

SIMULANDO A TOWER OF SHADOWS DE LE CORBUSIER

Heitor da Costa Silva – [heitorcds@gmail.com](mailto:heitorcds@gmail.com)

Faculdade de Arquitetura da UFRGS

Paulo Otto Beyer – paulo.beyer@ufrgs.br

Diretor de Ensino e Treinamento da ASBRAV

F3 - Simulação Termo Energética

**Resumo.** O objetivo desse trabalho é discutir possibilidades de uso de “softwares” especializados para conceber e desenvolver projetos de edificações para as atividades humanas considerando aspectos relacionados à estética, à materialidade e à adequação das edificações ao sítio, bem como a quantificação e a qualificação da energia consumida para o condicionamento dos ambientes desde a implementação, o uso e a manutenção de sistemas, principalmente da eletricidade, para o conforto dos usuários dos ambientes construídos. Como base foi escolhida a estrutura chamada Tower of Shadows, (Le Corbusier e Iannes Xenakis), que está em Chandigarh, na Índia. Este trabalho apresenta resultados para uma primeira etapa de investigações, que inicialmente foram pesquisados para a avaliação do desempenho quanto ao sombreamento que é oferecido pela estrutura, com estratégia de resfriamento, por meio do envoltório da estrutura. O estudo foi realizado, basicamente com os “softwares” Sketchup Make® Euclid® e Energy Plus®, e revelaram a influência na diminuição do consumo energético, por meio de simulações com dois tipos de vidro de diferentes propriedades confrontados com e sem o envoltório projetado e construído para o controle de acesso solar na estrutura laboratório Tower of Shadows.

**Palavras-chave:** Simulação Termo-Energética, Eficiência de Brises, Desempenho de Vidros em Edificações

## 1. INTRODUÇÃO

A presença do Sol nos trabalhos e textos de Le Corbusier é recorrente e precede muitas experimentações antes da Tower of Shadows, construído trinta anos depois dos diversos ensaios e correções por Iannes Xenakis, em 1980. A exemplo disso estão as pérgolas, em Pessac 1925 (Quartiers Modernes Frugès), na França e a cobertura para-sol na casa de Baizeau, em 1928 (Cartaghe), na Tunísia. Seguem-se as preocupações com higiene urbana com o máximo de luz solar para “Villa Radieuse” da década de 30 (projeto para um plano urbano “Cidade Radiante”, não construído apresentado em forma de livro com título homônimo, em 1924). Depois disso o “brise-soleil”, como invenção técnica para permitir o acesso solar durante os períodos frios, mas com controle do acesso da radiação solar direta permitindo movimentação do ar para o resfriamento nos períodos quentes.

A abordagem corbusiana para o controle da luz do sol era considerada empírica, devido a má repercussão, em relação a performance térmica do edifício do Exército da Salvação em Paris, em 1929. O edifício para desabrigados foi completado em 1933. A idéia principal para a concepção da edificação era o vidro duplo para a fachada Sul, com ar condicionado que nunca funcionou. O vidro foi substituído em 1952, depois de muitos “verões” com super-aquecimento dos dormitórios e da total insatisfação e reclamações dos residentes. Esse edifício, segundo o próprio Le Corbusier “... atuou como laboratório, para os edifícios que seguiram ...”, ao Exército da Salvação (Armé du Salut).

Le Corbusier encontrou diversos desafios quando foi trabalhar na Índia, sendo que a compreensão do clima, tornou-se fundamental para a concepção de uma arquitetura moderna apropriada ao local. O clima; temperaturas por volta de 40°C, Março a Maio, chuvas torrenciais de Junho a Outubro (monções), e frio de Novembro a Fevereiro. Iluminação, ventilação, controle de umidade do ar e proteção contra a chuva tornaram-se matéria vital para os projetos na Índia. A figura a seguir mostra uma anotação de Le Corbusier onde revela seu total empenho em resolver as questões climáticas.

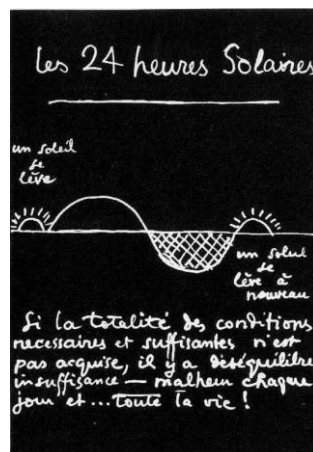


Figura 1 - 24 Horas Solares

Uma tradução do texto da figura seria: " Se a totalidade das condições necessárias e suficientes não são atingidas, haverá desequilíbrio, insuficiência – aflição cada dia e ... toda a vida!".

Iannis Xenakis, jovem talentoso engenheiro indiano se declarou encarregado da carta climática, no escritório de Le Corbusier em Paris e durante Dezembro de 1951 a Março de 1952 estabeleceu as bases de uma planilha que se compunha de bancos de dados climático para os projetos, condições biológicas para conforto, com recomendações para estratégias de projeto e com desenhos sugestivos de soluções formais. A carta climática de Xenakis foi revisada e serviu como referências a diversos trabalhos de Le Corbusier até 1959.

A Tower of Shadows, ou Tower of Man, é um arquétipo estrutural peculiar, concebido por Le Corbusier para ensaio formal para o enfrentamento do ambiente quente em Chandigarh, Índia, 30.73N latitude e 76.77E longitude. Além disso é um edifício de forma exótica construído em concreto armado para determinar o acesso solar em um ambiente sem definição específica de atividades, é um laboratório em escala real de uma planta 16x16m, com um pé direito de contorno com 6m. No centro dessa planta há um lanternin rotacionado 45° elevado 2m de maneira que sob o lanternin o pé direito é de 6m. A planta baixa oferece faces N, S, L e O, e com o lanternin rotacionado sobre a planta oferece faces voltadas NE, NO, SE e SW. Assim, o fechamento desse ambiente tem faces para os eixos cardeais e respectivas interpo- lações. Portanto é possível ver as elaborações formais de elementos horizontais e verticais que controlam o acesso solar para o interior da estrutura. A seguir pode ser vista uma foto da fachada Norte da Tower of Shadows (<http://www.chandigarhguide.com/tower-of-shadow>)



Figura 2 – Tower of Shadows

## 2. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

O primeiro aspecto que chamou a atenção para o início desse estudo foi o nome que Le Corbusier deu à estrutura, Tower of Shadows, e posteriormente, examinando alguns dos desenhos originais foi possível identificar uma trajetória solar, um desenho de um relógio solar, próximo ao desenho de implantação da Torre no sítio, visíveis em destaque na figura 3 abaixo, junto com a Tower of Shadows.

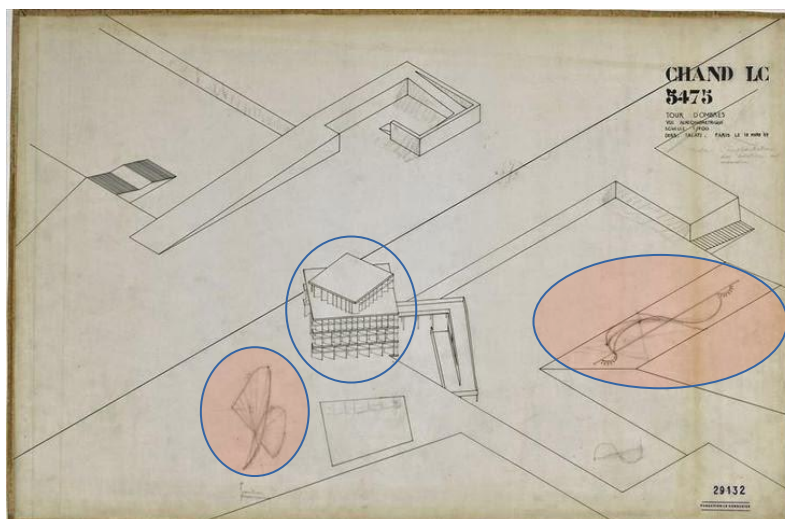


Figura 3 – Tower of Shadows, Chandigarh, India.

Para efetivar as simulações foram reproduzidos os elementos verticais e horizontais que compõe a estrutura e submetidos a simulação de sombras e manchas de sol, no modelo a partir das alternativas de desenho que os “softwares” Sketchup e Euclid permitem, com modelagem horária e sazonal, tanto em imagem 3D parada, quanto por animação.

A seguir são apresentadas as figuras 4(a/b) e 5(a/b), onde estão exemplos de imagens geradas para investigar o acesso solar na Tower of Shadows, em dois dias, 15 de julho (verão) e 15 de janeiro (inverno).

As figuras a seguir mostram o efeito dos brises na entrada da radiação solar na edificação. As duas primeiras figuras são em 15 de julho (verão), às 9 h e 15 h.

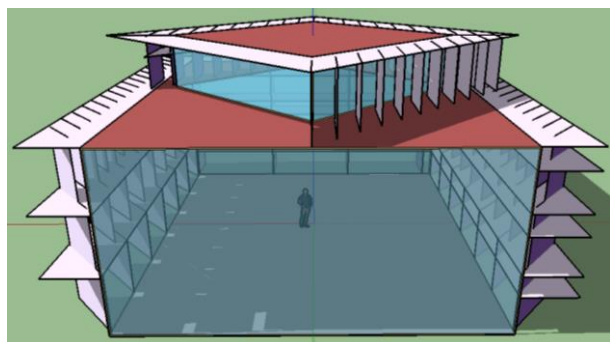


Figura 4a - Manchas de sol em 15/julho 9 h

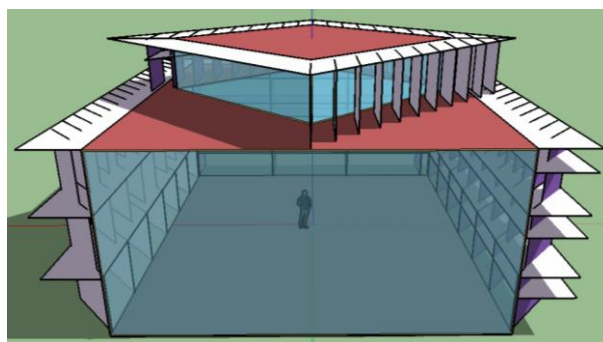


Figura 4b - Sombreamento em 15/julho 15 h

O sol entra com baixa intensidade na manhã, quando a temperatura externa é baixa, e não entra na tarde de verão, quando a temperatura externa é alta.

As duas seguintes são para o dia 15 de janeiro (inverno), às 9 h e 15 h.

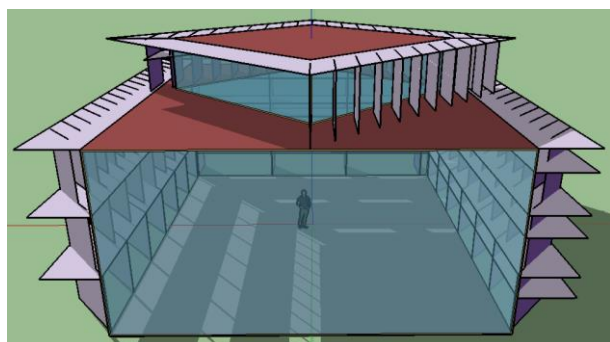


Figura 5a - Manchas de sol em 15/janeiro 9 h

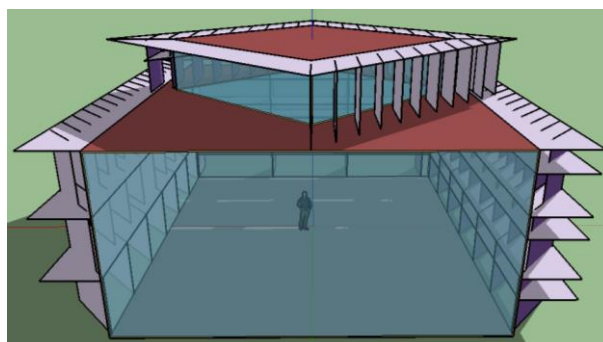


Figura 5b - Manchas de Sol em 15/julho 15 h

O sol entra com boa intensidade na manhã de inverno e pouca intensidade na tarde de inverno.

As figuras ilustram a estrutura sombreada onde é possível ver a efetividade do sistema e confirmam o nome atribuído por Corbusier, além disso permitem um exame criterioso para o posicionamento dos elementos verticais e horizontais, relativamente ao movimento aparente do Sol, na latitude 30° Norte. O modelo gerado com o auxílio do Sketchup e Euclid permite ainda manipulações formais para a proposição de alternativas e posição, confirmando a condição de laboratório de investigação para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos.

O modelo desenvolvido para a simulação do sombreamento é útil de várias formas, mas principalmente para uma avaliação expedita, pois que é visível. Mais ainda, é possível desenhar uma quadrícula, no piso da estrutura e obterem-se valores numéricos percentuais horários e por períodos, sazonal ou anual, ou ainda uma combinação específica de relação área e tempo desejados, para 30° latitude. A simulação também permitiu afirmar que a estrutura que promove as sombras tem o título apropriado conforme Le Corbusier planejou.

### 3. SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA

A simulação Termo Energética depende muito da localização onde está a edificação a ser simulada e do clima da região. A Tower of Shadows está localizada em Chandigarh, no Norte da Índia, conforme figuras 6a e 6b.



Figura 6a - Índia e Déli

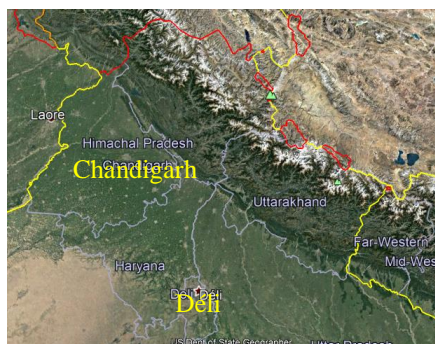


Figura 6b - Chandigarh e Déli

A localização da Tower of Shadows é 30°45'35"N e 76°48'15"L, (30,75°N e 76,75°L) conforme Google Earth Pro 2018.

O trabalho desenvolve um procedimento que visa verificar o desempenho da Tower of Shadows, um conjunto de elementos de sombreamento criado por Le Corbusier. Este trabalho simula duas edificações, uma com os brises e marquises da Tower of Shadows com a adição de uma edificação com fachadas em vidro comum, figura 7a. A outra edificação é somente o prédio interno de vidro, sem os sombreamentos externos, porém com vidro termicamente eficiente, figura 7b.

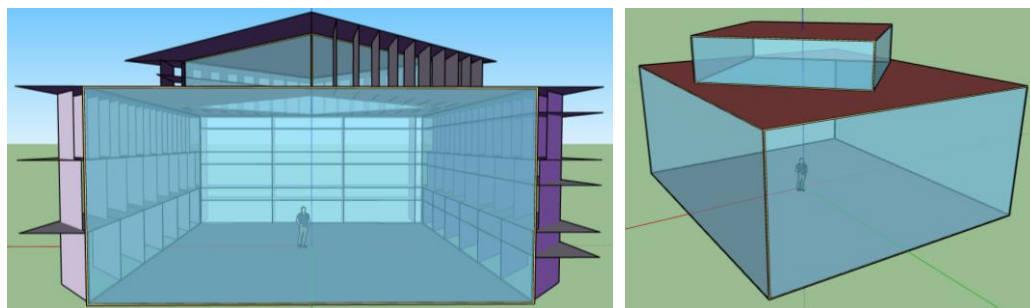


Figura 7a- Tower of Shadows com Sombreamento Externo

Figura 7b- Tower sem Sombreamento Externo

Pode ser visto que a construção tem um ambiente inferior com fachadas Norte, Oeste, Sul e Leste. Acima existe um segundo ambiente de menor dimensão, rotacionado 45°, com fachadas Nordeste, Noroeste, Sudoeste e Sudeste. O ambiente inferior mede 12,4 m de frente, 14,2 m de fundos e altura de 6 m, total 176 m<sup>2</sup>. O ambiente superior mede 7,7 m por 7,7 m, com altura de 2 m. A construção total tem uma altura de 8 m.

Para fazer esta avaliação, colocou-se internamente na Tower of Shadows uma edificação com todas as fachadas envidraçadas. Esta edificação foi simulada no EnergyPlus (2018), uma ferramenta de simulação grátis do DOE (Departamento de Energia dos EUA).

A montagem do modelo simulado foi feita utilizando o Trimble SketchUp Make (2017) e a extensão Big Ladder Euclid (2017). Os modelos simulados podem ser vistos nas Fig. 7, vistos do Norte (7a) e Nordeste (7b).

A colocação da edificação envidraçada é para avaliar o desempenho do sombreamento externo, através do consumo energético da edificação, com seus usos internos de energia e o sistema de condicionamento de ar. Este modelo é composto pelas proteções externas da Tower of Shadows e pela edificação interna com fachadas em vidro, sendo que estes vidros são simples, compostos por vidro claro 3 mm comum.

As áreas envidraçadas medem:

Zona inferior, orientações:	Norte e Sul:	2 x 72 m <sup>2</sup> = 144 m <sup>2</sup>
	Leste e Oeste:	2 x 83 m <sup>2</sup> = 166 m <sup>2</sup>
	Total da zona inferior	= <u>310m<sup>2</sup></u>

Zona superior, orientações:	Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste:	4 x 14 m <sup>2</sup> = <u>56 m<sup>2</sup></u>
-----------------------------	---	---

Total de área envidraçada da edificação = 366 m<sup>2</sup> de vidro

Taxa de envidraçamento = 366/176 = 2,08 m<sup>2</sup> vidro/m<sup>2</sup> piso

Em termos de comparação, foi também simulado um prédio sem as proteções externas, com um vidro energeticamente mais eficiente que o vidro claro 3mm, no caso o NP50 (Guardian).

## 4 ENERGYPLUS

As simulações foram feitas com o EnergyPlus. A seguir serão vistos os fluxos energéticos principais simulados pelo EnergyPlus e seus equacionamentos básicos.

### 4.1 Fluxos de Calor numa Superfície Opaca Externa

Os fluxos térmicos existentes são relacionados a seguir.

Fluxos Externos:

- Radiação de onda curta - Radiação solar direta, difusa e refletida
- Radiação de onda longa - Troca bidirecional de radiação infravermelha com as superfícies do entorno
- Convecção - Troca alternativa de calor com o ar exterior (vento)

Fluxos Internos:

- Radiação de onda curta - Radiação solar e de fontes internas (lâmpadas)
- Radiação de onda longa - Troca bidirecional de radiação infravermelha com as superfícies internas
- Convecção - Troca alternativa de calor com o ar interno

O fluxo de calor pode ser entrando ou saindo, sendo comum inverter ao longo de um dia.

#### 4.2 Fluxos de Calor numa Superfície Translúcida Externa

Os ganhos de calor por janelas são calculados pelas seguintes equações:

Ganho interno de radiação solar direta:

$$Q_b = A E_{t,b} \text{SHGC}(\theta) \text{IAC}(\theta, \Omega) \quad (1)$$

Ganho interno de radiação solar difusa:

$$Q_d = A (E_{t,d} + E_{t,r}) \text{SHGC}_D \text{IAC}_D \quad (2)$$

Ganho de calor por condução:

$$Q_c = UA(T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

Ganho de calor total pela janela  $Q$ :

$$Q = Q_b + Q_d + Q_c \text{ (após conversão)} \quad (4)$$

onde

- $A$  = área da janela, m<sup>2</sup>
- $E_{t,b}$ ,  $E_{t,d}$ , e  $E_{t,r}$  = Irradiancia direta, difusa do céu e difusa refletida pelo solo, W/ m<sup>2</sup>
- $\text{SHGC}(\theta)$  = Coeficiente de Ganho de Calor Solar por radiação direta função do ângulo de incidência  $\theta$
- $\text{SHGC}_D$  = Coeficiente de Ganho de Calor Solar por radiação difusa (também chamada hemisférica)
- $T_{in}$  = Temperatura interna, °C
- $T_{out}$  = Temperatura externa, °C
- $U$  = Fator global de transferência de calor incluindo as molduras e divisores, W/m<sup>2</sup> K
- $\text{IAC}(\theta, \Omega)$  = Coeficiente de atenuação solar interna para radiação direta, com valor = 1 se não existir sombreamento interno. É função do tipo de sombreamento. Pode ser função do ângulo de incidência da radiação solar no sombreamento.
- $\text{IAC}_d$  = Coeficiente de atenuação solar interna para radiação difusa, com valor = 1 se não existir sombreamento interno. É função do tipo de sombreamento e pode depender da geometria do sombreamento.

Os ganhos internos de radiação solar se transformam em carga térmica após serem absorvidos por superfícies opacas internas, esquentá-las e estas aquecerem o ar, com um atraso temporal.

#### 4.3 Cálculo dos Fluxos Térmicos das Zonas

Com os principais fluxos externos acima e outros existentes, o equacionamento transiente básico do EnergyPlus pode ser visto na equação diferencial ordinária a seguir, escrito para calcular a variação temporal da temperatura das zonas da edificação.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{ci}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{si}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{ac} C_p (T_{ins} - T_z) \quad (5)$$

onde

$$C_z = \rho_{ar} C_p C_s \text{ onde} \quad (5.1)$$

$\rho_{ar}$  = densidade do ar da zona

$C_p$  = calor específico do ar

$C_s$  = multiplicador da capacidade de calor sensível para melhorar a convergência

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \text{energia armazenada no ar da zona em cada incremento no tempo} \quad (5.2)$$

$\sum_{i=1}^{N_{ci}} \dot{Q}_i$  = soma das cargas internas convectivas

$$\sum_{i=1}^{N_{si}} h_i A_i (T_{si} - T_z) = \text{transferência de calor convectivo das superfícies da zona} \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) = \text{transferência de calor pela troca de ar entre zonas} \quad (5.5)$$

$$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) = \text{transferência de calor pela infiltração de ar exterior} \quad (5.6)$$

$$\dot{m}_{ac} C_p (T_{ins} - T_z) = \text{potência do condicionador de ar} \quad (5.7)$$

Para obtenção da temperatura da zona no tempo, a mesma é isolada na equação acima e calculada por diferenças finitas regressivas de terceira ordem, obtendo-se

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ci}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{si}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{ac} C_p T_{ins} - \left(\frac{C_z}{\delta t}\right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta t}\right)}{\left(\frac{11}{6}\right) \left(\frac{C_z}{\delta t}\right) + \sum_{i=1}^{N_{si}} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{ac} C_p} \quad (6)$$

onde  $T_z^t$  é a temperatura de cada zona em determinado tempo de cálculo.

O cálculo do conteúdo de umidade da zona segue os mesmos princípios, considerando os calores latentes.

#### 4.4 Condução de Calor através das Paredes

O cálculo transiente dos fluxos de calor nas paredes é feito por Função de Transferência por Condução, chamado CTF (Conduction Trasfer Function).

A solução mais básica de séries temporais é a equação do fator de resposta, que relaciona o fluxo em uma superfície de um elemento com uma série histórica infinita de temperatura, em ambos os lados da superfície, como mostrado pela equação a seguir, escrita para o lado externo da parede:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (7)$$

onde  $q''$  é fluxo de calor por condução,  $T$  é temperatura,  $i$  significa o interior do elemento da construção,  $o$  significa o exterior do elemento de construção,  $t$  representa o passo de tempo atual, e  $X$  e  $Y$  são os fatores de resposta.

A solução da equação contém elementos que são chamados de Funções de Transferência por Condução (CTF). A forma básica de uma solução de Função de Transferência por Condução é mostrada pelas seguintes equações:

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (8)$$

para fluxo de calor externo e

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (9)$$

para fluxo de calor interno, onde

$X_j$  = Coeficiente CTF externo,  $j = 0, 1, \dots, nz$   
 $Y_j$  = Coeficiente CTF cruzado,  $j = 0, 1, \dots, nz$   
 $Z_j$  = Coeficiente CTF interno,  $j = 0, 1, \dots, nz$   
 $\Phi_j$  = Coeficiente CTF de fluxo,  $j = 0, 1, \dots, nq$   
 $T_i$  = Temperatura da face interna  
 $T_o$  = Temperatura da face externa  
 $q''_{ko}$  = Fluxo de calor por condução na face externa  
 $q''_{ki}$  = Fluxo de calor por condução na face interna

Os coeficientes CTF podem ser encontrados de diversas formas, sendo mais comum o Sistema Básico de Espaço de Estado, definido por equações matriciais lineares.

## 5 ARQUIVO CLIMÁTICO

Para fazer a simulação é preciso, além das características da edificação, dois fatores importantes:

- A posição da edificação em relação à radiação solar;
- O arquivo climático do local.

A forma com que a radiação solar chega na edificação depende da latitude, longitude e altitude, e da posição do sol, função da hora, dia e mês do ano.

Estes valores foram encontrados no Google Earth Pro 2018, obtendo-se latitude 30,75° Norte, longitude 76,75° Leste e altitude 334 m. Estes valores foram colocados no arquivo de dados do EnergyPlus.

Não foi encontrado arquivo climático para Chandigarh, mas em <https://energyplus.net/weather> 2018 foram encontrados arquivos climáticos para três cidades próximas de Chandigarh, a saber, Sundernagar (altitude 874 m), Dehradun (682 m) e Saharanpur (274 m). O local com altitude mais próxima de Chandigarh (Saharanpur) foi escolhido para informar os dados climáticos, com o posicionamento de latitude, longitude e altitude acima descritos, com distância entre as duas cidades de 111 km.

A temperatura externa considerada (Saharanpur) pode ser vista em escala anual na figura a seguir. As temperaturas mínimas no inverno ficam em torno de 2°C e as máximas no verão em torno de 38°C. As temperaturas médias anuais oscilam entre 12°C no inverno e 29°C no verão. A modificação das amplitudes é muito influenciada pelas monções.

A seguir pode ser visto também o gráfico das umidades relativas externas, com bastante oscilação ao longo do ano. As maiores oscilações ocorrem em torno do mês de abril, oscilando entre 20 e 90 % de umidade relativa.

As maiores umidades e menores oscilações ocorrem no entorno do mês de agosto, entre 80 e 98%, devido às monções que trazem ar quente e úmido do mar.

A umidade relativa média apresenta grande oscilação ao longo do ano, apresentando dois pontos máximos e dois pontos mínimos.

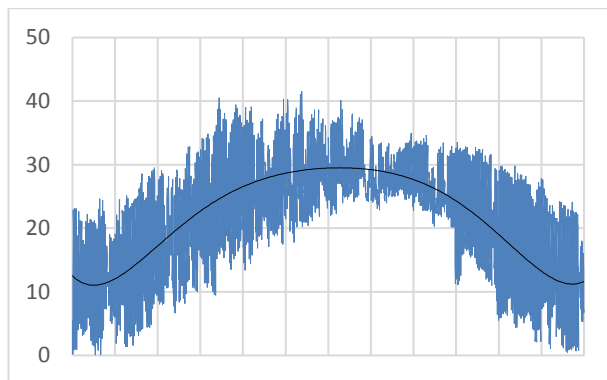


Figura 8a - Temperatura de Bulbo Seco Externa Mensal

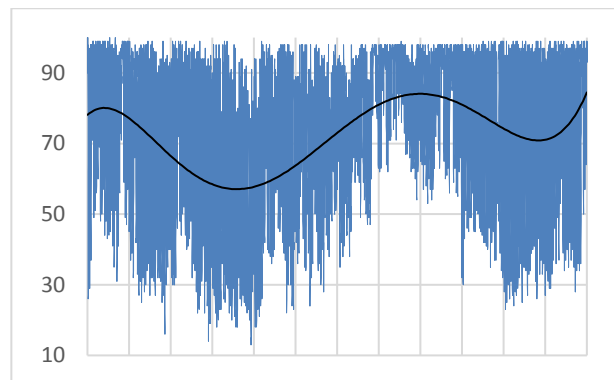


Figura 8b - Umidade Relativa Externa Mensal

A radiação solar global horizontal ao longo do ano apresenta, na primeira metade do ano, radiação solar com valores elevados, na ordem de  $1100 \text{ W.h/m}^2$ , devido às baixas umidades relativas e níveis de chuva. Durante as monções, pela grande quantidade de chuva e elevação das umidades relativas, a radiação alcança valores na ordem de  $800 \text{ W.h/m}^2$ .

## 6 ARQUIVO DE SIMULAÇÃO

A simulação da edificação foi feita através do programa EnergyPlus versão 8.7. O arquivo de simulação será basicamente descrito a seguir.

O ambiente simulado foi definido como o escritório de alguma empresa, funcionando nos dias da semana das 8 h às 18 h, e nos sábados das 8 h às 12 h.

A primeira simulação introduziu internamente à Tower of Shadows um prédio totalmente em vidro simples claro 3 mm, com Transmitância Solar de 84 % e Visível de 90 %. Após foi simulado um prédio de mesma geometria, sem os brises e marquises externas e com um vidro eficiente bastante utilizado atualmente (NP50 Guardian, 2018), com Condutividade Térmica de  $5,68 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , Coeficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC) de 0,39 e Transmitância Visível de 0,47.

O escritório foi simulado com as cargas térmicas internas relacionadas a seguir. As pessoas foram calculadas com ocupação de  $11,6 \text{ m}^2/\text{pessoa}$  e atividade de  $120 \text{ W/pessoa}$ , a iluminação foi calculada com taxa de  $8 \text{ W/m}^2$  e os equipamentos com taxa de  $8,6 \text{ W/m}^2$ .

A taxa de infiltração de ar nos ambientes foi calculada com taxa de 0,75 Trocas de Ar por Hora (ACH). A regulação de temperatura do ar condicionado foi feita com  $22^\circ\text{C}$  no aquecimento e  $25^\circ\text{C}$  no resfriamento.

Nas simulações foi usado o módulo PTHP (Package Terminal Heat Pump), ou Bomba de Calor Terminal Compacta (Split Ciclo Reverso), cujas propriedades podem ser vistas a seguir.

As vazões de ar em resfriamento e aquecimento foram calculadas pelo EnergyPlus. A vazão de ar exterior foi calculada com  $9,44 \text{ L/s}$  por Pessoa. A eficiência total do ventilador foi usada como 0,7, e a pressão do ventilador foi de 75 Pa. A eficiência do motor do ventilador foi de 0,9. A capacidade total de resfriamento e aquecimento (W) foi calculada pelo EnergyPlus. O COP em Resfriamento foi tomado igual à 3, e em Aquecimento igual à 2,75.

Os dias de Projeto (Design Day) foram calculados com as seguintes propriedades:

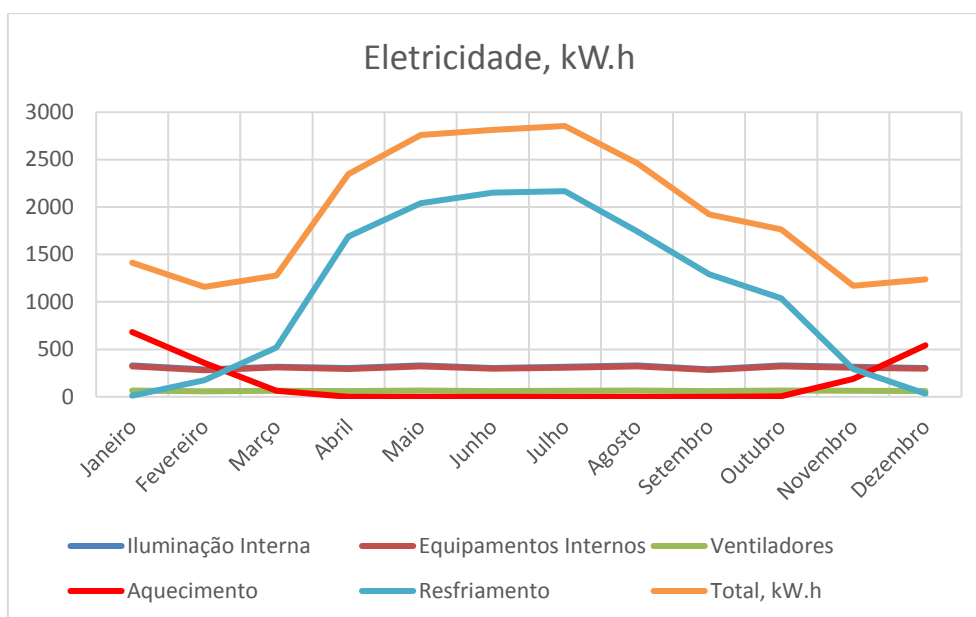
Dia de Projeto de Verão: Frequência de TBSmáx 0,4%, data 21/06, TBSmáx.  $38,4^\circ\text{C}$ , Amplitude  $20,5^\circ\text{C}$ , TOrv  $16,2^\circ\text{C}$ , Vel.Vento  $3,7 \text{ m/s}$ , Azimute Vento  $120^\circ$ , Modelo Solar ASHRAEClearSky, Claridade do Céu 1.

Dia de Projeto de Inverno: Frequência 99,6% para Temperatura de Bulbo Seco, data 21/12, TBSmáx.  $1,6^\circ\text{C}$ , Amplitude  $0^\circ\text{C}$ , TOrv  $1,6^\circ\text{C}$ , Vel.Vento  $3,7 \text{ m/s}$ , Azimute Vento  $120^\circ$ , Modelo Solar ASHRAEClearSky, Claridade do Céu 0.

## 7 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

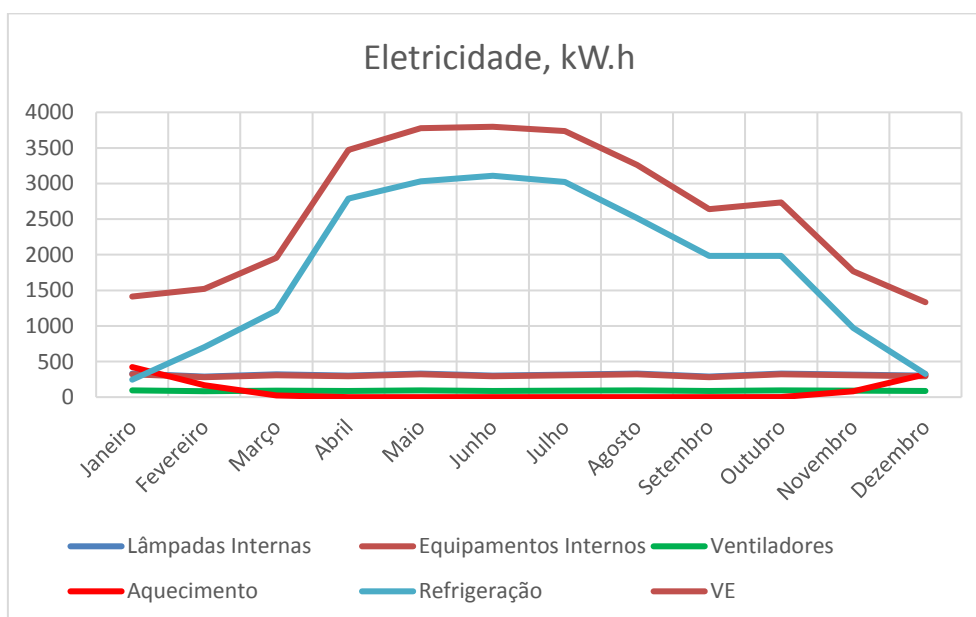
A seguir serão apresentados os resultados das simulações dos dois prédios, o primeiro com Proteção Externa dos brises e marquises da Tower of Shadows e Vidro Comum, nominado PEVC, e o segundo o prédio sem proteção externa e Vidro termo energeticamente Eficiente, nominado VE.

O gráfico a seguir mostra os diversos consumos energéticos mensais do prédio PEVC, salientando-se o consumo de resfriamento, com pico em torno de  $2200 \text{ kW.h}$ , e o consumo total da edificação, com pico em torno de  $2850 \text{ kW.h}$ .



Consumos Energéticos Mensais por Uso Final – Prédio PEVC

O gráfico a seguir novamente mostra os diversos consumos energéticos mensais do prédio VE, salientando-se o consumo de resfriamento, com pico em torno de 3100 kW.h, e o consumo total da edificação, com pico em torno de 3800 kW.h.



Consumos Energéticos Mensais por Uso Final – Prédio VE

Já pode ser visto que o prédio sem proteção externa e vidro eficiente gasta mais energia que o prédio que utiliza os brises externos da Tower of Shadows e vidro comum.

A tabela a seguir mostra o consumo anual de energia por uso final para os dois prédios.

Tabela 1 – Consumos Anuais por Uso Final

Eletricidade [kW.h]	PEVC	VE
Aquecimento	1842	1017
Resfriamento	13155	21887
Iluminação Interna	3764	3764
Equipamentos Internos	3652	3652
Ventiladores	757	1087
<b>Total por Uso Final</b>	<b>23171</b>	<b>31407</b>



O gráfico de barras mostra a comparação entre os usos finais de energia para os dois prédios.

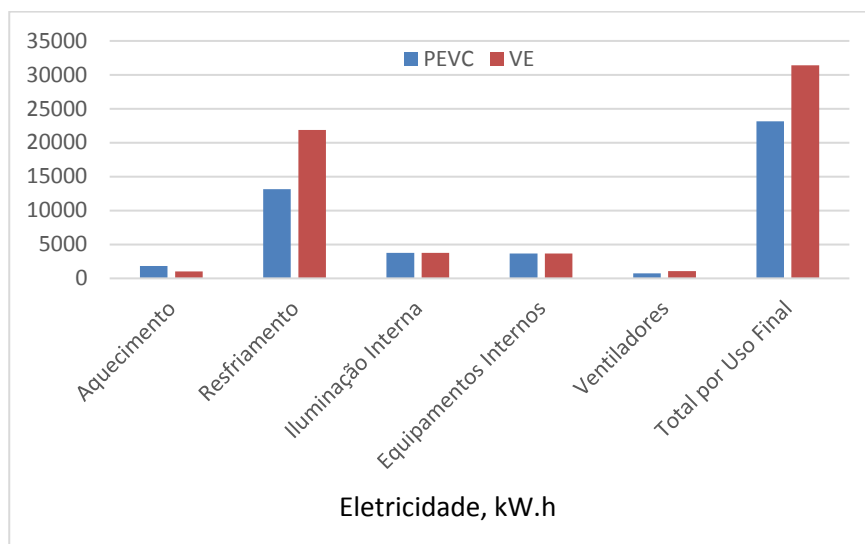


Figura 9 - Comparação entre os Consumos Anuais de Energia por Uso Final

O prédio sem os brises de proteção externa e vidro eficiente (VE) gasta 31407 kW.h/ano, 35 % a mais que os 23171 kW.h/ano do prédio com brises de proteção externa e vidro comum (PEVC). O consumo em resfriamento do prédio VE é de 21887 kW.h/ano, 66 % maior que o prédio PEVC, que consome 13155 kW.h/ano. O prédio VE consome em resfriamento 70 % da sua energia total anual. O prédio PEVC consome em resfriamento 57 % da sua energia total anual.

Os resultados acima mostram o predomínio, em muito, do consumo energético para resfriamento das edificações. Já pode ser visto que a ausência dos brises não foi compensada pelo vidro mais eficiente, pois o consumo do resfriamento aumentou em relação ao prédio com brises e vidro comum.

O gráfico a seguir mostra os consumos totais mensais dos dois prédios, sendo que o prédio sem brise e com vidro eficiente apresenta o maior consumo todos os meses, salvo janeiro. O pequeno aumento dos consumos do prédio com brises e vidro comum em janeiro e dezembro (inverno) se deve à presença dos brises que diminuem a incidência do sol na edificação. Por outro lado, os brises distanciam muito o consumo nos meses de verão.

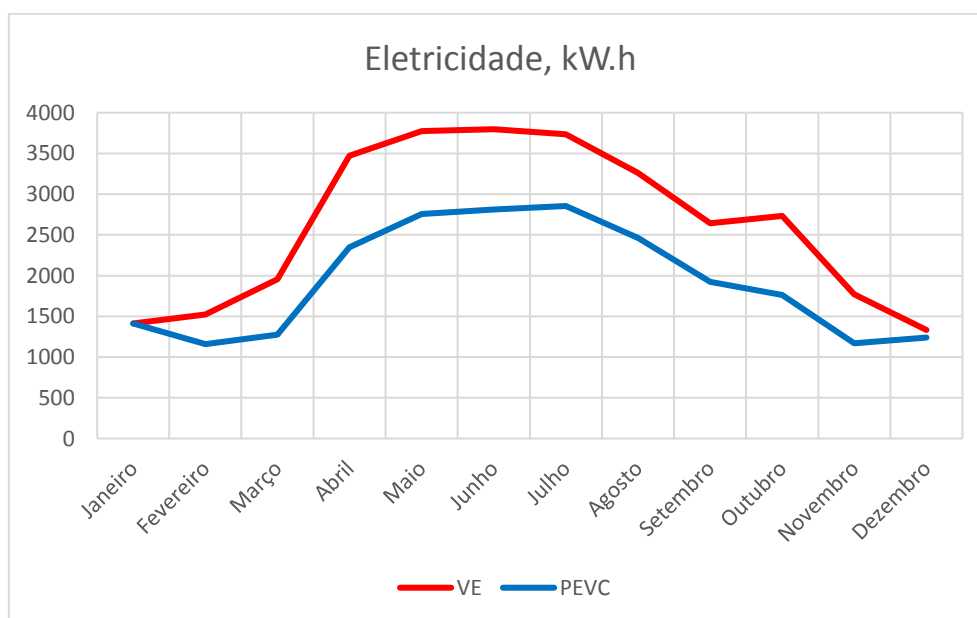


Figura 10 - Comparação de Consumo Mensal Final entre os Dois Prédios

## 8 CONCLUSÕES

O trabalho mostrou que o edifício de Le Corbusier, a Tower of Shadows, é um exercício que permite investigação precisa, em nível de desenho arquitetônico, ou projeto de lugares, por meio de controle solar por elementos de sombra, os chamados “brises soleil”, num universo de soluções arquitetônicas que pode ser extrapolado para diversos tipos de edificações em outros referenciais de latitude, de maneira a adaptar edificação ao clima com controle solar.

Os brises podem ser fixos, móveis manualmente ou motorizados, abrindo muitas possibilidades de adequação do grau de fechamento dos mesmos, otimizando o desempenho termo-energético-lumínico dos mesmos.

O prédio com brises externos e vidro claro simples teve grande vantagem em relação ao prédio sem brises e com vidro energeticamente eficiente. O prédio com vidros eficientes gastou 31407 kW.h/ano de energia por ano, principalmente no resfriamento do ar condicionado, mostrando que a eficiência dos vidros não foi suficiente para baixar o consumo do ar condicionado.

O prédio que usou os brises e marquises da Tower of Shadows de Le Corbusier e vidro comum (claro 3 mm) gastou bem menos energia, no valor de 23171 kW.h/ano, mostrando ser a melhor solução. É necessário colocar que os brises da Tower of Shadows foram muito bem estudados e projetados, protegendo muito bem no verão o prédio, e permitindo alguma passagem de radiação solar no inverno, para auxiliar no aquecimento. A grande vantagem dos brises é de que eles barram a radiação solar fora do prédio, dissipando o calor produzido pela incidência da radiação solar nos brises.

No prédio sem brises e vidros termicamente eficientes, com grande probabilidade a solução mais usadas atualmente nos prédios que procuram ser eficientes, grande parte da radiação solar é absorvida pelos vidros, esquentando os vidros, que em média, dissipam metade deste calor para o exterior e metade para o interior da edificação. Esta parte que entra na edificação deve ter exigido o maior consumo de energia do sistema de ar condicionado.

Por este estudo, a melhor solução são os brises, que barram a radiação fora da edificação, constatação óbvia. Porém, não é a solução mais usada. Quais os motivos?

Talvez a necessidade de dimensioná-los o melhor possível seja uma das dificuldades a ser enfrentada e resolvida. Outra questão é o preço dos brises, que pode ser recuperado na economia de energia anual da edificação, devido ao menor consumo do ar condicionado no prédio com brises.

## 9 REFERÊNCIAS

Arquivos Climáticos - <https://energyplus.net/weather>

Big Ladder Euclid (2017) - euclid-0.9.3.rbz

Daniel Siret. Le Corbusier Plans. 1940 – Studies in Sunlight (no place). English version. Foundation Le Corbusier. Le Corbusier Plans. DVD N°7, Fondation Le Corbusier, Echelle-1 Codex Images International, 2000 <<http://e1-intl.com>>. <halshs-01249648>

Daniel Siret. Le Corbusier Plans. 1950 – Climate Chart Chandigarh). English version. Foundation Le Corbusier. Le Corbusier Plans. DVD N°11, Fondation Le Corbusier, Echelle-1 Codex Images International, 2006 <<http://e1-intl.com>>. <halshs-01249644>

Daniel Siret. Le Corbusier Plans. 1950 - Studies in Sunlight - Tower of Shadows (Chandigarh). English version. Fondation Le Corbusier. Le Corbusier Plans, DVD N°11, Fondation Le Corbusier, Echelle-1 Codex Images International, 2006, <<http://e1-intl.com>>. <halshs-01249639>

EnergyPlus 2018 - <https://energyplus.net/>, acessado em 04/2018 (EnergyPlus-8.7.0-78a111df4a-Windows-x86\_64.exe)

Google Earth Pro, 2018. US Dept. of State Geographer, 2018 Google, Image Landsat/Copernicus, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Guardian Brasil - [www.sa.pt.sungardglass.com/cs/groups/sungardsouthamerica/.../gi\\_002782.pdf](http://www.sa.pt.sungardglass.com/cs/groups/sungardsouthamerica/.../gi_002782.pdf) - Neutral Plus 50 - Acessado em 17/09/18

Silva, H. Costa. 2017. A bioclimatic reading about the Tower of Shadows. Design to Thrive, PLEA – Edinburgh, Scotland. 2017.

SketchUp Make 2017 - sketchupmake-2017-2-2555-90783-pt-br-x64.exe

Stasinopoulos T. 2015. The Need for Architectural Materialism. Architecture in (R)Evolution, PLEA - Bologna, Italy. 2015.

Tower of Shadows - <http://www.chandigarhguide.com/tower-of-shadow/>, acessado em 10/05/2018.

### SIMULATING LE CORBUSIER TOWER OF SHADOWS

**Abstract.** *The objective of this work is to discuss possibilities of using specialized softwares to design and develop projects of buildings for human activities considering aspects related to aesthetics, materiality and the adequacy of buildings to the site, as well as quantification and qualification of energy consumed for the conditioning of environments from the implementation, use and maintenance of systems, mainly electricity, to the comfort of users of built environments. As a base was chosen the structure called Tower of Shadows, (Le Corbusier and Iannes Xenakis), which is in Chandigarh, India. This work presents results for a first stage of investigations, which were initially researched for the evaluation of performance regarding the shading that is offered by the structure, with cooling strategy, through the structure envelope. The study was carried out basically with the Sketchup Make® Euclid® and Energy Plus® softwares and revealed the influence on the reduction of energy consumption through simulations with two different kinds of properties confronted with and without the wrap designed and built for solar access control in the Tower Laboratory of Shadows structure.*

**Keywords:** *Thermal-Energy Simulation, Brises Efficiency, Glass Performance in Buildings*