

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA A FACHADA DE UM PRÉDIO VISANDO CONFORTO E
ECONOMIA DE ENERGIA

por

Jefferson Luiz Henkel Ferronato

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.

Porto Alegre, 7 de dezembro de 2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE ALTERNATIVAS PARA A FACHADA DE UM PRÉDIO VISANDO CONFORTO E
ECONOMIA DE ENERGIA

por

Jefferson Luiz Henkel Ferronato

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

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Horácio Antonio Vielmo

Prof. Flávio Tadeu van der Laan

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 5 de dezembro de 2011.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela força, apoio e sabedoria com as quais sempre me apoiaram.

Ao professor Paulo Beyer pela disponibilidade, paciência e conhecimento transmitido.

Ao Vice-Diretor da Faculdade de Arquitetura Ubirajara Borne e ao Mestrando Fernando Pasqualli pelo auxílio prestado quando consultados e disponibilidade.

À minha namorada pelo apoio e paciência, especialmente durante a reta final do trabalho.

FERRONATO, J. L. H. **Estudo de alternativas para a fachada de um prédio visando conforto e economia de energia**. 2011. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

A fachada norte do prédio da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul é composta basicamente por janelas, sofrendo com temperaturas elevadas e problemas acústicos. Soluções de eficácia assegurada já existem, mas em um cenário global de preocupação crescente com a sustentabilidade cabe à simulação computacional ser uma alternativa viável para a investigação das alternativas de projeto mais eficientes. Este trabalho realizou esta avaliação, criando um modelo básico para comparar seu consumo energético com o das alterações propostas. Estas alterações incluíram em todos os casos o controle de iluminação nos ambientes e a utilização de diferentes películas disponíveis para os vidros no mercado brasileiro, somados à diferentes combinações de variações de sombreamento externo nas fachadas, adaptação de um peitoril para as janelas da fachada norte e instalação de prateleiras de luz. Concluiu-se que estruturas externas de sombreamento e prateleiras de luz resultaram em economias mais significativas de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Sustentabilidade, alternativas para fachadas, simulação computacional e economia de energia.

FERRONATO, J. L. H. **Study of alternatives for a building facade aiming for confort and enery economy**. 2011. 19 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The north facade of the Federal University of Rio Grande do Sul Architecture Faculty building is compound basically by windows, suffering with solar heat gain and acoustic problems. Different reliable solutions already exist, but in a global scenario with growing concerns of sustainability, computer simulation is a viable alternative to investigate more efficient project alternatives. In this work, this evaluation was made, creating a base reference model to compare its energy consumption with the ones from the proposed alternatives. These changes included in all cases illumination control of the environment and the use of different window films used in the Brazilian Market, added to different combinations of varieties of external shades, adaptation of a window sill in the north facade and installation of light shelves. It was concluded that external shading structures and light shelves resulted in more significant energy economy.

KEYWORDS: Sustainability, facade alternatives, computer simulation, energy economy.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	2
3.1 <i>GOOGLE SKETCHUP 8 E OPENSTUDIO.....</i>	<i>2</i>
3.2 <i>ENERGYPLUS.....</i>	<i>2</i>
3.2.1 Alimentação de parâmetro e aquisição de dados.....	2
3.2.2 Equacionamento energético.....	3
4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	5
4.1 ZONAS TÉRMICAS.....	6
4.2 CONSTRUÇÕES.....	6
4.3 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ILUMINAÇÃO.....	7
4.4 PESSOAS E OCUPAÇÃO.....	7
4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO, INFILTRAÇÕES E SISTEMA DE AR CONDICIONADO.	7
4.6 SIMULAÇÕES PROPOSTAS.....	8
4.7 CONTROLE DE ILUMINAÇÃO.....	8
4.8 SOMBREAMENTO, PERSIANAS E PELÍCULAS PARA O VIDRO.....	8
4.9 PEITORIL ELEVADO.....	9
4.10 PRATELEIRA DE LUZ (<i>LIGHTSHELF</i>).....	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
Anexo I.....	16
Apêndice I.....	17

1. INTRODUÇÃO

Desde 1952, após a fusão dos cursos de arquitetura existentes na Escola de Engenharia e no Instituto de Belas Artes existentes na UFRGS, a Faculdade de Arquitetura já formou mais de 2800 arquitetos e assim influenciou significativamente os estilos e tendências da arquitetura em todo o estado e principalmente em Porto Alegre. O prédio construído para abrigar a Faculdade pode ser considerado pioneiro na arquitetura moderna da capital do estado. Possuindo grande parte de sua fachada constituída de vidros, ele é um prédio belo e único, que permite admirar paisagens da cidade independentemente de qual parte o visitante se encontre no mesmo.

Porém, esta abundância de vidros provoca alguns transtornos. Como aproximadamente 90% da fachada norte é constituída de janelas, as salas deste lado do prédio alcançam temperaturas elevadas. Além disso, como estas mesmas salas estão em frente à Avenida Osvaldo Aranha, em um dos trechos de trânsito mais intenso de Porto Alegre, quando as janelas destas são abertas para ventilá-las, ministrar aulas e simplesmente comunicar-se torna-se impraticável para professores e alunos. E mesmo quando com janelas abertas, a temperatura nos ambientes mantém-se elevada em dias mais quentes, ocasiona um desconforto térmico que dificulta o rendimento das aulas e o aprendizado dos alunos. Por fim, o ar que entra nas salas é poluído, já que além da tradicional poeira, ele está carregado de partículas residuais da combustão de carros, motos, caminhões e ônibus que por ali passam.

Soluções para estes problemas, de eficácia assegurada, já foram propostas. Mas em um cenário global de preocupação crescente com o esgotamento de recursos naturais, com a poluição e com um consumo insustentável, além dos custos energéticos em ascensão, a eficácia precisa deixar de ser a preocupação principal para que a eficiência seja o motivador primário de todos os projetos. Cabe então à simulação computacional, se devidamente difundida e valorizada, viabilizar a investigação das alternativas de projeto mais eficientes.

Local ideal para a difusão e valorização da simulação computacional, voltada para a otimização de projetos civis antes de construídos, é a Faculdade de Arquitetura. É dela que continuarão a sair a parte mais significativa dos arquitetos deste estado. Por isso, a oportunidade de analisar as adaptações de um prédio moderno pioneiro, para que ele seja novamente exemplo a futuros arquitetos que deverão cada vez mais, além da abordagem estética, utilizar a abordagem técnica para verificar quais projetos são mais sustentáveis e garantir o conforto térmico de edificações, é o grande motivador para este trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a revisão bibliográfica, foram essenciais as consultas à Monografias realizadas previamente por colegas dentro do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, que simularam termo-energeticamente edificações utilizando o mesmo conjunto de programas que este trabalho. Nesta revisão, buscou-se avaliar aspectos e dificuldades que poderiam repetir-se durante a execução deste trabalho.

Stein, T. S., 2011, avaliou um edifício na cidade de Porto Alegre, buscando economia de energia e conforto térmico. Ele quantificou os efeitos da substituição de um sistema de água gelada, então existente na edificação, por um sistema VRF (volume de refrigerante variável). Constatou através das simulações que a utilização de vidros de alta eficiência termo-energética e um bom aproveitamento da luz natural, aliados a substituição do sistema de ar-condicionado por outro mais moderno, promoveram grande redução na demanda energética do prédio.

Pizzutti, D., 2010, simulou modelos para o projeto de reforma do prédio da Engenharia Nova da UFRGS, que sofre com o calor nas salas de sua fachada norte, por estas possuírem grande parte desta fachada constituída por janelas. Ele simulou o projeto com ar condicionado analisando qual era a melhor combinação de películas de vidro, controles de iluminação, cortinas e persianas, controláveis ou não, que demandariam menor consumo energético garantindo conforto térmico. Concluiu que variações com películas para os vidros, controles de

luz e cortinas eram as melhores opções, que deveriam ser ajustadas de acordo com a disponibilidade financeira para a reforma.

Souza, F., 2010, dedicou-se a simular a eficiência energética de uma nova edificação a ser construída no Campos do Vale da UFRGS, avaliando se as soluções existentes para o prédio, como utilização de fachadas ventiladas, telhados verdes, proteção solar nas janelas, além de alternativas de vidro, controle de iluminação e elevação do prédio eram realmente viáveis. Entre as alternativas, apenas duas se mostraram viáveis, que foram a elevação do prédio e a utilização de controle de iluminação.

Souza, W. B., 2010, comparou a eficiência energética de um sistema de água gelada com um sistema VRF aplicados ao prédio histórico da Engenharia da UFRGS, que atualmente encontra-se em reforma. A busca pela constituição das construções do prédio histórico, como paredes e pisos, foram obtidas através dos arquitetos da Secretaria do Patrimônio Histórico da UFRGS e o sistema VRF foi significativamente mais eficiente que o a água gelada.

Souza, L. C., 2009, buscou adequar um prédio teórico novo para Engenharia Mecânica da UFRGS nos critérios de prédios verdes do programa de certificação LEED. Através da comparação energética de um modelo base do prédio com outros modelos contendo as alterações estruturais propostas, ele pode comparar quais as modificações mais eficientes e suficientes para garantir a certificação.

3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

No projeto foram utilizados dois *softwares* para a modelagem e simulação dos modelos. Ambos programas isentos de custos de utilização ou instalação e podem ser encontrados para *download* em seus sites originais. Para o trabalho, a modelagem tridimensional foi gerada com o programa *Google SketchUp*, adaptado para a simulação no *EnergyPlus* por seu *plug-in OpenStudio*.

3.1 GOOGLE SKETCHUP 8 E OPENSTUDIO

O *software Google SketchUp 8*, utilizado na versão 8.0.4811, é um programa de propriedade da *Google* disponibilizado gratuitamente na internet em sua versão simples. Ele é uma ferramenta de interface amigável para a modelagem 3D, que torna-se relevante ao projeto térmico de edificações quando é adicionado a ele o *plug-in OpenStudio*.

Este *plug-in*, disponibilizado sem custos pelo Departamento de Energia dos EUA, encontra-se na versão atual 1.0.6.382 e permite que o usuário utilize as ferramentas padrões de desenho do *Google SketchUp* para criar e editar zonas e superfícies no *EnergyPlus*, adequando a modelagem 3D ao formato deste programa.

3.2 ENERGYPLUS

Este *software*, também disponibilizado gratuitamente pelo Departamento de Energia dos EUA, encontra-se na versão 6.0.0.023 e é onde os parâmetros principais de simulação são alimentados. É um programa de análise energética e simulação de cargas térmicas baseado na descrição do usuário de uma construção analisada pela perspectiva das características construtivas físicas, associadas à sistemas mecânicos de ventilação, refrigeração ou aquecimento.

O *EnergyPlus* permite avaliar o comportamento termo-energético de construções, através da avaliação de parâmetros que influenciam as trocas e cargas térmicas de zonas desenhadas no modelo. A ferramenta possibilita a análise de diferentes dados relevantes que podem ser obtidos através da simulação de um modelo, como por exemplo o perfil de temperaturas da construção, consumo energético e iluminação.

3.2.1 ALIMENTAÇÃO DE PARÂMETROS E AQUISIÇÃO DE DADOS

A alimentação dos parâmetros dimensionais para a modelagem nestes *softwares* é feita através do programa *Google SketchUp*, onde, utilizando o *plug-in OpenStudio*, são criadas diferentes zonas térmicas distribuídas a fim de se adaptarem melhor à necessidades de análise. Dentro destas zonas são desenhados e especificados os parâmetros das construções que servirão de base para a edição do modelo dentro do *EnergyPlus*. O modelo é aberto diretamente neste último programa, onde os parâmetros de simulação são declarados. Lá são informados dados como por exemplo, a constituição e propriedades térmicas das construções (paredes, pisos, vidros, etc.), as agendas de ocupação do prédio e são definidos as cargas térmicas e também os sistemas de refrigeração e aquecimento.

Para simular as condições climáticas semelhantes a que a edificação será sujeita ao longo do período de análise, é necessária a utilização de um arquivo com dados climáticos para a cidade de Porto Alegre. Este arquivo é disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC, [LABEEE, 2011]. Sendo composto de uma média histórica anual obtida através de um banco de dados de medições coletadas de diferentes aspectos meteorológicos, como temperatura, umidade, pressão, intensidade e direção do vento e radiação solar.

Finalmente, para analisar os resultados obtidos, o *EnergyPlus* é capaz de gerar diferentes arquivos de saída para a aquisição de dados. Cabe ao usuário declarar quais são os resultados mais pertinentes à simulação e o formato desejado para sua extração. Após rodar o modelo, o programa grava os relatórios que podem ser acessados para a análise. O formato de relatório mais relevante são arquivos .csv, que são arquivos de texto separados por vírgulas, que podem ser convertidos em uma planilha de Excel.

3.2.2 EQUACIONAMENTO ENERGÉTICO

Segundo o manual do *EnergyPlus*, Engineering Reference, 2011, o programa é uma simulação integrada. O que significa que as três partes principais da simulação, prédio, sistema e planta, precisam ser resolvidos simultaneamente. Assim, a solução começa com um balanço energético em uma zona que atualiza as condições na mesma e determina as cargas de aquecimento/refrigeração em todas as iterações. Essa informação alimenta a simulação da planta de ar condicionado para determinar a resposta do sistema, sem afetar as condições da zona.

Essa técnica de simulação funciona bem quando a resposta do sistema é uma função bem definida da temperatura do ar em um ambiente condicionado, mas na maioria dos casos a capacidade do sistema é dependente de condições externas e/ou outros parâmetros do ambiente condicionado.

Para obter uma simulação que seja mais realística fisicamente, os parâmetros devem ser ligados em um esquema de solução simultânea. No caso do *EnergyPlus*, todos os elementos são integrados e controlados pelo Gerenciador de Solução Integrada, onde os ciclos de simulação são divididos entre os lados da oferta e demanda de aquecimento ou refrigeração, e o esquema de solução geralmente se baseia em substituições sucessivas de iterações para reconciliar a oferta e demanda utilizando a filosofia de atualização contínua de *Gauss-Seidel*.

ABORDAGEM PREDITIVA/CORRETIVA

O processo do *EnergyPlus* chamado de Preditivo/Corretivo faz uma estimativa da quantidade de ar condicionado necessário para balancear a equação energética da zona. Como a carga na zona dirige todo o processo, essa carga é usada como ponto de partida para fornecer a demanda ao sistema de ar condicionado. Então a simulação do sistema de ar fornece a capacidade de fornecimento atual e a temperatura da zona é ajustada se necessário.

EQUAÇÕES DE BALANÇO ENERGÉTICO SENSÍVEL

A base para essa integração é formular os balanços energéticos e de umidade para o ar da zona e resolver as equações diferenciais ordinárias resultantes utilizando a abordagem preditiva-corretiva.

As zonas são subdivisões do modelo, que buscam ou agrupar ambientes de comportamentos térmicos semelhantes, ou isolar áreas mais relevantes para a análise, sendo declaradas de acordo com os desejos do usuário. A formulação do esquema de solução começa com um balanço energético sensível no ar da zona, demonstrado na equação 3.1.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superf}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sist} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (3.1)$$

Onde C_z é a capacitância térmica da zona [J/K], dT_z/dt é a variação da temperatura da zona, $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é o termo referente à soma das cargas internas convectivas e \dot{Q}_i é uma carga interna convectiva [W]. $\sum_{i=1}^{N_{superf}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é o termo referente a transferência de calor por convecção das superfícies da zona térmica, onde h_i é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/(m² * K)], A_i é a área da superfície [m²], T_{si} é a temperatura da superfície e T_z é a temperatura da zona, ambas em [K]. $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é o termo referente ao somatório das taxas de calor por troca de ar com outras zonas, onde \dot{m}_i é a vazão mássica entre as zonas [kg/s], C_p é o calor específico à pressão constante [J/(kg * K)], T_{zi} é a temperatura zona adjacente [K]. $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é o termo referente a transferência de calor devido à infiltração de ar externo na zona, onde \dot{m}_{inf} é a vazão mássica da infiltração de ar, T_{∞} é a temperatura do ambiente externo [K].

Finalmente, $\dot{m}_{sist} C_p (T_{sup} - T_z)$ é a taxa de troca de calor com o sistema de climatização [W], formulada como a diferença entre a entalpia do ar que entra e a entalpia do ar que deixa a zona, onde \dot{m}_{sist} é a vazão mássica do sistema [kg/s] e T_{sup} é a temperatura do ar que entra na zona [K]. Ambas correntes de saída de ar deixam o ambiente na temperatura média do mesmo.

Da equação 3.1 pode concluir-se que a soma das cargas térmicas das zonas adicionada às variações no sistema decorrentes da atuação do sistema de ar condicionado, são iguais a variação de energia armazenada na zona. Onde, tipicamente, a capacitância C_z seria apenas do ar, porém, massas internas que ofereçam inércia térmica ao sistema podem e foram incluídas neste termo para este trabalho.

ABORDAGEM PREDITIVA-CORRETIVA PARA O CALOR LATENTE

$$\rho_{ar} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{carga\ agend} + \sum_{i=1}^{N_{superf}} A_i h_{mi} \rho_{ar_z} (W_{superf_i} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t) + \dot{m}_{sis} (W_{sup} - W_z^t) \quad (3.2)$$

A equação 3.2 acima se trata do balanço de massa transiente para a mudança na razão de umidade da zona [$\rho_{ar} V_z C_w (dW_z/dt)$]. Este balanço é igual a soma das cargas latentes internas agendadas [$\sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{carga\ agend}$], adicionada a convecção das superfícies das zonas [$\sum_{i=1}^{N_{superf}} A_i h_{mi} \rho_{ar_z} (W_{superf_i} - W_z^t)$], dos fluxos de ar das zonas [$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{zi} - W_z^t)$], da infiltração de umidade nas zonas [$\dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t)$] e também da remoção ou adição de umidade através do sistema de climatização [$\dot{m}_{sis} (W_{sup} - W_z^t)$]. A umidade entregue pelas pessoas presentes nas zonas é incluída nas cargas latentes internas agendadas.

ALGORITMOS E CONVERGÊNCIA DA SIMULAÇÃO

O *EnergyPlus* fornece três algoritmos de soluções diferentes para resolver as equações de balanço energético do ar e umidade das zonas. Essas são definidas no algoritmo no campo de objeto *ZoneAirHeatBalanceAlgorithm*, sendo elas a *3rdOrderBackwardDifference*, *EulerMethod* e *AnalyticalSolution*. Os dois primeiros métodos utilizam aproximações de diferenças finitas, enquanto o último utiliza uma solução analítica. Para este trabalho foi utilizado a *3rdOrderBackwardDifference*, descrita na equação 3.3, que exige as temperaturas das zonas das últimas três iterações e usa coeficientes de temperatura constantes.

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superf}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sist} C_p T_{ent} - \left(\frac{C_z}{\delta t}\right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta t}\right)}{\left(\frac{11}{6}\right) \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{superf}} h_i A + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sist} C} \quad (3.3)$$

Onde T_z^t é a temperatura da zona na iteração t , $T_z^{t-n\delta t}$ é a temperatura da zona na iteração $t - n$, T_{ent} é a temperatura de fornecimento do sistema de climatização [K], e $C_z/\delta t$ é a variação da capacitância térmica com o tempo.

Ao iniciar a simulação, antes do programa rodar ao longo do ano, ele busca um regime estacionário inicial com as condições climáticas daquele instante, em um período conhecido de aquecimento do prédio (*Warm-up-period*). Quando as temperaturas das zonas se estabilizam, são feitas as iterações ao longo do ano em regime transiente, utilizando as condições climáticas do instante de cada iteração.

Existe a possibilidade de se definir o número máximo de iterações para chegar a convergência neste período de aquecimento. O padrão do programa e também recomendado em sua bibliografia [EnergyPlus, 2011] é um valor máximo de 20 iterações até a convergência, o mesmo utilizado por este trabalho. Se o limite de iterações é excedido, a simulação é abortada e uma mensagem de erro aparece. O *software* também permite definir o número de iterações realizadas em cada hora do ano. A escolha do valor tem importantes implicações para a precisão do modelo e o tempo que se leva para rodar a simulação.

Para verificar a convergência e precisão do modelo, simulou-se o modelo base com todas quantidades de iterações permitidas. Verificou-se que o modelo converge facilmente, não sendo possível afirmar que um número maior de iterações gera um resultado mais preciso. Excluindo a utilização de apenas 1 iteração horária, nenhum outro valor ofereceu uma variação maior que 1,8% da média obtida entre as simulações com diferentes quantidades de iterações, por isso, para reduzir o tempo de simulação, foi optado por utilizar-se 4 iterações por hora. Os resultados das simulações para verificação de convergência podem ser encontrados no Apêndice I.

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA



Figura 4.1: Fachada norte do Prédio da Faculdade de Arquitetura.



Figura 4.2: Perspectiva do modelo do *Google Sketchup 8* para as salas da fachada norte do 3º, 4º e 5º pavimentos.

O prédio possui cinco pavimentos (térreo incluso) e deve passar por reformas nos próximos anos. Dentre as mudanças previstas na reforma, o prédio passará a ter um sexto pavimento, já que no terraço serão construídas salas. Além disso, será construído e anexado ao prédio um novo setor na ala sudeste do mesmo.

Este setor do prédio contabiliza uma área total de mais de 1500m², cuja frente da fachada norte faz um ângulo horário com o norte de apenas 14°, possuindo também fachadas com frentes oeste e leste.

Deseja-se, com este trabalho, verificar qual a combinação das modificações propostas para garantir o conforto térmico, que resultará em maior economia energética. Para aprender sobre quais seriam as reformas realizadas no prédio, a constituição e os materiais das construções, como materiais que compõe as paredes, pisos, etc., assim como o calendário de utilização das salas, foram utilizados como fontes diretas de consulta o Vice-Diretor da Faculdade de Arquitetura Ubirajara Borne e também o arquiteto Fernando Pasqualli.

4.1 ZONAS TÉRMICAS

As plantas disponibilizadas indicam que os pavimentos típicos (terceiro, quarto e quinto) deveriam possuir quatro salas em sua fachada norte, distribuídas igualmente em cada um dos três pisos analisados. Já a distribuição atual de salas do prédio é diferente. Atualmente, ele está passando por reformas e a biblioteca, por exemplo, que se encontrava no térreo, ocupa temporariamente duas salas do terceiro pavimento.

Por esse motivo, o Vice-Diretor Ubirajara Borne foi consultado, para se entender como ficarão as distribuições dos pavimentos após a reforma. Definiu-se então, que para o modelo, se utilizaria a distribuição futura das salas, já que serão estas que serão atendidas pelo sistema de ar condicionado. Logo a distribuição da planta de pavimento típico será mantida, exceto o terceiro andar, que possui em sua sala mais à oeste da sua fachada norte dois laboratórios de informática, que compartilham uma mesma sala de entrada e não serão alterados em reformas futuras.

Assim, cada piso foi dividido para análise em três zonas, sendo uma a leste, outra a norte e uma última a oeste. As zonas leste e oeste foram dimensionadas para mensurar o comportamento próximo as suas respectivas fachadas, enquanto a zona norte, mais extensa e homogênea, para investigar o restante do pavimento. O quarto e quinto pavimentos têm zonas de mesmo tamanho, já o terceiro andar, por possuir os laboratórios de informática, diferencialmente buscou-se coincidir o limite da zona oeste com o fim das salas do laboratório.

4.2 CONSTRUÇÕES

As construções utilizadas no prédio foram os pisos e tetos, as paredes internas e externas e as janelas com vidros. As lajes e pisos utilizadas entre o terceiro e o quarto andar e também entre o quarto e quinto foram as mesmas, sendo elas constituídas por uma camada de 120 mm de concreto denso, somados a 31 mm de contra piso e 19 mm de madeira dura (parquet). A laje da cobertura, semelhantemente, também possui uma camada de 120 mm de concreto denso, porém acima desta camada existe um piso de terraço e um filme impermeabilizante.

Já a laje inferior do terceiro andar, possui algumas características construtivas diferenciadas. Nela, existe uma laje dupla, com um vão de cerca de 600 mm entre uma laje e outra, que é ocupado por ar. Por isso, utilizaram-se duas camadas de laje de concreto denso de 120 mm, separadas por uma resistência de ar para construções horizontais, e acima da laje superior, reboco e parquet.

As paredes utilizadas se diferenciam entre internas e externas, sendo que ambas foram declaradas com camadas internas e externas de 25 mm de reboco, diferenciando-se apenas na espessura da camada de tijolos, de 200 mm para as paredes externas e de 100 mm para as paredes internas. As janelas do prédio utilizam vidros claros de 3 mm de espessura, onde investigou-se os efeitos de adicionar-se ou não películas aos mesmos. As propriedades

radiativas das superfícies foram obtidas utilizando como referência a tabela de Emitância e Absortância de superfícies da ASHRAE [ASHRAE, 2001].

4.3 EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ILUMINAÇÃO

Os equipamentos elétricos e a iluminação, além de demandarem eletricidade para funcionar, liberam calor que deve ser removido do ambiente. Por isso sua relevância na simulação. A carga dos equipamentos nas salas foram as mesmas em todas as simulações, porém a iluminação teve sua intensidade controlada nas diferentes propostas buscando aproveitar a luminosidade natural existente.

Tabela 4.1: Demanda média de eletrodomésticos [Eletrobras, 2011].

APARELHOS ELÉTRICOS	COMPUTADOR	MONITOR LCD	NOTEBOOK	PROJETOR	TV EM CORES – 42" (LCD)	MONITOR LCD + CPU	COMPUTADOR ALL-IN-ONE
Potência	63 W	34 W	20 W	239 W	203 W	97 W	65 W

Utilizando a iluminação existente no prédio como base de cálculo, estabeleceu-se que as lâmpadas atuais têm uma potência de 10,5 W/m². Para cada uma das salas admitiu-se que um projetor seria utilizado pelos professores 50% do tempo de acordo com a ocupação das salas, exceto nos laboratórios de informática que possuem TVs de LCD instaladas para exercerem esta função e seus consumos médios foram definidos como mostra a tabela 4.1.

Aos laboratórios também foram somadas as demandas energéticas dos computadores, sendo que cada um dos dois laboratórios possui 20 computadores, um deles possuindo monitores de LCD e CPUs, e outro com computadores conhecidos como *all-in-one* que unem monitor e CPU na mesma unidade. Foi considerado que apenas 25% dos alunos dentro das salas em determinado momento estariam com seus *notebooks* ligados.

4.4 PESSOAS E OCUPAÇÃO

Devido ao fato de os ambientes analisados serem ateliers de ensino e não salas de aula comuns, foi considerado como lotação máxima das salas durante os períodos aula, 4m² por aluno, sendo que os alunos foram considerados em nível atividade metabólica equivalente a de pessoas em um escritório, seguindo o calendário de ocupação.

Segundo informado pelo Vice-Diretor Borne, as salas seguem o calendário acadêmico da Universidade e fora dos períodos de aula as mesmas não são utilizadas. Portanto, foi considerado que as salas seriam ocupadas de março até meados de julho, quando começa o recesso de inverno, retornando às atividades no início de agosto e seguindo até pouco depois da metade de dezembro, quando inicia o recesso de verão.

Dentro desse calendário, a agenda das aulas é diversificada, sendo que as salas são utilizadas tanto pela faculdade de Arquitetura, durante a manhã e à noite, quanto pela faculdade de Design, durante a tarde. As aulas da arquitetura utilizam 90% da ocupação máxima e as aulas do design apenas 10% da ocupação máxima.

As atividades da manhã iniciam com aulas da arquitetura às 09h30min da manhã e seguem até as 11h 30min, e são retomadas às 14h 30min pela faculdade de Design, até às 18h 30min quando a arquitetura volta a utilizar as salas até às 21 horas quando encerram-se as atividades do dia.

4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO, INFILTRAÇÕES E SISTEMA DE AR CONDICIONADO

As condições de contorno servem para estabelecer como ocorrem as trocas térmicas entre as superfícies limites das zonas térmicas. Para tal, diferentes condições de contorno foram declaradas, sendo que entre zonas climatizadas considerou-se essas superfícies como sendo adiabáticas. Para as superfícies externas considerou-se como contorno o ambiente

externo. Finalmente, para as superfícies internas, porém não climatizadas, utilizou-se um artifício disponível no *EnergyPlus*, o *OtherSideCoefficients*, que são coeficientes de aproximação de temperatura, onde pode-se estabelecer que a temperatura nestes ambientes é uma média aritmética entre a temperatura do ambiente climatizado e a temperatura externa.

Para o modelo, foram adicionadas como grupo de sombreamento as salas e estrutura que serão construídas no sexto pavimento, atualmente o terraço, já que estas bloquearão a radiação solar que incidiria diretamente sob o terraço. Estes ambientes serão climatizados, e por isso, considerou-se que as superfícies limite serão adiabáticas.

Com relação à infiltração, que é o ar que entra e sai do ambiente por frestas nas aberturas, considerou-se 0,75 trocas de ar por hora do volume de todas as zonas da simulação.

Para o ar condicionado, foi utilizado o mesmo tipo de sistema para todas as zonas. O sistema utilizado foi um PTHP (*Packaged Terminal Heat Pump* ou Bomba de calor de terminal compacto), também conhecido como sistema Mini-Split. Um termostato serve como regulador de temperatura, sendo estabelecido como temperatura mínima 22°C e máxima 25°C, com uma renovação de ar de 0,0075 m³/s por pessoa (7,5 L/s por pessoa).

4.6 SIMULAÇÕES PROPOSTAS

Inicialmente, com intuito de formar uma base de comparação para a avaliação através das simulações das melhorias propostas, foi necessário definir o modelo base, que verificou qual seria a demanda energética do prédio quando um sistema de ar condicionado fosse instalado. Decidiu-se que para esse modelo deveriam constar as mudanças definidas nas reformas que ocorrerão ao longo dos próximos anos no prédio, como por exemplo, a utilização de vidros sem película, utilização de cortinas internas, materiais das paredes, etc., pois serão para essas novas características que o sistema de climatização deverá ser otimizado. Por isso, nele já consta a reorganização das salas nos andares e também a adição de novas salas ao sexto pavimento.

O resultado desta simulação foi a demanda base. A partir desta, comparou-se as propostas de otimização, através da simulação da demanda energética dos novos modelos. Cada um destes modelos analisou os efeitos combinados com os diferentes tipos de película para vidros e também utilizou o controle de intensidade da iluminação (para a prateleira de luz, somente é possível fazer a simulação quando houver controle de iluminação nas zonas).

Os modelos de simulação de melhorias propostas à base de análise (ar condicionado, sem películas e sem controle de iluminação, CI) foram:

- Adição de películas aos vidros c/ e s/ CI (controle de iluminação).
- Adição de *breezes* para sombreamento externo (c/ e s/ CI).
- Construção de um peitoril para a fachada norte (c/ e s/ CI).
- Adição de sombreamento externo à estrutura com peitoril na fachada norte (c/ e s/ CI).
- Instalação de prateleira de luz na fachada norte, apenas para estrutura com peitoril.
- Adição de sombreamento externo às fachadas leste e oeste no modelo com prateleira de luz e peitoril.
- Instalação de prateleira de luz na fachada norte e oeste, apenas para estrutura com peitoril.

4.7 CONTROLE DE ILUMINAÇÃO

Os modelos foram testados com os ambientes utilizando iluminação variável, através do controle da intensidade de iluminação de acordo com as condições ambientais de luz, regulando a intensidade luminosa das lâmpadas. Através disso é possível reduzir significativamente a demanda energética devido à iluminação.

4.8 SOMBREAMENTO, PERSIANAS E PELÍCULAS PARA O VIDRO

Os diferentes sombreamentos externos (*breezes*) analisados são horizontais na fachada norte e verticais na fachada leste, sendo os horizontais distantes 30 cm um do outro, se estendendo 30 cm distante da parede, perpendicularmente a mesma. Já os verticais são distantes 20 cm um do outro e se estendem a 20 cm, sendo que a leste fazem um ângulo de 30° horários com um plano vertical normal aos vidros e a oeste um ângulo de -30° horários com o mesmo plano.

Quando não foram utilizados os sombreamentos externos utilizaram-se as persianas instaladas atualmente no prédio. Além delas, foram testados para todas as propostas a melhor combinação de vidro e películas, sendo que as propriedades térmicas das películas foram obtidas através de um catálogo de marca atuante no mercado brasileiro [Baekert, 2003]. Foram utilizadas nos modelos as películas Sterling 20, 40, 50, 60 e 70, que permitem, respectivamente que aproximadamente 20, 40, 50, 60 ou 70% da radiação visível seja transmitida.

4.9 PEITORIL ELEVADO

A fachada norte por ser composta basicamente por vidros sofre com a intensa entrada de radiação solar no ambientes. Uma das propostas analisadas para combater este problema foi simular a construção de um peitoril para estas fachadas, isolando a janela mais baixa, que atualmente é um vidro aramado, mantendo o mesmo e adicionando uma camada de lã de vidro, seguida por um pequeno espaço de ar e acabamento em gesso acartonado. Assim, reduz-se a entrada de radiação solar nas salas e colabora-se com o isolamento acústico e térmico.

4.10 PRATELEIRA DE LUZ (*LIGHTSHELF*)

Foi analisado também o efeito na demanda energética e distribuição lumínica no prédio se instaladas prateleiras de luz, mas apenas para o modelo com o peitoril elevado. Essas prateleiras são instaladas tanto na parte interior quanto na parte exterior do prédio e buscam distribuir melhor a luminosidade que entra no ambiente. Para o modelo, foi considerado que a prateleira de luz teria 2 m de largura, ou seja, 1 m para o lado exterior e 1 m para o interior da janela, e que seria instalada na divisória já existente nas esquadrias, como mostrado na figura 4.2.

Um melhor dimensionamento das prateleiras de luz, assim como uma melhor otimização das propriedades térmicas, principalmente radiativas, que não foi executado neste trabalho, poderia ser feito através do programa *EnergyPlus*, executando simulações para cada tipo de prateleira proposta. Desta maneira, este recurso poderia trazer ainda maior economia.

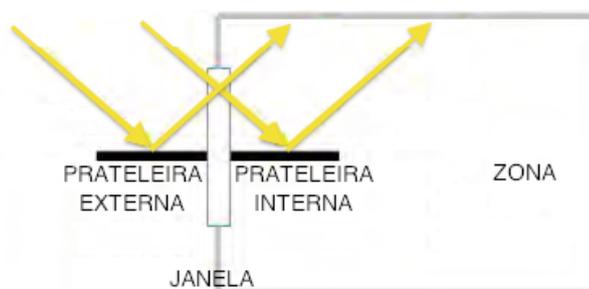


Figura 4.2: Funcionamento de uma prateleira de luz [EnergyPlus, Input Output Reference, 2011].

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No total, foram simuladas 66 variantes de projeto no *EnergyPlus*. Este número foi obtido combinando todas as propostas de melhorias com ou sem as diferentes películas para o vidro, utilizando ou não controle de iluminação.

Abaixo, na tabela 5.1, é possível observar quais as propostas, combinadas com a melhor película para seu modelo, provocaram economia mais significativa de energia em relação ao modelo básico. Este que resultou em um consumo de 49.431 kWh por ano para o prédio.

Tabela 5.1: Economia de energia dos modelos propostos em relação à referência.

Combinação	Economia de energia em relação ao modelo base
Sem controle de iluminação (CI) + Película Sterling 20	11,8%
S/ CI + Sombreamento externo + Película Sterling 20	17,9%
S/ CI + Peitoril elevado + película Sterling 20	14,8%
S/ CI + Peitoril + sombreamento externo + película Sterling 20	16,6%
C/ controle de Iluminação (CI)	8,63%
Película Sterling 20 + controle de iluminação (CI)	14,5%
Sombreamento externo + película Sterling 70 + (CI)	26,6%
Peitoril elevado + película Sterling 40 + (CI)	17,2%
Peitoril + sombreamento externo + película Sterling 70 + (CI)	27,5%
Prateleira de luz* + película Sterling 40 + (CI)	25,8%
Prateleira de luz* + breeze janelas leste e oeste + película Sterling 40 (CI)	28,4%
Prateleira de luz* nas janelas Norte e Oeste + película Sterling 40 (CI)	27,5%

*As prateleiras de luz foram testadas combinadas ao peitoril elevado.

Quando não é utilizado o controle de iluminação (CI), a economia de energia será maior quanto mais escura for a película. No entanto, é significativo relevar que películas excessivamente escuras deprimem ambientes, pois deixam sombrio o dia exterior. Nestas condições (sem controle de iluminação), pode-se observar através da tabela 5.1, que o melhor resultado em economia energética, com 17,9% de redução da demanda inicial, foi a instalação de sombreamento externo e utilização de película para vidro Sterling 20.

No caso de se utilizar apenas a película Sterling 20 sem o controle de iluminação, é possível economizar 11,8% de energia em relação ao modelo de referencia base, sendo esta uma alternativa que exige poucas mudanças estruturais e poucos recursos financeiros.

Pode-se verificar que com apenas a utilização do controle de iluminação (CI) dos ambientes se obteve uma economia de 8,6% do valor do consumo energético do modelo referencia base. Verifica-se também que a utilização de sombreamentos ou dispositivos nas janelas geram melhores resultados que a utilização de apenas películas para o vidro. Neste ponto, faz-se interessante a comparação que quando utilizado o controle de iluminação as maiores economias não ocorreram com as películas mais escuras.

Dentro das propostas que utilizam o controle de iluminação variável, as de menor complexidade de instalação são a adição de película Sterling 20 aos vidros e a construção de um peitoril para a fachada norte somada a adição de uma película Sterling 40, que atingiram respectivamente 14,5% e 17,2% de economia energética.

As propostas de maior economia indicadas na tabela 5.1 exigem a instalação de estruturas nas janelas, seja na forma de sombreamentos ou de prateleiras de luz e também de controle de iluminação variável, que a princípio exigiriam investimentos maiores. Mas investimentos teoricamente mais altos resultaram em uma economia energética mais significativa, superando em todos os casos, para a melhor combinação de película possível, mais que 25% de economia em relação ao modelo referencial básico.

A alternativa que possibilitou maior economia foi a combinação da prateleira de luz com sombreamento externo nas janelas a oeste e leste, com vidros utilizando película Sterling 40, contabilizando uma economia de 28,4% de consumo de energia quando comparado ao modelo referencial base.

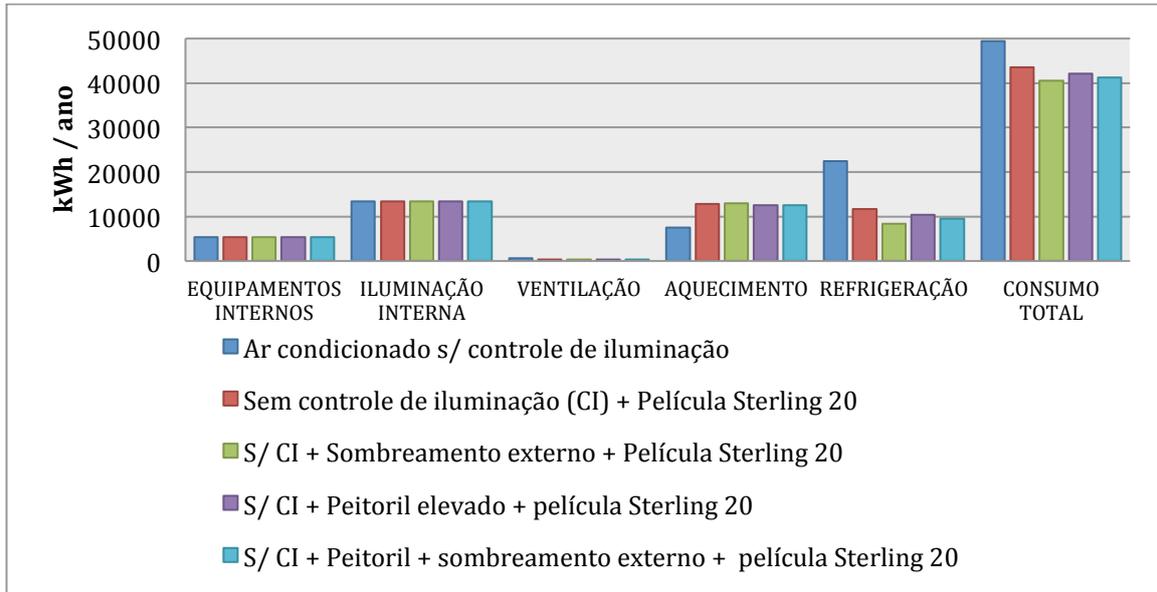


Gráfico 5.1: Consumo energético por tipo de demanda

No gráfico 5.1 acima pode-se observar, que sem o controle de iluminação variável, todas as alternativas comparadas ao modelo base possuem consumo energético semelhante, porém, a adição de sombreamento externo e película Sterling 20 aos vidros resultou numa economia energética em refrigeração, tornando esta a alternativa mais econômica do ponto de vista energético.

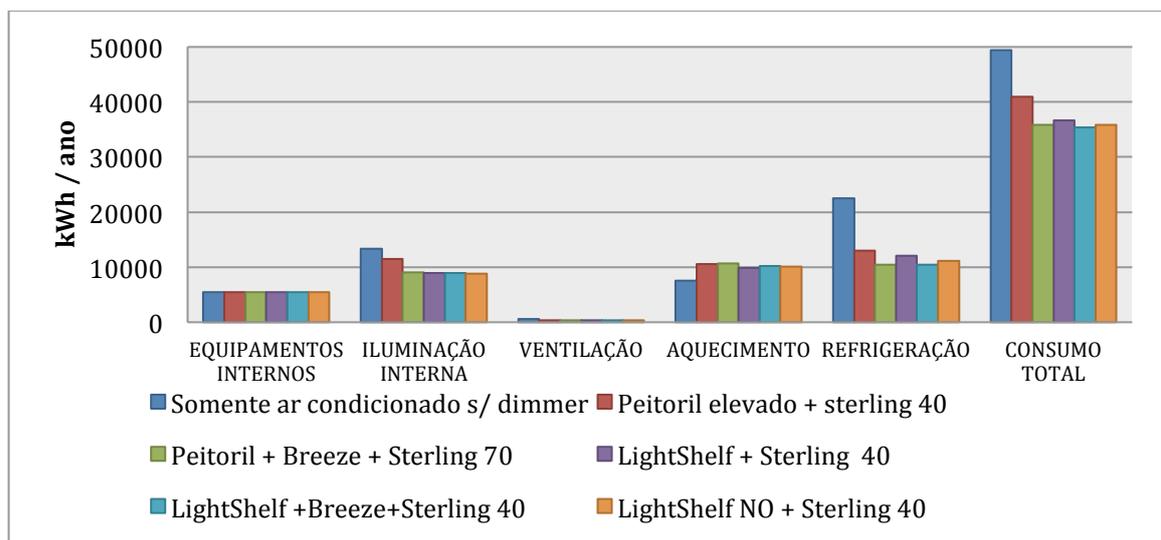


Gráfico 5.2: Continuação do consumo energético por tipo de demanda

Já o gráfico 5.2 traz a comparação da referência base com as alternativas quando adicionado o peitoril à fachada norte. Verifica-se que todas possuem perfil de demanda anual muito semelhantes, sendo um pouco maior a demanda energética da que não possui nenhum tipo de sombreamento ou prateleira de luz.

Essa alternativa, apesar de possuir menor eficiência energética, já que o consumo com refrigeração e iluminação são um pouco mais elevados que nos outros modelos, ao utilizar apenas a película Sterling 40 e o peitoril, teoricamente exigiria investimento menor, podendo ser uma alternativa altamente atrativa.

Também pode ser observado no gráfico 5.2 o comportamento da prateleira de luz quando comparada a utilização de sombreamentos externos. Por expor mais o ambiente à

radiação solar, a prateleira de luz exige a utilização de películas mais escuras (no caso Sterling 40) para otimizar o sistema de refrigeração. Era esperado que, por possuir uma película muito mais escura que o sombreamento externo (Sterling 70), a demanda energética devido a iluminação fosse muito maior. Porém, a prateleira de luz, por realizar uma melhor distribuição luminosa no ambiente, acaba compensando este escurecimento de película e na verdade prova-se que a utilização de prateleiras de luz permitem a economia energética com iluminação.

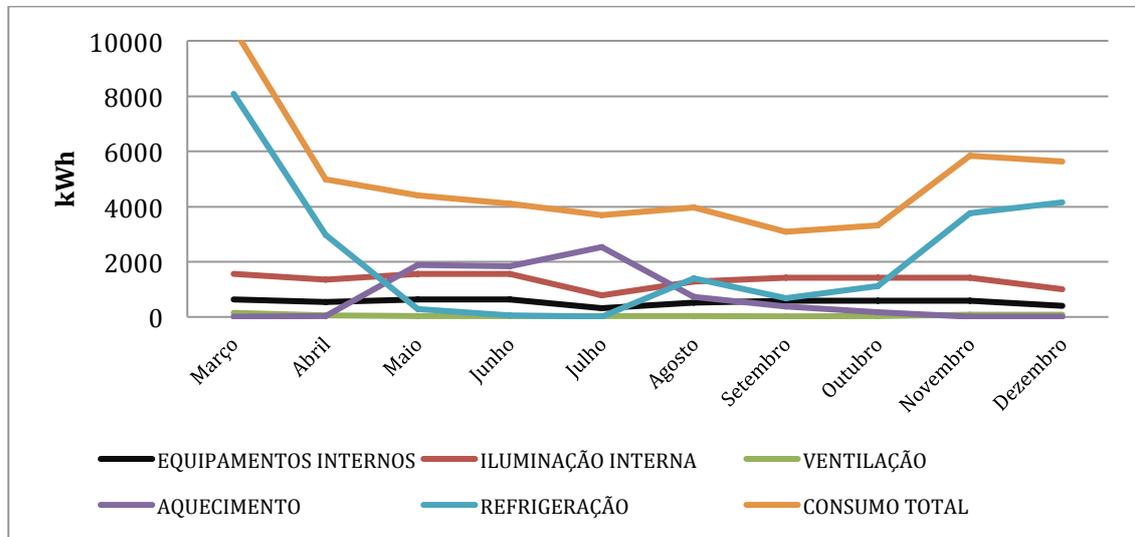


Gráfico 5.3: Demanda energética anual para o modelo básico (ar condicionado sem controle de iluminação)

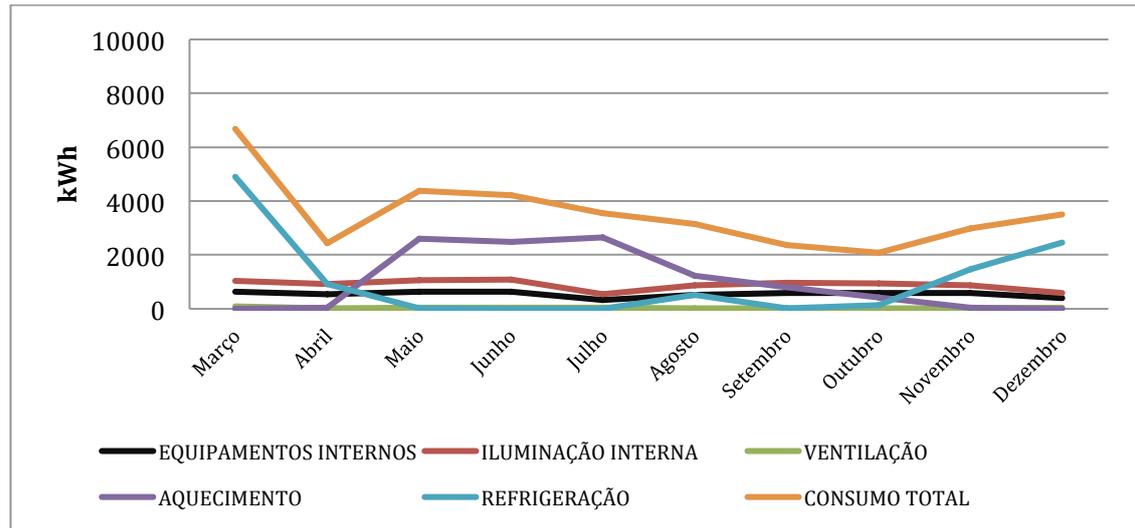


Gráfico 5.4: Demanda energética ao longo do ano para o modelo mais eficiente (prateleira de luz + sombreamento externo nas janelas leste e oeste + película Sterling 40)

Analisando os gráficos 5.3 e 5.4 é possível comparar a demanda do sistema de referência base com a melhor alternativa energética para a climatização. Verifica-se que para a alternativa mais econômica, o consumo energético é mais homogêneo ao longo do ano, sendo que o aquecimento das salas passa a ter papel mais relevante que no referencial base.

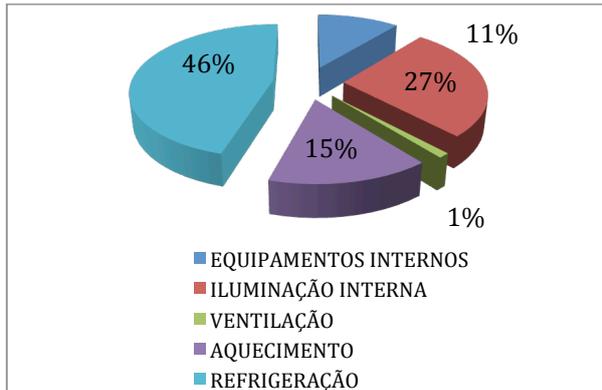


Gráfico 5.5: Fração do consumo energético total (49 431 kWh) por tipo de demanda para o modelo básico

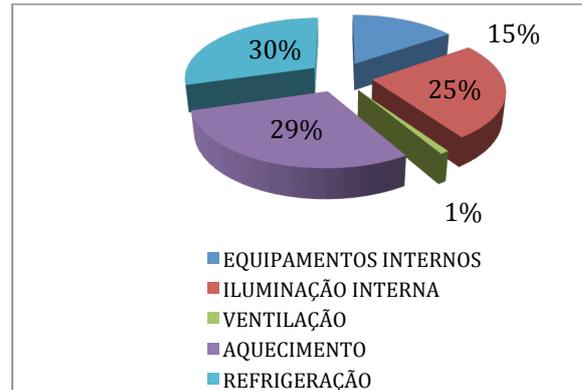


Gráfico 2.6: Fração do consumo energético (35 377 kWh) por tipo de demanda para o modelo mais eficiente

O modelo base tem sua demanda energética significativamente dominada pela refrigeração, que representa quase metade do consumo. No modelo de consumo energético mais eficiente, pode-se verificar que os consumos são melhor distribuídos entre as demandas, sendo que refrigeração, aquecimento e iluminação tem praticamente o mesmo consumo total no ano.

MAPAS DE ILUMINAÇÃO

A análise dos mapas de iluminação é significativa para justificar a redução que as prateleiras de luz provocam no consumo energético. Para isso, foram gerados mapas de iluminação no dia 21 de março, dia do *Equinócio* solar, que é uma boa representação da inclinação solar média no ano.

Os mapas de iluminação consideram apenas a iluminação natural, por isso, os gráficos 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 não contabilizam a iluminação artificial dos ambientes. O mapa para a zona norte do modelo que utiliza peitoril elevado e película Sterling 40, com persianas internas nas janelas a 45° com a horizontal, apresenta salas muito escuras, o que exige maior utilização de iluminação artificial do que o modelo que utiliza as prateleiras de luz.

Verificou-se através destes mapas, que com a utilização das prateleiras de luz, quando comparado a outra proposta, que utiliza características construtivas idênticas exceto à prateleira, que a luminosidade na sala é muito mais intensa ao longo do dia, permitindo um aproveitamento mais significativo da iluminação natural externa e consequente redução significativa da necessidade de iluminação artificial.

Também pode-se observar que devido à inclinação horária de 14° com o norte geográfico, a luminosidade é mais intensa durante a manhã. Constatou-se também que as árvores existentes em frente ao prédio não chegam a fazer sombra na fachada analisada.

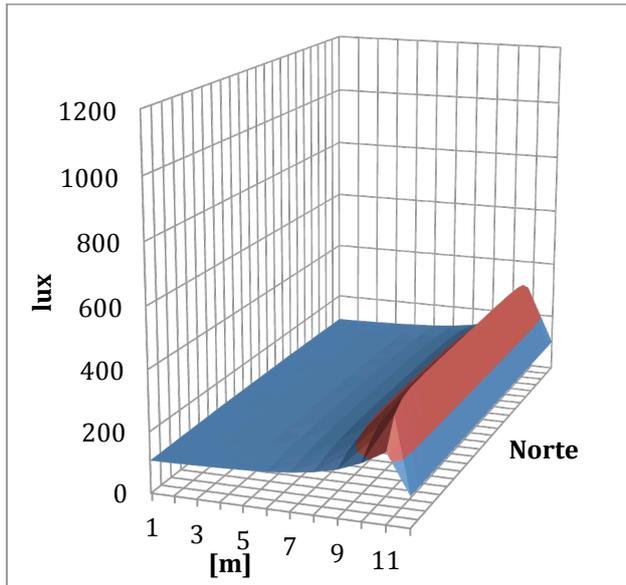


Gráfico 5.7: Mapa de luz para zona norte c/ peitoril, persianas internas à 45° e c/ película Sterling 40 às 9 horas.

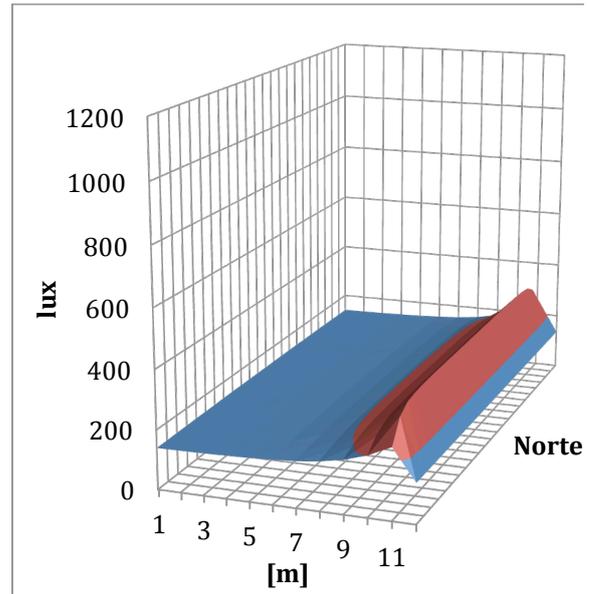


Gráfico 5.8: Mapa de luz para zona norte c/ peitoril persianas internas à 45° e c/ película Sterling 40 às 15 horas.

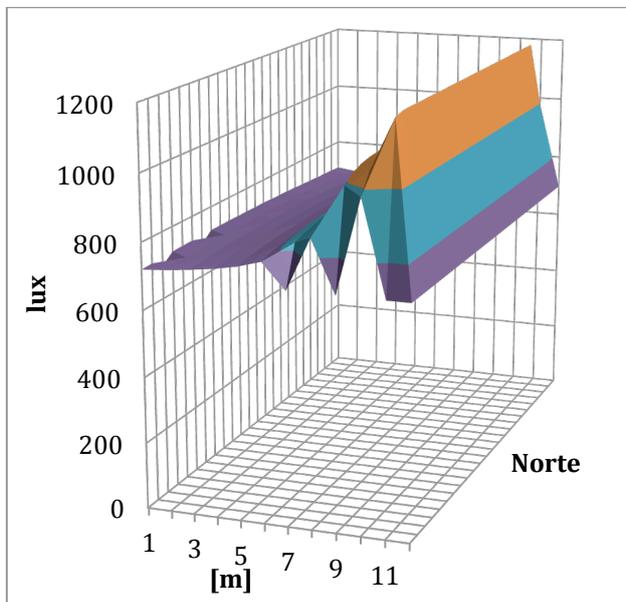


Gráfico 5.9: Mapa de luz para zona norte adicionando-se prateleira de luz, sem persianas, às 9 horas.

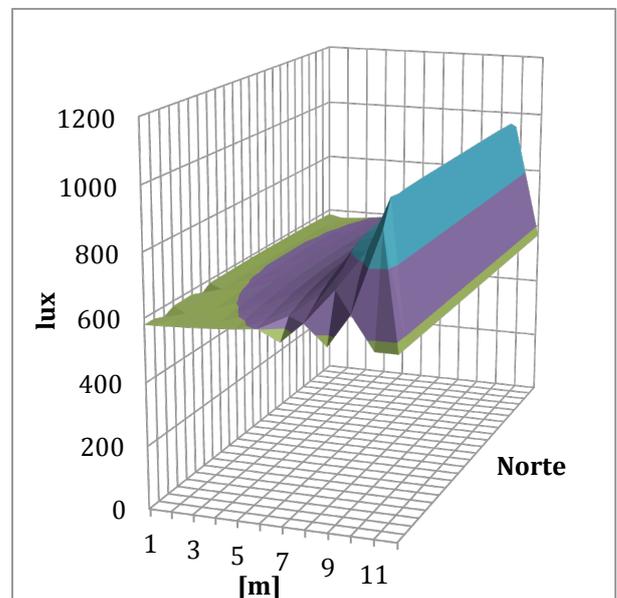


Gráfico 5.10: Mapa de luz para zona norte adicionando-se prateleira de luz, sem persianas às 15 horas.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou verificar modificações estruturais que otimizassem a demanda energética das salas da fachada norte do prédio da Faculdade de Arquitetura da UFRGS, quando instalado um sistema de climatização.

Para tal, foram simulados diferentes modelos no *software EnergyPlus*, e os consumos energéticos foram comparados com uma referência base. Concluiu-se que as alternativas de maior economia são as que adicionam à fachada estruturas de sombreamento ou prateleiras de luz, utilizando controle variável de iluminação, aliadas a utilização ótima de películas para os vidros, sendo que a alternativa que apresentou maior economia energética, de 28% em relação

à referencia base, era o modelo onde foi adicionado a construção do peitoril na fachada norte, às prateleiras de luz, película Sterling 40 para os vidros e sombreamento externo nas fachadas leste e oeste. Outra alteração de complexidade menor que também obteve um resultado significativo de 17% de economia energética, foi a utilização do peitoril na fachada norte e película Sterling 40 para vidros.

Ainda mais interessante, menos complexa, porém menos eficiente, pode se citar as alternativas que não utilizam o controle de iluminação variável, onde apenas a adição de película Sterling 20 aos vidros do modelo resultou em uma economia de quase 12% de energia e adicionando-se sombreamento externo a esta película, alcança-se uma economia de quase 18%.

Todas as alternativas analisadas oferecem economia de energia e podem ser de aplicação interessante. Porém, como este trabalho não realizou levantamentos de viabilidade econômica, não é possível inferir qual, entre todas as propostas analisadas é a mais viável do ponto de vista financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., **“ASHRAE Fundamentals HandBook”**, SI Edition, Atlanta, USA, 2001.

Bekaert, **“Catálogo #0121 COM POR”**, Bekaert Specialty Films, 2003.

Eletrobras, **“Estimativa de consumo médio de eletrodomésticos”**, <http://www.eletrobras.com/>. Acesso em 10/09/2011.

EnergyPlus, **“Input Output Reference & Engineering Reference”**, <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>. Acessado em 02/09/2011.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, **“Arquivos Climáticos”**, <http://www.labee.ufsc.br>. Acesso em 20/08/2011.

Pizzutti, D., **“Análise energética de edificação com uso de proteções solares”**, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Souza, F., **“Simulação visando a eficiência energética de um prédio da UFRGS utilizando o EnergyPlus”**, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Souza, L. C., **“Avaliação termo-energética de um edifício segundo critérios de prédios verdes”**, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Souza, W. B., **“Comparação entre dois sistemas de ar-condicionado para um prédio histórico”**, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Stein, T. S., **“Impacto das soluções de arquitetura e climatização no consume de energia de uma edificação”**, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ANEXO I

No anexo, foram detalhadas as propriedades térmicas dos materiais utilizados no edifício. São descritos na tabela AN.1 os materiais opacos e na tabela AN.2 os materiais translúcidos utilizados. Os valores para as propriedades foram obtidos diretamente do banco de dados dos modelos simulados no *EnergyPlus*, da tabela de Condutância e Absortância de materiais da ASHRAE, 2001, e também do catálogo de películas para vidros da Bekaert, 2003.

Tabela AN.1: Propriedades térmicas dos elementos opacos

	K	ρ	C_p	ϵ	α_{solar}	$\alpha_{visivel}$
Concreto Pesado	1,95	2240	900	0,9	0,4	0,4
Reboco / Contra piso	0,72	1856	840	0,9	0,4	0,4
Madeira Dura (parquet)	0,167	680	1630	0,9	0,7	0,7
Piso de terraço	1,8	2560	790	0,9	0,7	0,7
Concreto leve	0,53	1280	840	0,9	0,4	0,4
Isolamento de lã de vidro	0,036	140	960	0,85	0,6	0,6
Gesso Acartonado	0,16	800	1090	0,9	0,4	0,4
Tijolo	0,89	1920	790	-	-	-
Filme Plástico Impermeabilizante	0.002*	-	-	0,9	0,75	0,75
Espaço de Ar entre paredes	0.15*	-	-	-	-	-
Espaço de Ar entre pisos	0.18*	-	-	-	-	-

*Valor representa a resistência térmica em m^2K/W .

Onde K é a condutividade térmica, em $W/(m.K)$, ρ representa a massa específica em kg/m^3 , C_p é o calor específico, em $J/(kg.K)$, ϵ é a emissividade térmica, α_{solar} é a absortância solar do material, $\alpha_{visivel}$ é a absortância visível do material.

Tabela AN.2: Propriedades térmicas dos elementos translúcidos

Vidro c/ película:	U-Factor	SHGC	$\tau_{visivel}$
Sterling 70	5	0,63	0,69
Sterling 60	5	0,46	0,53
Sterling 50	5	0,43	0,49
Sterling 40	5	0,36	0,41
Sterling 20	5	0,24	0,22

Onde U-Factor é dado em $W/(m^2.K)$, SHGC é o coeficiente de ganho de calor solar, e $\tau_{visivel}$ é a transmissão visível.

APÊNDICE I

O apêndice traz resultados e avaliações que foram relevantes ao trabalho, porém não essenciais ao desenvolvimento do corpo do trabalho.

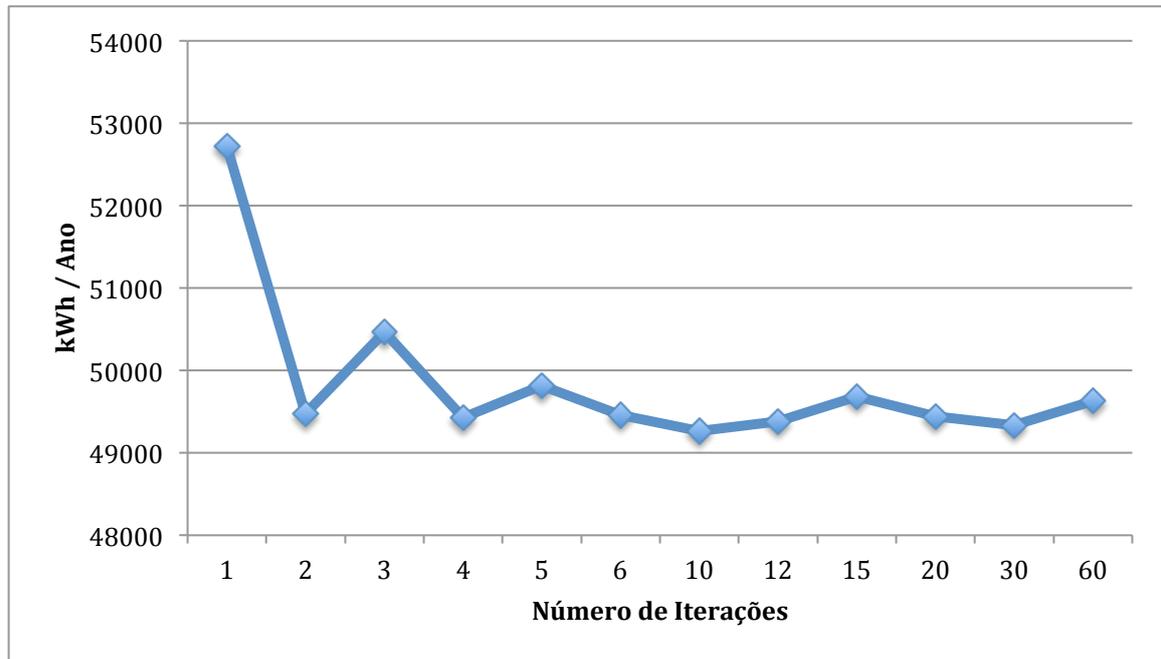


Gráfico A.1: Consumos energéticos totais para o modelo base utilizando diferentes quantidades de iterações nas simulações.

O gráfico A.1 acima foi gerado para verificar a independência de resultados da simulação em relação ao número de iterações utilizadas por hora. Este número necessita ser um divisor de 60, podendo ser 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 30 ou 60 iterações por hora. Já a tabela A.1 abaixo, verificou o desvio de cada número de iterações do valor médio para as diferentes quantidades utilizadas. Para o trabalho, foram utilizadas 4 iterações.

Tabela A.1: Desvio da média dos consumos energéticos totais para o modelo base utilizando diferentes quantidades de iterações nas simulações.

Número de Iterações	2	3	4	5	6	10	12	15	20	30	60	Média
Consumo Total [kWh]	49478	50466	49431	49812	49462	49263	49383	49685	49444	49332	49627	49580
Desvio da Média	0,21%	1,79%	0,30%	0,47%	0,24%	0,64%	0,40%	0,21%	0,27%	0,50%	0,09%	

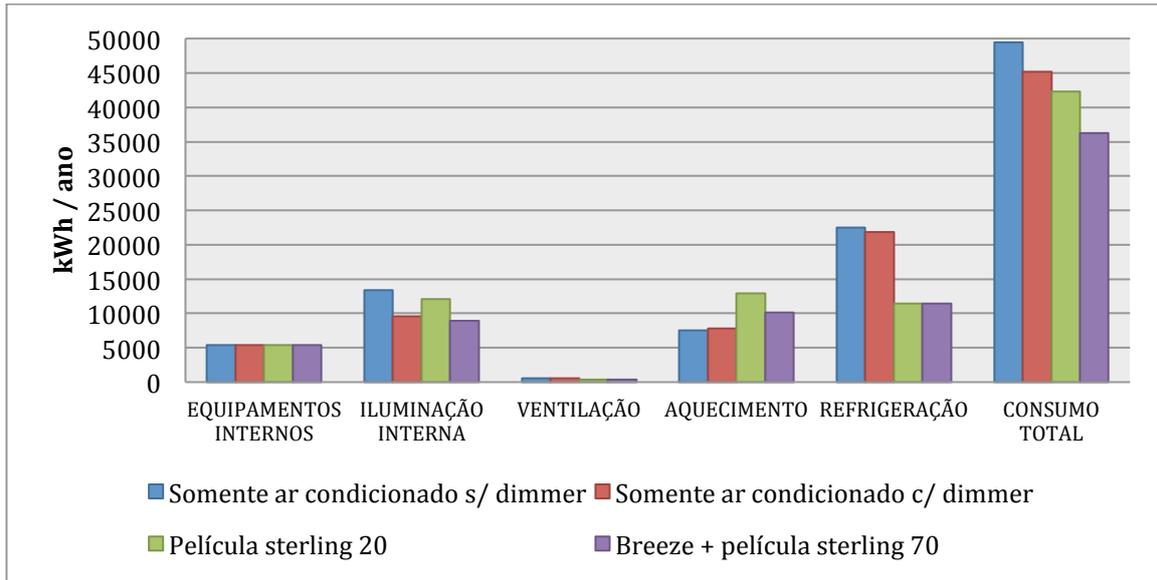


Gráfico A.2: Consumo energético por tipo de demanda.

No gráfico A.2 pode-se observar que alternativas que bloqueiem a radiação solar, como o sombreamento externo, são as mais econômicas energeticamente. Isso ocorre porque, para maximizar a economia, as películas sozinhas devem transmitir o mínimo possível de radiação visível, reduzindo assim os gastos energéticos com a refrigeração. Já o sombreamento externo faz com que economize-se em iluminação e aquecimento, na comparação com a alternativa anterior, pois aumenta-se a transmissão dos vidros.

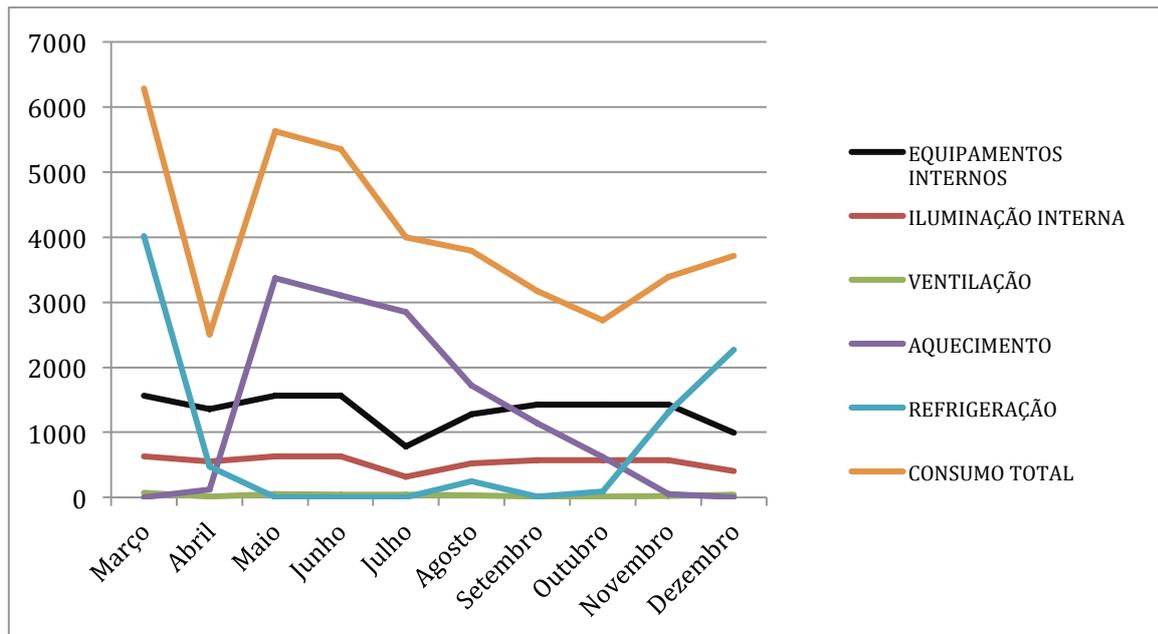


Gráfico A.3: Consumo por tipo de demanda s/ controle de iluminação, com sombreamento externo e película Sterling 20.

Já o gráfico A.3 acima, apresenta o perfil do consumo mensal do modelo sem controle de iluminação, com sombreamento externo e película Sterling 20 ao longo do ano. Verifica-se uma inflexão significativa na curva, no mês de abril. Esta inversão abrupta na tendência de queda na demanda energética pode ser explicada pelo aumento significativo no consumo devido ao aquecimento.

Por último, na tabela A.2 abaixo, encontram-se os consumos por tipo de demanda, o consumo total e a economia em relação ao modelo básico para as propostas de otimização mais eficientes.

Tabela A.2: comparação das diferentes demandas energéticas para as melhores combinações películas para os modelos simulados

	Demanda Final	Soma do Consumo Anual [kWh]	Consumo Total [kWh]	Economia do Original
	EQUIPAMENTOS INTERNOS	5421	-	-
Sterling 20 s/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	13386	43612	11,8%
	VENTILAÇÃO	395,1		
	AQUECIMENTO	12784		
	REFRIGERAÇÃO	11626		
Breeze + Sterling 20 s/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	13386	40562	17,9%
	VENTILAÇÃO	338		
	AQUECIMENTO	12986		
	REFRIGERAÇÃO	8431		
Peitoril + Sterling 20 s/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	13386	42136	14,8%
	VENTILAÇÃO	369,5		
	AQUECIMENTO	12504		
	REFRIGERAÇÃO	10455		
Peit. + Breeze + Sterling 20 s/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	13386	41236	16,6%
	VENTILAÇÃO	351,8		
	AQUECIMENTO	12499		
	REFRIGERAÇÃO	9578		
Ar condicionado s/ dimmerização	ILUMINAÇÃO INTERNA	13386	49431	0,0%
	VENTILAÇÃO	565,6		
	AQUECIMENTO	7550		
	REFRIGERAÇÃO	22508		
Ar condicionado c/ dimmerização	ILUMINAÇÃO INTERNA	9537	45167	8,6%
	VENTILAÇÃO	555,9		
	AQUECIMENTO	7835		
	REFRIGERAÇÃO	21818		
Película sterling 20 c/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	12108	42286	14,5%
	VENTILAÇÃO	393,6		
	AQUECIMENTO	12923		
	REFRIGERAÇÃO	11440		
Sombreamento Externo + Película Sterling 70 c/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	8926	36281	26,6%
	VENTILAÇÃO	355,3		
	AQUECIMENTO	10129		
	REFRIGERAÇÃO	11450		
Peitoril elevado + Película Sterling 40 c/	ILUMINAÇÃO INTERNA	11526	40916	17,2%
	VENTILAÇÃO	395		

dimmer	AQUECIMENTO	10583		
	REFRIGERAÇÃO	12991		
Peitoril + Sombreamento externo + Película Sterling 70 c/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	9044	35841	27,5%
	VENTILAÇÃO	343,7		
	AQUECIMENTO	10629		
	REFRIGERAÇÃO	10403		
Prateleira de Luz + Película Sterling 40 c/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	8963	36679	25,8%
	VENTILAÇÃO	367,5		
	AQUECIMENTO	9838		
	REFRIGERAÇÃO	12089		
Prateleira de Luz + breeze janelas leste e oeste + película Sterling 40 c/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	8899	35377	28,4%
	VENTILAÇÃO	336		
	AQUECIMENTO	10259		
	REFRIGERAÇÃO	10462		
Prateleira de Luz nas janelas Norte e Oeste + película Sterling 40 c/ dimmer	ILUMINAÇÃO INTERNA	8875	35830	27,5%
	VENTILAÇÃO	346,3		
	AQUECIMENTO	10059		
	REFRIGERAÇÃO	11129		