

RICCIANO LIBERALI

SIMULAÇÃO PARA ESTUDO DO ENVOLTÓRIO DE UM PRÉDIO

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

SIMULAÇÃO PARA ESTUDO DO ENVOLTÓRIO DE UM PRÉDIO

RICCIANO LIBERALI

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. SÉRGIO V. MÖLLER
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. JORGE R. S. ZABADAL
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. SÉRGIO LUIZ FREY
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2010

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família e meus amigos.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Otto Beyer*, que sempre esteve disposto a esclarecer minhas dúvidas.

à Tempoffice Climatização Ltda.

Este trabalho contou com apoio das seguintes entidades:

- SOG Arquitetura
- Tempoffice Climatização Ltda.

Don't forget your history
Know your destiny
In the abundance of the water
The fool is thirsty

Bob Marley

LIBERALI, R. **Simulação Para Estudo do Envoltório de Um Prédio**. 2010. 21f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Este trabalho trata do uso do programa *Energyplus* para estudo do envoltório de um prédio localizado na cidade de Curitiba. O prédio foi simulado com quatro diferentes tipos de envoltórios a fim de se analisar a influência dos mesmos no consumo de energia elétrica anual do prédio. Para análise do consumo energético levou-se em conta o sistema de climatização, a iluminação e os equipamentos encontrados no prédio estudado. Por fim apresentaram-se os resultados obtidos e fez-se uma análise destes, a fim de discutir os valores encontrados.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação Energética, Envoltório, *Energyplus*.

LIBERALI, R.. **Simulation to Study of Envelopment of a Building**. 2010. 21f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ABSTRACT

This work lectures about the utilization of the Energyplus program to study the outside envelopment of a public building situated in Curitiba, PR – Brazil. The building was simulated with four different types of envelopments in order to analyze their influence in its electric power consume. To do the analysis of the energetic consume it was taken in consideration the HVAC, the illumination and the equipment found in the studied building. Finally the obtained results are presented and followed by their analysis in order to discuss the found values.

KEYWORDS: Energy Simulation, Envelopment, Energyplus.

SUMÁRIO

ABSTRACT.....	1
1. INTRODUÇÃO	4
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estrutura do trabalho	4
2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	5
2.1 Edificação estudada.....	5
2.2 Programa computacional utilizado.....	5
2.3 Envoltório de edificações	5
2.3.1 Definições	5
2.3.1 Materiais	6
2.4 Sistema de ar condicionado utilizado	6
2.5 Conforto térmico.....	6
3. MODELAGEM.....	7
3.1 Modelagem geométrica do prédio.....	7
3.2 Definições no energyplus.....	8
3.2.1 Parâmetros de Simulação.....	8
3.2.2 Localização e Clima	8
3.2.3 Horários	8
3.2.4 Materiais	8
3.2.5 Construções	8
3.2.6 Ganhos internos de calor e iluminação natural.....	9
3.2.7 Dados de Saída	9
4. RESULTADOS E ANÁLISES	9

4.1 Carga térmica	9
4.2 Consumo energético	10
4.2.1 Simulação 01	10
4.2.2 Simulação 02	12
4.2.3 Simulação 03	13
4.2.4 Simulação 04	14
4.2.5 Simulação 05	16
4.2.5 Análise Global	17
5. CONCLUSÕES	18
6. REFERÊNCIAS	19
7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	19
APÊNDICES	20
ANEXOS	21

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVAS:

O estudo de eficiência energética de edificações é uma área que vem crescendo muito nos últimos anos, impulsionada pela preocupação existente com o aumento do consumo energético, que por sua vez é influenciado pelo desenvolvimento acelerado e crescimento populacional mundial, levando a cada dia mais pessoas a morar em grandes metrópoles.

Com esse aumento do consumo de energia surgem programas voltados ao uso mais racional e com maior qualidade dos recursos energéticos como, por exemplo, o Procel-Edifica [ELETROBRÁS, 2010] que proporciona a etiquetagem das edificações quanto ao seu desempenho energético e o Plano de Trabalho de implementação da Lei de Eficiência Energética, Lei Nº 10.295, de 17 de outubro de 2001 [MME, 2010], que visa o desenvolvimento de mecanismos que promovam a eficiência energética em edificações construídas no Brasil.

Esse novo panorama leva profissionais envolvidos na construção civil a estudos sobre como se pode reduzir os gastos energéticos para a operação dessas edificações. Com isso desenvolvem-se *softwares* de simulação, como é o caso do *Energyplus* [DOE, 2010], que proporcionam a análise da influência dos parâmetros construtivos no gasto energético anual de um prédio em operação.

Outra preocupação comum é com referência ao conforto térmico dos ocupantes dessas edificações dentro das zonas de conforto da ASHRAE [2004]. Assim o ar condicionado torna-se uma grande influencia no consumo energético total dos prédios, tornando a constituição construtiva destes um ponto importante no desenvolvimento de edificações sustentáveis.

Portanto, dentro do contexto apresentado, o presente trabalho irá simular a influência da constituição do envoltório de um prédio, a ser construído na cidade de Curitiba, visando o conforto térmico dos ambientes climatizados e um baixo consumo de energia elétrica na operação anual do mesmo.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o uso do software *Energyplus* para a simulação de carga térmica e de gasto energético anual para um prédio que será construído na cidade de Curitiba, de maneira a se obter dados sobre diferentes tipos de envoltórios e posterior estudo dos mesmos para análise do impacto deste elemento no consumo energético para a operação do prédio em questão.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será apresentado em cinco capítulos.

Além da introdução já apresentada apresenta-se no segundo capítulo a edificação simulada, o programa adotado para a simulação, definições sobre envoltórios, sistema de ar condicionado selecionado e conforto térmico.

O terceiro capítulo traz a modelagem do prédio para simulação e as definições no programa *Energyplus*.

No quarto capítulo são apresentados os resultados provenientes das simulações dos diversos tipos de envoltórios além de análises e comparativos dos mesmos.

No quinto capítulo apresentam-se as conclusões finais deste trabalho.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

2.1 EDIFICAÇÃO ESTUDADA

A edificação estudada será construída na cidade de Curitiba.

Trata-se de um prédio de sete andares com uma área total de 4859 m² dos quais 2964 m² são climatizados.

O trabalho de escritório será a atividade principal de seis pavimentos enquanto no terceiro pavimento será construído um auditório com capacidade para 90 pessoas.

O envoltório do prédio será constituído de alvenaria e vidros. Os vidros representaram um total de 49,13% da área total do envoltório externo do prédio.

A planta baixa do pavimento tipo pode ser vista no anexo A.



Figura 1 – Prédio Estudado (FONTE: Projeto Arquitetônico – SOG Arquitetura)

2.2 PROGRAMA COMPUTACIONAL UTILIZADO

O programa computacional utilizado para as simulações neste trabalho é o *Energyplus*, que foi desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América a partir de outros dois programas, BLAST e DOE-2.

O *Energyplus* é um programa de simulação térmica e energética [Lamberts, 2006], ou seja, é possível o cálculo de cargas térmicas de refrigeração e aquecimento para uma determinada edificação, além da simulação energética anual do prédio em funcionamento.

Como arquivos base apresentam-se bibliotecas climáticas, de materiais, horários de funcionamento de máquinas e ocupação, entre outros. Esses arquivos são utilizados nas simulações facilitando o uso do programa.

Na modelagem geométrica do prédio utilizou-se o programa *Google Sketchup* [GOOGLE, 2010] juntamente com o *plugin Openstudio* [DOE, 2010], este último gerando arquivos do tipo idf que são utilizados no *Energyplus*.

2.3 ENVOLTÓRIO DE EDIFICAÇÕES

2.3.1 Definições

Define-se envoltório de edificações como o que separa o interior de um edifício do exterior.

Para análise térmica dividem-se as construções que constituem o envoltório em dois grupos: construções opacas e translúcidas.

Nas construções opacas a maior parte do calor trocado entre zonas climatizadas e não climatizadas ocorre por meio de condução térmica. Portanto, nessas construções, a condutividade térmica do material utilizado é o parâmetro mais importante na análise.

Já em construções translúcidas o calor irradiado através destas deve ser levado em conta, sem que seja desprezada a transferência de calor por condução. Assim, nessas construções, além da condutividade térmica, propriedades dos materiais como refletância e transmitância devem ser levadas em conta.

Outra importante propriedade dos materiais é a sua densidade. A partir dela pode-se saber qual o efeito do material na inércia térmica do prédio.

2.3.2 Materiais

De acordo com o *Energyplus* [2010] há uma subdivisão dos materiais opacos em materiais opacos comuns e materiais opacos de massa desprezível. A diferença entre ambos durante a simulação é que os materiais de massa desprezível não contribuem para a inércia térmica do ambiente enquanto os materiais comuns participam desse fenômeno.

Tijolos e placas de concreto são exemplos de materiais comuns enquanto carpetes representam os materiais de massa desprezível.

Os materiais translúcidos são divididos em vidros e películas. Os vidros têm sua massa considerada nos cálculos, enquanto as películas são consideradas com massa desprezível.

No *Energyplus* existe a possibilidade do uso de espaços de ar entre os materiais na constituição das construções. O objetivo é o aumento da resistência térmica da construção a fim de diminuir a troca de calor entre as zonas.

2.4 SISTEMA DE AR CONDICIONADO UTILIZADO

O sistema de ar condicionado adotado nas simulações é do tipo *split* com multi-evaporadoras. Este sistema proporciona o uso de uma única unidade condensadora que atende a diversas unidades evaporadoras, diminuindo assim o espaço externo necessário.

O sistema possui duas unidades funcionais, uma interna e outra externa, que trabalham em conjunto para fechar o ciclo de refrigeração. Na unidade interna encontra-se o evaporador do sistema que é constituído basicamente por uma serpentina de troca de calor, um ventilador e termostatos que controlam a temperatura do ar de retorno. A unidade externa é constituída por um ou mais compressores, uma condensadora (que possui um ventilador e uma serpentina de troca de calor) e a válvula de expansão, esta última, entretanto, podendo estar na unidade interna.

O sistema trabalha com gás refrigerante R410a que é considerado um gás ecológico, pois possui potencial de degradação da camada de ozônio igual a zero. Porém possui potencial de aquecimento global igual a 2100. Fazendo-se uma comparação com o R-22 tem-se que o potencial de degradação da camada de ozônio para este gás é igual a 0,055, por outro lado ele contribui menos para o aquecimento global tendo um potencial de 1810 [ASHRAE, 2009].

Para aquecimento utiliza-se o ciclo reverso do ar condicionado.

2.5 CONFORTO TÉRMICO

Conforto térmico é definido como “aquela condição da mente na qual é expressa satisfação com o ambiente térmico” [Beyer, 2008]. Assim o conforto térmico pode ser gerado por temperaturas médias diferentes para cada pessoa.

Como pode ocorrer esse tipo de variação, após estudos a ASHRAE definiu as temperaturas de conforto térmico como sendo 25°C para o verão e 22°C para o inverno [2004], com variações de mais ou menos 1,5°C.

3. MODELAGEM

3.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA DO PRÉDIO

Para modelagem geométrica do prédio utilizou-se o programa *Google Sketchup* e para posterior uso desta modelagem utilizou-se o *plugin Openstudio*, que tem como função salvar os arquivos gerados no modelo idf, tornando assim possível seu aproveitamento no *Energyplus*.

Neste primeiro passo definem-se as dimensões do prédio estudado, além da criação de zonas para melhor controle na simulação.

Dividiram-se os pisos como internos e sobre o solo.

Os pisos internos são os que separam as zonas térmicas e foram adotados como adiabáticos, pois dividem apenas zonas climatizadas de zonas climatizadas ou zonas não climatizadas de zonas não climatizadas, sendo assim desprezível a troca de calor por meio desta construção.

O piso sobre o solo é o que está no pavimento térreo e troca calor com o solo. Esta troca de calor foi considerada nos cálculos e ao longo do trabalho demonstra-se como isso foi feito.

As paredes subdividiram-se em paredes externas, paredes climatizadas e paredes não climatizadas.

As paredes externas representam o envoltório físico do prédio. A exposição ao sol e aos ventos é levada em consideração.

Utilizou-se paredes climatizadas apenas entre zonas climatizadas por isso estas foram consideradas adiabáticas.

Paredes não climatizadas são utilizadas para separar zonas climatizadas de zonas não climatizadas. Para estas construções adotou-se o coeficiente de transferência de calor *Other Side Coefficient*, que trabalha de modo a prescrever as temperaturas as quais a construção está exposta.

A cobertura, assim como as paredes externas, é exposta aos ventos e ao sol. Os forros internos são adiabáticos pelas mesmas razões dos pisos internos.

As janelas foram definidas em sua geometria em relação às paredes em que se encontram. Posteriores refinamentos desta construção aparecem no *Energyplus*.

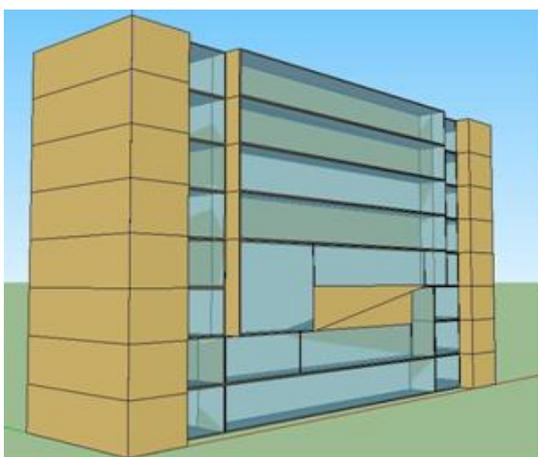


Figura 2 – Modelagem geométrica do prédio.

3.2 DEFINIÇÕES NO ENERGYPLUS

3.2.1 Parâmetros de simulação

Pode-se, através do *Energyplus*, tanto dimensionar a carga térmica dos ambientes quanto simular o consumo energético anual do prédio. No trabalho optou-se por realizar essas tarefas separadamente, primeiramente obtendo-se a carga térmica para posteriormente analisar o consumo energético da edificação.

Os limites de convergência adotados foram 0,4°C.

A distribuição solar escolhida foi a *Full Exterior*, que leva em conta as sombras causadas por uma região sobre a outra, de maneira a refinar os resultados das simulações. Outra distribuição solar mais refinada, *Full Exterior and Interior*, não pode ser usada, pois o prédio possui uma estrutura dita não convexa e, portanto essa distribuição solar não foi escolhida.

3.2.2 Localização e Clima

Como dito anteriormente o *Energyplus* possui uma biblioteca de arquivos climáticos que podem ser utilizadas nas simulações.

Esses arquivos trazem um histórico do clima da cidade selecionada além de alguns dados importantes como a localização e a pressão total do local.

Os dias de projeto aparecem logo após as definições de clima e localização do prédio. Eles traçam as premissas básicas de simulação e também foram retirados da biblioteca de arquivos do *Energyplus*.

3.2.3 Horários

O programa trabalha de modo a se aproximar ao máximo da realidade. Para isso utiliza-se de horários de ocupação e operação de ar condicionado, equipamentos e iluminação.

O programa trás em sua biblioteca os horários para cada tipo de atividade, porém optou-se por adaptá-los as condições brasileiras. Uma mudança que representa isso é a alteração do período de funcionamento do ar condicionado em ambientes de escritório que passou de oito da manhã até as dez da noite para oito da manhã até as sete horas da noite.

3.2.4 Materiais

A biblioteca de arquivos do programa tem uma variedade de materiais para utilização nas simulações.

Além da utilização de alguns tipos de materiais do arquivo do programa, alguns outros materiais foram criados de modo a adaptar as construções a realidade nacional.

As tabelas 1 e 2, que estão no apêndice A trazem respectivamente as propriedades dos materiais translúcidos e opacos utilizados na constituição das construções durante as simulações. Além disso, a definição de caixilhos ocorre nesse item, e o material utilizado para tal foi o alumínio.

Utilizaram-se ainda espaços de ar nas paredes, nos pisos e nos forros. Para paredes tem-se uma resistência térmica de 0,15 m²K/W e para os demais 0,18 m²K/W nestes espaços de ar utilizados.

3.2.5 Construções

Para cada tipo de construção definida anteriormente deve-se agora definir sua constituição construtiva.

Como o trabalho terá cinco simulações diferentes, algumas construções variam suas construções ao longo destas simulações.

A tabela 3, encontrada no apêndice B, trás as definições de cada construção. Deve-se prestar atenção ao fato de apenas forro externo, parede externa e janelas terem suas configurações alteradas nas simulações.

3.2.6 Ganhos internos de calor e uso de iluminação natural

Os ganhos internos de calor são divididos em três itens: pessoas, equipamentos e iluminação.

Para o primeiro optou-se por um total de 0,11 pessoas/m² em áreas climatizadas e de 0,15 pessoas/m² em áreas não climatizadas. Esses números levam em conta dados do projeto do prédio e variam de acordo com o horário de ocupação.

Os equipamentos declarados são basicamente elevadores e computadores. Os elevadores estão nas zonas de serviço e os computadores nas zonas climatizadas. A variação ocorre a partir do horário de ocupação pois, espera-se, que a utilização de equipamentos esteja ligada diretamente a taxa de ocupação do prédio.

O uso da iluminação natural passou a ser considerada a partir da segunda simulação, de modo a mostrar a importância de um projeto bem sucedido nessa área. Para todas as simulações definiu-se um total de 15 W/m² para a iluminação. A partir do uso da iluminação natural esse número varia ao longo das simulações.

3.2.7 Dados de Saída

Como dados de saída selecionou-se para cada simulação: horas não atendidas pela temperatura definida no termostato durante a ocupação, carga térmica total das zonas climatizadas, gasto energético anual do prédio, gasto energético mensal do sistema de ar condicionado, total de energia anual gasta pelo ar condicionado, total de energia anual gasta pela iluminação, total de energia gasta pelos equipamentos e carga térmica do último pavimento.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados serão apresentados em dois itens. No primeiro apresentam-se as cargas térmicas do prédio e do último pavimento para cada simulação. Já no segundo os dados serão relativos ao consumo energético do prédio para cada caso estudado.

4.1 CARGA TÉRMICA

Os materiais utilizados em cada construção seguem a ordem já apresentada na tabela 3. Para a primeira simulação desconsiderou-se o efeito da iluminação natural, nas demais simulações este efeito foi considerado.

Para cálculo da carga térmica optou-se por analisar o prédio todo em funcionamento, diferentemente do recomendado que seria o desligamento de todas as zonas para a análise de carga térmica de uma única zona ligada. Essa simplificação tem fundamentação devido ao fato de que o prédio deverá ter horários de funcionamento muito próximos em todos os pavimentos. Além disso, se tem uma zona de conforto com amplitude de 6°C.

Sendo assim, pode-se ter um efeito indesejado que não atenda as condições de conforto térmico nos dias de projeto, se zonas diferentes funcionarem em horários diferentes.

Tabela 4 – Valores das cargas térmicas total do prédio e do último pavimento.

Carga térmica					
	Simulação 01	Simulação 02	Simulação 03	Simulação 04	Simulação 05
Prédio	498 kW	481 kW	439 kW	436 kW	436 kW
Último Pavimento	78 kW	75 kW	68 kW	65 kW	65 kW

A tabela acima mostra que a maior diminuição da carga térmica ocorreu entre a segunda e a terceira simulação, quando o vidro claro de 3 mm de espessura foi trocado pelo vidro esverdeado de 6 mm de espessura. Por se tratar de um vidro de espessura maior e com uma transmitância solar menor, entende-se que houve uma redução tanto na transferência de calor, do exterior para as áreas climatizadas, por condução quanto por radiação. A redução total de carga térmica entre essas duas simulações atinge 9%.

A redução da carga térmica ocorrida da simulação 01 para a simulação 02 deve-se a diminuição do uso de iluminação artificial. Como se tem menos carga de lâmpadas, a carga térmica dos ambientes sofreu uma redução de 3,4%.

Com relação ao aumento da espessura do concreto que integra o forro de 200 mm para 300 mm, nota-se que há uma redução de 9% na carga térmica do último pavimento.

Para a última simulação trocou-se a constituição das paredes externas, passou-se a usar blocos de concreto furado no lugar de tijolos furados. Nota-se que não houve redução na carga térmica do prédio. Isto se deve ao fato de que as paredes externas estão em grande parte em contato com zonas não climatizadas, influenciando apenas indiretamente as zonas climatizadas.

4.2 CONSUMO ENERGÉTICO

4.2.1 Simulação 01

A tabela 5 trás dados da primeira simulação que leva em conta os dados do projeto arquitetônico. Os materiais utilizados podem ser vista na tabela 3 no apêndice B.

Tabela 5 – Gasto energético anual dos sistemas na simulação 01.

Consumo energético anual		
Sistema	Consumo anual	Percentual do consumo total
Resfriamento	170965 kW.h	29%
Aquecimento	3357 kW.h	0,5%
Ventiladores	23227 kW.h	3,8%
Ar Condicionado	197549 kW.h	33%
Iluminação	265925 kW.h	43%
Equipamentos	147275 kW.h	24%
TOTAL	610749 kW.h	100%

Pode-se notar que o gasto energético com iluminação é o maior entre os sistemas estudados. Isto se deve ao fato de que apesar de se ter uma grande área envidraçada, para esta primeira simulação, não se adotou o efeito do uso da iluminação natural na operação do prédio.

A figura 3 mostra a distribuição mensal do consumo de cada sistema do prédio estudado para a simulação 01.

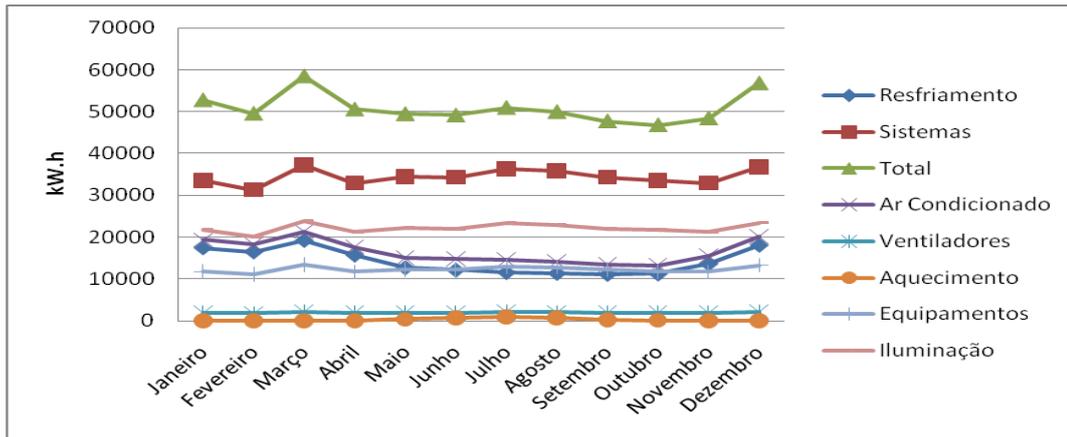


Figura 3 – Distribuição mensal do consumo energético (simulação 01).

Pode-se notar que a distribuição do consumo energético mensal pela iluminação não tem uma variação acentuada. Outro ponto importante é que o aquecimento é praticamente nulo e o resfriamento bastante alto durante os períodos de frio. Isto se deve ao fato que a iluminação artificial gera uma carga térmica interna grande, contribuindo para que o ar condicionado opere no ciclo frio nos meses de inverno.

Da simulação pode-se retirar o dia e o horário em que se teve o pico de demanda de consumo energético do prédio. Este pico ocorreu no dia 15 de abril as 13 horas e 39 minutos com um valor total de 272 kW, sendo que destes 72 kW do sistema de iluminação e 134 kW do sistema de ar condicionado.

A figura 4 trás o consumo anual de cada sistema do prédio para esta simulação.

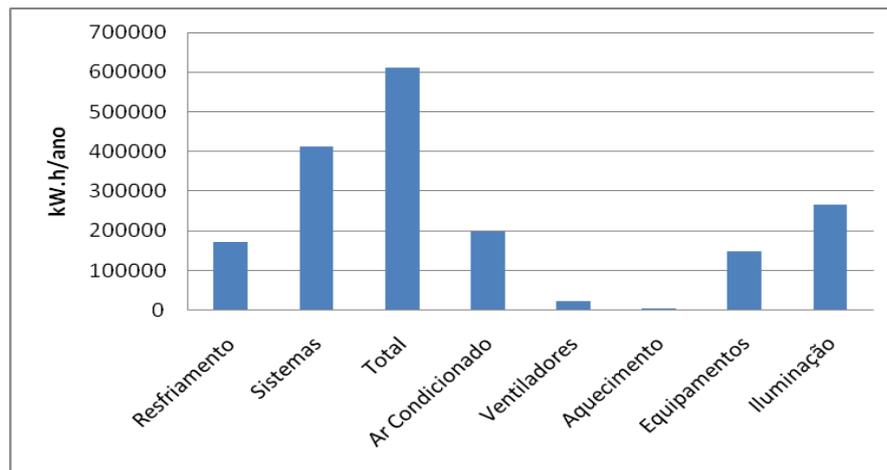


Figura 4 – Consumo energético anual de cada sistema (simulação 01).

Entede-se por total a carga total do sistema, por sistemas a soma das cargas de equipamentos e iluminação e por ar condicionado a soma de resfriamento, aquecimento e ventiladores.

A figura 4 mostra que o sistema de iluminação foi o maior responsável pelo consumo anual total do prédio. Da tabela 5 se tem os valores de 265925 kW.h ou 43% do total do consumo energético para a iluminação. Para o sistema de ar condicionado o gasto anual foi de 170965 kW.h ou 33% do consumo anual do prédio.

Nesta primeira simulação, durante 297 horas a temperatura das zonas não esteve dentro dos padrões da ASHRAE. Sendo que, 214 horas ocorreram durante o resfriamento e 83 horas durante o aquecimento. Estas horas fora da zona usualmente ocorrem quando os sistemas são ligados.

4.2.2 Simulação 02

A partir desta simulação, os dados relativos ao uso da iluminação natural entram nos cálculos de consumo energético.

A tabela 6 trás os valores de consumo anual para cada sistema nesta simulação.

Tabela 6 – Gasto energético anual dos sistemas na simulação 02.

Consumo energético anual		
Sistema	Consumo anual	Percentual do consumo total
Resfriamento	149199 kW.h	30%
Aquecimento	5623 kW.h	1,2%
Ventiladores	22429 kW.h	4,5%
Ar Condicionado	177251 kW.h	36%
Iluminação	165450 kW.h	34%
Equipamentos	147275 kW.h	30%
TOTAL	489977 kW.h	100%

Pode-se notar que a maior diminuição de consumo energético anual ocorre no sistema de iluminação que passou de 265925 kW.h para 165450 kW.h, ou seja, redução de 38%. A iluminação natural trabalhou de modo a se utilizar menos a iluminação artificial, e com isso o sistema de climatização também sofreu uma redução no consumo durante o resfriamento, pois se tem uma menor carga térmica interna gerada pelas lâmpadas. Esta redução é de 18% ou 21766 kW.h/ano.

Apesar da redução no consumo do ar condicionado no resfriamento, no aquecimento há um aumento deste valor. Isto se deve ao fato de que com a diminuição da carga térmica interna que era gerada pela iluminação artificial, necessitou-se durante mais tempo o ciclo reverso do ar condicionado.

A figura 5 mostra a distribuição mensal do consumo energético para a simulação 02.

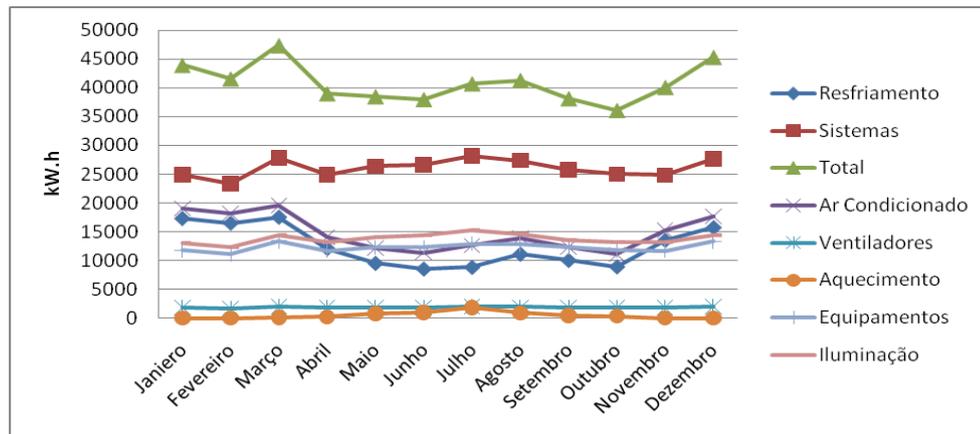


Figura 5 – Distribuição mensal do consumo energético (simulação 02).

Pode-se notar, a partir da figura 5, que o pico de consumo energético ocorre no mês de março. Este valor pode ser obtido em relatórios da simulação e foi de 47382 kW.h. Este consumo tem como maior responsável o ar condicionado com 19587 kW.h no mês. Logo atrás o consumo com iluminação que neste mês atinge 14413 kW.h.

Nota-se que, em relação à primeira simulação, se tem uma queda do uso da iluminação artificial, de modo que este sistema é ultrapassado pelo sistema de ar condicionado durante os períodos quentes do ano.

Da simulação pode-se retirar o momento em que houve a maior demanda de energia durante o ano. Nesta simulação este momento ocorreu no dia 31 de março às 14 horas e 30 minutos quando se tem uma demanda de 227 kW sendo 122 kW (54%) em ar condicionado.

A figura 6 mostra o consumo anual, de cada sistema simulado, no ano.

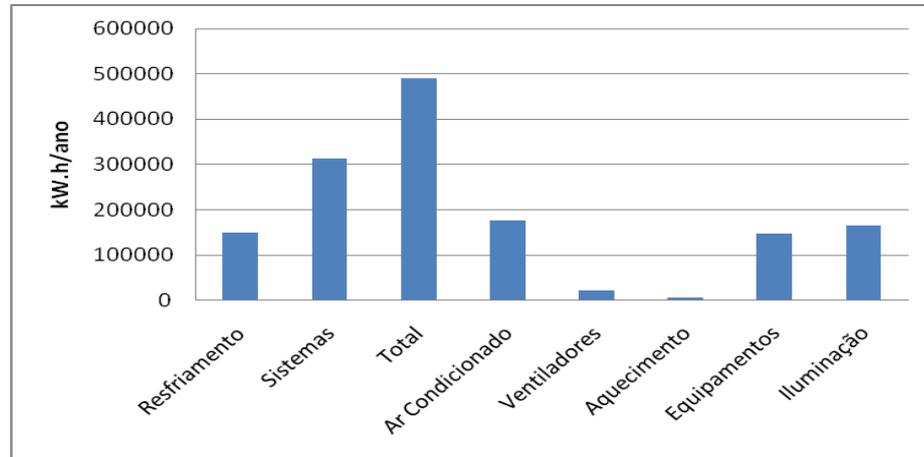


Figura 6 – Consumo energético anual de cada sistema (simulação 02).

A redução de consumo total anual foi de 120772 kW.h ou 20%. A maior redução ocorreu no sistema de iluminação, logo em seguida vem o sistema de ar condicionado.

Para esta simulação o total de horas em que a temperatura não esteve dentro da zona de conforto da ASHRAE durante a ocupação foi de 297 horas sendo que destas 198 horas aconteceram durante o resfriamento e 99 horas durante o aquecimento dos ambientes.

4.2.3 Simulação 03

A tabela 7 trás os resultados obtidos na terceira simulação, quando houve a troca de vidros claros por vidros esverdeados.

Tabela 7 - Gasto energético anual dos sistemas na simulação 03.

Consumo energético anual		
Sistema	Consumo anual	Percentual do consumo total
Resfriamento	129471 kW.h	28%
Aquecimento	5947 kW.h	1,3%
Ventiladores	20496 kW.h	4,4%
Ar Condicionado	155915 kW.h	33%
Iluminação	166078 kW.h	35%
Equipamentos	147275 kW.h	31%
TOTAL	469268 kW.h	100%

A tabela 7 mostra que existiram variações no resfriamento, no aquecimento e na iluminação, em relação à simulação 02. Nota-se que, entre estes três itens, o único que variou de forma significativa foi o resfriamento.

Entende-se que com o escurecimento dos vidros teve-se uma diminuição na transferência de calor por radiação para os ambientes climatizados. Com isso ocorreu uma queda no uso do ar condicionado no ciclo frio durante o ano.

Esse escurecimento porém fez com que o gasto energético com iluminação aumentasse para que as condições de luminosidade fossem mantidas nos ambientes.

Pode-se notar que, para esta configuração, o sistema de iluminação passa novamente a ter um consumo mais significativo que o de climatização.

Na energia total gasta para operação do prédio, teve-se uma redução de 4,2 % em relação à simulação dois. Para o ar condicionado a redução foi de 12% e o aumento no consumo por iluminação foi de 0,4%.

A figura sete trás a nova distribuição energética mensal dos sistemas estudados.

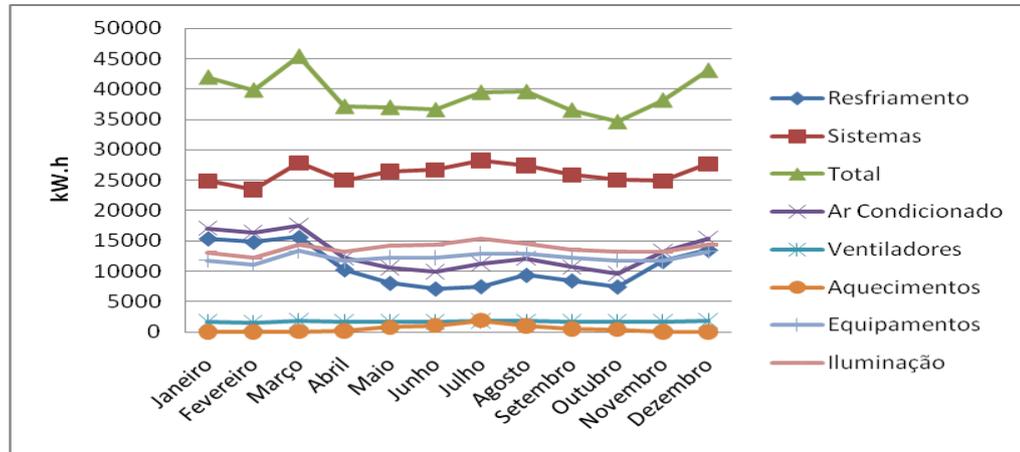


Figura 7 – Distribuição mensal do consumo energético (simulação 03).

Nota-se que o pico de consumo continuou no mês de março. Agora o pico é de 45398 kW.h no mês, onde a iluminação consumiu 14454 kW.h (32%) e o ar condicionado 17562 kW.h (39%).

Outro dado importante é que os equipamentos tiveram um consumo superior ao ar condicionado entre os meses de maio e outubro, diferentemente da segunda simulação quando os equipamentos só consumiram mais do que o ar condicionado durante os meses de junho e julho.

Para esta simulação o pico de demanda foi de 215 kW e ocorreu no mesmo dia e mesmo horário do pico da simulação 02.

A figura oito mostra o consumo anual de cada sistema para a simulação 03.

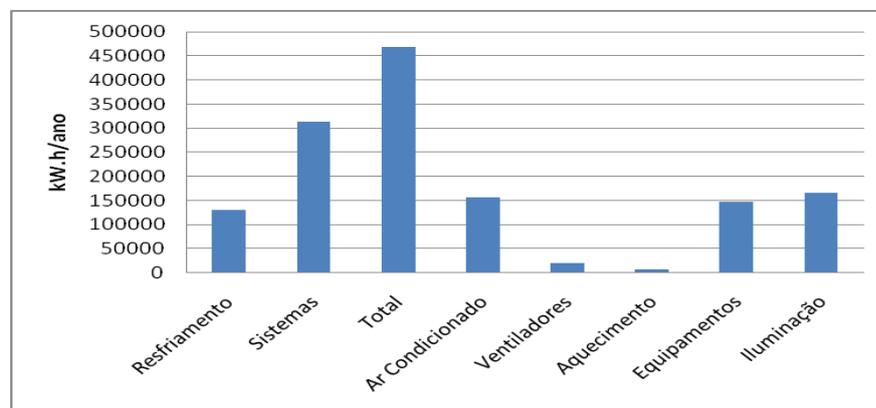


Figura 8 – Consumo energético anual de cada sistema (simulação 03).

Para a simulação 03 a temperatura não esteve na zona de conforto durante 242 horas, sendo que destas 139 horas no resfriamento e 103 horas no aquecimento.

4.2.4 Simulação 04

Os resultados da quarta simulação, quando se trocou a espessura da cobertura de 200 mm para 300 mm, aparecem na tabela 8.

Tabela 8 - Gasto energético anual dos sistemas na simulação 04.

Consumo energético anual		
Sistema	Consumo anual	Percentual do consumo total
Resfriamento	129852 kW.h	28%
Aquecimento	5853 kW.h	1,2%
Ventiladores	20352 kW.h	4,3%
Ar Condicionao	156058 kW.h	33%
Iluminação	166078 kW.h	35%
Equipamentos	147275 kW.h	31%
TOTAL	469412 kW.h	100%

Na tabela oito pode-se observar que, em relação à tabela 7, há um aumento no consumo de energia para o resfriamento apesar da diminuição da carga térmica do prédio. O aumento de energia elétrica total em relação à simulação anterior foi de 0,03%.

Isto pode ser explicado pelo fato de que o forro externo teve sua espessura aumentada de 200 mm para 300 mm e com isso, quando aquecido pelo sol, precisou de uma maior carga do sistema de ar condicionado para resfriá-lo. A figura 9 mostra a distribuição mensal do consumo energético de cada sistema do prédio estudado.

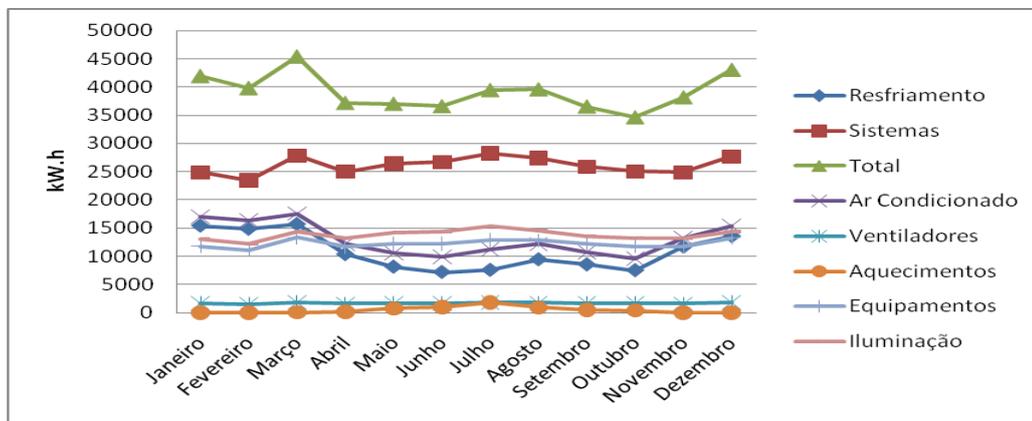


Figura 9 – Distribuição mensal do consumo energético (simulação 04).

Pode-se notar que não há variações significativas na distribuição do consumo energético mensal do prédio estudado, com relação à simulação 03.

O pico de consumo continua no mês de março com um leve aumento em relação à terceira simulação.

O aumento do consumo de energia pelo ar condicionado pode ser compreendido como influência do aumento da massa do forro mais espesso utilizado nesta simulação.

A figura 10 mostra o consumo anual para cada sistema do prédio, para a simulação 03.

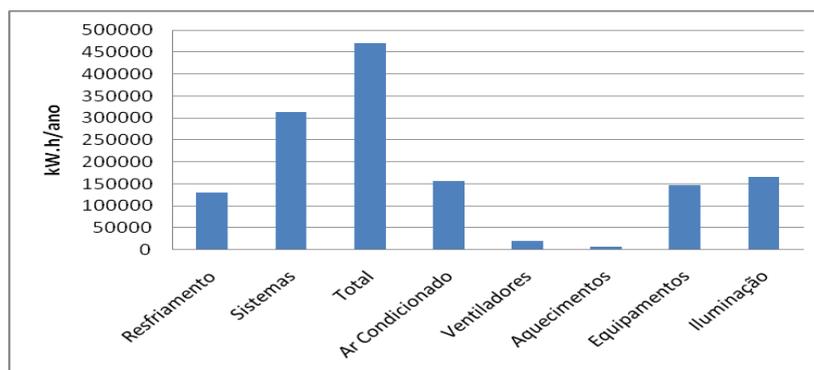


Figura 10 – Consumo energético anual de cada sistema (simulação 04).

Nesta simulação as horas não atendidas pelo sistema foram de 247 horas, sendo 143 horas durante o resfriamento e 104 horas no aquecimento.

4.2.5 Simulação 05:

A tabela 9 mostra os valores obtidos na simulação 05, quando se utilizou blocos de concreto furados no lugar de tijolos furados nas paredes externas. Pode-se notar que há pequenas variações em comparação a simulação 04. Uma dessas variações é o aumento do consumo do sistema de ar condicionado que acabou influenciando no consumo total de energia elétrica do prédio estudado. Aumento esse de 0,23%.

Este aumento pode ser explicado pelo fato de que os blocos de concreto furados usados nesta simulação nas paredes externas, em detrimento aos tijolos furados, têm uma menor resistência térmica devido a sua densidade mais baixa.

O dia em que se tem a maior demanda continuou sendo em 31 de março, assim como o horário que permaneceu às 14 horas e 30 minutos.

Tabela 9 - Gasto energético anual dos sistemas na simulação 05.

Consumo energético anual		
Resfriamento	131076 kW.h	28%
Aquecimento	5730 kW.h	1,2%
Ventiladores	20339 kW.h	4,3%
Ar Condicionado	157146 kW.h	33%
Iluminação	166078 kW.h	35%
Equipamentos	147275 kW.h	31%
TOTAL	470500 kW.h	100%

A figura 11 trás a distribuição do consumo energético mensal para operação do prédio. Pode-se notar neste gráfico que o pico de consumo energético continua ocorrendo no mês de março.

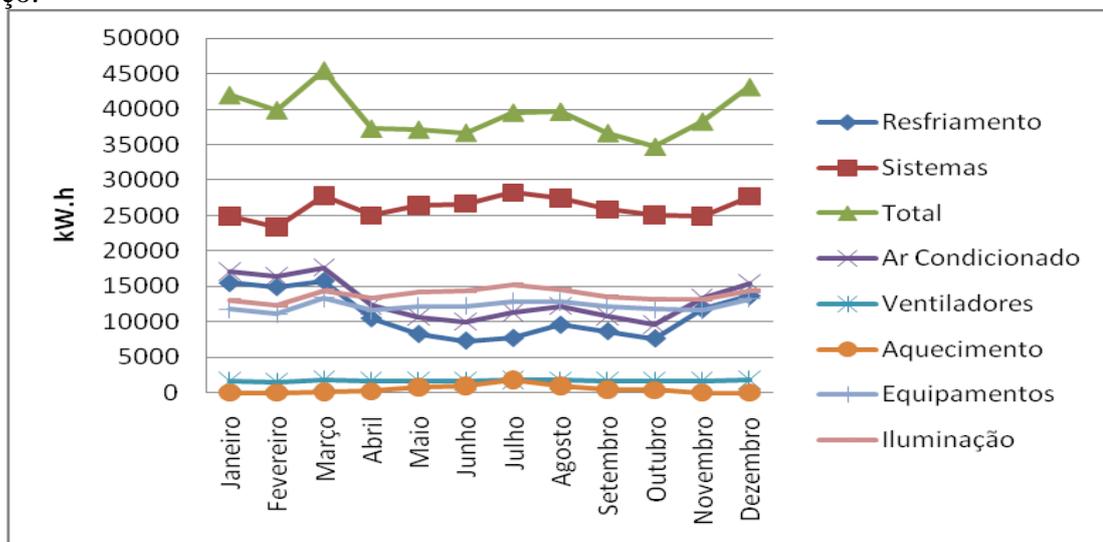


Figura 11 - Distribuição mensal do consumo energético (simulação 05).

Para esta última simulação, a temperatura esteve fora da zona de conforto durante 247 horas. Durante o resfriamento foram 144 horas e no aquecimento 103 horas.

A figura 12 mostra o consumo energético anual para cada sistema do prédio em estudo.

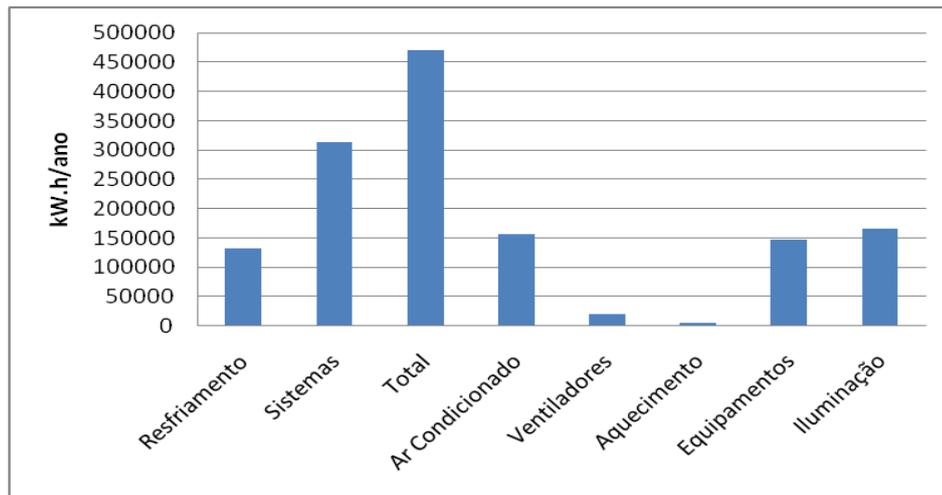


Figura 12 – Consumo energético anual de cada sistema (simulação 05).

4.2.6 Análise Global

A tabela 10 mostra o consumo total em cada simulação realizada. Além disso, trás percentuais de redução ou aumento de cada simulação em relação à simulação anterior.

Tabela 10 – Consumo elétrico total anual de cada simulação.

Consumo elétrico total anual de cada simulação		
Simulação	Consumo elétrico total anual	Varição em relação à simulação anterior
Simulação 01	610749 kW.h	-
Simulação 02	489977 kW.h	-20%
Simulação 03	469268 kW.h	-4,2%
Simulação 04	469413 kW.h	+0,03%
Simulação 05	470500 kW.h	+0,23%

Nota-se, a partir da tabela 10, que se tem a melhor configuração, entre as estudadas, na simulação 03. A utilização da iluminação natural e o escurecimento dos vidros proporcionaram uma redução no consumo energético do prédio de 23% em relação à primeira simulação.

A figura 13 mostra o consumo anual total do prédio estudado em cada simulação realizada.

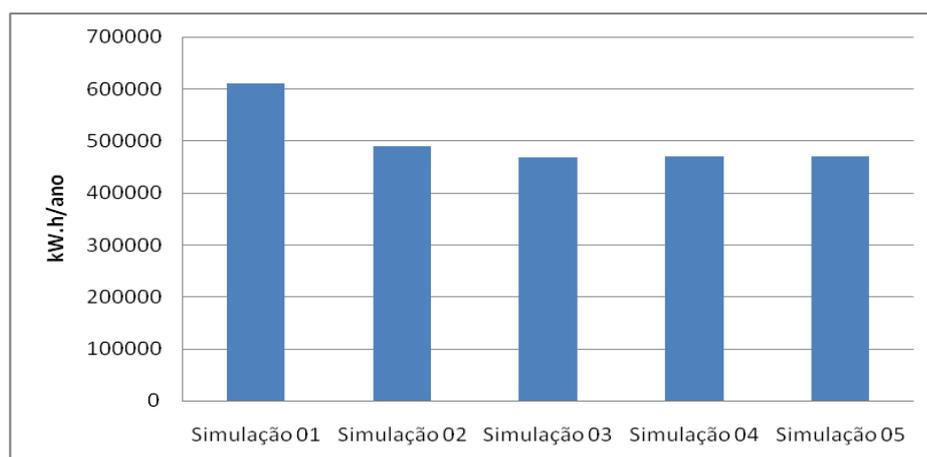


Figura 13- Consumo energético total anual em cada simulação.

5. CONCLUSÕES

Para a realização deste trabalho, utilizou-se um prédio localizado em Curitiba, com uma área total de 4859 m² e uma área climatizada de 2964 m². A simulação computacional foi realizada através do programa *Energyplus*.

O *Energyplus* é uma ferramenta para simulação termo-energético de edificações, capaz de analisar diversas alternativas. Contudo, o usuário deve possuir conhecimento técnico suficiente, além de um bom conhecimento dos recursos disponíveis no programa, para realizar uma simulação bem sucedida.

Através da metodologia utilizada neste trabalho, foi possível avaliar os efeitos energéticos de quatro diferentes tipos de envoltórios e do uso da iluminação natural. Para estas simulações foram necessários quatro meses entre aprendizado do programa e modelagem do prédio base para análises posteriores.

No prédio base, referente à primeira simulação, utilizou-se vidros claros e não se considerou os efeitos do uso de iluminação natural. Para esta simulação notou-se que o sistema que mais utilizou energia em sua operação durante o ano foi à iluminação. Este dado pode ser explicado pelo fato de que o uso da iluminação artificial durante esta simulação foi muito alto, pelo fato de se desconsiderar o uso de iluminação natural.

Na segunda simulação notou-se uma grande redução no consumo do sistema de iluminação quando comparada a primeira simulação. Como na simulação 02 considerou-se um projeto que utiliza-se a iluminação natural no prédio, a iluminação artificial passou a ser menos utilizada. Também nota-se a redução do consumo do ar condicionado para resfriamento, devido à redução da carga interna gerada pelas lâmpadas.

Na terceira simulação com o escurecimento dos vidros, além do aumento da espessura dos mesmos, teve-se uma diminuição energética significativa durante o resfriamento do prédio. Isto se deve ao fato de que, com o escurecimento dos vidros, houve uma diminuição na quantidade de radiação que incide nas zonas climatizadas. Por outro lado ocorreu um leve aumento no consumo energético anual do sistema de iluminação, que é explicado pela menor passagem de luz natural pelos novos tipos de vidro selecionados, tornando assim a iluminação o sistema que mais consome energia para esta simulação.

As duas últimas simulações não obtiveram resultados significativos em relação a consumo energético, quando comparadas com a segunda simulação. Quando da troca do forro externo por um forro mais espesso, na simulação quatro, notou-se que, apesar da redução da carga térmica no dimensionamento do ar condicionado, houve um aumento no consumo de ar condicionado, influenciado pelo aumento da massa do forro do prédio em questão.

Na quarta simulação a mudança de tijolos furados por blocos de concreto furados nas paredes externas mostrou que a resistência térmica menor dos blocos em relação aos tijolos causou um leve aumento no consumo do sistema de climatização.

Por fim conclui-se que, um projeto que use a iluminação interna, assim como a escolha de um vidro com boas propriedades são as alternativas que possuem maior efeito no consumo energético anual do prédio estudado.

Para futuros trabalhos sugere-se analisar projetos de iluminação que possam ser usados neste prédio, além de estudos de *payback* dos diferentes tipos de envoltórios.

6. REFERÊNCIAS

ASHRAE. **Handbook of Fundamentals**, Chapter 29. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta. 2009.

ASHRAE 55-2004. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta. 2004.

BEYER. **Apostila de Conforto Térmico**. Paulo Otto Beyer, Dr. 2008.

DOE. **U. S. Departamento of Energy**. Desenvolvido pelo governo dos Estados Unidos da América. Possibilita o *download* do programa *Energyplus* e do *plugin Openstudio*. <http://www.energy.gov>. Acesso em 30 de março de 2010.

ENERGYPLUS. **Energyplus Documentation**. April. 2010.

GOOGLE. Desenvolvido pelo Google. Possibilita o *download* do programa Google Sketchup. <http://sketchup.google.com>. Acesso em 30 de março de 2010.

LAMBERTS. **Introdução ao Energyplus**. Roberto Lamberts, PhD. 2006.

MME. **Ministério de Minas e Energia**. Desenvolvido pelo governo brasileiro. Apresenta textos sobre leis de eficiência energética. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 22 de abril de 2010.

PROCEL. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. Desenvolvido pelo governo brasileiro. Apresenta textos sobre conservação de energia elétrica. Disponível em <http://www.procel.gov.br>. Acesso em 25 de maio de 2010.

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ENERGYPLUS. **Engineerig References**. April. 2010.

INCROPERA, F. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª Edição. 2008.

MELO, A. P. **Análise da Influência da Transmitância Térmica no Consumo de Energia de Edificações Comerciais**. Tese de Mestrado. Florianópolis. 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELA DE MATERIAIS

Tabela 1 – Propriedades dos materiais translúcidos.

Materiais Translúcidos					
Material	Espessura (m)	Transmitância Solar	Transmitância Visível	Condutividade Térmica (W/m.K)	Emissividade Infravermelho
Vidro Claro	0,003	0,837	0,898	0,9	0,84
Vidro Esverdeado	0,006	0,455	0,431	0,9	0,8

Tabela 2 – Propriedades dos materiais opacos.

Materiais Opacos					
Material	Rugosidade	Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m3)	Calor Específico (J/kg.K)
Placa acústica	Semi-liso	0,0191	0,06	368	590
Concreto leve (100 mm)	Semi-áspero	0,10	0,17	640,73	830
Placa de isolamento	Semi-áspero	0,0762	0,03	43	1210
Concreto pesado (200 mm)	Semi-áspero	0,20	1,72	2242,58	900
Madeira Compensada (19 mm)	Liso	0,019	0,12	544	1210
Tijolo Furado (200 mm)	Liso	0,20	0,6	1121,29	830
Concreto Leve (200 mm)	Semi-áspero	0,20	0,17	640,73	830
Concreto Leve (300 mm)	Semi-áspero	0,30	0,17	640,73	830
Reboco (20 mm)	Liso	0,02	0,72	1858,14	830
Bloco de concreto leve furado (200mm)	Semi-áspero	0,20	0,38	1041,2	830

APÊNDICE B – TABELA DE CONSTRUÇÕES

Tabela 3 – Definições construtivas.

Construções	
Construção	Constituição Construtiva
Parede climatizada	Madeira compensada (19 mm)
Parede não climatizada	Madeira compensada (19 mm) + espaço de ar + madeira compensada (19 mm)
Piso interno	Placa acústica + espaço de ar + concreto leve (100 mm)
Piso em contato com o solo	Placa de isolamento (50mm) + concreto pesado (200 mm)
Forro interno	Concreto leve (100 mm) + espaço de ar + placa acústica
Forro externo (simulações 1, 2 e 3)	Concreto leve (200 mm) + espaço de ar + placa acústica
Forro externo (simulações 4 e 5)	Concreto leve (300 mm) + espaço de ar + placa acústica
Janelas (simulação 1 e 2)	Vidro claro de 3 mm
Janelas (simulações 3, 4 e 5)	Vidro esverdeado de 6 mm
Parede externa (simulações 1, 2, 3 e 4)	Reboco (20 mm) + tijolo furado (200 mm) + reboco (20 mm)
Parede externa (simulação 5)	Reboco (20 mm) + bloco de concreto leve furado (200 mm) + reboco (20 mm)

