incidência das variáveis projetivas e de construção no consumo energético dos edifícios*. Sagra-DC Luzzatto, Porto Alegre, 1992.
- [23] ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Climatic Design Information*. ASHRAE Handbook Fundamentals, Atlanta, 2001.
- [24] HENNINGER, R. H., WITTE, M. J., CRAWLEY, D. B., *Analytical and Comparative Testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test Suite*, Energy and Buildings, 2004.
- [25] PEREIRA, F. L., *Avaliação da Influência Termoenergética do Tipo de Vidro Utilizado na Envoltória de Edificações*. Monografia de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

- [26] NETO, A. G., *Melhoramento das Condições Térmicas em uma Fábrica através de um Sistema de Ventilação*. Monografia de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [27] WALLAUER, M., *Utilização do Programa EnergyPlus para a Simulação do Conforto Térmico em Edificações Populares em Quatro Capitais Brasileiras*. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [28] VERDI, R. E., *Análise Termo-Energética de um Prédio Comercial*. Monografia de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [29] GRINGS, E. T. O., *Comparação entre Resultados Computacionais e Experimentais do Comportamento Térmico de um Ambiente*. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [30] PEREIRA, F. L., *Determinação Computacional da Influência de Parâmetros Físicos no Comportamento Termoenergético de uma Edificação*. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- [31] SHIBATA, O., *Earthport Tokyo Gas Kohoku New Town Building - An Office Building with Life-cycle Energy Saving Features, ecodesign*. First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. IEEE, Tóquio, 1999.
- [32] TSUBOTA, Y., YAMAKAWA, K., *Energy Conservation in TEPCO R&D Center, ecodesign*. First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. IEEE, Tóquio, 1999.
- [33] FILIPPÍN, C. *Energy Use of Buildings in Central Argentina*. Journal of BUILDING PHYSICS, vol. 29, nº 1, Argentina, 2005.

- [34] FROTA, A. B., SCHIFFER, S. R., *Manual do Conforto Térmico*. Stúdio Nobel, São Paulo, 2003.
- [35] LAMBERTS, R., GHISI, E., ABREU, A., CARLO, J., *Apostila de Desempenho Térmico de Edificações*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [36] SATTLER, M. A., *Apostila de Conforto Ambiental*. Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- [37] ISO - International Organization for Standardization. *ISO 7243 - Hot environments: Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)*, 1989.
- [38] BEYER, P. O. *Apostila do Curso de Climatização*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- [39] FANGER P. O., *Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill, New York, 1972.
- [40] LAMBERTS, R., XAVIER, A. A. P., *Apostila de Conforto Térmico e Stress Térmico*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [41] RIVERO, R., *Acondicionamento Térmico Natural: Arquitetura e Clima*. D. C. Luzzatto Editores, Porto Alegre, 1986.
- [42] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, *Projeto 02: 135.07-001 - Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades*. Rio de Janeiro, 2003.
- [43] _____, *Projeto 02: 135.07-002 - Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do calor solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro, 2003.

- [44] COSTA, E. C., *Física aplicada à Construção: Conforto Térmico*. Edgard Blücher, São Paulo, 1974.
- [45] Disponível em <http://www.univates.br/>. Acesso em 14/02/2006.
- [46] Disponível em <http://www.labeeee.ufsc.br/downloads/>. Acesso em 14/02/2006.
- [47] Disponível em <http://www.wunderground.com>. Acesso em 14/02/2006.
- [48] GOULART, S.; BARBOSA, M.; PIETROBON, C. E.; BOGO, A.; PITTA, T., *Bioclimatologia Aplicada ao Projeto de Edificações visando o conforto térmico*. Relatório interno 02/94, NPC - UFSC, Florianópolis, 1994.
- [49] ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *Physiological Principles and Thermal Comfort*. ASHRAE Handbook Fundamentals, Atlanta, 1993.
- [50] *EnergyPlus Manual. Documentation Version 1.2.3*. The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.
- [51] ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Diário Oficial da União. *Resolução RE nº. 09 de janeiro de 2003*. Brasília, 2003.
- [52] KRAUSE, C. B., et al., *Manual de Prédios Eficientes em Energia Elétrica*. IBAM/ELETRÓBRÁS/PROCEL, Rio de Janeiro, 2002.

ANEXO 1

Projeto 02: 135.07-001 - Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1

ANEXO 2

Projeto 02: 135.07-002 - Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2

ANEXO 3

Características técnicas gerais de aparelhos

Springer

ANEXO 4

Eficiência Energética em Edificações – Pôster

ANEXO 5

Indústria da Construção Civil e Eficiência Energética – Artigo

ANEXO 6

Uso de Recursos Naturais para Redução de Consumo de Energia Elétrica em Edificações – Resumo e Artigo