

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARKUS KIRST HAHM

**Avaliação de estratégias para a redução do
consumo energético em edificações climatizadas**

São Paulo

2007

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Avaliação de estratégias para a redução do
consumo energético em edificações climatizadas**

Trabalho de conclusão de curso de
graduação do Departamento de
Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Markus Kirst Hahm

Orientador: Prof. Dr. Alberto H. Neto

Área de concentração: Engenharia
Mecânica

São Paulo

2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Hahm, Markus Kirst

Avaliação de estratégias para a redução do consumo energético em edificações climatizadas / M.K. Hahm. -- São Paulo, 2007.

53 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Consumo de energia elétrica 2.Climatização (Simulação)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todas as pessoas, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso, especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto, pela grande ajuda prestada a mim para a confecção deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é a análise e simulação de uma edificação climatizada, visando à redução do consumo energético. Como estudo de caso, foi escolhido o prédio da Nova Reitoria da USP, que conta com um sistema de climatização formado por condicionadores de ar do tipo janela e split. Primeiramente foi feita a análise de conformidade da edificação com a norma ASHRAE 90.1 e com a metodologia SIADDE e em seguida foi simulado um sistema central de condicionamento de ar em substituição aos equipamentos atuais. Foram analisadas três alternativas para a redução do consumo: a utilização de filmes reflexivos nas janelas, a ventilação noturna e o resfriamento noturno. Todas as simulações foram feitas no *software* Energy Plus, resultando em curvas de consumo energético do sistema de condicionamento de ar e de carga térmica retirada do ambiente, mostrando que a melhor alternativa é o uso de filmes reflexivos nas janelas, com uma redução média de 8,87%. Este resultado pode ser melhorado fazendo-se o uso conjunto de duas soluções, o uso de filmes reflexivos e a ventilação noturna, resultando em redução média de 8,89%.

ABSTRACT

The purpose of this project is the numerical simulation and analysis of an air conditioned building in order to choose the best alternative to energy consumption reduction. As a case study, the new building of the Administration Building in the University of São Paulo (Nova Reitoria) was chosen. At first, a conformity analysis with the SIADEE methodology and the ASHRAE 90.1 standard was made. Then the original air conditioning system, consisting of window HVACs and split type air conditioners, was replaced by a central HVAC system and then simulated using the Energy Plus software. Three alternatives for the energy use reduction were simulated: the use of reflexive coating on the windows, night ventilation and night cooling. The simulation resulted in energy use and cooling load curves, showing that the best alternative was the use of window coating, with an average annual reduction of 8,87 %. Further analysis showed that the results could be improved by linking two different solutions, namely window coating and night ventilation, resulting in an average reduction of 8,89%.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bloco K da Nova Reitoria.....	3
Figura 2: Planta de um andar típico.....	4
Figura 3: Componentes do consumo na Reitoria	5
Figura 4: Demanda média típica para o complexo da Reitoria	6
Figura 5: Tela de saída do programa Energia 1.0.....	11
Figura 6: Resultado da simulação no <i>software</i> Energia 1.0	13
Figura 8: Tela de término de simulação	15
Figura 9: Tela do IDF Editor	16
Figura 10: Tela de entrada da geometria de superfícies	19
Figura 11: Tela de definição dos horários	21
Figura 12: Tela de entrada de dados de iluminação	22
Figura 13: Tela de entrada de dados sobre pessoas	23
Figura 14: Tela de entrada de dados sobre equipamentos elétricos	23
Figura 15: Temperaturas internas e externas – dia típico de verão	25
Figura 16: Temperaturas internas e externas – dia típico de inverno.....	25
Figura 17: Carga térmica e potência do sistema para o caso-base – dia típico de verão.....	28
Figura 18: Carga térmica de aquecimento para o caso-base – dia típico de inverno	28
Figura 19: Distribuição anual da demanda elétrica do sistema de climatização – caso base...	29
Figura 20: Consumo elétrico mensal do sistema de climatização – caso base.....	29
Figura 21: Comparativo do consumo elétrico mensal – casos-base.....	31
Figura 22: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso de filme reflexivo.....	32
Figura 23: Ganhos de calor pelas paredes e janelas – dia típico de inverno	34
Figura 24: Ganhos de calor pelas paredes e janelas – dia típico de verão.....	34

Figura 25: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso de ventilação noturna	37
Figura 26: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso de resfriamento noturno	38
Figura 27: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso filme reflexivo e ventilação noturna.....	41
Figura 28: Comparativo do consumo mensal do sistema de climatização – todas as soluções	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes do perfil de consumo no complexo da Reitoria.....	4
Tabela 2: Perfil de consumo para os blocos K e L	5
Tabela 3: Potência instalada em um andar típico	7
Tabela 4: Dados introduzidos no programa Energia 1.0	10
Tabela 5: Valores de coeficiente de transmissão de calor	12
Tabela 6: Dados climáticos de São Paulo.....	18
Tabela 7: Schedule de ocupação de pessoas e uso de iluminação.....	20
Tabela 8: Schedule de funcionamento do sistema de climatização.....	20
Tabela 9: Perfil de ocupação e utilização do caso-base.....	24
Tabela 10: Distribuição de cargas térmicas para um dia típico de verão	26
Tabela 11: Parcelas de carga térmica – dia típico de verão	27
Tabela 12: Consumo mensal do sistema de climatização – filme reflexivo - em kWh.....	33
Tabela 13: Perfil de ocupação e utilização para o caso de ventilação noturna.....	36
Tabela 14: Consumo mensal do sistema de climatização – ventilação noturna - em kWh	36
Tabela 15: Perfil de ocupação e utilização para o caso de resfriamento noturno.....	38
Tabela 16: Consumo mensal do sistema de climatização – resfriamento noturno – em kWh .	39
Tabela 17: Consumo elétrico mensal do sistema de climatização – filme + ventilação noturna – em kWh	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. ESTUDO DE CASO: NOVA REITORIA DA USP.....	3
3.1 Descrição da Edificação	3
3.2 Dimensões	3
3.3 Perfil de consumo	4
3.4 Cargas internas de um andar típico	6
3.4.1 Cargas internas elétricas	6
3.4.2 Pessoas.....	7
4. METODOLOGIA.....	8
4.1 CONFORMIDADE DA EDIFICAÇÃO COM AS NORMAS.....	8
4.1.1 SIADEE.....	8
4.1.2 Norma ASHRAE 90.1	11
4.1.3 Comparação entre SIADEE e ASHRAE 90.1	12
4.2 ENERGY PLUS	14
4.2.1 EP-Launch	14
4.2.2 IDF Editor.....	15
5. ENTRADA DE DADOS NO ENERGY PLUS	17
5.1 Localização geográfica.....	17
5.2 Dados climáticos	17
5.3 Construção da edificação.....	18
5.3.1 Definição da geometria das zonas térmicas.....	18
5.3.2 Definição dos materiais	19
5.4 Horários (Schedules)	20

5.5 Ganhos internos	21
5.5.1 Iluminação	21
5.5.2 Pessoas	22
5.5.3 Equipamentos elétricos	23
6. RESULTADOS	24
6.1 Caso Base	24
6.2 Caso Base (ASHRAE 90.1)	30
6.3 Alternativa 1: Uso de filme reflexivo nas janelas	32
6.4 Alternativa 2: Ventilação Noturna	35
6.5 Alternativa 3: Resfriamento noturno da edificação	37
6.6 Alternativa 4: Filme reflexivo e ventilação noturna	40
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
9. BIBLIOGRAFIA	44

1. INTRODUÇÃO

O uso racional de energia elétrica nunca foi prioridade no Brasil até o ano de 1985 com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel). Mas somente em 2001, época dos “apagões” e do racionamento de energia, que a cultura de eficiência energética passou a ser mais valorizada.

Para o caso específico de consumo de energia em edificações, existe o programa Procel-Edifica que, entre outros, determina:

- requisitos básicos para arquitetura bioclimática (uso de energia solar e correntes de ar naturais, transparência de vidros);
- indicadores de eficiência energética em edificações;
- certificação de materiais e equipamentos;
- procedimentos para regulamentação/legislação (leis de incentivo ao uso de fontes alternativas, leis que estabelecem níveis máximos de consumo de equipamentos elétricos);

As metas principais deste programa são a redução de consumo de energia elétrica nas edificações e a estimulação de ações de consumo racional de energia.

As edificações são responsáveis por cerca de 50% do consumo de energia elétrica no Brasil. Nas edificações comerciais, verificou-se que o sistema de condicionamento de ar é responsável por cerca de 48% do consumo energético, seguido pela iluminação com 24%, elevadores e escadas rolantes com 13% e equipamentos de escritório com 15% (MAGALHÃES, 2001). Este fato mostra que a redução no consumo energético de sistemas de condicionamento de ar pode acarretar em significativa redução de custos com energia elétrica.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é o estudo, análise e simulação de uma edificação climatizada, visando à redução do consumo energético. Como estudo de caso, foi escolhido o prédio da Nova Reitoria da USP, que conta com um sistema de climatização formado por condicionadores de ar do tipo janela e split. Como estudo preliminar foi feita a análise de conformidade do edifício (nas condições atuais) com a norma ASHRAE 90.1-2001 e com o SIADEE -Sistema Integrado para Avaliação de Desempenho Energético em Edificações (ROMERO et al, 2004).

O estudo principal foi realizado através de simulações numéricas com o software Energy Plus, tendo como objetivo a determinação das condições térmicas no interior do edifício e o consumo de energia elétrica necessário para essas condições serem atingidas. O objetivo a ser atingido é o de simular diferentes estratégias para diminuir este consumo de energia elétrica e a posterior avaliação termo-econômica das mesmas. O edifício original possui sistemas de ar-condicionado do tipo janela e split, no entanto, neste trabalho, foi simulado um sistema do tipo central, que será tomado como base para as análises. Sobre o caso-base foram simuladas e analisadas as seguintes alternativas:

- utilização de filme reflexivo nas janelas
- resfriamento prévio do edifício
- ventilação noturna

3. ESTUDO DE CASO: NOVA REITORIA DA USP

3.1 Descrição da Edificação

O prédio da Nova Reitoria da Universidade de São Paulo situa-se no Campus Cidade Universitária, na Rua da Reitoria 109. O complexo é constituído por dois blocos, K e L, e um andar térreo que abrigam os gabinetes do Reitor, Vice-Reitor e pró-Reitores, além de vários departamentos administrativos. Ao todo são cerca de 3000 m² de área construída. Cada bloco é constituído por um prédio de seis andares de formato retangular, como visto na Figura 1.



Figura 1: Bloco K da Nova Reitoria

3.2 Dimensões

Cada andar típico é dividido em duas áreas distintas: um corredor não-condicionado, com 2,1m de largura, e uma área de salas condicionada, de 6,3m de largura, ambas

percorrendo o comprimento total do prédio, de 73m. A área de salas é subdividida em 12 unidades de tamanho igual. Para efeitos de simulação, a área de salas será considerada como uma única zona, de 73 x 6,3m de tamanho, pois todas serão condicionadas na mesma temperatura. Cada andar típico foi dividido em três partes iguais, chamadas de Salas da esquerda, do centro e da direita. Essa subdivisão visa à possibilidade de analisar a influência da radiação solar nas diferentes partes da edificação.

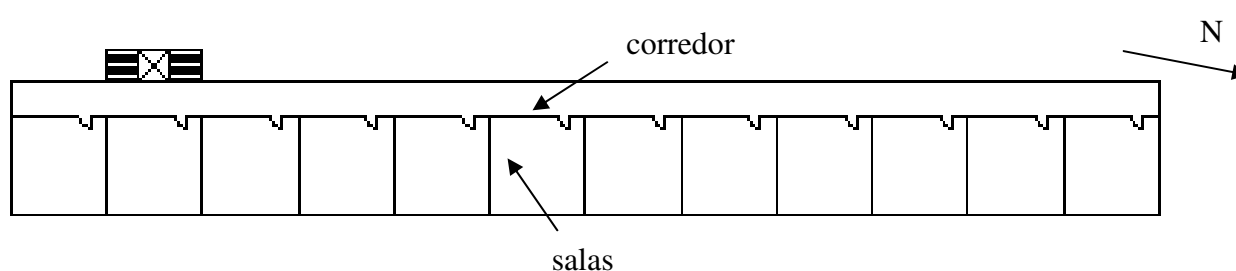


Figura 2: Planta de um andar típico

A área envidraçada corresponde a cerca de 40% da área da fachada leste, não havendo janelas nas fachadas norte e sul.

3.3 Perfil de consumo

Foram feitos levantamentos de todos os equipamentos (informática e diversos) e iluminação existentes, além de medições do consumo energético no complexo da Reitoria. Os dados coletados são os seguintes:

Tabela 1: Componentes do perfil de consumo no complexo da Reitoria

	Iluminação	Informática	Diversos	Climatização	Total
Potência (KW)	119,8	63,1	19,9	192,2	395,0
% do total	30,33	15,97	5,04	48,66	100,00

Obs: Como não há registros da potência instalada (ou em uso) de sistemas de ar condicionado, foi feito o cálculo a partir de dados de demanda máxima registrada, para o mês

de março de 2005 considerado como mês típico de verão, cujo valor é de 395 kW. A parcela do consumo referente à climatização foi avaliada simplesmente através da diferença entre a demanda máxima e as parcelas de consumo por iluminação, equipamentos de informática e diversos. Com base neste procedimento, chegou-se a conclusão que a iluminação, informática e diversos compunham cerca de 51% da demanda máxima e, portanto, a climatização ficaria com 49% do total.

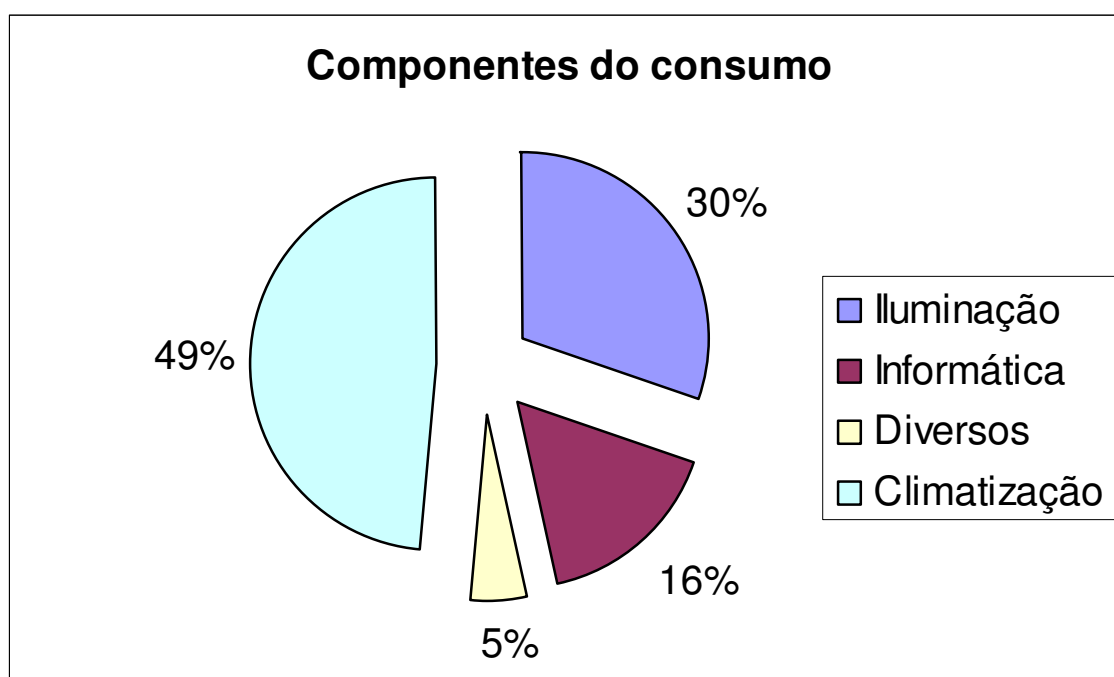


Figura 3: Componentes do consumo na Reitoria

Conhecida a contribuição aproximada do ar condicionado para a matriz energética do edifício, foi elaborada uma tabela para o perfil de consumo nos blocos K e L, excluindo o andar térreo que não faz parte do escopo deste projeto.

Tabela 2: Perfil de consumo para os blocos K e L

	Iluminação	Informática	Diversos	Climatização	Total
Potência (KW)	70,8	46,8	11,3	123,8	252,6
% do total	28,0	18,5	4,5	49,0	100,0

Os dados de demanda foram coletados por meio de sistema de medição dedicado, o SISGEN - Sistema de Gerenciamento de Energia Elétrica. O SISGEN permite a coleta, análise e monitoração de dados de consumo de energia em tempo real e através de sistemas de computador, a apresentação numérica e gráfica dos dados. O SISGEN pode monitorar, entre outros, as demandas ativa, reativa e aparente, fatores de potência, tensões de linha e de fase e correntes. O sistema é compatível com medidores de energia de todos os fabricantes e permite a monitoração remota das instalações via Internet ou rede telefônica.

A figura 8 mostra a demanda média típica para o complexo da Reitoria, coletados através do SISGEN.

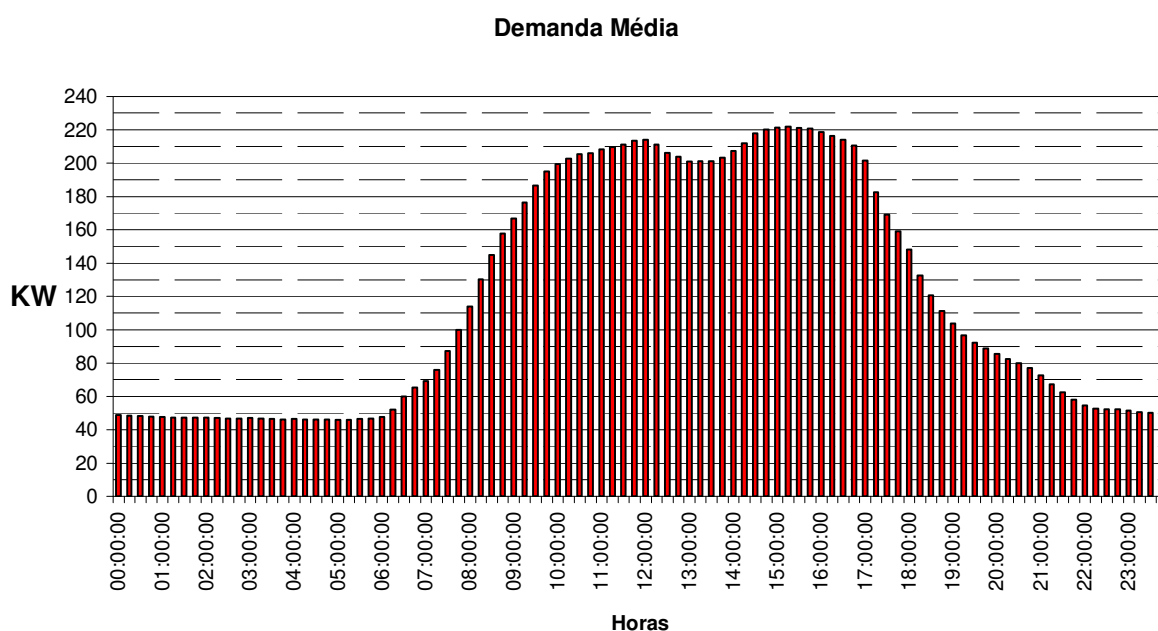


Figura 4: Demanda média típica para o complexo da Reitoria

3.4 Cargas internas de um andar típico

3.4.1 Cargas internas elétricas

Para realizar a simulação no *software* Energy Plus será modelado um andar típico. Será adotado que todos os andares dos dois blocos têm a mesma configuração e, portanto, os

valores de carga térmica e de consumo serão multiplicados por 12, que representarão os valores totais para os dois blocos analisados. Deste modo, utilizando os valores totais anteriormente avaliados, foi adotada a média aritmética de todos os componentes de consumo, resultando nos seguintes valores:

Tabela 3: Potência instalada em um andar típico

	Potência (kW)
Iluminação	5,9
Informática	3,9
Diversos	0,9

3.4.2 Pessoas

O complexo da Reitoria conta com 800 a 900 pessoas em regime fixo e 300 a 500 em regime flutuante. Em média, há 1250 pessoas no complexo, mas multiplicando por um fator 0,8, levando em conta a parcela flutuante, existem em média 1000 pessoas no complexo todo. Portanto, em cada andar típico, há cerca de 84 pessoas trabalhando diariamente.

4. METODOLOGIA

4.1 CONFORMIDADE DA EDIFICAÇÃO COM AS NORMAS

4.1.1 SIADEE

O SIADEE (ROMERO et al, 2004) é o Sistema Integrado para Avaliação de Eficiência Energética de Edificações, que avalia o desempenho energético de edificações, recomendando ou não a sua construção. O programa foi inicialmente desenvolvido para as novas construções nos campi da Universidade de São Paulo, mas pode também ser usado para projetos de reforma de edificações. O SIADEE é composto por duas partes principais: a metodologia de avaliação energética e o *software* Energia 1.0.

A metodologia de avaliação compreende todos os cálculos necessários para a avaliação do desempenho energético da edificação, como a determinação das trocas de calor pelas paredes, teto e piso, o ganho de calor pela radiação solar, entre outros. Somente são considerados os aspectos construtivos da edificação, como dimensões, orientação e materiais empregados, sem levar em conta qualquer sistema ativo de climatização.

O *software* Energia 1.0 executa os cálculos apresentados na metodologia, permitindo uma avaliação mais rápida do desempenho energético de uma edificação, servindo como ferramenta de projeto para o arquiteto e/ou engenheiro.

Para a utilização do *software* Energia 1.0, devem ser informadas as características físicas da construção, como as áreas e coeficientes de transmissão de calor de paredes, janelas, cobertura e piso. O *software* não tem uma opção clara de simulação de um edifício de vários andares, e por isso será simulado apenas um andar e o resultado será assumido como válido para a edificação completa.

Inicialmente deverão ser introduzidos no programa os dados construtivos das paredes em cada fachada, como as áreas de parede e janelas, coeficientes de transferência de calor das

paredes, pé-direito e área útil total. O coeficiente de transferência de calor, denominado coeficiente K, pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$K = \left[\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_n}{k_n} \right]^{-1} \quad (\text{W/m}^2\text{°C}) \quad (1)$$

onde: $\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$ = resistências térmicas superficiais

e_n = espessura de cada material da envolvente

k_n = condutividade térmica de cada material da envolvente

Para o caso da Nova Reitoria temos os seguintes dados construtivos:

1) Composição das paredes:

Camada	Material	Espessura [mm]	Calor Específico [J/(kg°C)]	Condutividade Térmica [W/m°C]	Densidade [kg/m³]
1 (externa)	Argamassa	20	780	0,8	1790
2	Concreto maciço	140	750	1,5	2250
3 (interna)	Argamassa	20	780	0,8	1790

2) Composição do teto e piso:

Camada	Material	Espessura [mm]	Calor Específico [J/(kg°C)]	Condutividade Térmica [W/m°C]	Densidade [kg/m³]
única	laje de concreto maciço	80	780	0,8	1790

3) Janelas

Camada	Material	Espessura [mm]	Calor Específico [J/(kg°C)]	Condutividade Térmica [W/m°C]	Densidade [kg/m³]
única	vidro simples	6	850	0,81	850

A partir destes dados são calculados os coeficientes de transferência de calor K , de acordo com a equação (1). Observa-se, neste caso, que os valores de $\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$ são conhecidos, já que são amplamente utilizados em problemas de transferência de calor. Seus valores numéricos são:

Posição da envolvente e sentido do fluxo de calor	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$ [m ² °C/W]
envolvente vertical	0,17
envolvente horizontal (fluxo ascendente)	0,14
envolvente horizontal (fluxo descendente)	0,22

Todos os dados introduzidos no programa Energia 1.0 foram tabelados a seguir:

Tabela 4: Dados introduzidos no programa Energia 1.0

Fachada	Área de parede (m ²)	Área de vidros (m ²)	K de parede (W/m ² K)	K de vidros (W/m ² K)
Norte	19	0	3,19	0
Leste	197	98	3,19	5,6
Sul	19	0	3,19	0
Oeste	197	0	3,19	0
Cobertura	511	0	3,13	0
Piso	511	0	3,13	0

Simulando estes parâmetros, chega-se à conclusão que a edificação está adaptada ao clima local, como mostrado na figura 5. Segundo a metodologia SIADDE, a edificação é eficiente do ponto de vista energético, ou seja, qualquer sistema de climatização, seja ele de resfriamento ou aquecimento, pode atingir o objetivo de fornecer conforto térmico sem desperdício de energia. Este resultado não explicita que não haja a necessidade de um sistema de climatização e, por isso, será feita posteriormente a simulação numérica para esta avaliação.

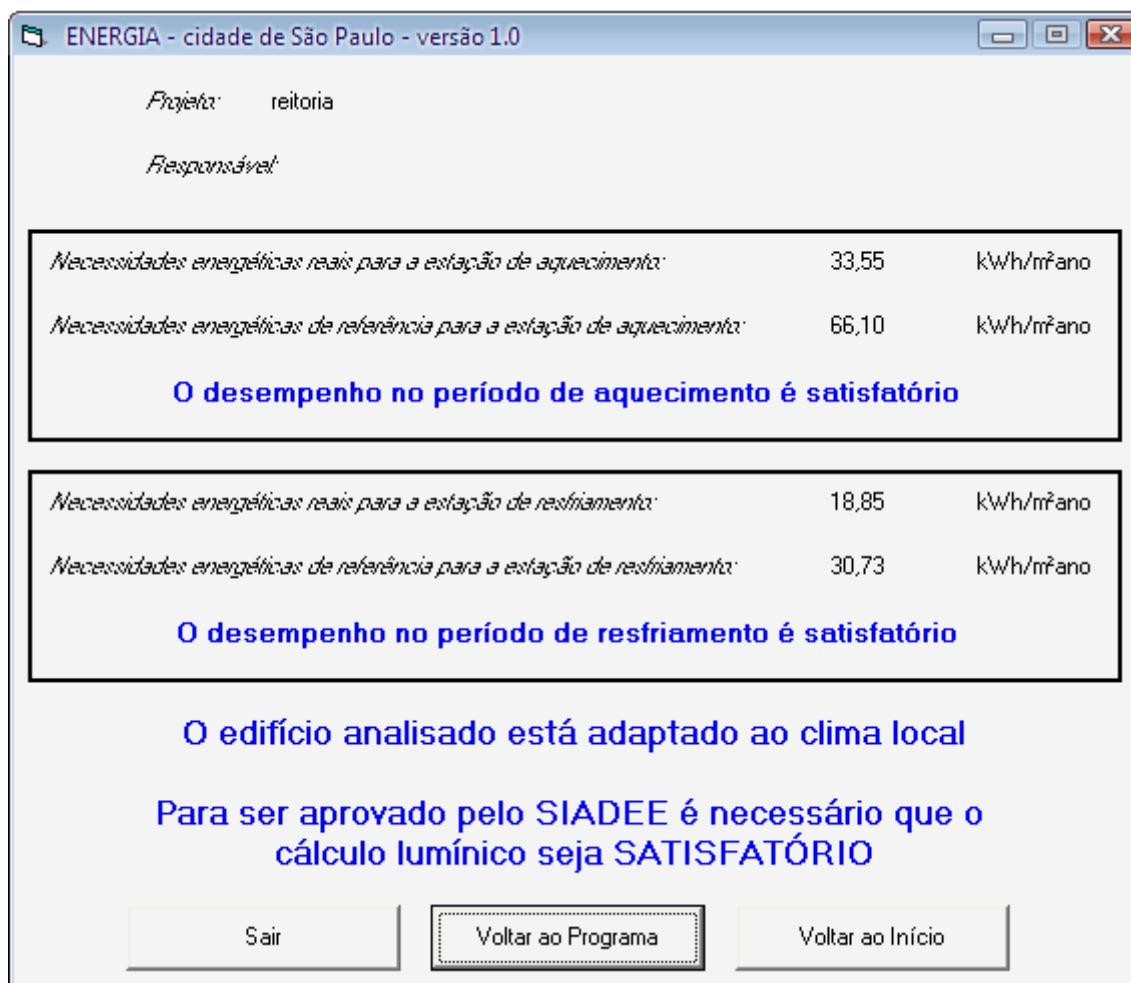


Figura 5: Tela de saída do programa Energia 1.0

4.1.2 Norma ASHRAE 90.1

A norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2001) determina valores máximos de coeficientes de transmissão de calor para paredes, coberturas, pisos e vidros, para diferentes regiões e climas do planeta.

Os valores de coeficiente de transmissão de calor (coeficiente K) da edificação são os mesmo do item anterior, ou seja, $3,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ para paredes, $5,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ para vidros e $3,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ para pisos e cobertura. A tabela 5 apresenta uma comparação entre os valores normativos máximos e os atuais:

Tabela 5: Valores de coeficiente de transmissão de calor

	Valores atuais de K (W/m ² K)	Valores normativos de K (máximos) (W/m ² K)
Paredes	3,19	3,293
Piso	3,13	0,78
Cobertura	3,13	0,192
Vidros	5,6	6,93

Para que a edificação obedeça à norma, os valores do coeficiente de transmissão de calor devem ser menores que os valores normativos. Analisando a tabela 5, vê-se que apenas os vidros e as paredes estão de acordo com as restrições. Os demais componentes da envolvente fornecem um isolamento térmico superdimensionado (no sentido de valores absolutos de K) e podem ser uma fonte de maior consumo de energia de sistemas de resfriamento, já que permitem uma maior entrada de calor por condução, aumentando a carga térmica interna e, por conseguinte, as temperaturas no interior da edificação.

Para o caso da estação de aquecimento, os valores superdimensionados para piso e cobertura podem não ser interessantes, pois não permitem um acúmulo de calor no interior da edificação, gerado pela ocupação e equipamentos elétricos, resultando no aumento da temperatura interna e na diminuição do gasto com energia de sistemas de aquecimento.

4.1.3 Comparação entre SIADEE e ASHRAE 90.1

Foi realizado o cálculo baseado na metodologia do SIADEE, utilizando-se os valores normativos de K ao invés dos valores reais da edificação. O resultado da simulação é mostrado na figura 6.

Os resultados mostram que o prédio da Nova Reitoria está adaptado ao clima local, mesmo usando os valores normativos de K. Caso a edificação tivesse sido construída de acordo com a norma ASHRAE 90.1, ela ainda assim seria eficiente energeticamente e de

acordo com o SIADEE. Analisando as necessidades energéticas para os períodos de aquecimento e resfriamento, nota-se que a norma ASHRAE 90.1 resulta em maiores consumos de energia para os dois casos, mesmo que em pequena escala. Isso mostra que tanto o atual isolamento térmico do edifício quanto o isolamento definido na norma, mesmo que muito diferentes em alguns casos (cobertura e piso), resultam em resultados satisfatórios segundo o SIADEE. Este resultado mostra que, segundo a metodologia do SIADEE, a composição de cobertura e piso não influi em larga escala nas necessidades energéticas da edificação, visto que os valores K de paredes e vidros têm valores próximos nos dois casos.

The screenshot shows a software window titled "ENERGIA - cidade de São Paulo - versão 1.0". Inside, there are fields for "Projeto:" (containing "reitoria") and "Responsável:". Below these are two tables of energy requirements.

Período	Necessidades energéticas reais	Necessidades energéticas de referência	Unidade
Aquecimento	35,85	66,10	kWh/m²ano
	O desempenho no período de aquecimento é satisfatório		
Resfriamento	19,47	30,73	kWh/m²ano
	O desempenho no período de resfriamento é satisfatório		

Below the tables, the software states: "O edifício analisado está adaptado ao clima local" and "Para ser aprovado pelo SIADEE é necessário que o cálculo lumínico seja SATISFATÓRIO". At the bottom, there are three buttons: "Sair", "Voltar ao Programa" (highlighted with a dashed border), and "Voltar ao Início".

Figura 6: Resultado da simulação no software Energia 1.0

4.2 ENERGY PLUS

O *Energy Plus* (ENERGY PLUS, 2006) é um programa de análise energética e simulação de carga térmica em edificações. Ele é um *software* livre, distribuído gratuitamente pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Baseado na descrição física do edifício pelo usuário, o programa calcula, entre outros parâmetros, a carga térmica para resfriamento e/ou de aquecimento para manter níveis adequados de conforto térmico e o consumo de energia do edifício.

O programa é baseado nos *softwares* DOE-2 e Blast, porém com inovações como opção de tomada de dados em intervalos menores que uma hora, solução baseada em balanços de energia, capacidade de solução para condução transiente de calor, modelos de conforto térmico, cálculos avançados para janelas e vidros e controles avançados de iluminação.

Além do programa de simulação em si, acompanham ainda dois utilitários para auxiliar o usuário. São eles o IDF-Editor, que auxilia na criação dos arquivos de entrada IDF (*Input Data File*), e o EP-Launch que serve como *interface* para a realização das simulações.

4.2.1 EP-Launch

O EP-Launch é um programa opcional do *Energy Plus* que permite ao usuário uma maneira mais simples de selecionar e simular os arquivos de entrada. Juntamente com os arquivos de entrada, podem-se selecionar arquivos com dados climáticos (temperatura, velocidades do vento, etc.) de diferentes localidades para o uso nas simulações. Adicionalmente, o programa pode ser usado para gerenciar um editor de texto para visualização dos arquivos de entrada e saída ou uma planilha eletrônica para visualização dos resultados, como mostrado na figura 7.

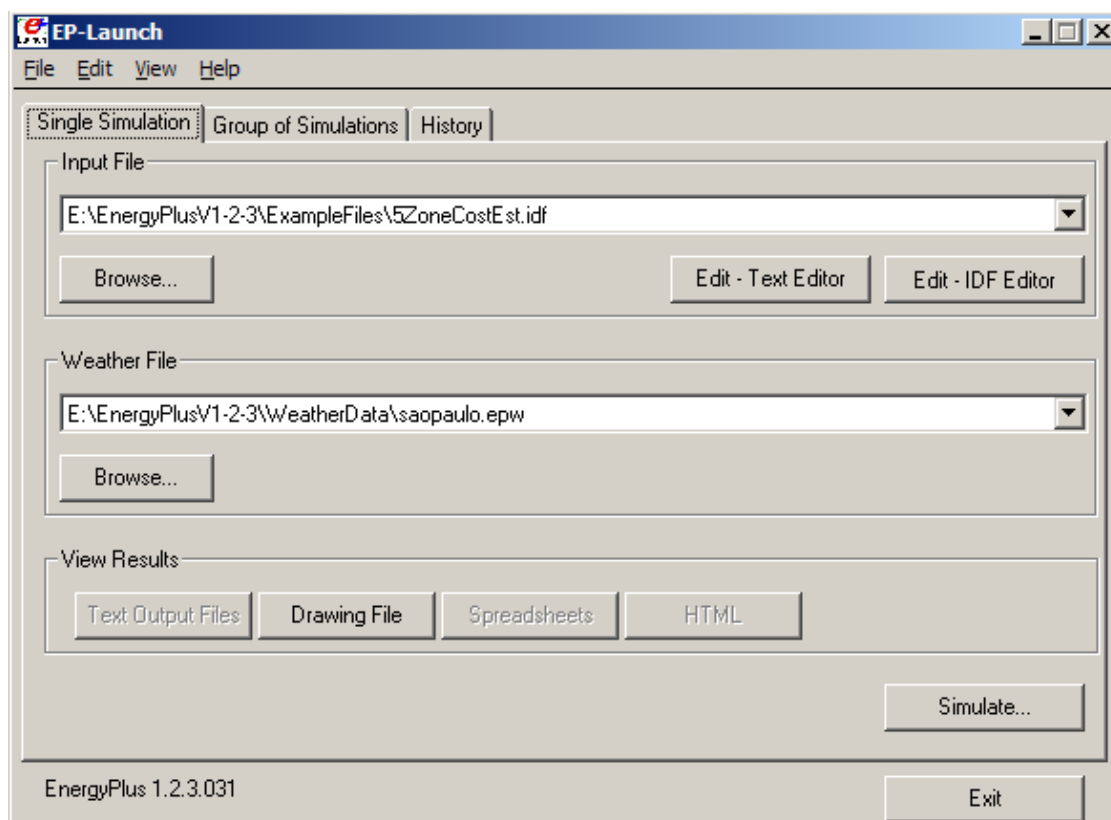


Figura 7: Tela do EP-Launch

Após o término da simulação, o programa relata a ocorrência de erro ou alertas, como mostra a figura 8. O usuário tem, então, a opção de visualizar estes alertas para localizar quaisquer erros e corrigi-los.

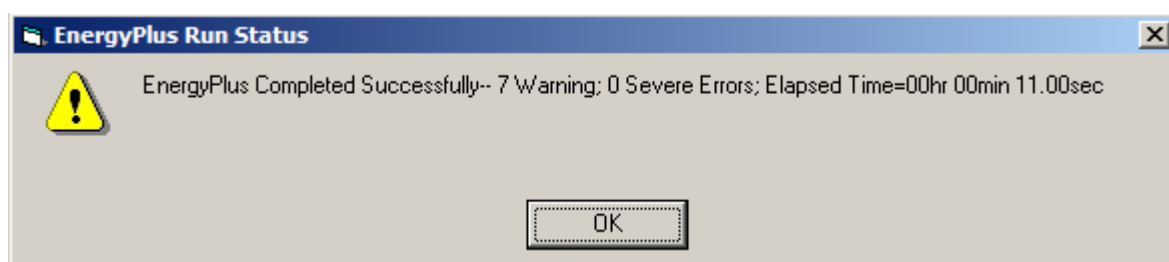


Figura 8: Tela de término de simulação

4.2.2 IDF Editor

Para facilitar a tarefa de criação e edição de arquivos de entrada (IDF) do *Energy Plus* foi criado o programa *IDF-Editor*. Com ele é possível visualizar com mais clareza todos os objetos do arquivo IDF, já que ele faz uma clara subdivisão em diferentes categorias como descrição do edifício, informações climáticas, sistemas de ar condicionado usados, tipo de

algoritmo de simulação usado, etc., como visto na figura 9. Quando uma entrada pode ter várias opções, o programa mostra uma lista com as diferentes alternativas disponíveis. Se uma entrada tem uma faixa de valores válidos, o programa mostra quais são esses valores. No caso de objetos que precisam estar ligados uns aos outros, ele mostra uma lista com tais objetos. Para melhorar ainda mais o entendimento do usuário, há comentários e explicações sobre alguns dos itens disponíveis.

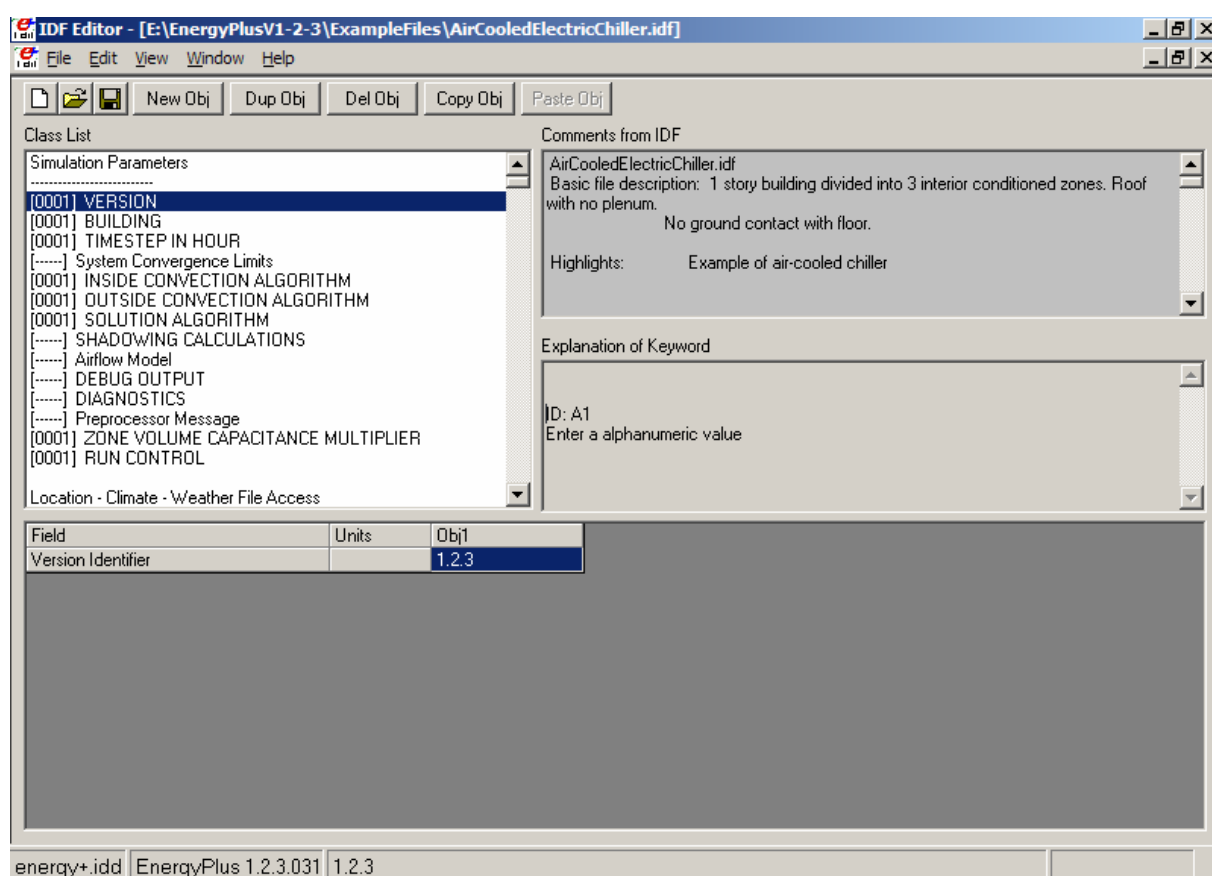


Figura 9: Tela do IDF Editor

5. ENTRADA DE DADOS NO ENERGY PLUS

5.1 Localização geográfica

A posição geográfica do edifício é muito importante na simulação, pois ela é que define a incidência solar sobre o mesmo, influenciando no cálculo das cargas térmicas. Serão introduzidos os seguintes dados, para São Paulo:

- Latitude: 23,33° S
- Longitude: 46,43° O
- GMT : -3
- Altitude: 730m

Onde: **GMT** (Greenwich Meridian Time – Horário do Meridiano de Greenwich): GMT = -3 significa um atraso de 3 horas em relação ao horário no Meridiano de Greenwich.

Como o cálculo é realizado de hora a hora, este dado permite realizar as correções em relação ao momento exato e o valor correto de incidência de raios solares e o respectivo fluxo de calor.

5.2 Dados climáticos

O *software Energy Plus* permite dois tipos de simulação: anual ou dia típico. No caso de simulação anual, deve ser fornecido ao *software* arquivo que contém diversos parâmetros climáticos como temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, etc. hora a hora ao longo de um ano. No caso de dias típicos, devem ser fornecidos alguns valores de parâmetros específicos e o *software* simulará apenas aquele dia típico. Neste último caso, para uma primeira avaliação, foram introduzidos no programa os seguintes valores:

Tabela 6: Dados climáticos de São Paulo

	Verão	Inverno
Máxima temperatura de bulbo seco (°C)	32	22
Variação de temperatura (°C)	8	5
Temperatura de bulbo úmido (°C)	25	18
Pressão barométrica (Pa)	92800	92800
Velocidade do vento (m/s)	2,4	1,8
Direção do vento (°)	150	130

5.3 Construção da edificação

5.3.1 Definição da geometria das zonas térmicas

A entrada dos dados de geometria é bastante trabalhosa e deve seguir uma sistemática rigorosa. Primeiramente, é definida uma origem cartesiana no edifício e em relação a este ponto são fornecidos os valores dos vértices de cada superfície. O procedimento deve ser repetido para cada parede, piso ou cobertura.

O edifício é dividido em zonas térmicas, ou seja, zonas que terão um perfil de temperaturas, ocupação e cargas térmicas independente das demais. No caso do edifício da Reitoria foram definidas duas zonas térmicas: a área de salas, que é condicionada, e o corredor, não condicionado.

Cada superfície de uma zona térmica deve ser definida por seus vértices, digitando-se as suas coordenadas cartesianas uma a uma, começando pela esquerda superior para quem olha de fora para dentro da zona térmica, e no sentido anti-horário. Este processo é feito para cada parede, tomando cuidado para não deixar espaços entre paredes, pois implica em erros durante a simulação.

Para cada superfície deverão também ser definidas suas características quanto à exposição solar e ao vento.

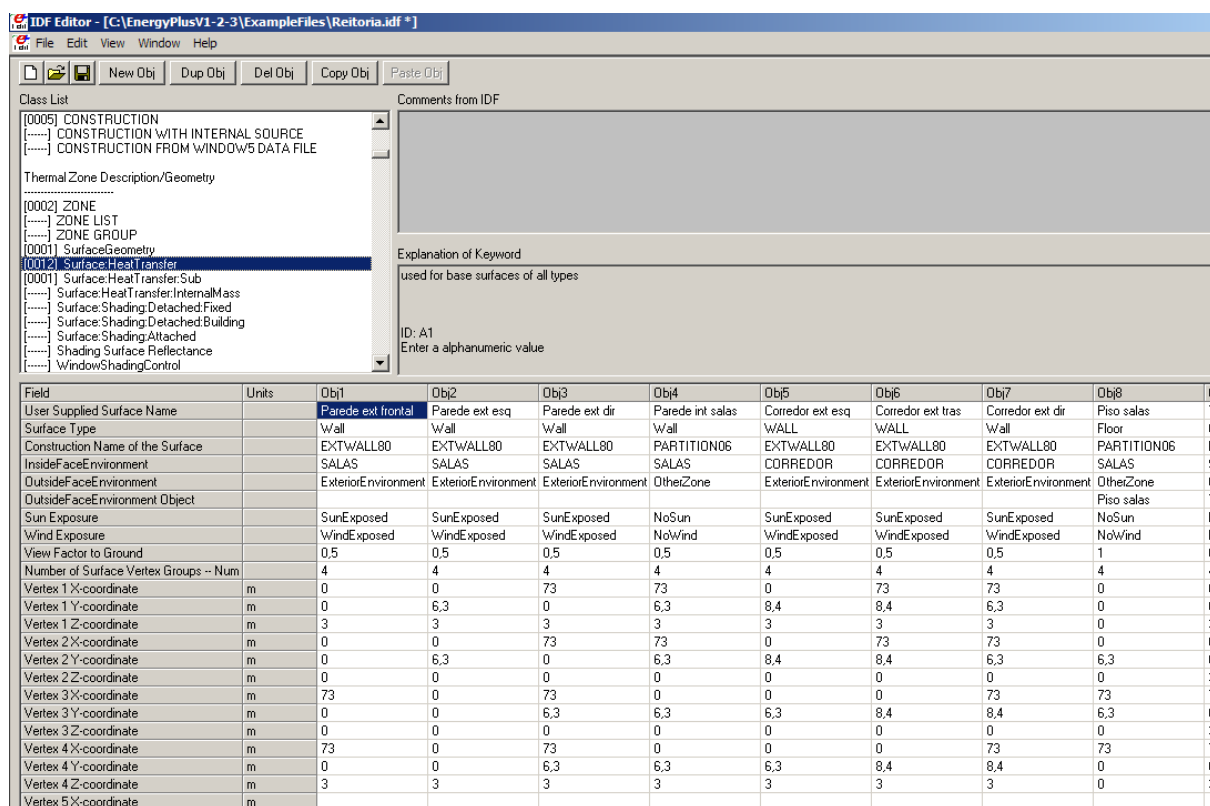


Figura 10: Tela de entrada da geometria de superfícies

Para portas e janelas o processo é similar. Deve-se primeiro selecionar a superfície onde a porta ou janela estará localizada e depois se insere os vértices seguindo a mesma metodologia descrita anteriormente.

5.3.2 Definição dos materiais

De modo a simular corretamente as transferências de calor entre as zonas e o ambiente externo, o *software Energy Plus* necessita de informações quanto às características dos materiais usados no edifício. Cada uma das partes (parede, piso, teto, etc.) deverá ser especificada quanto à sua composição física, como espessura, coeficientes de transferência de

calor, tipo de material de cada camada (se houver mais de uma), começando pela camada mais externa.

Definidos os materiais, associam-se cada um destes materiais com a sua superfície correspondente, definida na seção de geometria mostrada anteriormente. Foi definida, como mostrado na seção 4.1.1, uma composição de paredes com coeficiente global de transferência de calor da ordem de $3,19 \text{ W/m}^2\text{K}$, e piso e cobertura da ordem de $3,13 \text{ W/m}^2\text{K}$.

5.4 Horários (Schedules)

Nesta seção do *Energy Plus* são definidas diversas distribuições horárias de parâmetros relacionados com o perfil de ocupação e/ou perfil de controle dos diversos sistemas.

A tabela 7 mostra um exemplo *Schedule* de distribuição de ocupação de pessoas e uso de iluminação.

Tabela 7: Schedule de ocupação de pessoas e uso de iluminação

Horário	0:00 – 8:00	8:00 – 18:00	18:00-24:00
Ocupação de pessoas (%)	0	100	20
Uso de iluminação (%)	5	100	5

Os perfis de controle dos sistemas determinam os horários de funcionamento dos equipamentos de climatização (“chiller”, “fancoil”, bombas e ventiladores), bem como os *set-points* de temperatura desejados.

Tabela 8: Schedule de funcionamento do sistema de climatização

Horário	0:00 – 8:00	8:00 – 18:00	18:00-24:00
Funcionamento do sistema (%)	0	100	0
<i>Set-point</i> de temperatura (°C)	26	24	26

A Figura 11 mostra a tela de definição dos *schedules*.

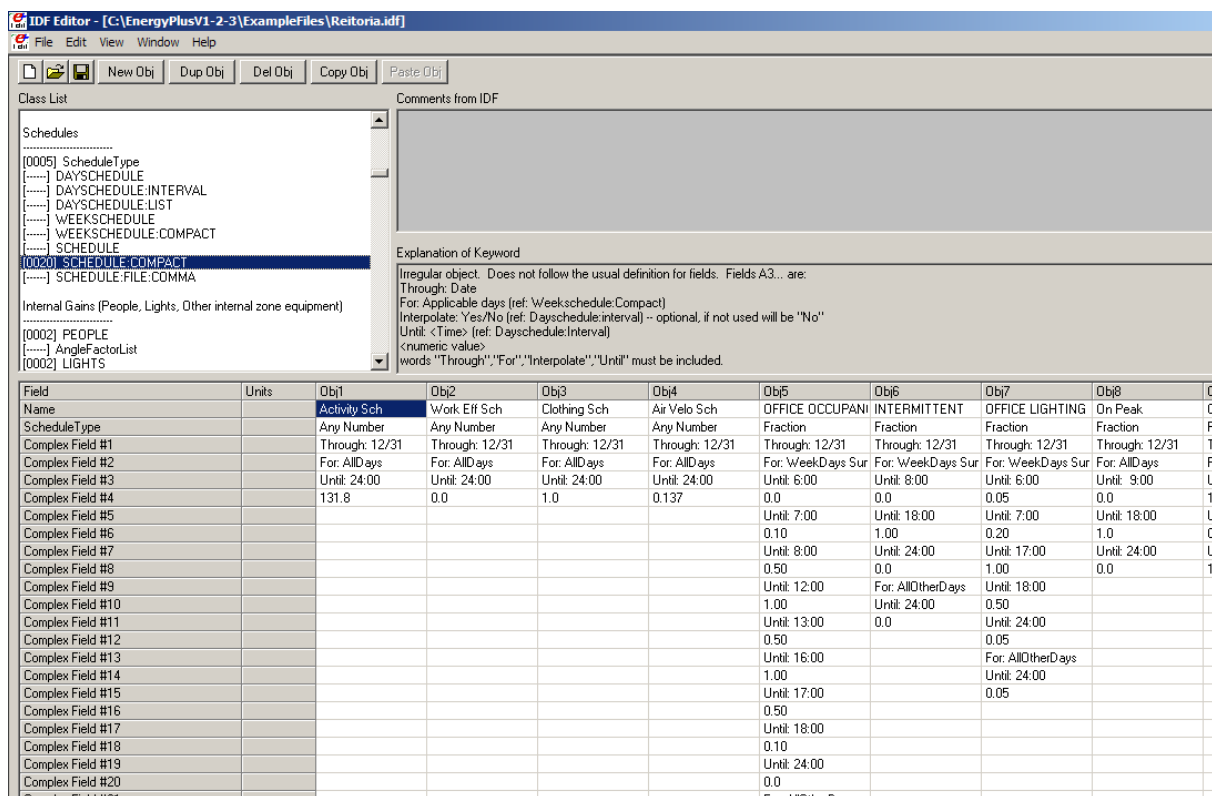


Figura 11: Tela de definição dos horários

5.5 Ganhos internos

Há três ganhos energéticos internos principais presentes nos prédios da Reitoria: pessoas, iluminação e equipamentos elétricos.

5.5.1 Iluminação

O programa recebe os dados de iluminação através da potência instalada e seus horários de funcionamento, como mostra a Figura 12.

The screenshot shows the 'IDF Editor' window with the 'Class List' on the left and a data entry table at the bottom. The 'LIGHTS' class is selected in the list. The table below contains the following data:

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Iluminação SALAS	Iluminação Corredor
Zone Name		SALAS	CORREDOR
SCHEDULE Name		OFFICE LIGHTING	OFFICE LIGHTING
Design Level	W	4500	1400
Return Air Fraction		0	0
Fraction Radiant		0,2	0,2
Fraction Visible		0,2	0,2
Fraction Replaceable		0	0
LightsEndUseKey		GeneralLights	GeneralLights
Return Air Fraction Is Calculated from Plc			
Coefficient #1 of Equation for Return Air f			
Coefficient #2 of Equation for Return Air f	1/K		

Figura 12: Tela de entrada de dados de iluminação

5.5.2 Pessoas

Aqui é introduzida a quantidade de pessoas ocupando certo ambiente. Informa-se o número máximo de pessoas ao programa e, através dos *schedules* pré-determinados, o *software* pode avaliar a carga térmica gerada por elas em cada horário. Além da quantidade de pessoas, também deve ser informado o tipo de trabalho realizado, que influenciará a quantidade de calor gerado pelo corpo humano e, por conseguinte, a carga térmica no ambiente. A figura 13 mostra a tela de entrada de dados sobre pessoas.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		SALAS	CORREDOR
Zone Name		SALAS	CORREDOR
Number of People		39	0
Number of People SCHEDULE Name (re		OFFICE OCCUPAN	INTERMITTENT
Fraction Radiant		0.3	0.3
Activity level SCHEDULE Name (units W		Activity Sch	INTERMITTENT
MRT Calculation Type		zoneaveraged	zoneaveraged
Surface Name/Angle Factor List Name			
Work Efficiency SCHEDULE Name (0.0-		Work Eff Sch	Work Eff Sch
Clothing Insulation SCHEDULE Name (re		Clothing Sch	Clothing Sch
Air Velocity SCHEDULE Name (units m/s		Air Velo Sch	Air Velo Sch
Thermal Comfort Report Type #1		FANGER	FANGER
Thermal Comfort Report Type #2			
Thermal Comfort Report Type #3			
user specified sensible fraction			

Figura 13: Tela de entrada de dados sobre pessoas

5.5.3 Equipamentos elétricos

Analogamente à iluminação, os equipamentos elétricos são informados ao programa pela sua potência nominal e seus horários de funcionamento, como visto na figura 14.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Equipamentos Salas	Equipamentos corre
Zone Name		SALAS	CORREDOR
SCHEDULE Name		INTERMITTENT	INTERMITTENT
Design Level	W	3900	0
Fraction Latent		0	0
Fraction Radiant		0.3	0.3
Fraction Lost		0	0
End-Use Category		0	0

Figura 14: Tela de entrada de dados sobre equipamentos elétricos

6. RESULTADOS

6.1 Caso Base

A fim de realizar um estudo comparativo de diversas alternativas de solução para a redução do consumo energético no prédio da Nova Reitoria, foi definido um caso-base para a simulação. A simulação deste caso-base fornecerá valores de consumo energético, cargas térmicas e temperaturas, entre outros, que serão usados como base de comparação. As alternativas de solução sugeridas serão montadas em cima deste caso-base e seus resultados de simulação comparados.

Os parâmetros do caso-base são mostrados na tabela 9:

Tabela 9: Perfil de ocupação e utilização do caso-base

Horário	0:00 – 8:00	8:00 – 18:00	18:00-24:00
Ocupação de pessoas (%)	0	100	0
Uso de iluminação (%)	0	100	0
Uso de equipamentos elétricos (%)	0	100	0
Sistema de climatização	Desligado	Ligado	Desligado

Primeiramente foi simulado o caso-base sem qualquer sistema de condicionamento de ar, a fim de mostrar a necessidade da implantação de um sistema de climatização. As temperaturas no interior da edificação para os dias típicos de verão e inverno são mostrados nas figuras 15 e 16, respectivamente.

Analisando as temperaturas internas à edificação, nota-se que elas estão, durante boa parte do tempo, acima do nível de conforto térmico, com temperaturas maiores que 30°C no verão. A implantação de um sistema de climatização é necessária para atingir o conforto térmico e o escopo deste projeto é justificável.

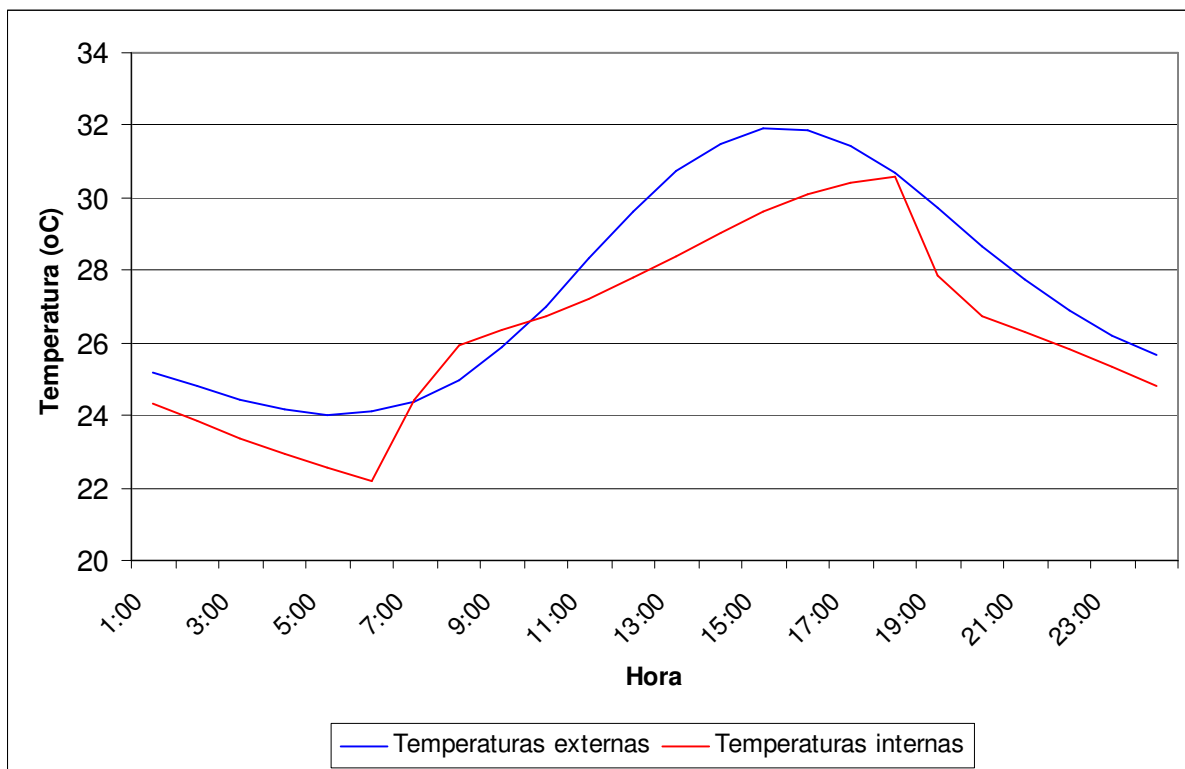


Figura 15: Temperaturas internas e externas – dia típico de verão

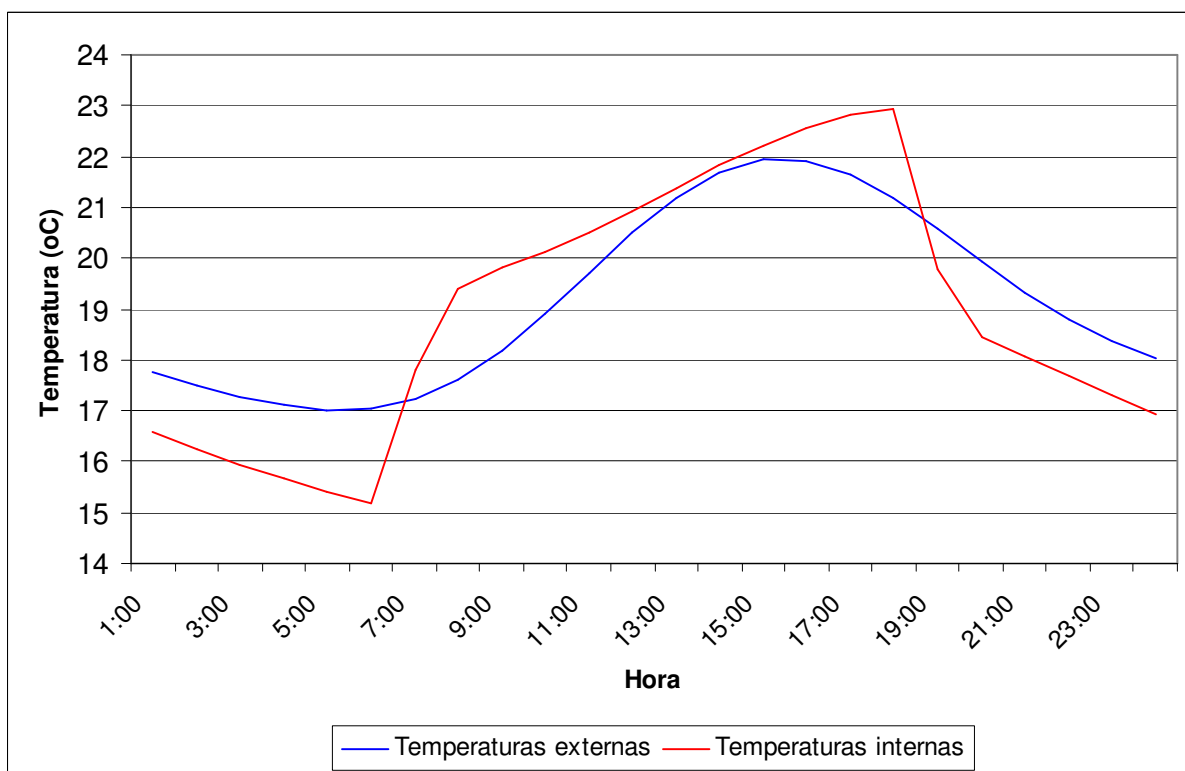


Figura 16: Temperaturas internas e externas – dia típico de inverno

O sistema de climatização foi simulado utilizando a opção Purchased Air, disponível no Energy Plus. Esta opção permite a implantação de um sistema de climatização ideal, de forma mais simples, sem a necessidade de definir circuitos de ar e de água. O sistema (COP=3,5) foi definido de forma a fornecer ar frio a 14°C com umidade relativa de 40%, de modo a retirar a carga térmica do ambiente, mantendo a temperatura interna em torno do *set-point* de 24°C. Há ainda a possibilidade do insuflamento de ar quente, promovendo o aquecimento do ambiente em casos de dias frios, mas essa opção não foi implantada, já que a edificação contará somente com sistemas de resfriamento de ar.

Como próximo passo foi feita a avaliação da contribuição das diversas fontes de calor (pessoas, equipamentos elétricos, iluminação e fontes externas) para a carga térmica total. Foi tomado como base para o levantamento da distribuição de carga térmica o dia típico de verão, que conta com maior influência de fontes externas, devido às maiores temperaturas externas e incidência de raios solares. A Tabela 10 mostra as parcelas de cargas térmicas fornecidas pelo *software* Energy Plus.

Tabela 10: Distribuição de cargas térmicas para um dia típico de verão

Horário	Pessoas (W)	Iluminação (W)	Equipamentos (W)	Carga Total (W)
08:00	11071,2	5910	4800	33570
09:00	11071,2	5910	4800	26936
10:00	11071,2	5910	4800	29589
11:00	11071,2	5910	4800	32663
12:00	11071,2	5910	4800	36056
13:00	11071,2	5910	4800	39154
14:00	11071,2	5910	4800	41966
15:00	11071,2	5910	4800	44221
16:00	11071,2	5910	4800	45608
17:00	11071,2	5910	4800	46112
18:00	11071,2	5910	4800	45875

A parcela referente às fontes externas pode ser calculada pela diferença entre as contribuições devido à pessoas, iluminação e equipamentos e a carga térmica total. Desse modo, temos a seguinte distribuição de cargas térmicas:

Tabela 11: Parcelas de carga térmica – dia típico de verão

Horário	Pessoas (W)	Iluminação (W)	Equipamentos (W)	Fontes externas (W)	Carga Total (W)
08:00	11071,2	5910	4800	11272	33053
09:00	11071,2	5910	4800	5076	26857
10:00	11071,2	5910	4800	7850	29631
11:00	11071,2	5910	4800	11057	32838
12:00	11071,2	5910	4800	14591	36372
13:00	11071,2	5910	4800	17807	39588
14:00	11071,2	5910	4800	20693	42474
15:00	11071,2	5910	4800	22961	44742
16:00	11071,2	5910	4800	24287	46068
17:00	11071,2	5910	4800	24717	46498
18:00	11071,2	5910	4800	24377	46159
% do total (18:00)	24,0	12,8	10,4	52,8	100

Obs: Foi escolhido o horário das 18:00 para a avaliação percentual da contribuição das cargas térmicas, pois nesse horário ocorria a maior carga total e por isso, a maior influência de fatores externos, já que as cargas devido à pessoas, iluminação e equipamentos são constantes durante o dia.

A simulação para os dias típicos de verão e inverno forneceu as curvas de carga térmica e demanda elétrica do sistema de climatização, mostradas nas figuras 17 e 18.

A figura 19 mostra a curva de demanda elétrica do sistema para a simulação anual de um andar típico da edificação. A distribuição tem o comportamento esperado, com valores mais altos nos meses de primavera e verão (novembro a março) e mais baixos durante o inverno (junho a agosto).

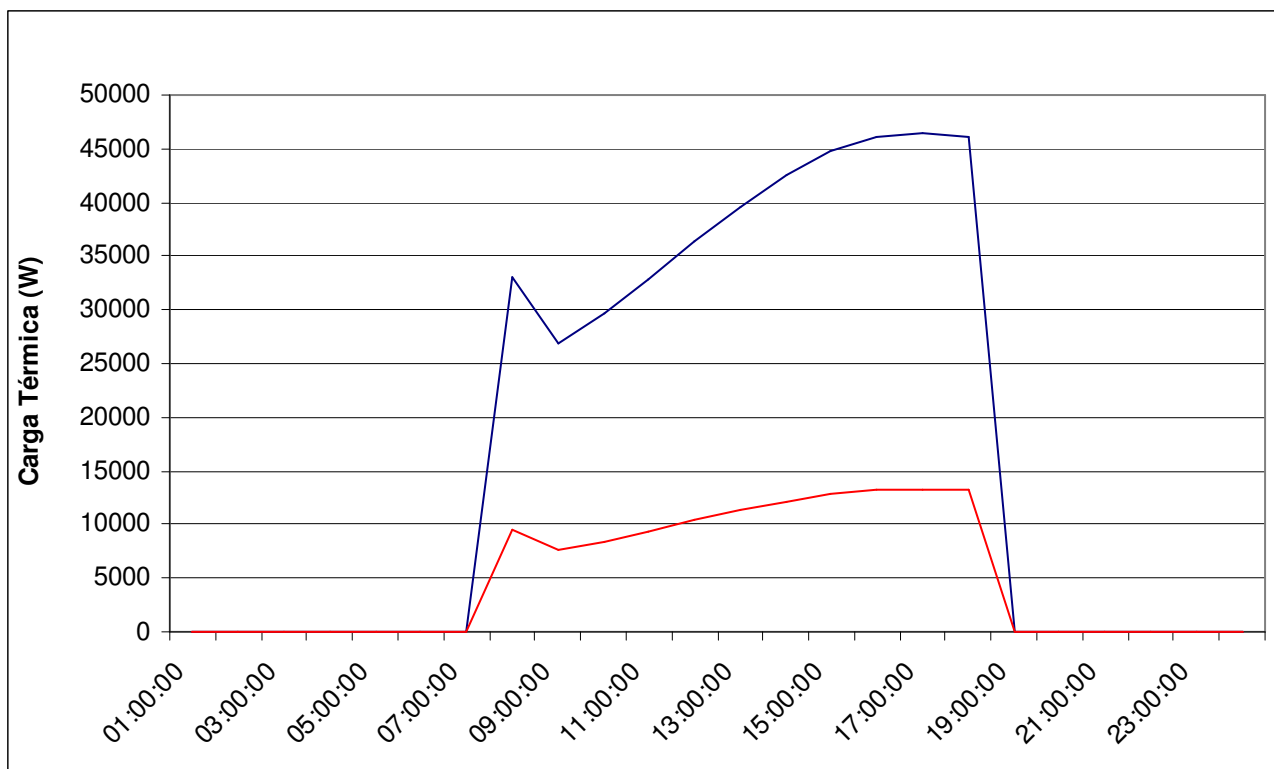


Figura 17: Carga térmica e potência do sistema para o caso-base – dia típico de verão

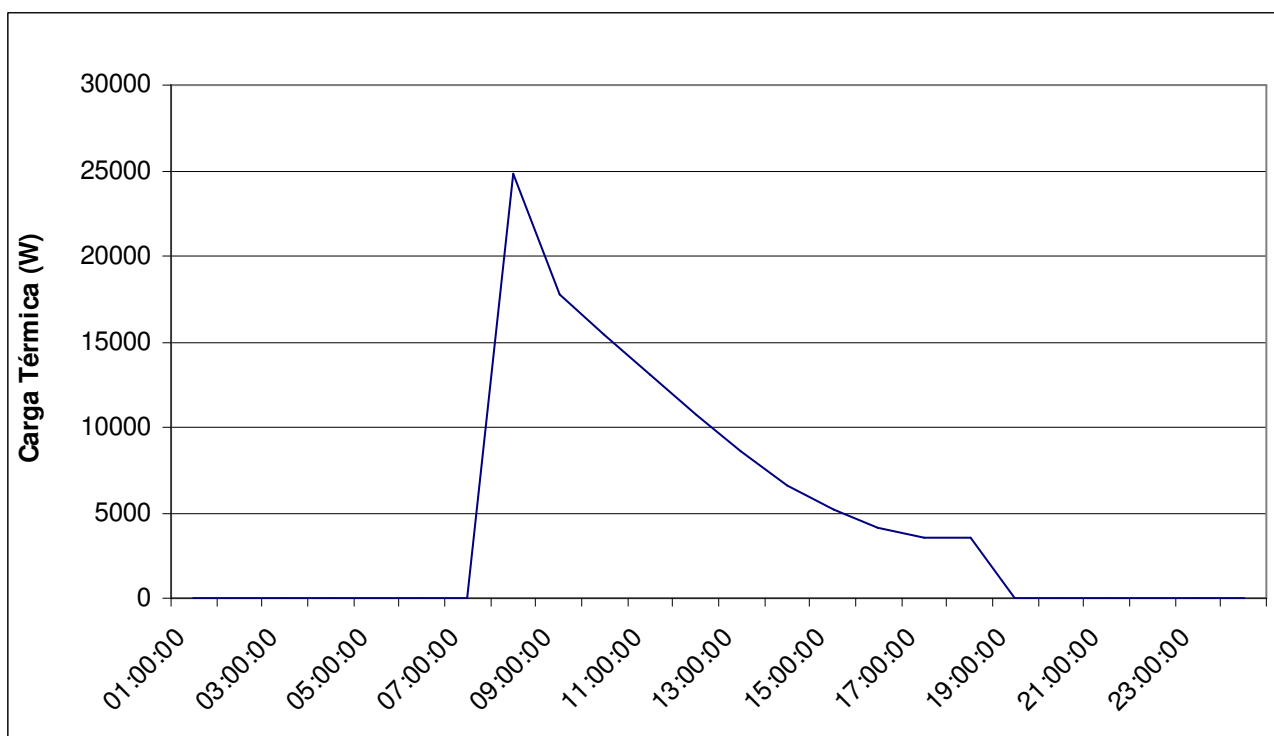


Figura 18: Carga térmica de aquecimento para o caso-base – dia típico de inverno

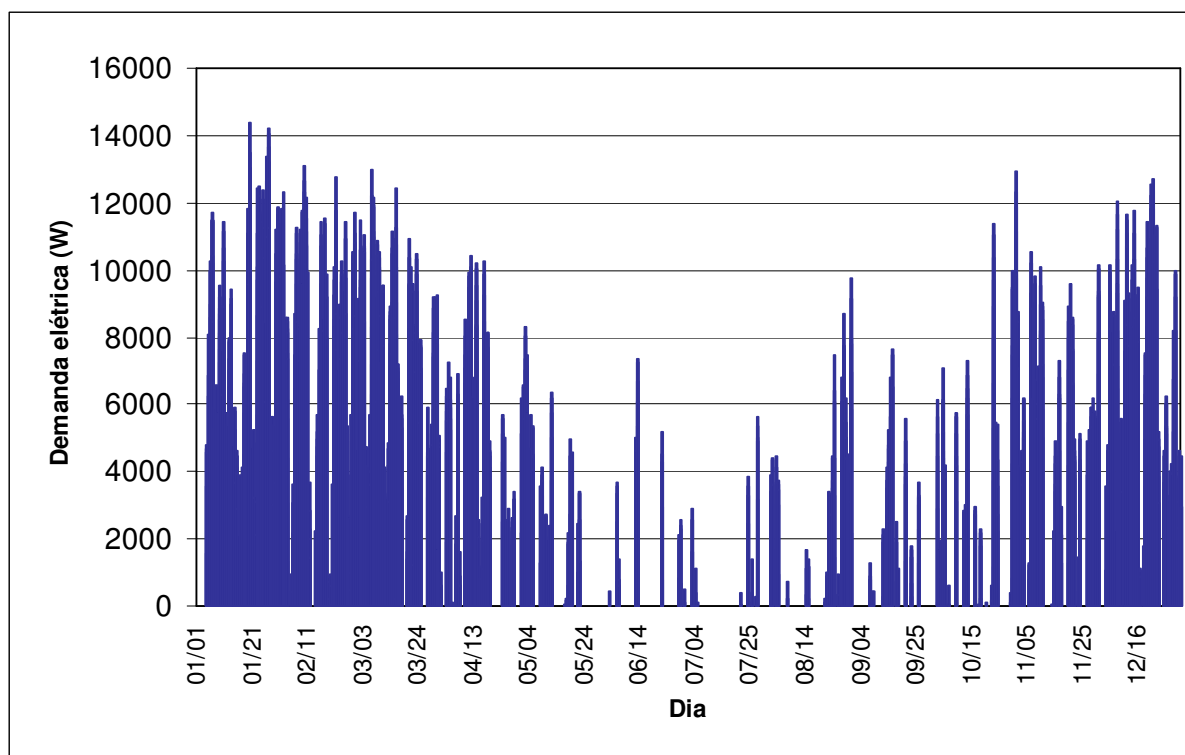


Figura 19: Distribuição anual da demanda elétrica do sistema de climatização – caso base

A partir da distribuição anual de demanda elétrica do sistema foi calculado o consumo elétrico mensal do equipamento em kWh, que é mostrado na figura 20.

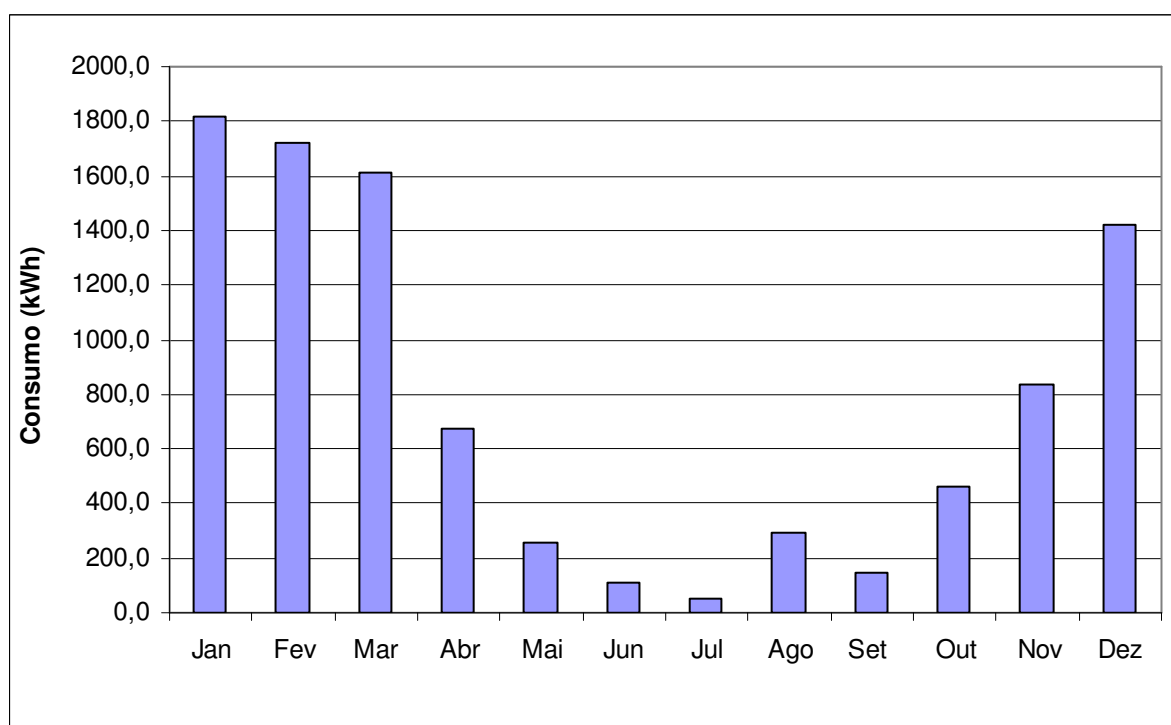


Figura 20: Consumo elétrico mensal do sistema de climatização – caso base

Os perfis de consumo de energia do sistema de climatização e de carga térmica se comportam conforme o esperado, começando o dia mais baixos e aumentando gradativamente, chegando ao pico por volta das 18 horas. Neste momento a carga térmica chega a 45 kW e a demanda elétrica do sistema de climatização por volta de 13 kW. No dia típico de inverno não foi registrada carga térmica de resfriamento, já que as temperaturas internas à edificação sempre permanecem abaixo do *set-point* de 24°C ajustado para o sistema. Em contrapartida existe uma carga de aquecimento, que deve ser fornecida à edificação para atingir o *set-point*.

O perfil anual de consumo elétrico também está de acordo com o esperado, com consumo alto nos meses quentes, e consumo baixo nos meses frios.

6.2 Caso Base (ASHRAE 90.1)

Nesta seção foi feita a simulação numérica do caso-base utilizando-se os valores de resistências térmicas definidos pela norma ASHRAE 90.1, como mostradas na tabela 5, ao invés dos valores que são realmente usados no prédio da Nova Reitoria. Esta simulação resultou nas curvas de consumo mensal mostradas na figura 21.

As simulações mostram um grande aumento no consumo do sistema de climatização, chegando a 1470% no mês de julho. Durante os meses mais quentes o aumento variou entre 77 e 177%. Um maior consumo já era de se esperar, como demonstrado anteriormente nas simulações do SIADEE. Também era de se esperar um aumento do consumo durante os meses mais frios, mas não na magnitude apresentada. O edifício, na sua configuração original, não precisa de muito resfriamento durante os meses frios, mas o aumento do isolamento das paredes impõe um aumento na carga térmica interna, que o sistema de climatização precisa funcionar durante muito mais tempo, resultando no aumento de consumo calculado.

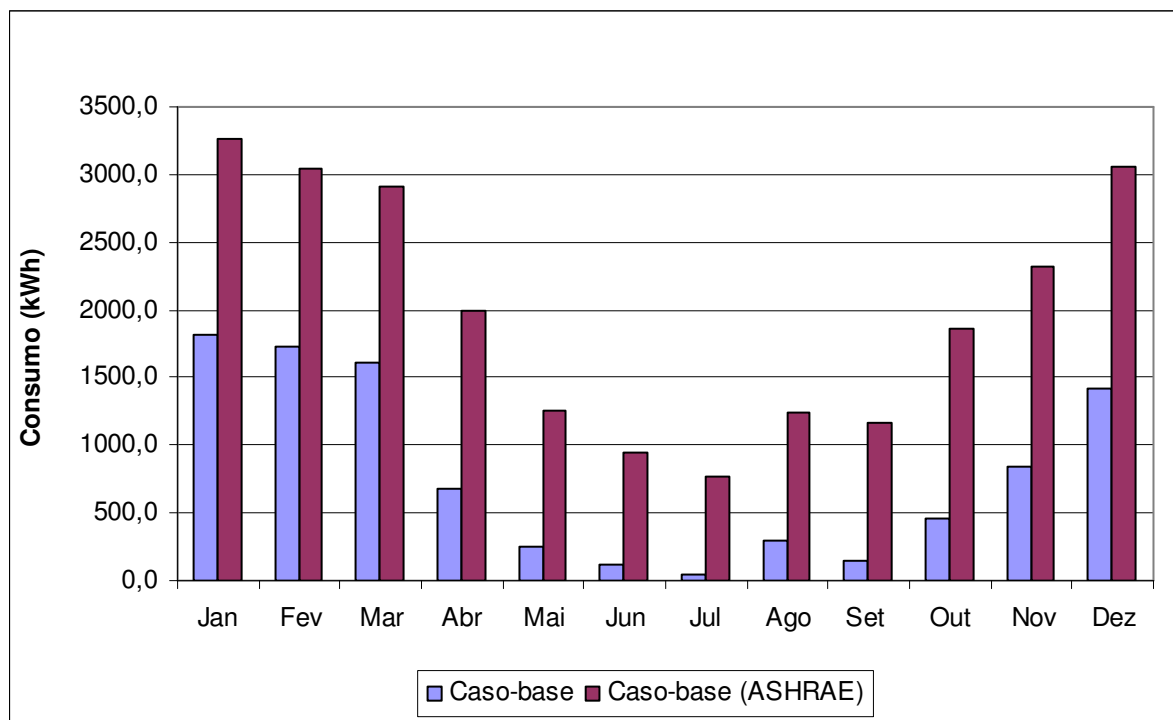


Figura 21: Comparativo do consumo elétrico mensal – casos-base

Como foi mostrado na seção 4.1.3, a norma ASHRAE 90.1 prioriza a redução no consumo de sistemas de aquecimento através de maiores valores de resistência térmica de paredes, cobertura, piso e vidros. Isto é mostrado na prática pelo aumento do consumo durante os meses mais frios. Neste caso, a maior carga térmica interna aumentou de tal forma as temperaturas internas que não só a carga de aquecimento foi zerada, mas a carga de resfriamento foi aumentada, necessitando da intervenção do sistema de climatização. A utilização da norma ASHRAE 90.1 para o projeto de uma edificação é interessante em regiões de clima muito frio, como em grande parte dos países do hemisfério norte, pois nestes casos é possível atingir uma redução dos custos de aquecimento sem aumentar os de resfriamento.

6.3 Alternativa 1: Uso de filme reflexivo nas janelas

A primeira solução sugerida é a utilização de filme reflexivo nas janelas da edificação. O filme reflexivo tem como objetivo diminuir a incidência de raios solares no interior da edificação, com o intuito de diminuir o ganho de calor e reduzir o consumo elétrico do sistema de condicionamento de ar.

Será simulado o caso-base com uma única mudança nos valores de transmissividade solar dos vidros, o que equivale a utilizar um filme reflexivo. Serão simulados dois tipos de filmes: o filme de cor verde com transmissividade $\tau = 0,7$ e o de cor cobre com $\tau = 0,6$ (em comparação com $\tau = 0,9$ do vidro comum).

A figura 22 mostra as curvas comparativas de consumo elétrico mensal para o caso-base e as duas soluções envolvendo filmes reflexivos nos vidros.

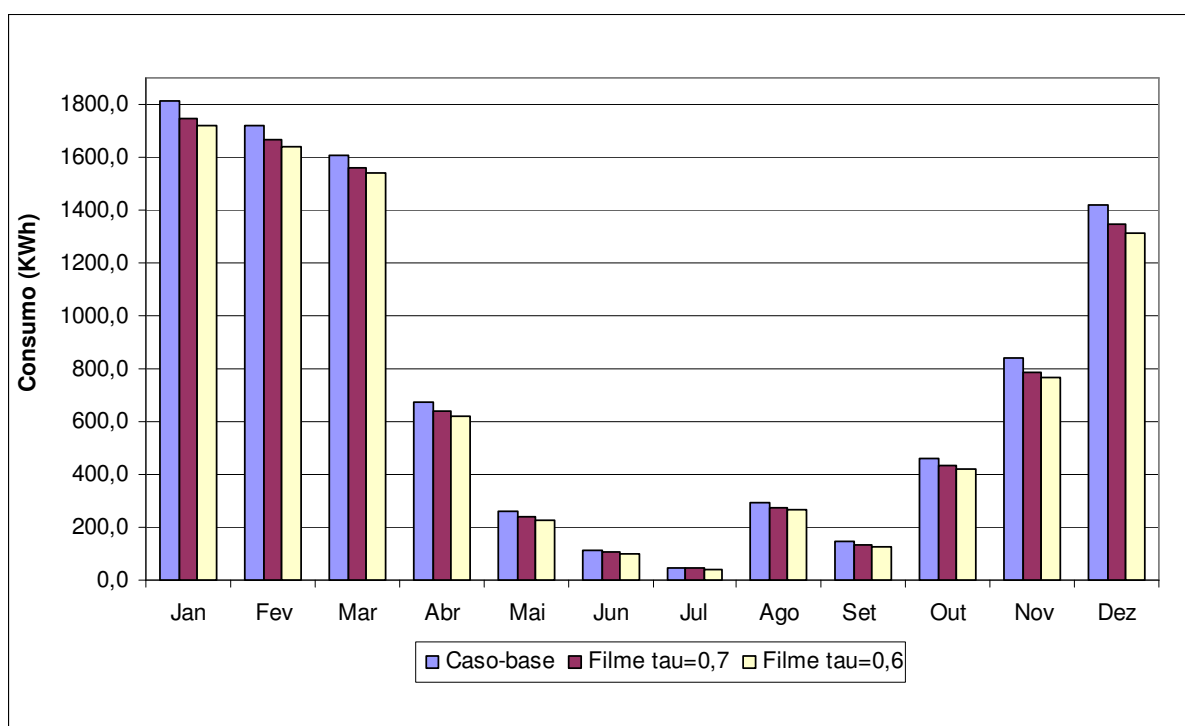


Figura 22: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso de filme reflexivo

A tabela 12 mostra os resultados obtidos para os cálculos de consumo elétrico do sistema nas diferentes configurações as reduções de consumo em relação ao caso base.

Tabela 12: Consumo mensal do sistema de climatização – filme reflexivo - em kWh

	Caso-Base	Filme ($\tau = 0,7$)	Variação (%)	Filme ($\tau = 0,6$)	Variação (%)
Janeiro	1813,7	1748,3	-3,607	1720,5	-5,140
Fevereiro	1722,5	1666,2	-3,271	1642,4	-4,651
Março	1609,8	1560,1	-3,088	1537,9	-4,465
Abril	673,2	637,6	-5,290	621,9	-7,618
Maiο	256,8	238,0	-7,321	229,4	-10,674
Junho	112,4	104,1	-7,348	100,4	-10,675
Julho	49,1	44,3	-9,697	42,3	-13,934
Agosto	290,2	272,1	-6,239	263,8	-9,072
Setembro	147,1	132,4	-10,019	125,8	-14,479
Outubro	461,8	430,9	-6,704	417,2	-9,661
Novembro	838,4	788,1	-6,005	765,7	-8,679
Dezembro	1417,9	1344,6	-5,174	1312,9	-7,408

Nota-se uma redução máxima de consumo significativa, atingindo um valor máximo da ordem de 10% para filmes com $\tau = 0,7$ e de 14,5% para filmes com $\tau = 0,6$. Essas reduções máximas ocorreram durante os meses mais frios do ano, o que não era de se esperar no início, já que a incidência de raios solares nesta época do ano é mais fraca. Uma possível explicação para este comportamento está no fato de a parcela da carga térmica devido à radiação solar ser proporcionalmente maior nos meses de inverno, já que outros fatores externos, como a temperatura do ar, têm menor influência no aumento da carga térmica de resfriamento. Para testar esta hipótese foi feita a simulação da edificação em um dia típico de verão e inverno, na condição com filme reflexivo, e plotados os ganhos de calor através dos vidros e das paredes. Os ganhos de calor pelos vidros são fornecidos como saída no programa Energy Plus, já os ganhos (ou perdas) de calor pelas paredes foram calculados a partir dos perfis de temperatura interna e externa das paredes, também fornecidas pelo programa, dos coeficientes de transferência de calor K e das áreas de parede, ambos mostrados na tabela 4. As figuras 23 e 24 mostram os resultados calculados para inverno e verão, respectivamente. Não foram levados em conta os ganhos internos, que permanecem iguais nos dois casos.

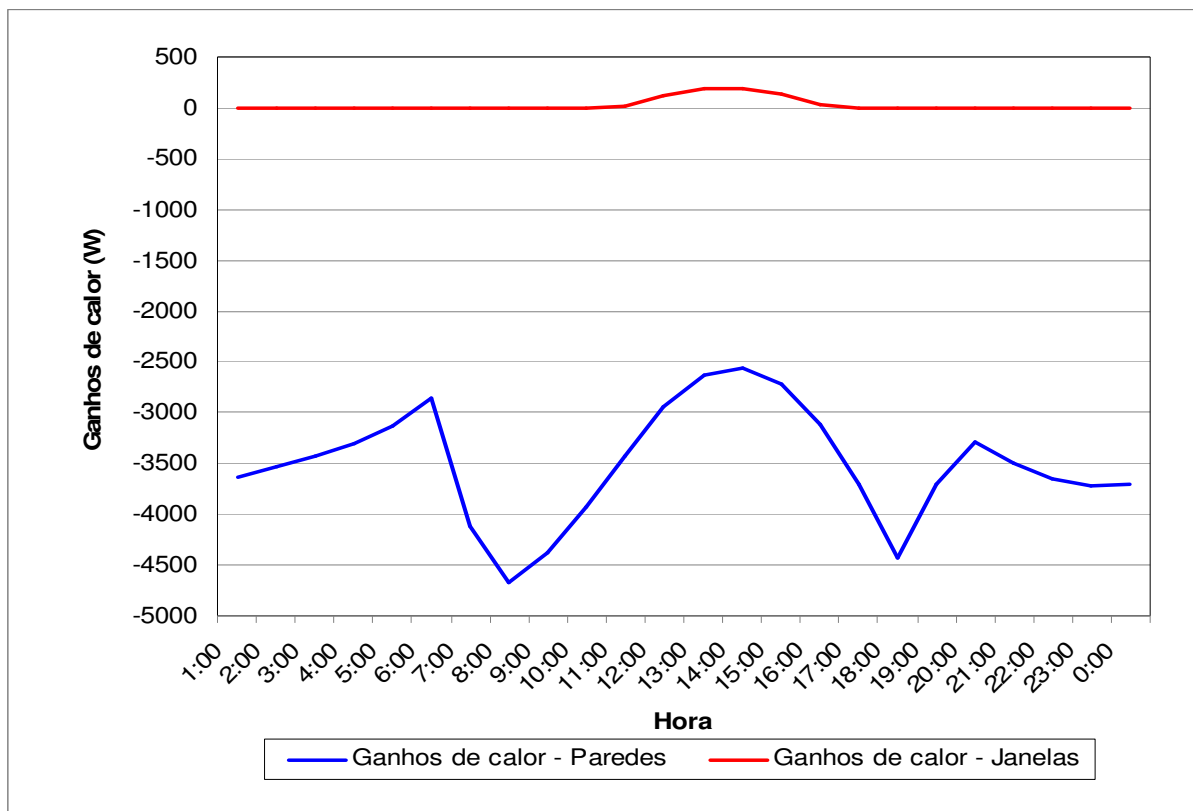


Figura 23: Ganhos de calor pelas paredes e janelas – dia típico de inverno

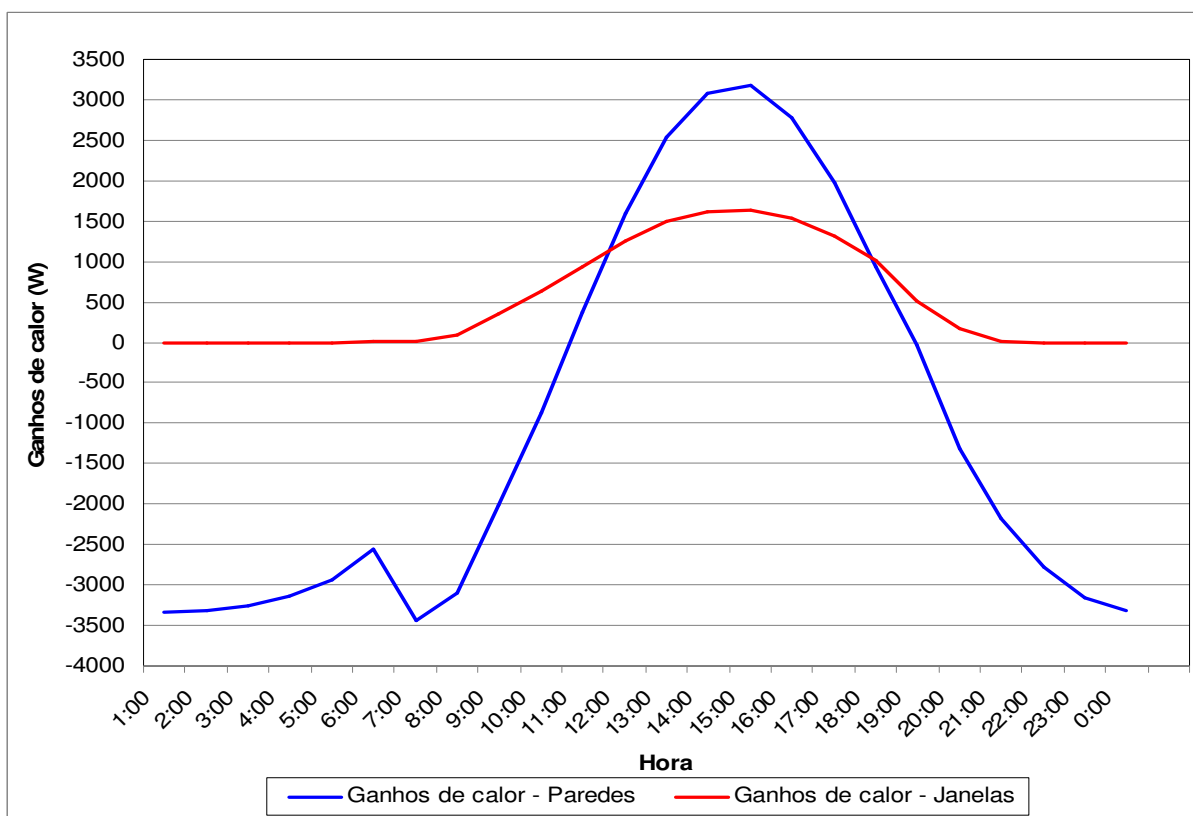


Figura 24: Ganhos de calor pelas paredes e janelas – dia típico de verão

Vemos que durante um dia de inverno não há fluxo de calor para o interior da edificação pelas paredes (indicado por um ganho de calor negativo). Isto mostra que a hipótese proposta é plausível, já que a influência de fatores externos, como a temperatura externa do ar, é pequena (neste caso, nenhuma) em relação aos ganhos de calor devido à radiação do sol através das janelas. Durante boa parte dos dias mais frios os ganhos internos (pessoas, iluminação e equipamentos) são equilibrados pelas perdas para o ambiente externo, reduzindo assim o aumento da temperatura interna, não necessitando de grande capacidade de resfriamento. Desse modo, a redução do fluxo de calor pelas janelas, mesmo que pequena, proporciona as maiores reduções percentuais calculadas no inverno, devido a já mencionada pouca utilização do sistema de climatização.

No caso do dia típico de verão ocorre o esperado, ou seja, grandes influências de fatores externos no ganho de calor, principalmente devido à temperatura externa. Apesar do ganho de calor pelos vidros ser maior, em valores absolutos, do que aquele no dia de inverno, seu valor relativo aos outros fatores externos é menor (no caso, chega a 50% do ganho de calor pelas paredes). Desse modo, a redução percentual no consumo elétrico é menor, se comparada com a redução obtida nos meses mais frios.

6.4 Alternativa 2: Ventilação Noturna

A segunda alternativa de solução para a redução do consumo energético na edificação é a utilização de ventilação noturna. Neste caso é feito apenas o insuflamento de ar externo no período da madrugada, sem que este ar seja condicionado de qualquer forma.

A ventilação noturna tem como objetivo diminuir a temperatura interna da edificação utilizando o ar externo mais frio da madrugada, e reduzir o consumo do sistema de climatização nas horas iniciais de ocupação. Foi definida uma vazão de ar externo capaz de promover uma renovação completa do ar interno em uma hora, equivalente a $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada andar típico. Seguem os parâmetros utilizados na simulação:

Tabela 13: Perfil de ocupação e utilização para o caso de ventilação noturna

	0:00-2:00	2:00-8:00	8:00-18:00	18:00-24:00
Ocupação de pessoas (%)	0	0	100	0
Uso de iluminação (%)	0	0	100	0
Uso de equipamentos elétricos (%)	0	0	100	0
Sistema de climatização	Desligado	Desligado	Ligado	Desligado
Vazão de ar externo (m ³ /s)	0	0,45	0	0

Utilizando estes perfis, foi feita a simulação anual que resultou no perfil de consumo de energia anual da figura 25 e nos dados da tabela 14.

Tabela 14: Consumo mensal do sistema de climatização – ventilação noturna - em kWh

	Caso-Base	Ventilação Noturna	Variação (%)
Janeiro	1813,7	1816,7	+0,161
Fevereiro	1722,5	1723,6	+0,065
Março	1609,8	1609,4	-0,026
Abril	673,2	672,9	-0,052
Maio	256,8	256,9	+0,052
Junho	112,4	112,3	-0,011
Julho	49,1	49,0	-0,213
Agosto	290,2	289,9	-0,083
Setembro	147,1	147,1	-0,031
Outubro	461,8	462,0	+0,032
Novembro	838,4	838,5	+0,004
Dezembro	1417,9	1420,1	+0,151

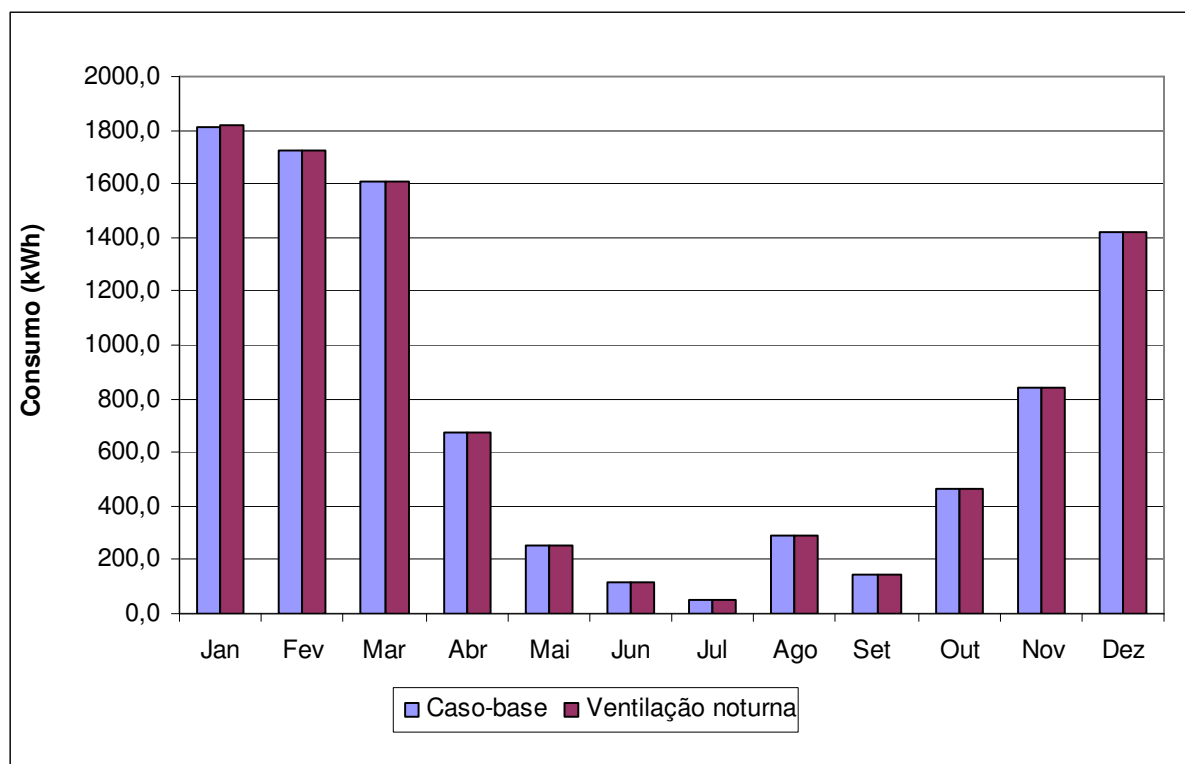


Figura 25: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso de ventilação noturna

Nota-se que esta alternativa não proporciona resultados satisfatórios, visto que as reduções máximas conseguidas são da ordem de 0,21%. Durante os meses mais quentes, entre outubro e fevereiro, existe um aumento no consumo de energia, que se deve pelo fato de o ar externo ser mais quente nesta época do ano, contribuindo para o aumento da carga térmica no interior da edificação. Durante estes meses é mais interessante impedir a entrada de ar externo durante a madrugada, pois a simples troca de calor por condução pelas paredes, cobertura e piso resulta em menor carga térmica interna do que aquela obtida com o insuflamento de ar externo.

6.5 Alternativa 3: Resfriamento noturno da edificação

Esta alternativa consiste em manter o sistema de climatização ligado durante horários noturnos, nos quais não existe ocupação. Desse modo, espera-se a redução da temperatura interna durante a noite e a posterior economia de potência de resfriamento nas primeiras horas

de ocupação do dia seguinte. O sistema de climatização foi definido para continuar funcionando desde o horário de final de expediente (18:00) até à meia-noite, sendo desligado durante o restante da madrugada até o início do expediente no dia seguinte. Durante o tempo ligado após o expediente, o *set-point* de temperatura do equipamento foi ajustado em 26°C. Os perfis de ocupação utilizados são mostrados na tabela 15.

Tabela 15: Perfil de ocupação e utilização para o caso de resfriamento noturno

	0:00-7:00	7:00-18:00	18:00-24:00
Ocupação de pessoas (%)	0	100	0
Uso de iluminação (%)	0	100	0
Uso de equipamentos elétricos (%)	0	100	0
Sistema de climatização	Desligado	Ligado	Ligado

A figura 26 mostra as curvas de consumo elétrico para o caso de resfriamento noturno.

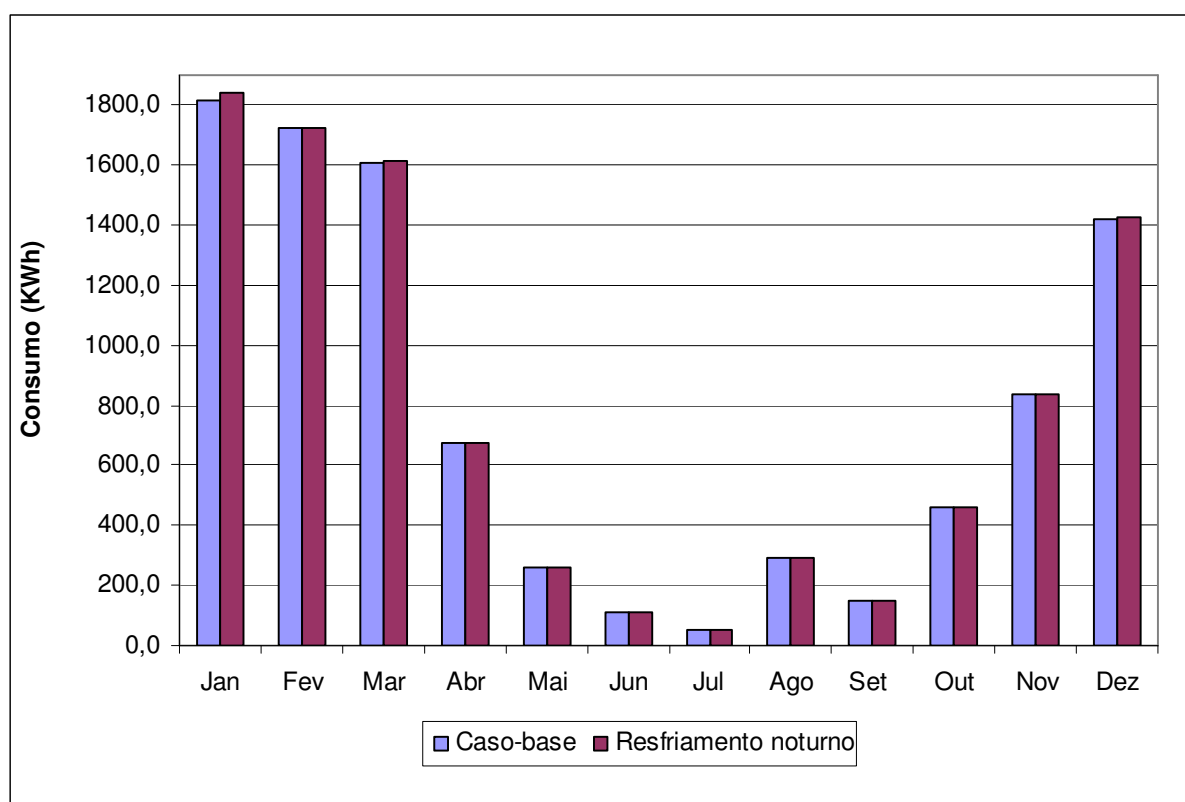


Figura 26: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso de resfriamento noturno

A tabela 16 mostra os valores comparativos entre o consumo do caso-base e o resfriamento noturno.

Tabela 16: Consumo mensal do sistema de climatização – resfriamento noturno – em kWh

	Caso-Base	Resfriamento noturno	Variação (%)
Janeiro	1813,7	1844,5	+1,695
Fevereiro	1722,5	1727,4	+0,283
Março	1609,8	1613,0	+0,200
Abril	673,2	673,1	-0,022
Maiο	256,8	256,7	-0,025
Junho	112,4	112,3	-0,017
Julho	49,1	49,1	-0,014
Agosto	290,2	290,2	-0,005
Setembro	147,1	147,1	-0,005
Outubro	461,8	462,8	+0,222
Novembro	838,4	839,4	+0,117
Dezembro	1417,9	1425,1	+0,504

Os resultados das simulações mostram que o resfriamento noturno não proporciona reduções no consumo de energia desejadas. Durante os meses de outubro até março, houve um aumento no consumo, e durante o restante do ano a redução foi muito baixa, com valores máximos de 0,025%. Já durante os meses quentes de primavera e verão (Outubro a Março), houve um aumento do consumo que chegou a 1,7%, contrariando o objetivo dessa alternativa.

Como o *set-point* do equipamento foi ajustado em 26 °C, fazendo o sistema funcionar somente no caso de a temperatura interna passar deste valor, as reduções de consumo eram esperadas apenas para noites mais quentes, quando o sistema tivesse a possibilidade de reduzir a carga térmica no interior da edificação. Os resultados mostram que o consumo de energia devido ao funcionamento do sistema durante a noite foi maior do que a economia proporcionada por ele durante o dia, aumentando o consumo final de energia.

6.6 Alternativa 4: Filme reflexivo e ventilação noturna

Esta alternativa consiste em utilizar filmes reflexivos com coeficiente de transmissividade solar $\tau = 0,6$ em conjunto com a ventilação noturna. A tabela 17 mostra os valores calculados para esta solução bem como aqueles obtidos para o uso de filme reflexivo com $\tau = 0,6$.

Tabela 17: Consumo elétrico mensal do sistema de climatização – filme + ventilação noturna – em kWh

	Caso-Base	Filme + Ventilação noturna	Variação (%)	Somente Filme ($\tau = 0,6$)	Variação (%)
Janeiro	1813,7	1723,0	-5,001	1720,5	-5,140
Fevereiro	1722,5	1643,2	-4,606	1642,4	-4,651
Março	1609,8	1537,0	-4,522	1537,9	-4,465
Abril	673,2	621,6	-7,672	621,9	-7,618
Mai	256,8	229,5	-10,619	229,4	-10,674
Junho	112,4	100,4	-10,663	100,4	-10,675
Julho	49,1	42,2	-14,056	42,3	-13,934
Agosto	290,2	263,6	-9,153	263,8	-9,072
Setembro	147,1	125,8	-14,484	125,8	-14,479
Outubro	461,8	417,4	-9,620	417,2	-9,661
Novembro	838,4	765,7	-8,677	765,7	-8,679
Dezembro	1417,9	1315,0	-7,262	1312,9	-7,408

O perfil de consumo elétrico mensal para a alternativa 4 é mostrado na figura 27.

Pela análise da tabela 17, nota-se que a melhor solução é utilizar apenas o filme reflexivo de outubro a fevereiro, e o uso conjunto de filme reflexivo e ventilação noturna durante o restante do ano.

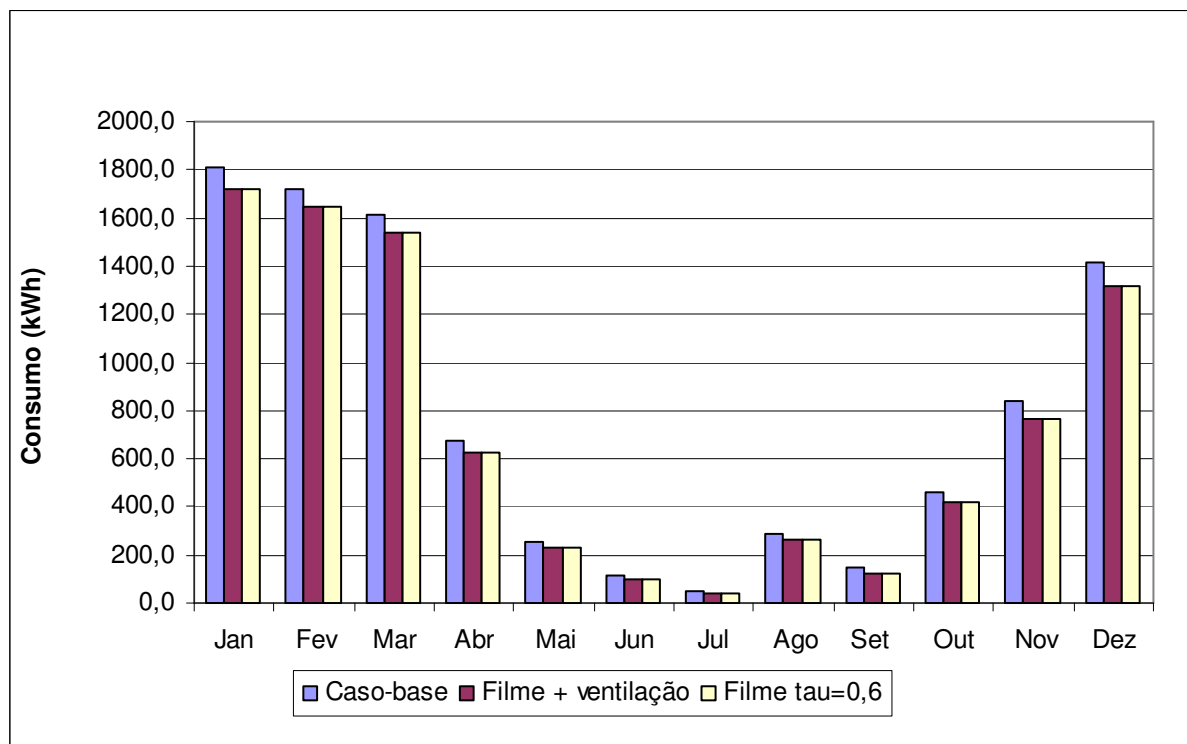


Figura 27: Comparativo do consumo elétrico mensal para o uso filme reflexivo e ventilação noturna

7. CONCLUSÕES

Depois de realizadas todas as simulações no Energy Plus, foi possível notar uma redução moderada do consumo apenas para o uso de filmes reflexivos. Para as demais soluções, a ventilação noturna e o resfriamento noturno, o consumo aumentou em parte do ano e no restante diminuiu muito pouco. No uso de filme reflexivo a redução média anual foi de 8,87%, na ventilação noturna um aumento médio de 0,004% e no resfriamento noturno um aumento médio de 0,244%.

Na figura 28 é mostrado o consumo mensal do sistema de climatização para todas as soluções. Analisando o gráfico, nota-se que o uso de filme reflexivo proporciona reduções no consumo durante o ano todo, mas maiores durante os meses mais frios enquanto que a ventilação noturna e o resfriamento noturno obtêm reduções de consumo, mesmo que muito baixas, nos meses mais frios (abril a setembro). Durante estes meses a redução média foi de 0,056% para a ventilação noturna e 0,0146% para o resfriamento noturno.

Em vista das reduções de consumo obtidas, a melhor solução, qualitativamente, seria o uso de filmes reflexivos com índice de transmissividade $\tau = 0,6$ combinado com a ventilação noturna durante os meses de fevereiro até outubro. Neste caso chega-se a uma redução máxima de 14,4% no mês de outubro e uma redução média anual de 8,89%. A redução do consumo nos meses mais frios torna-se atraente devido ao tipo de tarifação submetido à Nova Reitoria, a tarifação horo-sazonal. Neste tipo de tarifação, o custo da energia no período seco (maio a novembro) é mais alto, devido à menor quantidade de água disponível nos reservatórios de usinas hidrelétricas. Desse modo, reduzir o consumo nos meses do período seco pode acarretar em uma maior redução dos gastos mensais, se comparados a uma mesma redução absoluta durante os meses do período úmido (dezembro a abril).

A simulação da edificação com os valores de resistências térmicas definidos pela norma ASHRAE 90.1 mostrou que a norma não é adequada para climas quentes como o de São Paulo. Os valores de isolamento térmico definidos pela normas acarretam um maior consumo de sistemas de resfriamento, mas em compensação um menor consumo de sistemas de aquecimento. Como em São Paulo o inverno não é muito rigoroso e sistemas de aquecimento não são amplamente utilizados, logo não há a necessidade de reduzir o seu consumo, é preferível projetar as edificações de modo que elas possam dissipar melhor o calor e não aumentar a carga térmica interna, visando à redução de consumo dos sistemas de resfriamento de ar.

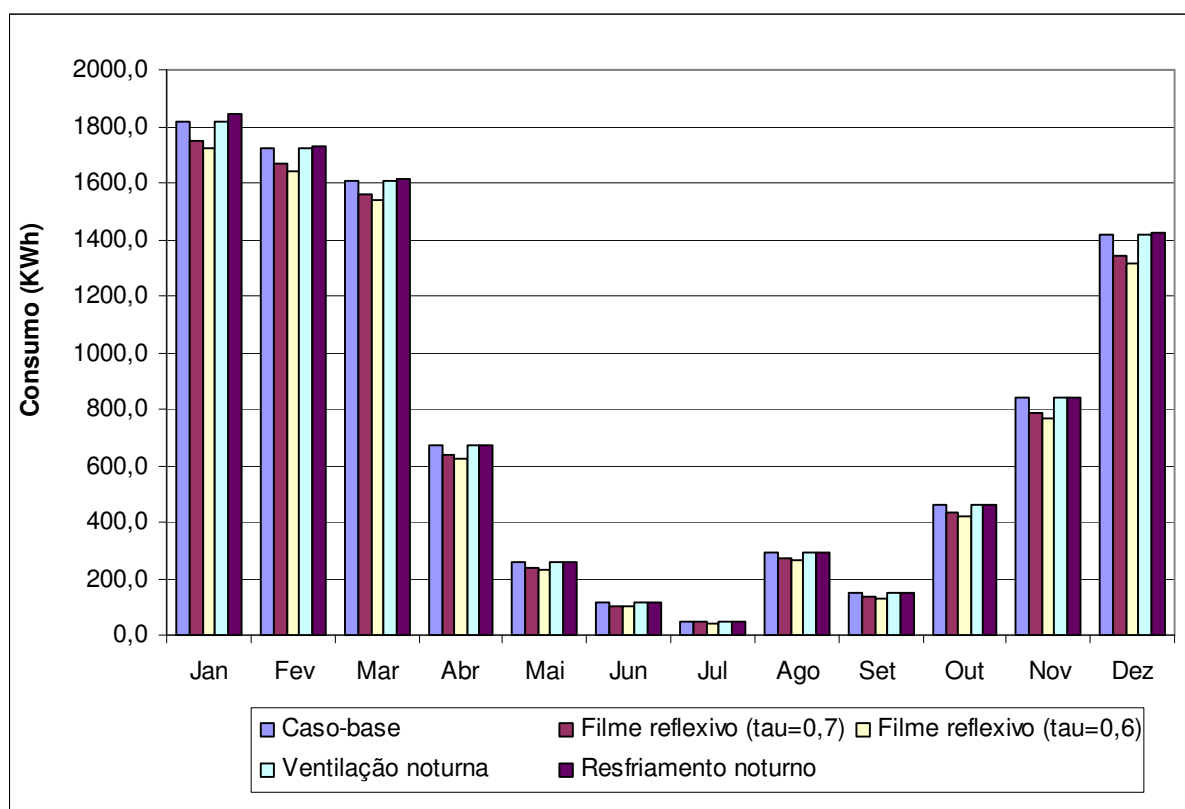


Figura 28: Comparativo do consumo mensal do sistema de climatização – todas as soluções

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **STANDARD 90.1-2001: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. Atlanta, 2001.
- [2] ENERGY PLUS. Software. Disponível em: <http://www.energyplus.gov>. Acesso em 29/10/2006.
- [3] MAGALHÃES, Luiz Carlos. **Orientações gerais para conservação de energia elétrica em prédios públicos**. 1ª edição. Abril/2001. p. 11.
- [4] ROMÉRO, M. A. et al. **SIADDE: Sistema Integrado para Avaliação de Desempenho Energético em Edificações**. São Paulo. FAU-USP, 2004.

9. BIBLIOGRAFIA

- [5] ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook: HVAC Applications**. Atlanta, 1999.
- [6] _____. **ASHRAE Handbook: HVAC Equipment and Systems**. Atlanta, 2000.
- [7] AQUINO, Rafael Farias de. **Gestão de manutenção de condicionadores de ar dos tipos janela e split**. São Paulo. EPUSP, 2005. 39 p.
- [8] INCROPERA, Frank P., DEWITT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5ª Edição. LTC Editora. Rio de Janeiro. 2003
- [9] PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/procel>. Acesso em: 22/04/2006.