ANÁLISE DE ALTERNATIVAS PARA A REDUÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM EDIFICAÇÕES CLIMATIZADAS

Markus Kirst Hahm
markus.hahm@gmail.com

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo a análise de diferentes soluções para a redução de consumo energético de sistemas de condicionamento de ar em edificações. Para isso, o edifício escolhido, a Nova Reitoria da USP, será simulado no software Energy Plus, que tem a capacidade de calcular grandezas, como a temperatura interna, a carga térmica e o consumo energético de sistemas de condicionamento de ar, a partir de dados construtivos da edificação e dados climáticos da localidade. Foram simuladas três alternativas de solução: o uso de filmes reflexivos nos vidros, a ventilação noturna e o resfriamento noturno do edifício. Os resultados mostram não apenas uma solução ótima para o problema, mas sim uma combinação de duas, o uso de filme reflexivo, mais eficiente durante o verão e a ventilação, melhor durante o inverno.*

Palavras chave:*. Consumo de energia elétrica, Climatização, Simulação*

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, transparência de vidros);
- indicadores de eficiência energética em edificações;
- certificação de materiais e equipamentos;
- procedimentos para regulamentação/legislação;

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 elétrica.

As edificações são responsáveis por cerca de 45% 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 equipamento de escritório com 15%. 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 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, mostrado na figura 1, 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 foi a simulação de 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, será 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
- ventilação noturna
- resfriamento noturno

3. Metodologia

Na parte de simulação numérica da edificação é utilizado o *software* Energy Plus versão 1.4.0, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

Figura 1. Nova Reitoria da USP

O *software* faz cálculos como a carga térmica da edificação ou o consumo de energia de sistemas de climatização, por exemplo. Para calcular estes itens, o programa precisa dos dados da edificação (dimensões externas, materiais da parede, teto e piso, tipo e tamanho de janelas, quantidade de pessoas trabalhando, potência de iluminação e equipamentos, tipo de equipamento de climatização, etc.) e os dados geográficos e climáticos (coordenadas da localização da edificação, altitude, temperaturas externas e suas variações diárias, velocidades e direções do vento e pressão atmosférica). A partir destas informações, o *software* calcula, entre outros, as trocas de calor ocorrendo nas diferentes partes do sistema de condicionamento de ar, a transferência de calor pelas paredes, a carga térmica gerada no ambiente e as temperaturas do ar na edificação. Tem-se a possibilidade, através de um *schedule*, definir diferentes modos de funcionamento do sistema de climatização para inverno e verão, bem como horários para ocupação do ambiente e funcionamento de iluminação e equipamentos.

Após realizar os cálculos, o *software* cria arquivos de saída, com variáveis que podem ser escolhidas de acordo com a necessidade, e posteriormente tratados em uma planilha eletrônica, fornecendo gráficos para uma melhor análise dos resultados. Neste trabalho serão analisadas, principalmente, as variáveis de carga térmica retirada do ambiente, temperaturas no interior da edificação e consumo energético do sistema de climatização. As cargas térmicas e o consumo energético serão comparados com dados reais coletados na edificação, fornecendo uma verificação ou não, da precisão e conformidade da simulação com a realidade.

O perfil de ocupação e utilização do caso-base segue o horário comercial (8:00-18:00), com ocupação total e funcionamento do sistema de climatização durante esse tempo. Durante o restante do dia não há ocupação e o sistema de climatização está desligado. As alternativas de solução se baseiam no caso-base, mas com as seguintes mudanças:

- uso de filme reflexivo: mudança nas propriedades de transmissividade dos vidros.
- ventilação noturna: insuflamento de ar externo durante a madrugada (2:00-7:00).
- resfriamento noturno: funcionamento do sistema de climatização após o término do horário comercial (18:00-24:00).

4. Resultados

A análise pelo SIADEE mostrou que a edificação está adaptada ao clima local, sendo 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 foi feita a simulação numérica do edifício.

A análise segundo a norma ASHRAE 90.1 mostrou que a cobertura e o piso estão superdimensionados, ou seja, seus coeficientes de transmissão de calor K são maiores do que a norma, e são uma possível fonte de maior consumo energético por parte dos sistemas de condicionamento de ar.

Tabela 1. Valores do coeficiente K – atuais e da norma ASHRAE 90.1

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

Foi ainda realizado o cálculo do SIADEE utilizando-se os valores normativos de K ao invés da dos valores reais da edificação. 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 proporciona consumos de energia cerca de 5% maiores para os dois casos.

A simulação numérica inicial no *software* Energy Plus mostrou a necessidade de um sistema de condicionamento de ar na edificação, conforme visto nas temperaturas de mais de 28°C atingidas no interior do edifício, mostradas na figura 2.

A simulação do caso-base para os dias típicos mostrou cargas térmicas máximas da ordem de 45 kW no verão, com potência do sistema de climatização da ordem de 13 kW máximos, devido ao COP adotado de 3,5. O dia típico de inverno não possui carga térmica de resfriamento, mas sim uma carga térmica de aquecimento, mostrada na figura 4.

O perfil de ocupação e utilização do sistema de climatização está mostrado na tabela 2.

Tabela 2. Perfil de ocupação para o 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

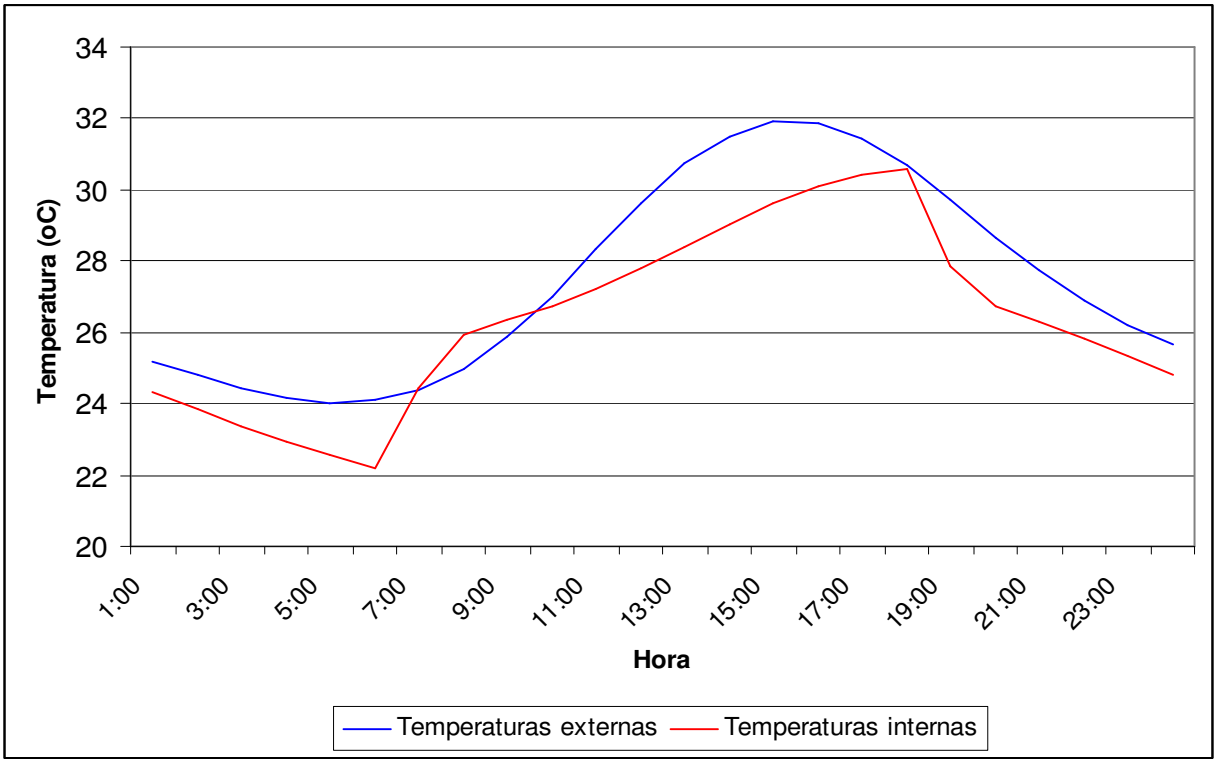

Figura 2. Temperaturas internas – dia típico de verão

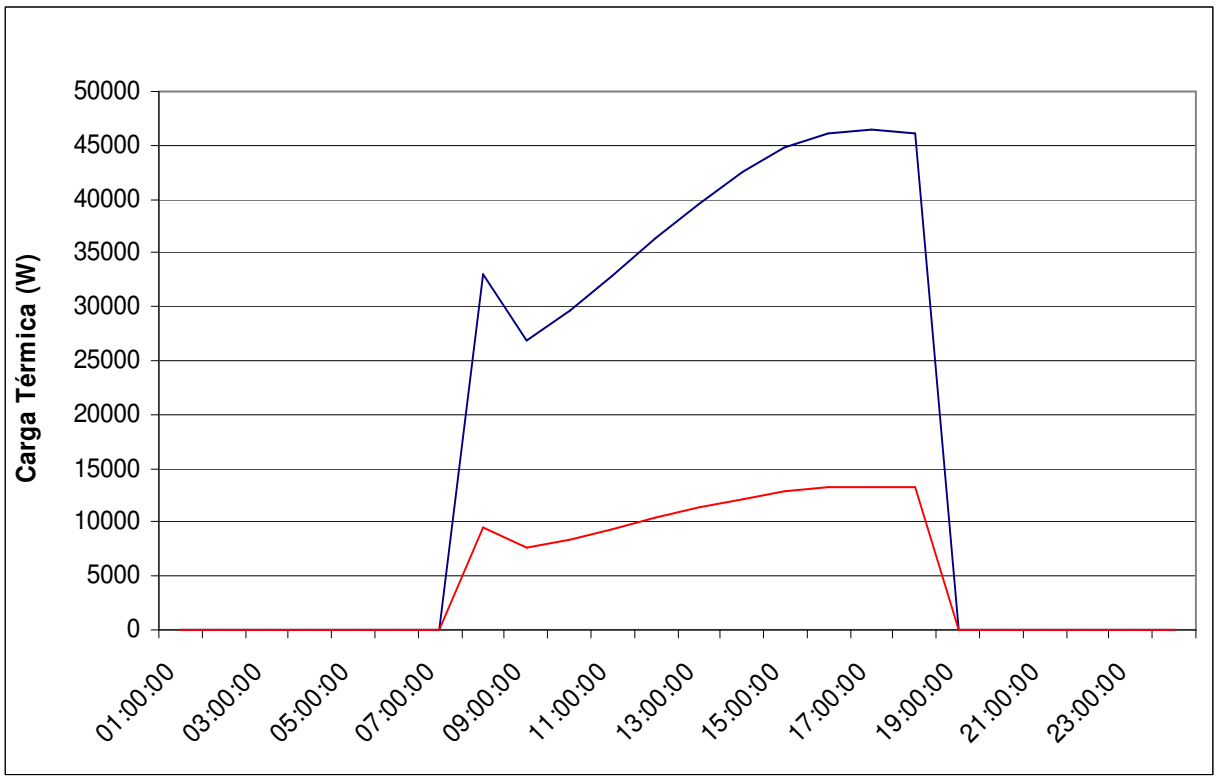

Figura 3. Carga térmica e potência do sistema de climatização – dia típico de verão

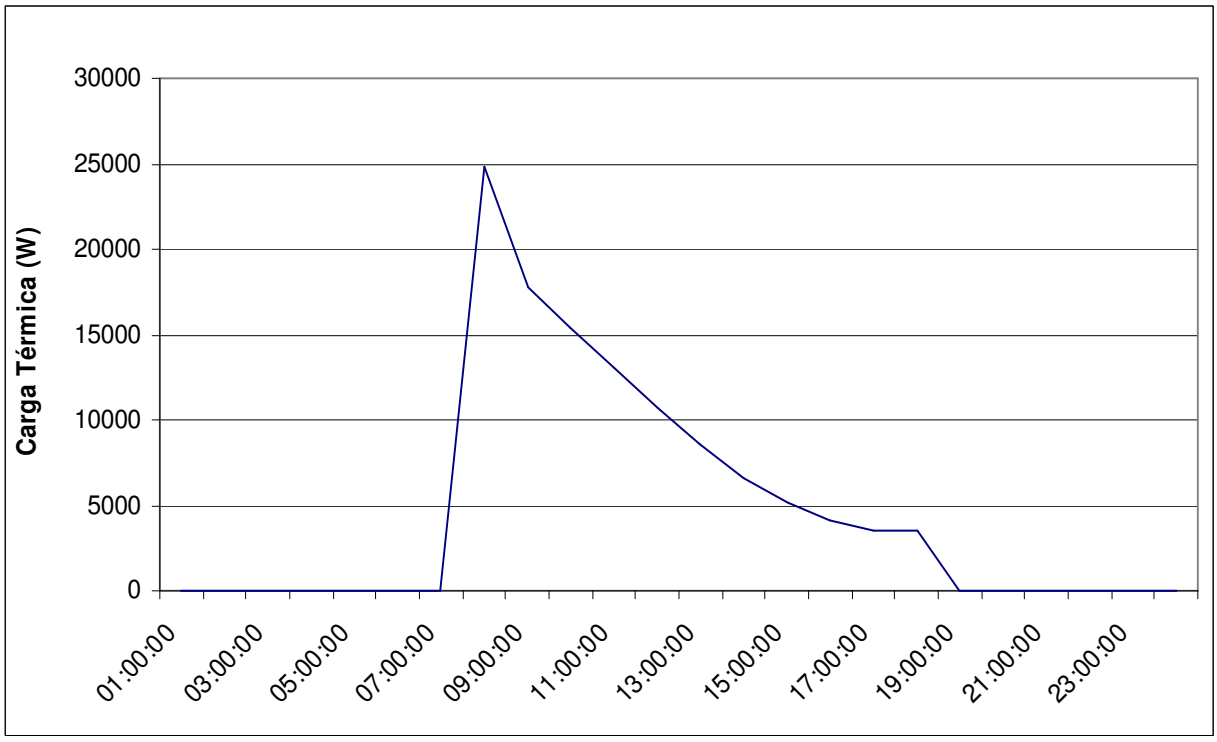

Figura 4. Carga térmica de aquecimento – dia típico de inverno

Foi realizada ainda, para efeitos de comparação, a simulação numérica do caso-base utilizando os valores de resistências térmicas da norma ASHRAE 90.1. O comparativo dos consumos é mostrado na figura 5.

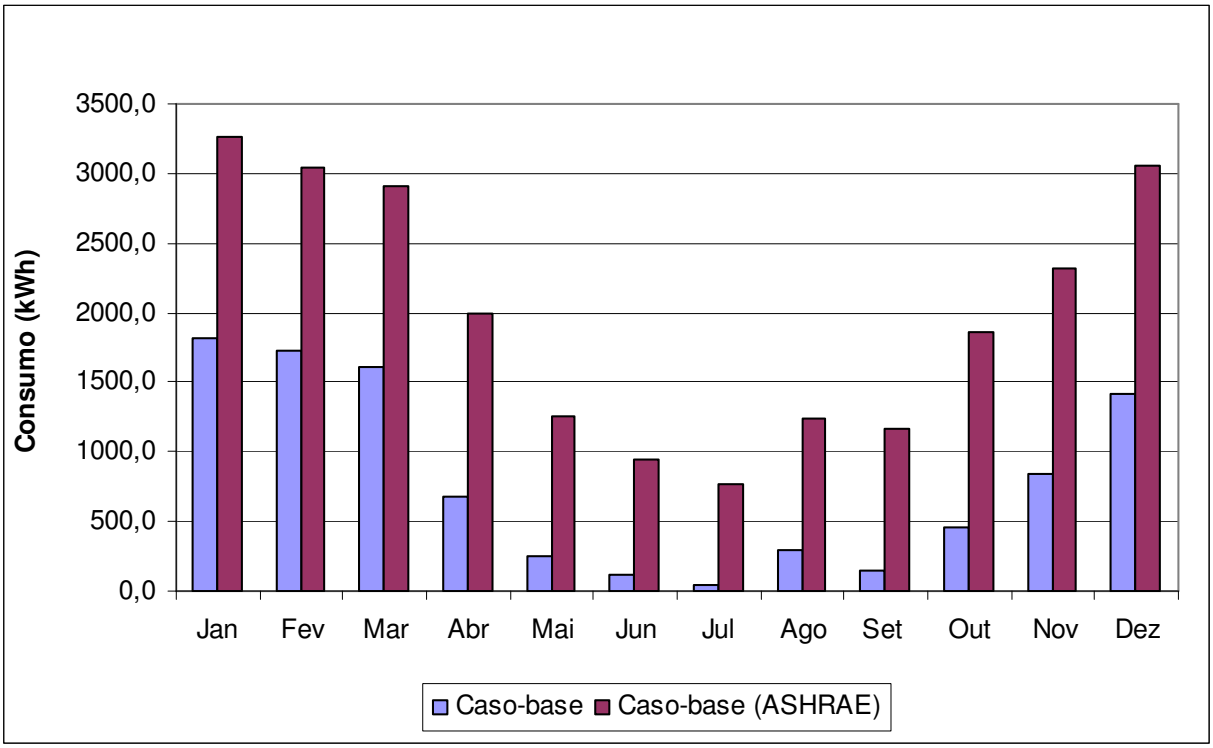

Figura 5. Comparativo do consumo elétrico mensal – casos-base

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 60 e 160%. Um maior consumo já era de se esperar, principalmente durante os meses mais quentes, já que o maior isolamento térmico da cobertura e do piso provoca uma pior dissipação do calor, aumentando a carga térmica interna e, conseqüentemente, o consumo de sistemas de climatização. 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 eleva de tal forma a carga térmica interna, que o sistema de climatização precisa funcionar durante muito mais tempo, resultando no aumento de consumo calculado.

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 mais 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.

Em seguida foram simulados o caso-base e as três alternativas de solução escolhidas para um ano inteiro. Neste caso utiliza-se um arquivo de dados climáticos coletados hora a hora para um ano inteiro. As três alternativas de solução são mostradas a seguir:

1) Filmes reflexivos

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.

Foi simulado o caso-base com uma única mudança nos valores de transmissividade solar dos vidros, o que equivale a utilizar um filme reflexivo. Foram 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).

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 m^3/s para cada andar típico. O perfil de ocupação é o mesmo do caso-base e a ventilação foi adicionada entre 2:00 e 6:00.

3) Resfriamento Noturno

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^{o}C.

Foi feita a simulação anual para as três alternativas, resultando nos perfis de consumo elétrico mostrados na figura 6.

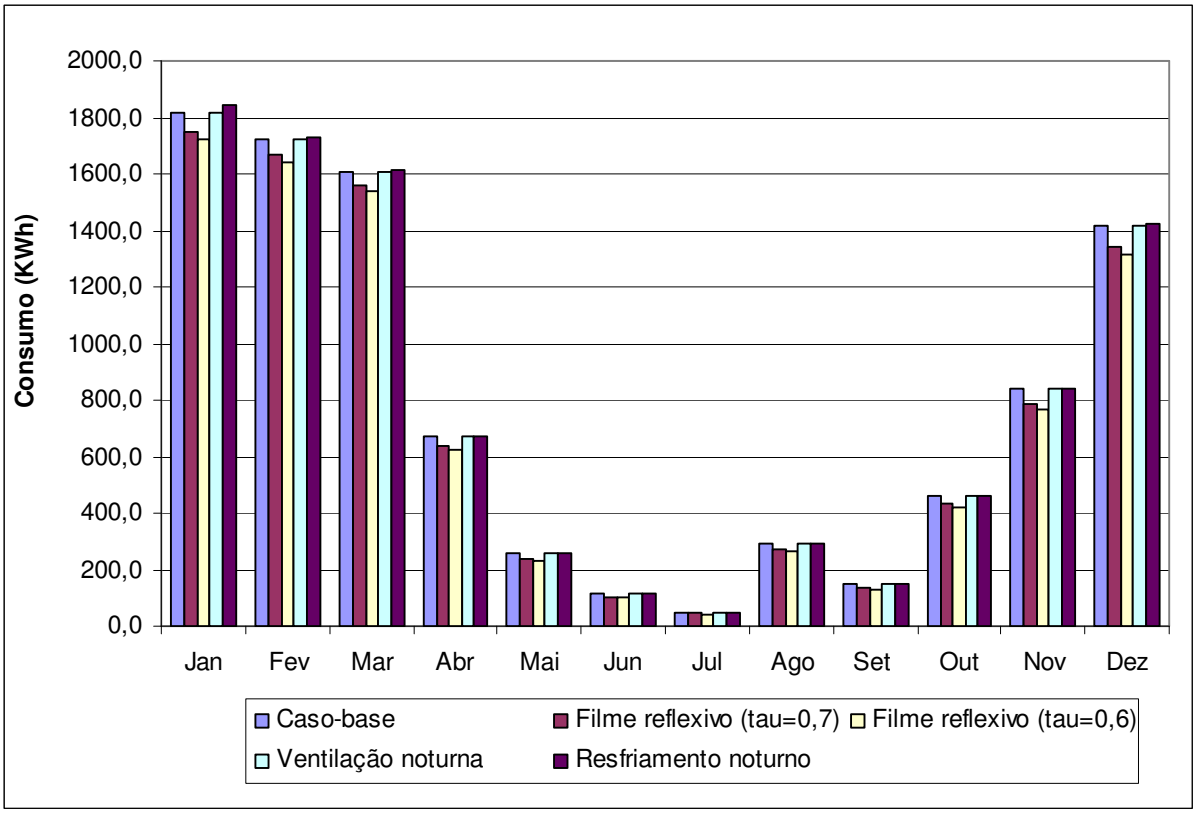

Figura 6. Consumo elétrico mensal do sistema de climatização – comparativo

Tabela 3. Valores mensais de consumo elétrico e suas variações percentuais – todas as alternativas

	Caso-Base (kWh)	Filme (τ = 0,7) (%)	Filme (τ = 0,6) (%)	Ventilação noturna (%)	Resfriamento noturno (%)
Janeiro	1813,7	-3,607	-5,140	+0,161	+1,695
Fevereiro	1722,5	-3,271	-4,651	+0,065	+0,283
Março	1609,8	-3,088	-4,465	-0,026	+0,200
Abril	673,2	-5,290	-7,618	-0,052	-0,022
Maio	256,8	-7,321	-10,674	+0,052	-0,025
Junho	112,4	-7,348	-10,675	-0,011	-0,017
Julho	49,1	-9,697	-13,934	-0,213	-0,014
Agosto	290,2	-6,239	-9,072	-0,083	-0,005
Setembro	147,1	-10,019	-14,479	-0,031	-0,005
Outubro	461,8	-6,704	-9,661	+0,032	+0,222
Novembro	838,4	-6,005	-8,679	+0,004	+0,117
Dezembro	1417,9	-5,174	-7,408	+0,151	+0,504

Analisando os resultados foi ainda simulada uma alternativa combinando o filme reflexivo (τ = 0,6), com a ventilação noturna. Os resultados são mostrados na tabela 4 e na figura 7.

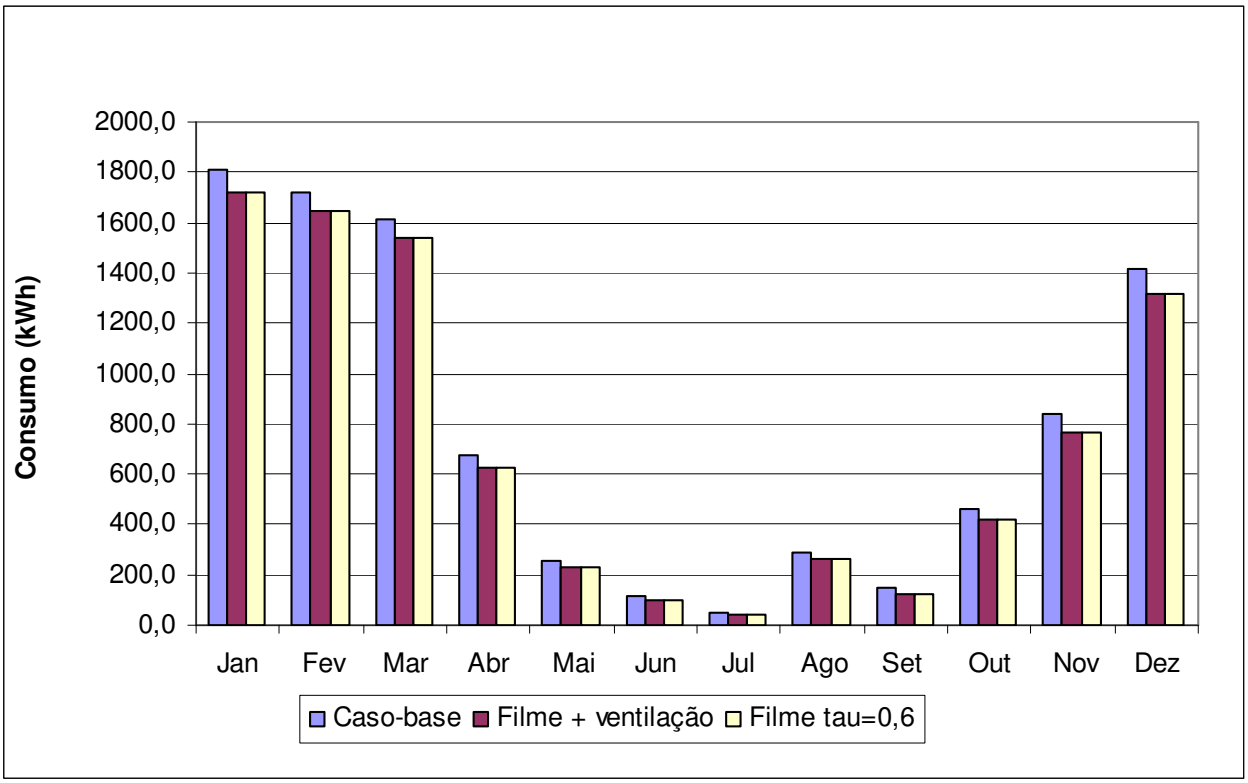

Figura 7. Perfil de consumo para a alternativa de filme reflexivo + ventilação noturna

Tabela 4. Consumo elétrico mensal do sistema de climatização – filme + ventilação noturna – em kWh

	Caso-Base	Filme + Ventilação	Variação (%)	Filme (τ = 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
Maio	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

Nota-se que a melhor solução é utilizar apenas o filme reflexivo de outubro a fevereiro, e a o uso conjunto de filme reflexivo e ventilação noturna durante o restante do ano.

5. Conclusões

Depois de realizadas todas as simulações no Energy Plus, foi possível notar uma redução significativa 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 diminui muito pouco. No uso de filme reflexivo (τ = 0,6) a redução média foi de 8,87%, na ventilação noturna e no resfriamento noturno um aumento médio de 0,004% e 0,24%, respectivamente.

Analisando a tabela 3, 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 obtém 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 julho 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 norma acarretam em 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. Isto é alcançado reduzindo-se o isolamento térmico da envoltória do edifício, como ocorre com o prédio da Nova Reitoria.

6. Referências

[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] ROMÉRO, M. A. et al. **SIADEE: Sistema Integrado para Avaliação de Desempenho Energético em Edificações.** São Paulo. FAU-USP, 2004.

ANALYSIS OF ALTERNATIVES ENERGY USE REDUCTION IN AIR-CONDITIONED BUILDINGS

Markus Kirst Hahm
markus.hahm@gmail.com

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 air conditioners 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 solution, namely window coating and night ventilation, resulting in an average reduction of 8,89%.

Keywords. Energy use. Air Conditioning. Simulation