

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TIPOLOGIA DE EDIFICAÇÕES ESCOLARES – FERRAMENTA DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

**Ms. Paula Roberta Pizarro (1); Ph.D. Lucila Chebel Labaki (2);
Daniel Paulo Nani (3)**

(1), (2) Unicamp – Universidade de Campinas
FEC- Faculdade de Engenharia Civil
e-mail: paulapzr@hotmail.com

(3) aluno de graduação - Unicamp – Universidade de Campinas
FEC- Faculdade de Engenharia Civil

RESUMO

Procurando a melhoria na eficiência e desempenho energético de edifícios, alguns países estão desenvolvendo programas para que novos edifícios ou edifícios existentes sejam energeticamente mais eficientes. No Brasil, esta busca por um selo de qualidade das edificações é recente, principalmente se tratando de redução de gastos energéticos em edificações de domínio público. Este artigo propõe uma análise da relação entre a tipologia das edificações escolares e o consumo de energia elétrica através do estudo de salas de aula de três escolas municipais da cidade de Campinas, SP. Para tanto as salas são caracterizadas por seus dados de consumo de energia elétrica, orientação e dimensões das salas de aulas e das fachadas, áreas de abertura vitrificadas e protetores solares externos. Dados de temperatura de superfícies são coletados de agosto a dezembro, durante os horários de aula, representando estações climáticas distintas. Todos estes dados entrarão como variáveis para uma modelagem de previsão de consumo. Para a proposta metodológica emprega-se um programa de Redes Neurais Artificiais (RNA) a fim de realizar simulações entre as variáveis citadas. Como resultado, espera-se definir índices de tipologias de edificações relacionadas a um bom padrão de consumo energético de escolas. Este trabalho está inserido no projeto “Indicadores de eficiência energética e conforto ambiental das escolas da rede pública” - INDEECON, financiado pelo MCT/FINEP/CET-ENERG e CNPq.

ABSTRACT

Looking for the energy efficiency improvement of the buildings, some countries are developing programs for the new or existent buildings to be more efficient. In Brazil, the research is to meet a very recently quality stamp, that is taking care to reduce wastes from the governmental public domain. This article proposes the analysis between the constructive aspects and the electrical energy consumption, at Campinas City classrooms – São Paulo. For that, each school is characterized by the electrical energy consumption, orientation, opening areas, façades and external solar protectors. Environment temperature data are collected between August and December during the classroom time, representing distinct climatic stations. All this data will be enter as variables for prediction model consumption. For this methodology is adopted the Artificial Neural Networking to simulate the variables. As a result, is expected to define the ranges of the building constructive aspects related to the efficient energetic school consumption. This work is inserted in the project “Energetic Efficiency Indicators and Environmental Comfort of Public Schools.” – INDEECON, financed by MCT/FINEP/CET-ENERG and CNPq.

1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética de um edifício pode ser maior ou menor, em função de um projeto consciente que tenha considerado as variáveis ambientais físicas e climáticas envolvidas, assim como a prática operacional e a manutenção dos dispositivos de controle energético, tais como brises, lâmpadas e reatores, fechamentos, aparelhos de ar-condicionado. Portanto, é na fase de projeto da edificação que são tomadas as decisões mais importantes ligadas ao consumo de energia (CARAM, 1998).

Segundo Graça (2002), considera-se um bom projeto arquitetônico para escolas estaduais, aquele que atende às restrições e diretrizes constantes em catálogos de especificação de ambientes e nas normas técnicas de elaboração de projetos de escolas de ensino fundamental e ensino médio no âmbito do estado de São Paulo. Da mesma forma são analisados os projetos escolares municipais. Entretanto, no processo de projeto, as condições de conforto não são consideradas como princípios de projeto, prejudicando o desempenho do edifício. Muitas escolas ao longo dos anos vêm sofrendo reformas e adaptações espaciais, mas que não garantem o desempenho pretendido. Em Almeida et al. (2003) notam-se problemas físicos ocorridos por conta do funcionamento de estabelecimento escolar em antigos edifícios residenciais.

Em relação aos edifícios escolares, é comum observar negligência em relação ao acendimento desnecessário de lâmpadas em salas de aula durante o período diurno de funcionamento. Em escolas que não possuem acondicionamento artificial, as lâmpadas são ainda mais responsáveis pelo total de gastos. Uma grande parte de acendimento de lâmpadas por parte de alunos e professores se deve ao baixo grau de luminosidade natural a que são expostos para a realização de suas tarefas. Outra parte, menos comumente relacionada ao gasto com lâmpadas é proveniente da má distribuição das aberturas e de suas orientações, bem como a configuração tipológica da sala. As radiações solares diretas inconvenientes para os usuários são barradas por cortinas, muitas vezes escuras demais para o tipo de ambiente, o que provoca acendimento de lâmpadas em salas de aula que teriam abundância de luminosidade natural. Sendo assim, dentro deste parâmetro de estudo, algumas variáveis relacionadas à tipologia e à incidência direta de radiação solar podem ser cruzadas com gastos energéticos provenientes das lâmpadas.

Para obter este tipo de cruzamento, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) são aqui utilizadas para determinar as variáveis e estabelecer relações entre elas, desenvolvendo um modelo de previsão de gasto energético. Em relação à modelagem através de Redes Neurais Artificiais, esta aparece como um substituto potencial aos modelos estatísticos convencionais, devido à fácil interface dos programas com o usuário e a não necessidade de conhecimento prévio da relação entre as variáveis envolvidas (BRONDINO, 1999 apud COSTA, 2003).

Em pesquisas relacionadas à eficiência energética e conforto ambiental não é comum o uso de simulações através das Redes Neurais. Talvez o fato deva-se à desinformação em relação às potencialidades desse modelo computacional, visto que é um ótimo recurso para pesquisas que apresentem um conjunto de variáveis interdependentes. Nesta pesquisa será utilizado o software Easy NN.

É sob este aspecto que a proposta desta pesquisa se concentra, qualificando as escolas selecionadas de uma maneira abrangente, estabelecendo parâmetros climáticos, tipológicos e construtivos relacionados ao edifício para posteriormente relacioná-las com os gastos energéticos.

2. METODOLOGIA

A metodologia consiste primeiramente em uma definição das escolas e salas de aula a serem estudadas, sendo elas, municipais, pertencentes à cidade de Campinas e do ensino fundamental. Logo após foram realizadas observações prévias ao estudo de fato nas salas, onde são notadas as condições do edifício e de conforto dos usuários, além do comportamento dos alunos frente aos mecanismos de controle de qualidade do ambiente.

A etapa de levantamento de dados engloba a catalogação de dados térmicos com o auxílio de equipamentos, levantamento de dados construtivos e gastos energéticos das edificações, para enfim definir as variáveis da pesquisa. Para confeccionar uma base de dados completa os levantamentos foram realizados em meses com estações climáticas distintas (agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro). As medições ocorreram sempre no período diurno, das 08:00 às 17:00, pelo fato do trabalho focar os parâmetros relacionados à radiação solar direta.

Tendo as variáveis estabelecidas, é feito um modelo de previsão dos gastos energéticos das salas de aula. Esta proposta metodológica segue um padrão realizado no trabalho de sensações de conforto em usuários de salas de aula, de Pizarro (2005).

2.1 Região de estudo – caracterização da cidade de Campinas

A cidade de Campinas localiza-se na latitude 22°54'S, longitude 43°3'O e altitude de 854m. Devido sua altitude, a cidade está sujeita a intensa ventilação e insolação (CHVATAL, 1998).

O período de verão compreende os meses de novembro a março e o período de inverno de junho a agosto. O verão possui a maior duração que o inverno. De acordo com dados climáticos, os meses mais quentes são Janeiro e Fevereiro, com média das máximas 29,9°C e 29,7°, respectivamente. E os meses mais frios são Junho, com média das mínimas de 12,5°C, e Julho com média das mínimas de 12,4°C.

A fachada Sul recebe radiação solar direta apenas no verão, porém durante todo o dia. Já a fachada Norte recebe muita radiação solar direta durante quase o ano todo, sendo que nos meses de março a setembro esta recebe insolação durante todo o dia.

Como é sabido, a fachada Leste recebe radiação solar direta no período da manhã e a Oeste no período da tarde, durante todo o ano, sendo que durante o verão essa radiação apresenta valores mais altos que no inverno (MIANA, 2005).

2.2 Levantamento de dados

O levantamento foi realizado através de visitas (levantamento de dados climáticos, fotográfico e inspeções *in situ*), levantamento de gastos energéticos dos últimos 3 anos e levantamento documental de arquitetura, com projetos fornecidos pelo apoio da Secretaria Municipal de Educação a este projeto. A escolha das escolas priorizou edifícios com maiores gastos energéticos e que seriam passíveis de reformas durante os próximos anos. Nota-se que os gastos energéticos gerais serviram de base para escolha das escolas a serem analisadas. Entretanto, para a definição da variável de estudo, gastos energéticos individuais de cada sala (lâmpadas) foram calculados.

Após o reconhecimento do projeto arquitetônico das escolas selecionadas para análise foi necessário a escolha de salas que comportariam um estudo de incidência de radiação solar. Para tanto, foram escolhidas aquelas que apresentavam aberturas críticas em relação a este parâmetro ou algum elemento de proteção solar externo significativo, selecionando, portanto, uma Fachada Principal a ser analisada em cada sala. Ainda, foram selecionadas salas com orientações solares opostas a fim de obter base comparativa de dados. As orientações das fachadas Principais foram transformadas em graus, medidos a partir do Norte (°N), (Tabela 1).

Tabela 1 – Escolas e salas selecionadas para levantamento de dados

Escolas	Salas	Orientação da Fachada Principal
EMEF Raul Pilla	1	Noroeste – NO (315°N)
	2	Sudeste – SE (135°N)
	3	Noroeste – NO (315°N)
	Multiuso	Nordeste – NE (45°N)
EMEF Ângela Cury Zakia	2	Norte – N (0°N)
	4	Leste – L (90°N)
EMEF Lourenço Bellocchio	2	Sudeste – SE (135°N)
	3	Sudeste – SE (135°N)
	5	Noroeste – NO (315°N)
	8	Noroeste – NO (315°N)

De acordo com a revisão bibliográfica, algumas variáveis construtivas puderam ser classificadas previamente às visitas, entretanto, somente em observações *in loco* é que se tornou possível o direcionamento da coleta de dados. Alguns pontos relativos a estas características devem ser mencionados, como o fato de todas as salas de aula obedecerem ao padrão das EMEFS e não apresentam sistema de condicionamento artificial. Além disso, os espaços vegetativos próximos às aberturas só puderam ser verificados nas visitas. As variáveis construtivas relevantes ao estudo e que compunham dados para modelagem são: orientação, vegetação, área de aberturas transparentes, dispositivos de proteção solares externos (marquises e beirais), área da fachada e área total da sala. Ressalta-se aqui que dos valores de área de aberturas transparentes (m²) foram subtraídos os valores de área de cortinas em uso (m²).

Para a realização das medições térmicas de superfícies a pesquisa contou com equipamentos cedidos pelo Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Faculdade de Engenharia Civil – FEC da Universidade de Campinas – UNICAMP. Durante as visitas foram registradas imagens da situação de cada sala de aula em relação à incidência de raios solares. A proposta metodológica das medições procurou atender às expectativas da coleta sem interferir nos andamentos das aulas. Embora a interferência dos alunos seja grande em aspectos relacionados aos parâmetros térmicos de conforto, a pesquisa prima por uma investigação construtiva e de configuração espacial. Os equipamentos utilizados foram:

- 2 Termo-higrômetros digitais com sensores externos, da marca Temptec;
- 16 Sensores de temperatura, modelo MTK 01, da marca Minipa;
- 1 Máquina fotográfica digital com resolução 4.1, da marca Sony.

Em todos os levantamentos obedeceu-se o padrão de uso dos alunos, por exemplo, em relação às disposições das cortinas. Ainda, as observações mostraram que os alunos ligavam e desligavam os ventiladores a todo o momento. Este fato determina a necessidade de maior ventilação no ambiente, porém não confere uma variável na modelagem no estudo proposto, assim como a temperatura radiante média da sala de aula (medida no centro da sala de aula). As variáveis de levantamento climático que demonstraram importância para a pesquisa são a temperatura de superfícies das paredes das fachadas, tanto internamente, quanto externamente. Tais valores expressam as diferentes situações das fachadas das salas de aula em relação à incidência de radiação solar durante os meses analisados, e configuram importantes variáveis se analisadas juntamente à orientação solar de cada fachada.

3. APLICAÇÃO DAS REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Para desenvolvimento do modelo de Redes Neurais Artificiais foi aplicado o software EasyNN.

As variáveis de “saída” do modelo das Redes compreendem os gastos energéticos de cada sala de aula analisada, sendo que as variáveis de “entrada” são as demais, levantadas na coleta de dados.

Vários modelos foram rodados, gerando resultados, dos quais o que obteve maior valor de R^2 e menor erro relativo foi selecionado. A Tabela 2 mostra os resultados das importâncias das variáveis, em porcentagem.

Tabela 2 – Relevância das variáveis em relação aos gastos energéticos para a melhor simulação

Variáveis	(%)
Temperatura da parede externa	5
Temperatura da parede interna	5
Área da Fachada Principal	6
Área de aberturas transparentes da Fachada Principal	8
Proteção solar externa	11
Vegetação	18
Área da sala	18
Orientação da Fachada Principal	29

De acordo com a Tabela 2, os valores da variável Orientação são muito mais significativos que qualquer outra variável construtiva relacionada à tipologia da edificação, em se tratando de gastos energéticos provenientes de lâmpadas acesas indevidamente durante o dia.

Outra variável que merece destaque e que obteve importância significativa é a Vegetação.



Figura 1 – Sala 2, EMEF Ângela Cury, aberturas parcialmente protegidas pela vegetação.

Mesmo que não se encaixe em um padrão de variável construtiva, ela é responsável por grande parte da atenuação de raios solares indesejáveis, como se vê na sala 2 da EMEF Ângela Cury Zákia (Figura 1), estando à frente da variável Proteção solar externa.

4. RESULTADOS

A partir dos resultados de importância das variáveis, foram realizados testes de verificação da influência daquelas que tiveram importâncias mais significativas. Estes testes consistem de simulações, adotando-se parâmetros médios para as variáveis do modelo gerado pelas Redes Neurais Artificiais.

O gráfico da Figura 2 mostra que os maiores resultados de consumo energético de lâmpadas em salas de aula devem-se às suas orientações vitrificadas voltadas para Norte (0°N) e os melhores resultados estão entre 40 e 160 °N.

Outro ponto de aumento de gasto energético se encontra aproximadamente a 200°N, quando a orientações passam de lateral Leste (valores menores de 180°N) para Oeste (valores maiores de 180°N).

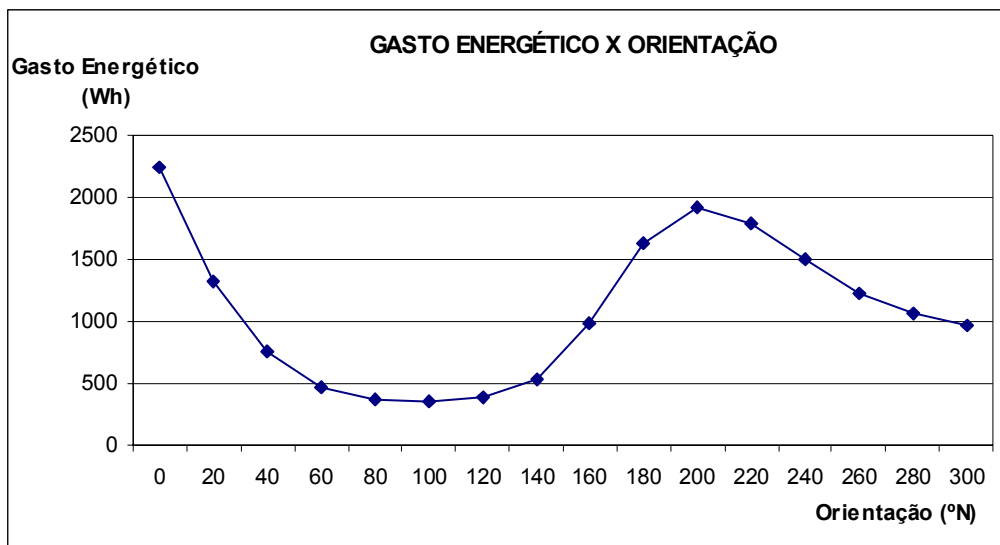


Figura 2 – Gasto energético em função da orientação

Os dados foram catalogados em estações climáticas variadas e simulados em conjunto. Como durante o mês de Agosto as temperaturas em Campinas são mais baixas os alunos que são afetados pelas radiações solares diretas matutinas neste mês não se mostram tão incomodados com a incidência direta do sol nas carteiras, preferindo esta situação a uma possível sensação de frio, permanecendo com as cortinas abertas (observações *in loco*). Por este motivo, os gastos com iluminação artificial tendem a ser mais baixos para orientação Sudeste. Ainda, alunos que se sentam perto das janelas orientadas a Oeste têm possivelmente maior possibilidade de sofrerem os resultados da temperatura de superfície da parede no período da tarde, contando com a inércia térmica. Sendo assim, é pertinente para um estudo futuro que se façam simulações separando estações climáticas. De qualquer forma, a radiação solar matutina tem maior aceitação em relação à vespertina (Figura 3).

Em relação o gráfico de área de salas de aula, a Figura 4 mostra uma sensível redução de gastos a partir de, aproximadamente, 50m². Salas amplas representam bons exemplos para o modelo estudado, neste caso, independente de suas áreas de aberturas. Ressalta-se aqui que a média encontrada para as salas analisadas está em torno de 52m², entretanto, muitas salas ainda apresentam valores menores a este mesmo comportando o mesmo número de alunos (30 a 35 alunos) e o mesmo tipo de equipamentos e mobiliários.

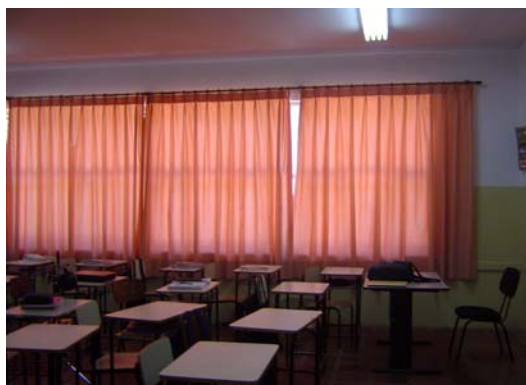


Figura 3 – EMEF Lourenço Bellocchio, orientação NO

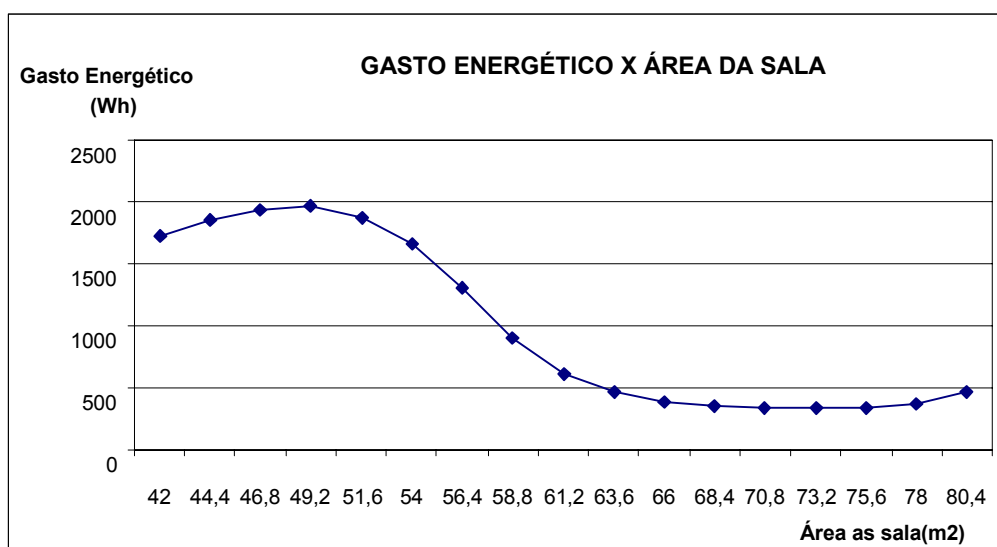


Figura 4 – Gasto energético em função da área da sala

A variável Proteção Externa (Figura 5), relativa aos beirais e marquises, obteve um bom resultado de importâncias para o modelo destacado. Os resultados do gráfico da Figura 5 apontam valores de comprimento de beiral que atendem ao parâmetro do bloqueio de incidência de radiação solar direta e do aproveitamento de luminosidade natural, tomando por base o acendimento das lâmpadas em período diurno. Este valor vai de 0,70m – mínimo encontrado na base de dados da pesquisa – até 1,30m, aproximadamente. Valores acima destes, dependendo da orientação prevista, provavelmente bloqueiam parte da radiação solar direta, mas prejudicam a luminosidade natural, somando gastos energéticos. São as salas de aulas que possuem características para serem confortáveis, entretanto dão a impressão de estarem sempre “escuras”, como relatam usuários.

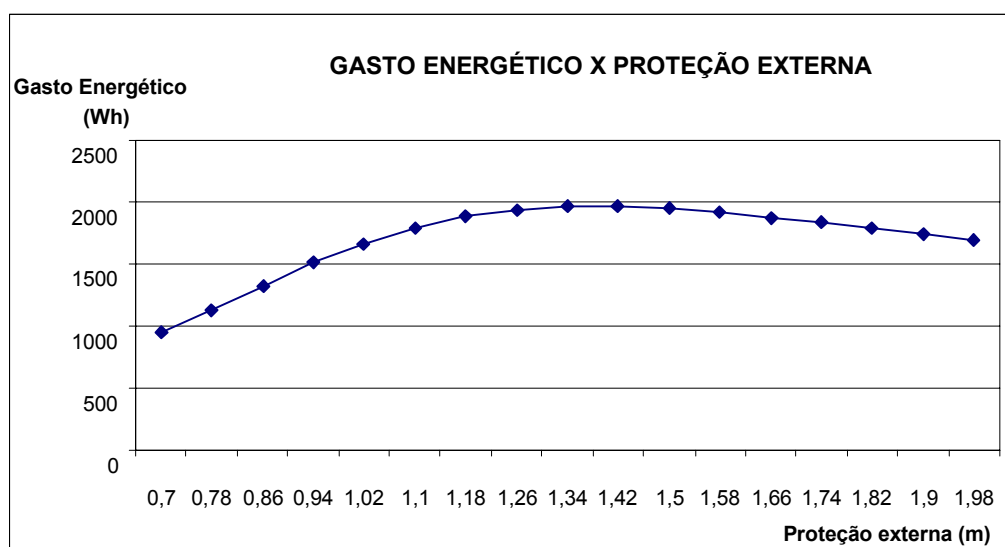


Figura 5 – Gasto energético em função da proteção externa

Um ambiente analisado que vale como exemplo para esta variável é a sala 3, da EMEF Raul Pilla. O valor de sua área de piso é de 46 m². Não chega a ser um valor ideal, como apresentado em gráfico anterior e apresenta área de abertura vitrificada voltada para NO (Figura 6).



Figura 6 – Sala 3, EMEF Raul Pilla

Neste caso, as aberturas transparentes são amplas e o fato da marquise desta fachada alcançar 2,00 (formando um corredor externo) faz com que a incidência de radiação solar proveniente deste tipo de orientação seja nula. Entretanto, a “impressão de sala escura” a acompanha por todas as horas do dia, fazendo com que a luz esteja constantemente acesa.

Ressalta-se aqui que valores de iluminância não foram catalogados para esta pesquisa, por se tratar de um estudo estritamente ligado aos fatores tipológicos construtivos e por primar à relação da incidência de radiação solar direta e suas conseqüências em uma sala de aula, como o fechamento de cortinas e acendimento de lâmpadas. Entretanto, eventuais relatos da situação da luminosidade natural da sala de aula, vistos como conseqüência destes fatores tipológicos são inevitáveis.

O gráfico da Figura 7 mostra valores de área de abertura em relação aos gastos energéticos. Os valores de abertura entre 10 e 12 m² comportam os maiores gastos energéticos, se comparados com outras áreas catalogadas. São valores medianos, visto que foram catalogadas salas com 7,2 m² a 13,6 m² de abertura transparente na Fachada Principal. Os melhores valores são menores que 9 m².

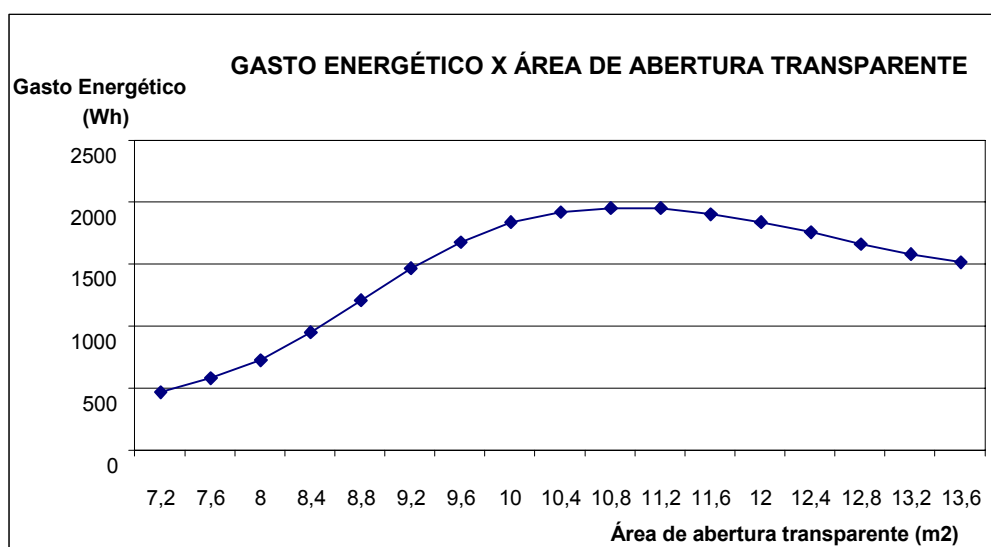


Figura 7 – Gasto energético em função da área de abertura transparente

Aqui a variável Área de Abertura é simulada separadamente da variável Orientação. Para uma abordagem posterior, onde haja uma correlação destas variáveis é interessante unir resultados destas duas ou até mesmo, simular Área de Abertura e Orientação conjuntamente. Esta conjugação se torna importante do ponto de vista do gasto energético com a iluminação, visto que aberturas transparentes menores, se mal dispostas, solicitam incremento de iluminação artificial.

Neste estudo, as variáveis Área da Fachada Principal e Temperatura de superfície interna e externa compuseram base de dados para simulação, entretanto obtiveram importância muito inferior a outras variáveis, como Orientação. Por este motivo, seus dados em porcentagem foram apresentados, ainda que não constituam resultados expressivos para simulações com gastos energéticos.

5. CONCLUSÕES

A Tabela 3 mostra um resumo dos índices encontrados para as quatro variáveis tipológicas com maior importância em relação aos gastos com iluminação artificial em sala de aula.

Tabela 3 – Índices em relação a menores gastos com iluminação artificial em salas de aula

Variáveis	Índices
Área de aberturas transparentes da Fachada Principal	<9m ²
Proteção solar externa	entre 0,70 e 1,30m
Área da sala	> 50m ²
Orientação	entre 40 e 160 °N.

Em relação à Área de Abertura os melhores valores são menores que 9 m². É um dado importante a ser ressaltado, pois o FDE determina que a área de iluminação natural seja 1/5 do piso, o qual deve ter aproximadamente 50 m². Sendo assim, a área de abertura para iluminação mínima da sala de aula deveria ter, pelo menos, 10 m². Portanto, novamente supõe-se que os projetos de aberturas e de proteção solar atuam como fatores de maior importância em relação aos gastos com iluminação artificial de salas de aula.

Para uma abordagem posterior, onde haja uma correlação das variáveis, é interessante simular Área de Abertura e Orientação conjuntamente. Ainda, para a variável Orientação é pertinente para um estudo futuro que se façam simulações separando as estações climáticas.

Ressalta-se aqui que valores de iluminância não foram catalogados para a base de dados, por se tratar de um estudo estritamente ligado aos fatores tipológicos construtivos e por primar à relação da incidência de radiação solar direta e suas conseqüências em uma sala de aula, como o fechamento de cortinas e o conseqüente acendimento de lâmpadas. Entretanto, eventuais relatos da situação da luminosidade natural da sala de aula, vistos como conseqüência destes fatores tipológicos são inevitáveis.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M.M.P; CALHEIROS, R.P.; MARTINS, L.B.; VILLAROUÇO, V. Adaptação de edificações residenciais a escolares: um enfoque ergonômico. In: ENCAC – VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e IV Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído. Curitiba, 5 a 7 de novembro, 2003. Segunda Coletânea de Anais dos Encontros Nacionais sobre Conforto no Ambiente Construído. Curitiba, 2003. CD-ROM.
- BRONDINO, N.C.M; SILVA, AN.R. “Combining Artificial Neural Networks and GIS for land valuation purposes.” In: Proc. 6th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Venice – Italy, 1999. CD-ROM.
- CARAM, R. M. (1998) “Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações.” Campinas SP, 1998. Tese de doutorado, UNICAMP.
- CHVATAL, K.M.S. “A prática do projeto arquitetônico em Campinas, SP e diretrizes para o projeto de edificações adequadas ao clima.” Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP. 1998. Dissertação (Mestrado). Campinas, 1998.
- COSTA, P.T. da.(2003) “Uma análise do consumo de energia em transportas nas cidades portuguesas utilizando Redes Neurais Artificiais.” 2003. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Municipal) – Universidade do Minho, Braga, 2003
- GRAÇA (2002), V.AZ. da. “Otimização de projetos arquitetônicos considerando parâmetros de conforto ambiental: o caso das escolas da Rede Estadual de Campinas.” 2002. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Campinas. Campinas, 2002.
- MIANA, AC.(2005) “Avaliação do desempenho térmico de brises transparentes: ensaios em células-teste.” Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.
- PIZARRO, P.R.(2005) “Estudo das variáveis do conforto térmico e luminoso em ambientes escolares.” 2005. 155f. Dissertação (Mestrado em Desenho Industrial) – UNESP – Universidade Estadual Paulista, Bauru, São Paulo, 2005.