

**MERCOFRIO 2000 – CONGRESSO DE AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO,
AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO DO MERCOSUL**

**OS CONFLITOS E OS COMPROMISSOS ENTRE LUZ, CALOR E CONSERVAÇÃO
DE ENERGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO ESCOLAR SUJEITO AO
SOMBREAMENTO ARBÓREO**

CLÁUDIO E. PIETROBON - carmen@cybertelecom.com.br

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil
87020-900 – Maringá, PR, Brasil

ROBERTO LAMBERTS - lamberts@ecv.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil
Cx. P. 476 – 88040-001 – Florianópolis, SC, Brasil

FERNANDO O.R. PEREIRA - feco@arq.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura e Urbanismo
Cx. P. 476 – 88040-001 – Florianópolis, SC, Brasil

***Resumo.** O presente artigo, apresenta o diagnóstico, a definição e a quantificação dos conflitos e dos compromissos do sombreamento arbóreo em salas de aula de Maringá-PR, através de pesquisa exploratória. Adotou-se metodologia de análise com cunho sistêmico e envolveu atividades de medição termo-luminosas "in loco", de tratamento computacional por binarização de imagens hemisféricas das árvores através de metodologia e instrumentação desenvolvidas para esta atividade, além de simulação paramétrica computacional. Para tanto foram elaborados o TRY-"Test Reference Year" com 52 640 dados de elementos de clima em base horária e foram processadas 8 162 simulações computacionais com o "software" VisualDOE 2.6 para identificar os parâmetros mais sensíveis, tais como: a otimização do sistema de iluminação artificial, a distância das árvores ao edifício, o "WWR-Window to Wall Ratio" e a inércia e isolamento térmicas do envoltório da edificação. Os resultados indicam a necessidade de especialização das funções das janelas sombreadas. A conservação de energia elétrica atinge a faixa de 14% a 57%, por simulação em base anual.*

Palavras-chave: Escolas, Conforto Térmico e Visual, Conservação de Energia, Paisagismo

1. INTRODUÇÃO

A complexidade e a coexistência dos fatores energético - ambientais (luz, som e calor) e a percepção humana integrada desses parâmetros operativos através de qualidades ambientais tornam a sua análise holística, no ambiente construído, extremamente dificultada pelos aspectos conflitantes no comportamento dessas variáveis. A problemática no caso dos estabelecimentos de ensino superior, cujo maior consumo final desagregado ocorre com a iluminação artificial, é analisada segundo ROMÉRO (1994), TOLEDO (1995), GHISI (1997) e MASCARÓ *et alii* (1997). O primeiro autor efetuou levantamentos para a USP - Universidade de São Paulo e o segundo e terceiro autores, para UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Os últimos autores efetuaram levantamentos para a UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ROMÉRO (1994) indica um valor médio de consumo anual de 61,00 kWh/m²ano, GHISI (1997) apresenta outros valores quantitativos do consumo energético, a saber: 94,56 kWh/m²ano para universidades norte-americanas e 79,26

kWh/m²ano para a UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. O desempenho termo-energético e lumínico em edificações escolares estão vinculados às variáveis determinantes do projeto arquitetônico e paisagístico. A relação diádica entre estas variáveis é conflitante, se analisadas conjuntamente, através do consumo de Energia Elétrica. Este artigo exploratório, de cunho sistêmico, analisa, através de medições “*in loco*” e tratamento de imagens hemisféricas de casos reais através da iluminância interna e externa. Diagnostica, define e quantifica os conflitos entre luz e calor, em salas de aula, sombreadas com Flamboyants, Sibipirunas, Ipês Amarelos e Ipês Roxos. Para a definição dos conflitos entre as variáveis de luz e calor, foram desenvolvidos um aparato e uma metodologia de medição da transparência dos hemisférios verticais, de grupos de árvores nos solstícios de verão e inverno e durante um ano para um exemplar de cada árvore, na localidade de Maringá-PR, segundo PIETROBON(1999).



Figura 1. Equipamentos para medição da Transparência das árvores

2. SUMÁRIO METODOLÓGICO

No presente sumário metodológico apresentam-se as estratégias adotadas:

- i) Primeira Etapa: Medição “*in loco*” das variáveis termo-lumínicas da situação de verão incluindo o tratamento computacional das imagens do hemisfério vertical externo;
- ii) Segunda Etapa: Medição “*in loco*” das variáveis termo-lumínicas da situação de inverno incluindo o tratamento computacional das imagens do hemisfério vertical externo;
- iii) Terceira Etapa: Definição do método de obtenção do índice de transparência das essências arbóreas através das medidas de luminância e do tratamento computacional das imagens. Além disto, efetuou-se a medição “*in loco*” da transparência mensal de um exemplar de cada espécie de árvore através da luminância e com o aparato construído, visando a obtenção de dados mensais para acompanhamento de estado fenológico das árvores durante o período de um ano, complementados por mais 3 meses para definição da repetibilidade do método, conforme PIETROBON *et alii* (1997, 1997a);
- iv) Quarta Etapa: Simulação computacional dos casos paramétricos, de modelos de salas de aulas visando obter o consumo total e final desagregado de energia elétrica dos edifícios escolares e suas variações através do “*software*” visualDOE 2.6, além dos parâmetros que mais influenciam nessa relação. Efetuou-se o levantamento de dados climáticos externos e

elaboração do ano climático de referência - “*Test Reference Year*”- para a obtenção dos elementos de clima a serem usados no processamento computacional paramétrico;

v) Quinta Etapa: Levantamento dos conflitos e compromissos entre os aspectos termolumínicos e as possíveis tentativas de otimização.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para ilustrar os conflitos e compromissos entre os aspectos lumínicos e térmicos oriundos do sombreamento arbóreo, apresentam-se, na Tabela 1, os resultados indicativos de que: quanto mais sombreado o ambiente, melhora-se o desempenho térmico e compromete-se o desempenho lumínico. Indica-se, então, a necessidade de equilíbrio entre ambas estratégias.

Tabela 1. Classificação dos hemisférios horizontais internos pelo valor de iluminância média.

Local	Orientação	Sala	Iluminância média. Horizontal (M)	Coef. de Regressão (r^2)	Árvores
Bloco D34	NE	S205	631 lux	0,80	-
Bloco D34	SW	S206	612 lux	0,86	-
Bloco M05	N	S07	595 lux	0,70	-
Bloco M05	S	S10	468 lux	0,94	-
Bloco E46	E	S05	392 lux	0,95	2 Ipês Amarelos
Bloco E46	W	S06	128 lux	0,95	3 Flamboyants
Bloco E34	SE	S05	101 lux	0,96	3 Sibipirunas
Bloco E34	NW	S06	61 lux	0,99	2 Flamboyants

Como a iluminância foi medida em datas diversas, no verão, procurou-se verificar a possibilidade de juntar os valores das três medições numa única regressão linear. Então, tomou-se a média de cada coeficiente angular dos três dias, na forma percentual, e correlacionou-se o valor deste coeficiente com o da regressão que inclui todas as medições numa só regressão mostradas na figura 2 e obteve-se uma reta de regressão linear com $r^2 = 0,87$ indicando uma aproximação com a reta passando pela origem com o coeficiente $a = 1,011$. Também, adotou-se o índice denominado de Coeficiente de Eficiência de Iluminação Média que corresponde, em forma percentual, à razão entre a iluminação natural média interna; no plano de trabalho e os valores de iluminação externa vertical média. Salienta-se que o CLD (coeficiente de luz diurna) difere do Coeficiente de Eficiência, pois adotam-se valores de iluminância externa e interna com os sensores do luxímetro na posição horizontal. Correlacionou-se com o coeficiente angular da reta de regressão da iluminação das três medições em conjunto e obteve-se uma reta com $r^2 = 0,87$ e coeficiente $a = 1,019$ na forma de uma reta passando pela origem, apresentada na figura 3 que indica uma robusta correlação linear, validando os métodos de medição diferenciados para o verão e inverno. Para auxiliar na análise, apresenta-se o critério de AKUTSU e VITTORINO (1993) que consiste em qualificar o desempenho térmico das edificações também relacionando-o com o rigor da exposição ao clima externo.

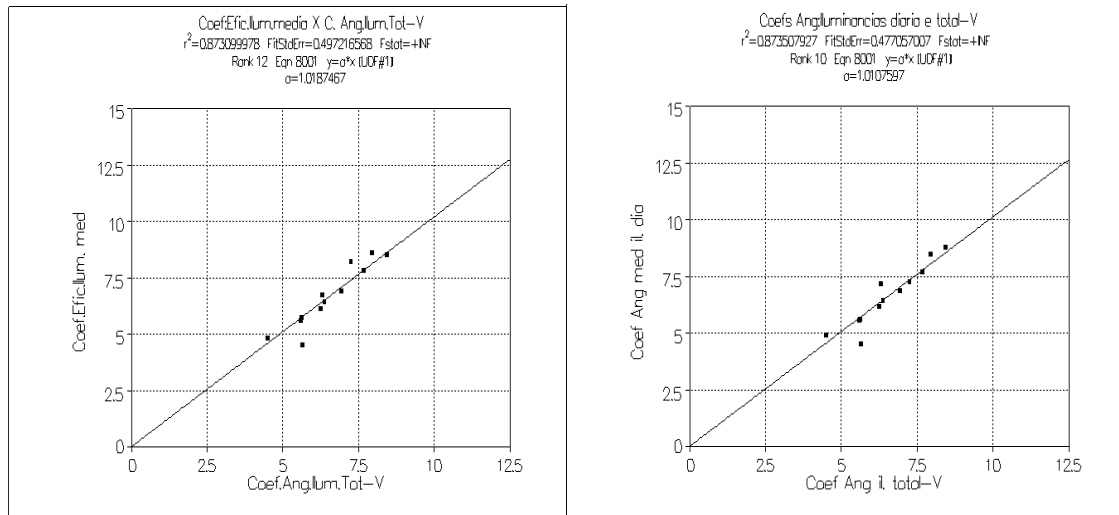


Figura 2. Correlação entre os valores de luminância medidos e os coeficientes angulares das curvas de regressão para o verão.

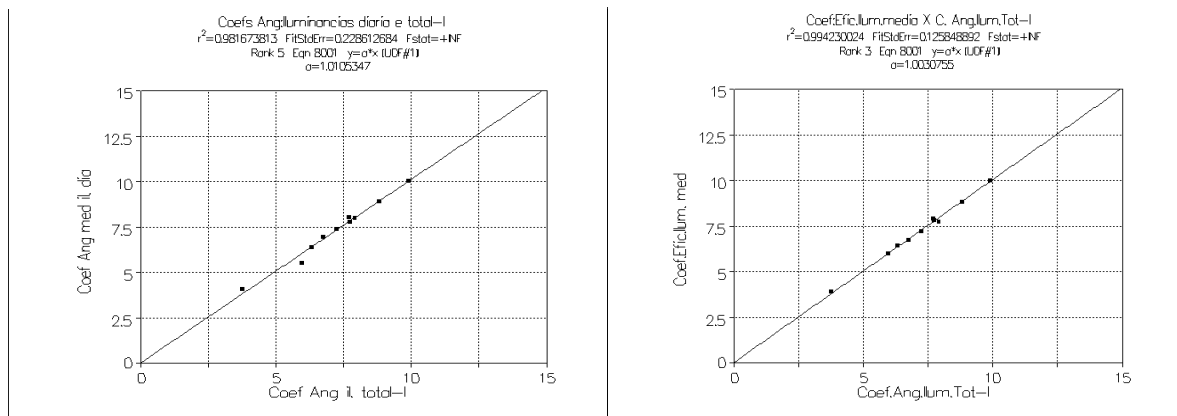


Figura 3. Correlação entre os valores de luminância medidos e os coeficientes angulares das curvas de regressão para o inverno.

Tabela 2. Classificação por ordem crescente de razão entre PMV_i e PMV_e VERÃO

Razão	ΣPMV_i	ΣPMV_e	Salas	Classes			Inércia	Árvores
0,41	+8,34	+20,30	E34 S006 NW	B	B	B	LEVE	2 Flamb.
0,59	+8,44	+14,40	E46 S006 W	B	B	B	LEVE	3 Flamb.
0,61	+3,06	+5,00	M05 S007 N	B	B	B	MÉDIA	-
0,72	+14,60	+20,30	E34 S005 SE	B	B	B	LEVE	3 Sibip.
0,84	+4,20	+5,00	M05 S010 S	B	B	B	MÉDIA	-
0,95	+6,34	+6,70	D34 S205 NE	B	C	B	PESADA	-
1,13	+6,34	+14,40	E46 S005 E	B	B	C	LEVE	2 Ipês A.
1,72	+11,52	+6,70	D34 S206 SW	C	C	B	PESADA	-

Na continuidade da discussão apresentam-se nas tabelas 2 e 3, respectivamente para o Verão e o Inverno, em ordem crescente, da razão entre a somatória da integração numérica valores de PMV (Voto Médio Estimado) internos e externos, que ultrapassam os limites de +0,82 e -0,82. As medições internas de caráter térmico são analisadas em conjunto com as de caráter lumínico através de uma classificação por hemisférios verticais externos mais luminosos e pelos hemisférios horizontais internos mais luminosos. No caso da medição de Verão, foi um período atípico, o que justifica obter apenas classes B e C. Comparativamente com a razão entre a somatórias de PMV_i nota-se que os critérios adotados mostram-se coerentes com os resultados obtidos conforme AKUTSU e VITTORINO (1993) que propõem os índices A, B e C. As salas com inércia leve indicam uma resposta de desempenho favorável devido às proteções arquitetônicas e arbóreas, quando sombreadas por árvores adultas não caducifólias ou caducifólias tardias. A exceção ocorre no caso dos Ipês Amarelos, que além de árvores caducifólias, são de pequeno porte e sombreiam uma sala orientada para o quadrante Leste. Na situação de salas com inércia média, protegidas apenas por beirais pequenos (0,70 m), o desempenho foi melhor que nas salas não protegidas e com inércia pesada. Pode-se incluir entre os fatores causadores deste desempenho a orientação adequada do bloco M05- Inércia Térmica Média - (Fases maiores orientadas ao Norte e ao Sul) que minimiza a carga térmica, além da absorvância das cores externas claras, o que não ocorre nas salas do bloco D34- Inércia Térmica Pesada- (Fases maiores orientadas a NE e SW) constituído externamente de lajotas com 6 furos, de cerâmica vermelha aparente. A análise efetuada apenas com os valores absolutos das somatórias do desempenho interno, não parece constituir-se um indicador robusto, pois este exame de caso não baseia-se em dias típicos e sim uma seqüência de 3 dias aleatórios e contínuos, sujeitos a diversas variações climáticas. Desta forma o indicador relativo entre o desempenho interior, ou seja, a razão entre eles pode auxiliar melhor na compreensão dos fenômenos que ocorrem nas variáveis envolvidas. A proteção arbórea mais densa, tem o seu desempenho em conjunto com as proteções arquitetônicas (beirais largos), demonstrado a sua parcela de contribuição positiva em termos de colaboração contra o rigor climático de Verão.

Tabela 3. Classificação por ordem crescente de razão entre PMV_i e PMV_e - INVERNO.

Razão	ΣPMV_i	ΣPMV_e	Salas	Classe			Inércia	Árvores
0,00	0,00	-0,30	E34 S006 NW	A	A	A	LEVE	2 Flamb.
0,00	0,00	-0,50	E34 S005 SE	A	A	A	LEVE	3 Sibip.
0,00	0,00	-0,50	E34 S009 SE	A	A	A	LEVE	3 Sibip.
0,06	-,34	-5,60	M05 S010 S	B	A	A	MÉDIA	-
0,07	-0,40	-5,60	M05 S007 N	B	B	B	MÉDIA	-
0,20	-8,00	-40,80	E46 S006 W	A	B	B	LEVE	3 Flamb.
0,30	-12,3	-40,80	E46 S002 W	A	B	C	LEVE	1 Ipê A.
0,93	-0,28	-0,30	E34 S010 NW	B	A	B	LEVE	1 Ipê R.
1,14	-7,74	-6,80	E46 S001 E	B	-	A	LEVE	1 Ipê A.
1,35	-9,20	-6,80	E46 S005 E	B	-	A	LEVE	2 Ipê A.

No caso da medição de Inverno, o clima apresentou-se atípico, com tendência a temperaturas mais quentes que as de outros anos, com exceção de apenas um dia em que penetrou uma frente fria mais rigorosa. Estas condições climáticas entretanto, foram, obviamente, menos quentes que na medição de Verão. Para aplicação na simulação Computacional Paramétrica, há necessidade de definição do TRY (Ano Climático de Referência), para cálculos de consumo de energia elétrica em base anual. O Ano Climático de Referência é o ano real que mais se aproxima da Normal Climatológica. Para sua determinação é tomada como base a variável TBS (temperatura de bulbo seco do ar). Apresenta-se na figura 3 o Ano Climático de Referência e a Normal Climatológica, segundo a ASRHAE (1981). Os parâmetros variados na simulação computacional paramétrica foram:

- i) A adoção de controle de iluminação artificial em “on-off” 1/3 e 2/3, além da tipologia de lâmpadas otimizadas ou não, associadas às cores claras do edifício;
- ii) A variação da distância da árvore ao edifício, que origina desempenhos de consumo de Energia Elétrica diferenciados por árvore;
- iii) O tipo e transparência da árvore adotada; caducifólia ou não caducifólia;
- iv) As dimensões das janelas variando de WWR=30% e WWR=60%, que induzem quando sombreadas, a um perfil de consumo de E.E. crescente ou decrescente conforme o tipo e a distância da árvore ao edifício;
- v) A orientação do edifício, em relação aos quatro pontos cardeais;
- vi) A inércia térmica das paredes externas e a sua isolamento térmica.

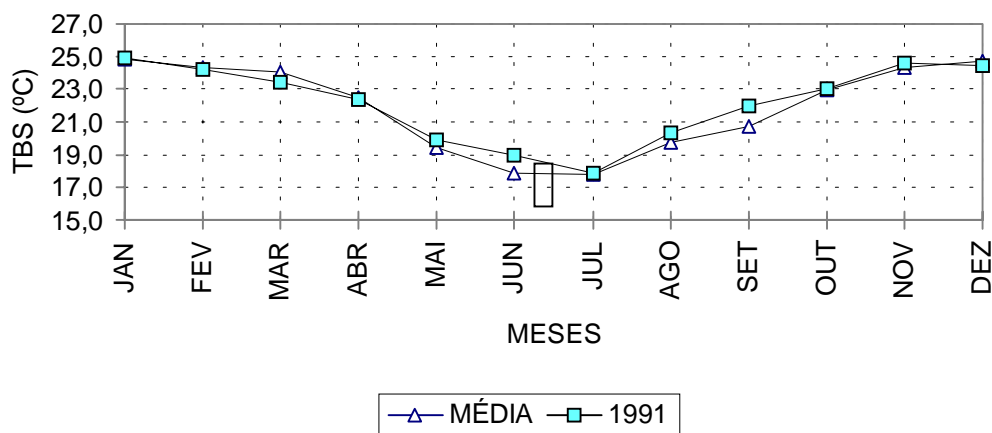


Figura 3. Dados de TBS(Temperatura de Bulbo Seco) da Normal Climatológica e do TRY (1991)

Além disso, menciona-se a eficiência de cada uma das árvores adotadas, salientando-se de antemão que as árvores caducifólias são mais indicadas para climas compostos como os da localidade em pauta. As variações de consumo energético são condicionantes para a escolha das árvores mais eficientes a fim de sombrear o modelo de sala de aula adotado. As variações de consumo de Energia Elétrica, são condicionantes para a escolha das árvores mais eficientes a fim de sombrear o modelo de sala de aula adotado: IPÊ AMARELO – com variação de consumo energético de 16,7 kWh/ m²ano a 31,7 kWh/ m²ano (47,4%); IPÊ ROXO - com variação de consumo energético de 16,7 kWh/ m²ano a 33,3 kWh/ m²ano (50%); SIBIPIRUNA - com variação de consumo energético de 16,7 kWh/ m²ano a 38,3kWh/ m² ano (56,5%); FLAMBOYANT - com variação de consumo energético de 13,3 kWh/ m² ano a

46,7 kWh/ m²ano (71,4%). Tais assertivas indicam para a necessidade de especialização das janelas para as funções distintas de iluminação natural e ventilação natural, além de alteração do partido arquitetônico das edificações escolares com corredor central, para corredores laterais facilitando a ventilação cruzada e a distribuição lumínica mais homogênea.

4. CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser formuladas em função das pesquisas já realizadas por PIETROBON *et alii* (1997, 1997a) e PIETROBON (1999):

- i) A orientação das edificações sem proteção solar, quer sejam arquitetônicas ou arbóreas, é importante para a ação conservativa em termos térmicos e lumínicos, especialmente em situação real do hemisfério celeste com nebulosidade variável;
- ii) A ação conservativa, por meios passivos tem limitações frente ao rigor climático a que se sujeitam as edificações;
- iii) A proteção arbórea mais indicada, para o caso de climas compostos, como o do objeto desta pesquisa, deve ser caducifólia para que o seu efeito seja considerável no aspecto de variação pelo efeito da sazonalidade;
- iv) Embora o sistema construtivo seja fundamental para ações conservativas passivas nos aspectos térmicos, o paisagismo pode ser um valioso auxiliar, no desempenho global do sistema edifício e entorno imediato com outras estratégias além do sombreamento;
- v) Apesar da conclusão anterior, há um nítido confronto entre os desempenhos térmicos e lumínicos e, conseqüentemente, na conservação de energia. Tais conflitos podem ser minimizados com a arborização e com a especialização das funções dos elementos arquitetônicos de iluminação natural. Além da integração interior-exterior, deve-se especializar as funções de iluminação natural, ventilação natural, e sistemas de proteção solar arquitetônicos;
- vi) A associação do sistema de iluminação artificial fluorescente de baixo consumo, com a proteção arbórea, especialmente as árvores caducifólias, indicam possibilidades de um melhor desempenho termo-luminoso energeticamente conservativo. A adoção do sistema liga-desliga 1/3 e 2/3, mantendo-se as demais soluções, indica que essa otimização tecnológica atinge, também, a otimização e a conservação energética;
- vii) Além da sistemática de se avaliar o desempenho térmico através das exigências do usuário, pode-se estabelecer critérios através da especificação dos valores das características termo-físicas de elementos, componentes e sistemas construtivos de acordo com o rigor de exposição climática, senão para obter uma situação satisfatória, que ao menos minimize a necessidade de condicionamento e iluminação artificiais;
- viii) O índice analisado, demonstrou um alto grau de correlação com a iluminância externa vertical e a interna horizontal, pois integrou todas as variáveis lumínicas numa só medição. Devido a essa característica necessita-se ainda de uma forma de análise dos valores obtidos em situações diversas, com nebulosidade variável, na qual há variações luminância de abóbada celeste tanto em azimute quanto em altura;

ix) O tratamento computacional das imagens hemisféricas verticais externas das salas monitoradas através da binarização em tons de branco e preto, para efeito de comparação com as medições de luminância das árvores apresentadas neste artigo, mostrou resultados consistentes. A análise das fotos hemisféricas foi quantificada através de tratamento de imagens por via computacional, para validar as conclusões a respeito da obstrução física dos hemisférios verticais, e das essências arbóreas estudadas, com os “softwares” ADOBE e IMAGO do LMPT/UFSC. A utilização do aparato para medição das luminâncias das árvores estudadas, com uma medição mensal em dia nublado, durante um ano, na condição de alta nebulosidade e baixo turvamento, apresentou resultados mais robustos que sem este controle. Este controle confirma-se com a determinação da incerteza do método, para a qual, foram efetuados monitoramentos por mais 3 meses, a fim de comparação com as medidas anteriores. A comparação entre os dois métodos mostrou-se consistente;

x) As simulações do consumo de energia elétrica para a iluminação em conjunto com as estratégias de paisagismo para comparar esse mesmo consumo com o condicionamento artificial sem as estratégias de paisagismo, foi um implemento útil para a análise paramétrica das variáveis do estudo em pauta. Tal procedimento necessitou do programa computacional VisualDOE 2.6, que também avalia o desempenho lumínico, além do térmico e da estimativa de consumo de Energia Elétrica. Estes procedimentos auxiliaram na determinação e análise dos conflitos e compromissos entre o ambiente térmico e lumínico no objeto desta pesquisa, de forma consistente, atingindo valores de conservação de Energia Elétrica entre 14% a 57 %, em base anual.

REFERÊNCIAS

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. Critério para a Definição de Níveis de Desempenho Térmico. In: II. ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO; ANTAC, Gramado, **Anais...** p. 69-74, 1993.

GHISI, E. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Retrofit em Sistemas de Iluminação: Estudo de Caso na Universidade Federal de Santa Catarina.** Florianópolis: UFSC, Dissertação de Mestrado: ECV, 246p, 1997.

MASCARÓ, J. L.; MASCARÓ, L. E.; BRUGALLI, T. A.; PADILHA, M. V. M. Consumo Energético de Edifícios Universitários: O caso da UFRGS. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: ANTAC, Salvador, **Anais...** p.359-363, 1997.

PIETROBON, C. E.; LAMBERTS.; PEREIRA, F. O. R., Simulação Computacional do Consumo Elétrico Final em Edificações Escolares Climatizadas e suas variações com Elementos Arquitetônicos e Paisagísticos de proteção Solar. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO: ANTAC, Salvador, **Anais...**, p.364-370, 1997.

PIETROBON, C. E.; LAMBERTS.; PEREIRA, F. O. R., Luz e Calor em Ambiente Construído Escolar não Climatizado e o Sombreamento Arbóreo: Conflito ou Compromisso com a Conservação de Energia? In: I ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS: ANTAC, Canela, **Anais...**, p.189-195, 1997a.

PIETROBON, C.E. **Luz e Calor em Ambiente Construído Escolar não Climatizado e o Sombreamento Arbóreo: Conflito ou Compromisso com a Conservação de Energia?** Florianópolis:UFSC, Tese de Doutorado: EPS, 2 v. 532p, 1999.

ROMÉRO, M. de A. **Método de Avaliação do Potencial de Conservação de Energia Elétrica em Campi Universitários: O Caso da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira.** São Paulo: FAUUSP, 1994. V.1. Tese de Doutorado (Estruturas Ambientais Urbanas). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura - Universidade de São Paulo.

TOLEDO, L. M. A. de. **Uso de Energia Elétrica em Edifícios Públicos e Comerciais de Florianópolis.** Florianópolis: UFSC, 1995. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

THE CONFLICTS AND THE COMPROMISSES BETWEEN LIGHT, HEAT AND ENERGY CONSERVATION IN SCHOOLS UNDER TREES SHADOWING

ABSTRACT

This paper presents the diagnosis, the definition and the quantification about the trees shadowing conflicts and compromises in classrooms located in Maringa-PR, by a exploratory research. It is made by using General Systems Theory and "in loco" measurements of thermal and luminous parameters, trees computer hemispherical imaging treatment with equipments and methodology develop to this aim. It was made too, computer parametric simulation, using the TRY- Test Reference Year – a climatic data file with 52 640 data hour by hour and 8 162 computer parametric simulations with the software VisualDOE 2.6 with the aim to identify the more sensitive parameters, as well: artificial lightning retrofit, trees distance to the building, WWR- Window to Wall Ratio, and the external walls and ceilings thermal inertia and isolation. The results indicate the need of windows functions specialization. The electric energy conservation is about 14% to 57%, simulated in annual basis.