

MERCOFRIO 2006 - V CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DE SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO DE AR ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Ana Paula Melo – apaula_melo@labeeee.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Fernando Simon Westphal – fernando@labeeee.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

Roberto Lamberts – lamberts@labeeee.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

LNN - Código e Nome do Tema

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo sobre os coeficientes de performance dos sistemas de condicionamento de ar do tipo de janela, com expansão direta, e do tipo central, com expansão indireta. O programa utilizado para o desenvolvimento deste trabalho foi o EnergyPlus, utilizado para simulação térmica e energética de modelos de edificações. A edificação utilizada foi um edifício comercial, localizado na cidade de Florianópolis - SC. O sistema de condicionamento de ar atual da edificação é do tipo de janela, o qual foi substituído por um sistema de condicionamento de ar do tipo central para avaliar qual sistema é mais eficiente energeticamente para o prédio. Além disso, duas opções de aparelhos de janela foram simuladas: uma com índice na categoria "A" do Procel, e outra com índice de categoria "E". Constatou-se que os valores nominais de coeficientes de performance adotados para os diversos tipos de condicionadores de ar não ocorrem na maior parte do tempo devido às condições às quais os condicionadores estão submetidos (temperatura externa, temperatura de bulbo seco e úmido, e carga parcial). Na comparação entre o condicionamento de ar do tipo de janela com eficiência A e o sistema de condicionamento central, observou-se que este reduz o consumo da edificação em até 12% (28778kWh), resultando em um valor de 8,22kWh/m² por ano.

Palavras-chave: Sistema de condicionamento de ar, Coeficiente de performance, Redução no consumo.

1. INTRODUÇÃO

O Prêmio Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, também conhecido como Prêmio Procel de Combate ao Desperdício de Energia, prestado pelo Ministério de Minas e Energia com base em diretrizes do Governo Federal, foi instituído por decreto presidencial em dezembro de 1993, com o intuito de reconhecimento aos participantes na luta contra o desperdício de energia elétrica. O Prêmio é dado anualmente a diversos setores que se destacaram pelo uso racional de energia e o combate ao seu desperdício. O objetivo do Prêmio Procel é estimular a sociedade a incorporar ações que efetivamente reduzam o consumo de energia elétrica (PROCEL, 2006).

Através do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) os consumidores podem obter informações das características técnicas dos produtos, podendo assim analisar a eficiência energética dos mesmos. O programa, no qual a participação é voluntária, incentiva à melhoria do desempenho dos equipamentos, gerando assim uma competitividade entre os fabricantes. Cada equipamento possui sua própria etiqueta com as respectivas informações técnicas e de eficiência energética.

Dentro do PBE, os coeficientes de performance (COP) de cada aparelho de condicionamento de ar variam de acordo com as classes estipuladas pelo ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. As classes variam do nível A (mais eficientes energeticamente) ao nível E (menos eficiente energeticamente).

ASHRAE (2000) define o coeficiente de performance (COP) de sistemas e aparelhos de condicionamento de ar como sendo a razão entre a carga térmica total retirada ou adicionada pelo sistema, e o consumo de energia elétrica solicitado pelo sistema ou aparelho. Portanto, o COP é um índice adimensional (W/W). Nos Estados Unidos é comum adotar o EER (*Energy Efficiency Ratio*) ao invés do COP, diferenciando-se deste apenas pela unidade de medida adotada: Btu/h.W. Outro índice utilizado, principalmente por programas de simulação energética, é o EIR, que seria o inverso do COP, representando a razão entre consumo de energia e capacidade do sistema ou aparelho de condicionamento de ar.

Através da simulação computacional será realizado um estudo a respeito dos COPs adotados para cada aparelho de condicionamento de ar, levando em consideração as curvas características do desempenho dos condicionadores de janela e do *chiller*. São um total de 5 curvas, as quais estabelecem a eficiência energética do aparelho em função das condições atuais de temperatura externa, carga parcial, temperatura de bulbo seco e úmido.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal utilizar a simulação computacional através do programa *EnergyPlus* para desenvolver um estudo nos coeficientes de performance dos sistemas de condicionadores de ar do tipo de janela (expansão direta) e do tipo central (expansão indireta). A este objetivo principal, está também associada uma comparação entre: sistemas condicionadores de ar do tipo de janela com eficiência A e E.

3. METODOLOGIA

3.1 O programa *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa computacional, criado a partir dos programas *BLAST* e *DOE-2* sob coordenação do Departamento de Energia dos Estados Unidos, desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. O programa possui capacidade de simulação diferenciada, tais como “*time-step*” de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas (fotovoltaico, aquecimento solar, etc...).

Para estimar o consumo de energia de uma edificação, o programa calcula o balanço térmico em cada zona, considerando a interação do edifício com as variáveis ambientais externas. Para isso, é necessário fornecer um arquivo de dados climáticos horários com informações sobre a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, velocidade e direção do vento, pressão do ar e radiação solar.

Nas simulações realizadas neste trabalho adotou-se o arquivo climático TRY (Test Reference Year) para a cidade de Florianópolis, que corresponde ao ano de 1963, dentro da série de dados registrados entre 1960 e 1990 (Goulart, 1993).

3.2 Características da edificação

A edificação utilizada para o estudo é um edifício comercial localizado em Florianópolis, com uma área construída de 3500m². A edificação possui 66 salas comerciais distribuídas nos pavimentos tipo, 2 salas comerciais no térreo e no ático, e 1 sala de reuniões no ático.

Nas janelas das salas existem *brises* fixos de concreto com 3,20 m de comprimento por 0,5 de largura e cortinas para atenuar a ação da radiação solar. A iluminação artificial é composta por lâm-

padas de diversos tipos (fluorescentes de 20 e 40W e incandescentes de 11, 25 e 60W). A taxa de infiltração foi adotada como 1 troca de ar por hora durante 24h em todas as zonas. Cada sala comercial possui um *frigobar* de 80 litros e computadores. O horário estabelecido para o funcionamento das salas comerciais do edifício foi das 8h às 18h.

O edifício não possui sistema de condicionamento de ar central, mas alguns ambientes são condicionados com aparelhos de janela e do tipo *split*. As salas dos pavimentos tipo e ático são climatizadas com condicionadores de ar de janela com capacidade de refrigeração de 10.000 Btu/h. O *hall* é climatizado por um condicionador do tipo *split*, com capacidade de 24.000 Btu/h. As salas do pavimento térreo e a sala de reuniões são também climatizadas por aparelhos do tipo *split*, com capacidade de 36.000 Btu/h, 9.000 Btu/h e 36.000 Btu/h, respectivamente. A capacidade total instalada em condicionamento de ar é de 77.5000 Btu/h, que equivale a 65TR (toneladas de refrigeração).

3.3 Modelagem do edifício no programa *EnergyPlus*

Foram inseridos no programa *Energyplus* a geometria do edifício, dividido em zonas térmicas, ou seja, zonas com características semelhantes quanto ao padrão uso, à densidade de carga instalada (W/m^2) e ao sistema de condicionamento de ar.

Para inserir o modelo real do sistema de condicionamento de ar da edificação foi utilizada uma macro desenvolvida no LabEEE, na qual são colocadas as informações da zona térmica e os padrões de uso de cada sistema de condicionamento de ar. Depois de executada a macro para modelar os aparelhos de janela correspondentes a cada zona, insere-se o coeficiente de performance (COP), e a taxa de insuflamento (m^3/s) de ar de cada aparelho. E para a inserção do sistema de condicionamento de ar do tipo central utilizou-se uma macro desenvolvida a partir de dados existentes no arquivo Templates (HVACTemplates-Autosize.imf) do próprio programa *EnergyPlus*.

3.4 Características dos condicionadores de ar

As características dos condicionadores de ar de janela foram adquiridas nos catálogos dos fabricantes (ELETROLUX, 2005; YORK, 2005) e os dados de eficiência energética na página da internet do INMETRO (INMETRO, 2005).

Condicionador de ar do tipo de janela. Adotou-se o coeficiente de performance do tipo A no valor de $3W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$, e para o tipo E no valor de $2,34W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$, ambos relacionados à um aparelho com capacidade de 10.000Btu/h. A taxa de insuflamento de ar, a capacidade de cada aparelho e o SHR (*sensible heat ratio*) foram adotados como *autosize* (dimensionado automaticamente pelo programa). Para obter a eficiência na qual o aparelho está sendo submetido foram solicitadas as variáveis horárias:

- DX Coil Total Cooling Rate*: carga térmica de resfriamento total (sensível + latente) de cada zona;
- Fan Electric Power*: potência elétrica média do ventilador;
- DX Cooling Electric Power*: potência elétrica média do compressor;

Para o cálculo da eficiência, primeiramente são somadas: a potência solicitada pelo compressor e a potência solicitada pelo ventilador. Depois se soma a carga total (*Watts*) retirada de cada zona. Para o cálculo do índice de referência horário divide-se a carga total pelo consumo dos equipamentos.

Condicionador de ar do tipo central. A central de água gelada é composta por bombas, para promover a circulação de água gelada e de condensação, torres de resfriamento para realizar a troca de calor no circuito de água de condensação e um resfriador de líquido (*chiller*) de condensação a água, o qual possui um coeficiente de performance de $6,96W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$ (0,5 kW/TR). Para promover a climatização dos ambientes, o sistema dispõe de fan-coils os quais são abastecidos com á-

gua gelada da central. Foram adotados como *autosize* no programa os dados: capacidade nominal do *chiller*, da bomba, dos ventiladores das torres e fan-coils. Como dados de saída para o cálculo da eficiência dos aparelhos de janela em condições de uso, foram solicitadas as variáveis horárias:

- a) *Fan Coil Total Cooling Rate*: carga térmica de resfriamento total (sensível + latente) de cada zona;
- b) *Pump electric power*: potência elétrica média das bombas de água gelada e de condensação;
- c) *Chiller electric power*: potência elétrica média do *chiller*;
- d) *Tower fan electric power*: potência elétrica média das torres de resfriamento;
- e) *Fan Electric Power*: potência elétrica média dos ventiladores (fan-coils).

Com as variáveis acima, pode-se realizar o cálculo do índice de eficiência horário. Primeiramente são somadas as potências solicitadas pelos componentes do sistema de condicionamento de ar central, como: bombas, *chiller*, torres e ventiladores. Depois se soma a carga (*Watts*) retirada de cada zona. Para o cálculo da eficiência divide-se a carga térmica total pelo consumo de todos os componentes do sistema central.

4. RESULTADOS

4.1 Modelo base

Após uma análise das características da edificação através do programa *AutoCad*, dividiu-se o prédio em um total de 11 zonas. O total de carga instalada no prédio pode ser observada na Tabela 1.

Carga instalada (kW)				
Zona	Ilum.	Equip.	Capacidade nominal dos aparelhos instalados	Equipamentos
Zona 1 (Subsolo)	1,3	-	-	• computador • <i>frigobar</i>
Zona 2 (Sala comercial)	0,86	0,54	10,44	• computador • <i>frigobar</i>
Zona 3 (Sala comercial)	0,22	0,27	2,61	• computador • <i>frigobar</i>
Zona 4 (Hall)	0,8	0,15	-	• computador • <i>frigobar</i>
Zona 5 (Hall)	0,8	0,15	6,96	• computador • <i>frigobar</i>
Zona 6 (Salas comerciais)	1,21	1,08	11,60	• computador • <i>frigobar</i>
Zona 7 (Circ.)	0,21	-	-	-
Zona 8 (Salas comerciais)	0,76	1,02	5,8	• computador • <i>frigobar</i>
Zona 9 (Sala reuniões)	0,45	-	10,44	-
Zona 10 (Circ.)	0,67	-	-	-
Zona 11 (Salas comerciais)	0,38	1,02	5,8	• computador • <i>frigobar</i>
Total	29,60	25,23	227,65	

Tabela 1. Total de carga instalada no prédio.

Para reduzir o tempo de processamento da simulação, sem prejuízo à precisão do modelo, optou-se por inserir o pavimento tipo uma única vez, em uma altura média entre o pavimento térreo e o ático. Para a representatividade das cargas do pavimento tipo no programa *EnergyPlus*, este foi multiplicado 11 vezes. O modelo geométrico final pode ser visualizado em 3 dimensões na Figura 1.

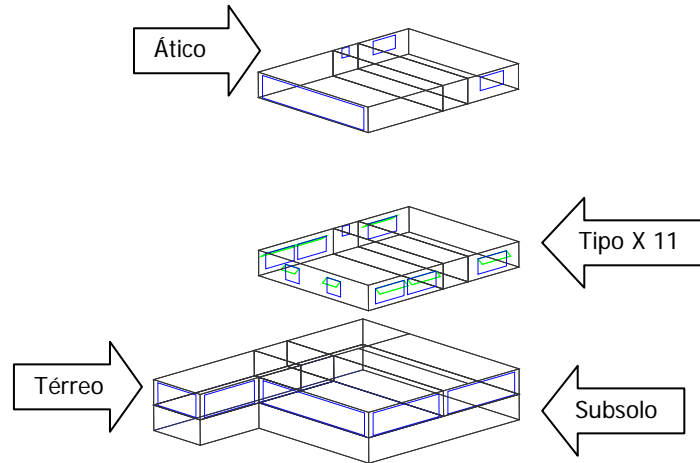


Figura 1 - Modelo base final.

4.2 Cargas internas

Após a definição da arquitetura do modelo base, os parâmetros relacionados às cargas internas foram analisados e inseridos no programa. O sistema de iluminação totaliza $8,46\text{W}/\text{m}^2$. O padrão de uso foi considerado somente para os dias de semana com horário de funcionamento das 8h às 18h. As capacidades dos aparelhos de condicionamento de ar foram dimensionadas automaticamente pelo programa de simulação.

4.3 Condicionador de ar do tipo de janela

Eficiência A. O coeficiente de performance calculado hora a hora para o aparelho de janela de eficiência A resultou em valores entre 2,55 e $3,44\text{W}_{\text{térmico}}/\text{W}_{\text{elétrico}}$. A Figura 2 representa a frequência de ocorrência dos valores do COP obtidos através da simulação.

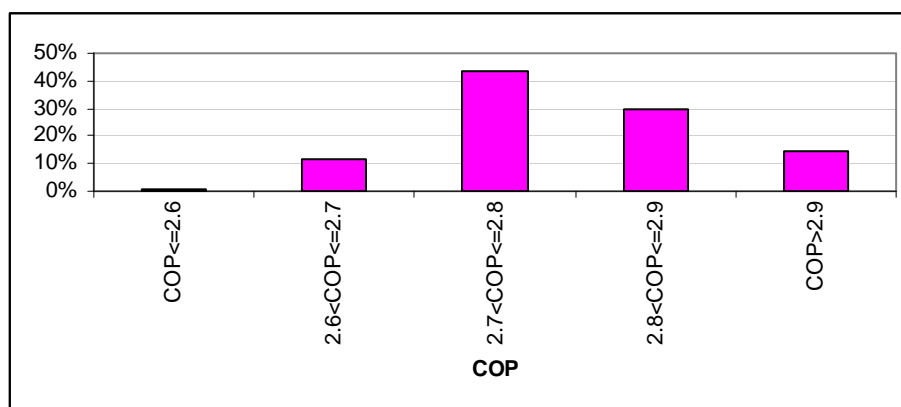


Figura 2 - COP simulado para os aparelhos de janela com eficiência A.

Observa-se que o aparelho com o coeficiente de performance adotado de $3\text{W}_{\text{térmico}}/\text{W}_{\text{elétrico}}$ está trabalhando na realidade com uma eficiência menor. Nota-se uma maior concentração dos resultados

entre os valores do COP de 2,6 a 2,9 $W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$, totalizando 85% das horas. O fato do sistema de condicionamento de ar não estar trabalhando com o valor do COP adotado está relacionado com as curvas características do aparelho (temperatura externa, temperatura de bulbo seco e úmido e carga térmica).

A Figura 3 e a Figura 4 comparam o índice de eficiência do sistema da zona 6 com a temperatura de bulbo seco (temperatura externa) na entrada do condensador e com a temperatura de bulbo úmido (temperatura interna) na entrada do evaporador, e o fator de carga parcial. Foi considerado o dia 08 de janeiro, por ser o dia mais quente registrado na simulação, e o dia 22 de agosto por ser um dia de inverno no qual ocorreu a utilização do sistema de condicionador de ar para resfriamento.

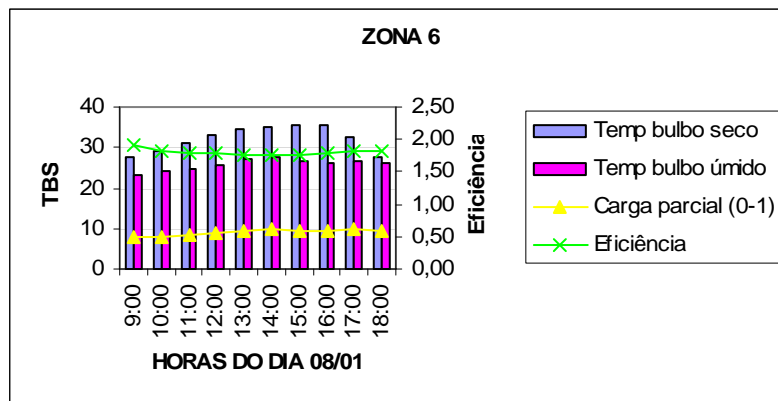


Figura 3 – Dia de verão.

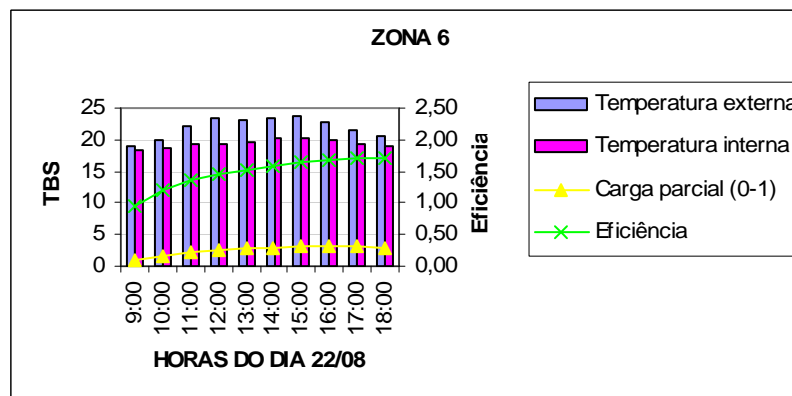


Figura 4 - Dia de inverno.

Observou-se que na zona 6, a carga máxima de solicitação do aparelho no dia 08 de janeiro foi às 17h com 0,60 da capacidade total. No inverno no dia 22 de agosto, o fator de carga parcial máximo foi de 0,32. Nota-se que quanto maior é a temperatura externa, menor é a eficiência do aparelho. Isto ocorre pelo fato do aparelho não conseguir trocar o ar quente do ambiente com o ambiente externo, pois a temperatura externa está muito elevada. Observa-se também que a carga parcial e a eficiência são diretamente proporcionais, ou seja, quanto menor a carga parcial menor será a eficiência do aparelho.

Eficiência E. O coeficiente de performance calculado hora a hora para o aparelho de janela de eficiência E resultou em valores entre 2,02 a 2,72 $W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$, como pode ser observado na Figura 5.

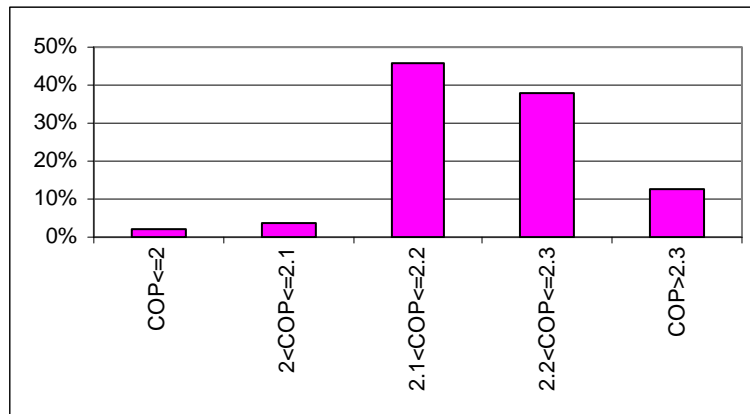


Figura 5 - COP real dos aparelhos de janela com eficiência E.

Observa-se uma maior concentração dos resultados nos valores do COP de 2,1 a 2,4 $W_{\text{t\`{e}rmico}}/W_{\text{el\`{e}trico}}$ totalizando 97% das horas. O fato do sistema de condicionamento de ar não estar trabalhando com o valor do COP adotado são os mesmos relacionados para o sistema de condicionamento de ar com eficiência A.

Comparação entre o aparelho de janela com eficiência A e eficiência E. O resultado da comparação entre o consumo mensal da edificação com os aparelhos de janela e os dois níveis de eficiência pode ser observado na Figura 6.

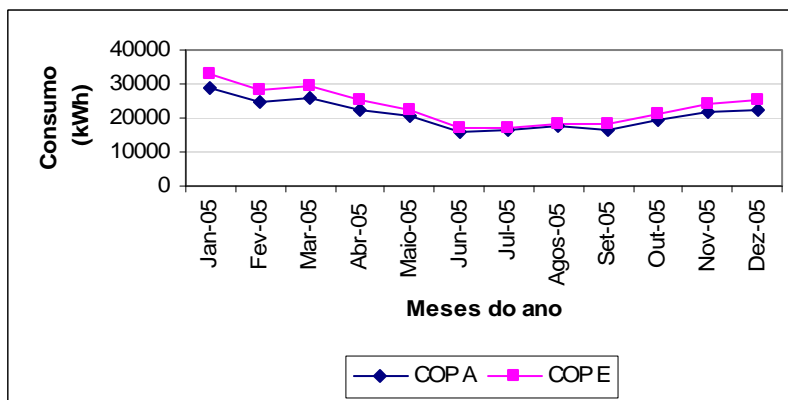


Figura 6 - Comparação entre os aparelhos de janela com eficiência A e E.

Nota-se que o aparelho de janela com eficiência A reduz o consumo da edificação conforme o esperado. A maior diferença pode ser observada no mês de janeiro, onde o aparelho com eficiência A reduziu o consumo da edificação em 4056kWh (14%). O consumo final da edificação com o aparelho de janela com eficiência A reduziu o valor em 25950kWh (11%), resultando em um total de 7,41kWh/m² do total anual.

4.4 Condicionador de ar do tipo central

Na Figura 7 pode-se observar a freqüência de ocorrência do COP para todo o sistema de condicionamento de ar do tipo central.

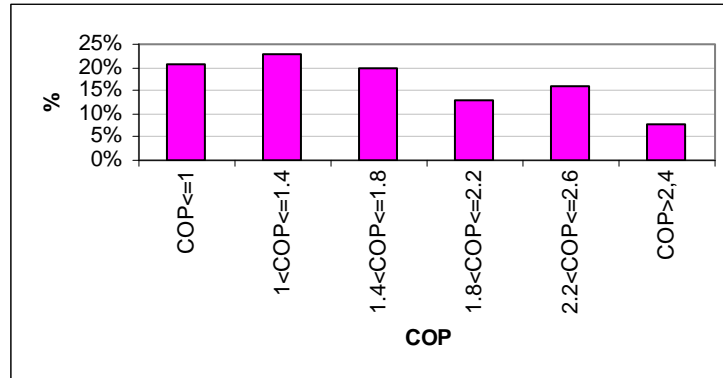


Figura 7 - COP real do sistema de condicionamento de ar do tipo central.

Nota-se uma maior concentração dos resultados (23%) em valores com um COP de 1 a $1,4W_{\text{térmico}}/W_{\text{elétrico}}$. Este resultado demonstra que o sistema está funcionando muito tempo em carga parcial, o que ocorre geralmente nos meses de inverno e primavera onde o sistema não é muito utilizado. Isso resulta em uma eficiência mais baixa do mesmo.

Calculou-se também a eficiência do *chiller* separadamente, dividindo a carga retirada da água gelada pelo consumo de energia elétrica do *chiller*. O resultado pode ser observado na Figura 8. Observa-se que o *chiller*, isoladamente, opera na maior parte do tempo com eficiência próxima do valor nominal (6,96 W/W).

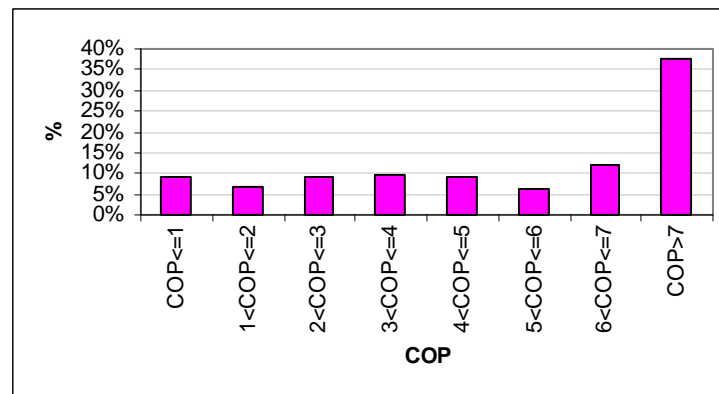


Figura 8 – COP do chiller.

Comparação entre o condicionador de ar central e o aparelho de janela com eficiência A. A diferença entre o consumo (kWh) da edificação com a utilização dos condicionadores de ar central e do condicionador de ar do tipo de janela com eficiência A pode ser observado na Figura 9.

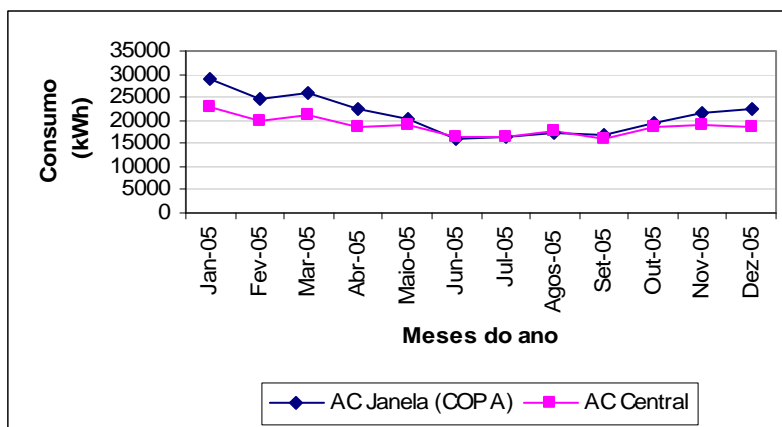


Figura 9. Comparação entre o condicionador de ar central e o aparelho de janela com eficiência A.

Observa-se que o modelo com o sistema de condicionamento de ar do tipo central consome menos energia que o modelo com o aparelho de janela com eficiência A. Nota-se uma redução do consumo final anual de 28778kWh (12%) com a utilização do sistema de condicionamento de ar central. A maior diferença pode ser observada no mês de janeiro, onde o condicionamento de ar central reduz em 4493kWh (20%) de energia do consumo mensal.

5. CONCLUSÕES

Através da metodologia adotada para a realização deste trabalho, foi possível avaliar os coeficientes de performance hora a hora para os sistemas de condicionamento de ar do tipo de janela e do tipo central em condições de funcionamento simulando o uso real.

Na análise dos aparelhos de janela com eficiência A, constatou-se que o coeficiente de performance adotado de 3W/W na realidade estão funcionando 85% das horas com um COP de 2,6 a 2,9W/W. Para os aparelhos de janela com eficiência E, notou-se que o COP adotado de 2,34W/W na realidade trabalha na maior parte do tempo (97%) com um coeficiente de performance de 2,2 a 2,3W/W. Conclui-se que o fator responsável pelo valor do COP ter resultado menor do que o nominal está relacionado com o fator de carga parcial do sistema de condicionamento de ar e em virtude das altas temperaturas de bulbo seco externa, quando o aparelho varia o seu potencial de funcionamento.

Na comparação entre os sistemas de condicionamento de ar do tipo de janela com eficiência A e E, observou-se que o aparelho com eficiência A reduz o consumo da edificação em até 11% (25950kWh) por ano.

Na análise do sistema de condicionamento de ar do tipo central, os coeficientes de performance se concentraram em valores menores de 1 a 1,4W/W (23%). Isto ocorre porque nos meses de inverno e primavera o sistema não é muito solicitado, funcionando com um fator de carga parcial baixo.

Na comparação entre os sistemas de condicionamento de ar do tipo de janela com eficiência A e o sistema de condicionamento de ar central, observou-se que este reduz o consumo final anual da edificação em até 12% (28778kWh) por ano.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ELETROLUX. Desenvolvido pela própria empresa. Apresenta características de produtos, como variados tipos de sistema de condicionamento de ar. Disponível em: <http://eden.eletrolux.com.br/Internet_Brasil/produtos.html> . Acesso em: 09 janeiro. 2006.
- ENERGYPLUS. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Office. Desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos da América. Apresenta o programa *Energy-Plus*. Disponível em: <<http://energyplus.gov>> . Acesso em: 25 março 2006.

GOULART, S. V.G. 1993. *Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico em Florianópolis*. 124 f. Dissertação em mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

INMETRO. Ministério de desenvolvimento, indústria e comércio exterior. Desenvolvido pelo governo brasileiro. Apresenta tabelas de consumo/eficiência dos condicionares de ar. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>> Acesso em: 27 janeiro. 2005.

MME. Ministério de Minas e Energia. Desenvolvido pelo governo de Minas Gerais. Apresenta textos sobre o Plano de Trabalho de Implementação da Lei de Eficiência Energética. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>> . Acesso em: 13 jan. 2006.

PROCEL. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Desenvolvido pelo governo brasileiro. Apresenta textos sobre a conservação de energia elétrica. Disponível em: <<http://www.procel.gov.br>> . Acesso em: 12 de fevereiro 2006.

YORK. Desenvolvido pela própria empresa. Apresenta características de produtos, como variados tipos de sistema de condicionamento de ar. Disponível em: <<http://yorkbrasil.com/site/content/home/>> . Acesso em: 09 set. 2005.

Abstract. This work presents a study on the coefficients of performance of the window air conditioning system, with direct expansion, and a central air conditioning system, with indirect expansion. The program used for this study was the EnergyPlus, a building energy simulation software. The building used for this work was a building office, located in the city of Florianópolis – SC. The actual air conditioning system is a packaged heat pump, wall-through type, which was substituted by a central air conditioning system to evaluate which system is more efficient for the building. Two options of window air conditioning system procedure had been simulated also: one with the category “A”, classified by the PROCEL – the Brazilian national energy saving program –, and another with category “E”. The nominal values adopted for the coefficients of performance of the air conditioning systems do not occur for the most part of the time due to conditions which those are submitted (external dry bulb temperature, internal wet bulb temperature and partial load). It was observed that the central conditioning systems provides an annual energy saving about 12% (28778kWh) over the building model with window air conditioning class “A”.

Key words: Air conditioning system, coefficient of performance, energy efficiency.