



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GET/23
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - XIV

GRUPO DE ESTUDOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO - GET

MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE POTENCIAL ANUAL DE RADIAÇÃO SOLAR E LUZ NATURAL EM AMBIENTES COMPLEXOS

| | | | | |
|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Anderson Claro (*) | João Q. Krause | Edison A. Portela Jr. | Marco A.R.G. Moreira | Fernando P.D. Perrone |
| Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC | Eletrobras | Eletrobras | Eletrobras | Eletrobras |

RESUMO

O uso de painéis solares como fonte de energia térmica vem sendo utilizado com sucesso em todo o mundo, principalmente em regiões tropicais. Painéis fotovoltaicos apresentam maiores limitações, sendo utilizados mais correntemente em países com políticas públicas e subsídios direcionados e/ou com alto custo de energia elétrica, fatores estes que tornam a relação custo x benefício x vida útil mais palatável.

No Brasil, a partir da criação pela ANEEL do Sistema de Compensação de Energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local, a geração fotovoltaica de eletricidade surge como uma das tecnologias com maior potencial de disseminação de aplicação da atualidade no conceito de microgeração distribuída, inclusive com possibilidade de realimentação da rede pública. Dado o contexto de instabilidade energética no Brasil, por conta do gradual esvaziamento dos reservatórios e a entrada em atividade de diversas termelétricas, que além de suarem a matriz aumentam consideravelmente o custo da energia, a microgeração distribuída passa a ser vista como uma possibilidade real de desonerar o Sistema Interligado Nacional, com a vantagem financiada pelos usuários finais.

As aplicações atuais, para quaisquer painéis solares, envolvem instalação em coberturas e fachadas, além de uso combinado como protetores solares para janelas. Todavia, a implantação eficiente de painéis é dificultada pela interferência do entorno edificado, que afeta a captação de luz provocando sombreamento. Há, portanto, grande carência de metodologias e ferramentas computacionais que considerem estas interferências e analisem o posicionamento mais eficiente destes painéis.

Este trabalho propõe a adoção do método completo da Radiosidade aplicado ao estudo integrado de incidência de radiação solar e iluminação natural de ambientes para determinar a orientação otimizada de painéis solares térmicos ou fotovoltaicos, considerando obstruções, aplicável fundamentalmente em áreas urbanas.

PALAVRAS-CHAVE

Radiosidade, otimização, energia solar-térmica, energia solar-fotovoltaica, microgeração distribuída.

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente painéis solares térmicos ou fotovoltaicos podem ser instalados em coberturas e fachadas, além da possibilidade de uso combinado como protetores solares para janelas. Todavia, a implantação eficiente de painéis,

(*)Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Arquitetura - Campus
Universitário, Trindade. 88010970 - Florianópolis, SC – Brasil

fundamentalmente nos grandes centros urbanos, é dificultada pela interferência do entorno edificado, que afeta a captação de luz provocando sombreamento. O método completo da Radiosidade aplicado ao estudo integrado de incidência de radiação solar e iluminação natural de ambientes pode ser uma solução computacionalmente viável para determinar a orientação otimizada de painéis solares, considerando obstruções.

2.0 - MODELO CONCEITUAL

O Modelo Vetorial Esférico - MVE, usado em estudos de iluminação natural, permite determinar para pontos de um ambiente, com projeções esféricas, porções visíveis do céu e demais superfícies do ambiente no ponto (CLARO, 1998). Estas projeções representam coeficientes (fatores de forma), que determinam os fluxos luminosos incidentes no ponto, provenientes do céu e das demais superfícies. Uma simulação estática de iluminação fornece a iluminância inicial do céu em pontos de superfícies do ambiente (inclusive num plano de análise), e a iluminância indireta com o cálculo dos ciclos de inter-reflexões (Equação da Radiosidade).

No entanto, a aplicação da Equação da Radiosidade exige a discretização dos planos de superfícies dos ambientes em porções de área menores, que garantam uniformidade de iluminância (e luminância), já que os grandes planos são geralmente iluminados de forma diferenciadas em suas partes (DRETTAKIS et al., 1996). Assim, os planos são divididos em vértices que, por sua vez, representam uma pequena porção do plano, e a equação deve ser aplicada relacionando cada um dos vértices com todos os outros.

Neste processo, primeiro é necessário identificar, para cada vértice, de cada plano por ele visualizado, quais vértices são efetivamente visualizados em cada direção da visibilidade, que podemos representar através do que chamamos de máscara de visualização, uma projeção esférica do hemisfério visível a partir de um ponto segundo um conjunto de pequenos ângulos sólidos em que são divididos os hemisférios. Esta máscara dará a resolução da visibilidade da análise e a determinação dos vértices de cada plano que são visualizados por um vértice receptor é bastante custosa em tempo de processamento. No Modelo Vetorial Esférico que tomamos por ponto de partida, a visibilidade em um hemisfério pode ser representada entre cerca de 750 e 73.500 direções (CLARO et al., 2005). Na Figura 1 temos exemplo de uma projeção de máscara de visualização.

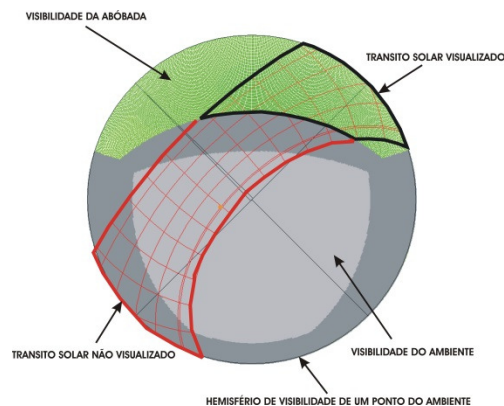


Figura 1: Máscara de um ponto em uma sala, indicando as porções visíveis do céu e trajetórias solares.

Num segundo momento, a aplicação da Equação da Radiosidade relaciona cada vértice com todos os outros, numa sucessão de interreflexões que são mais numerosas quanto mais claro e/ ou complexo é o ambiente.

Assim, supondo um ambiente retangular, composto por aproximadamente 10 planos, uma divisão em 10.000 vértices implicará numa interreflexão envolvendo 100.000.000 (cem milhões) de interações a cada ciclo, que podem chegar a 10 ou 20, ou até mais, em casos mais complexos (CUNHA et al., 2012), uma etapa bastante custosa em tempo de processamento.

Quando consideramos a perspectiva de uma avaliação anual de performance, integrando a análise da radiação incidente nas diferentes superfícies como potencial de geração de energia fotovoltaica com o potencial de aproveitamento da luz natural no interior do ambiente, considerando ainda as condições de obstrução por elementos edificados do entorno, ou o efeito solo, a solução se torna bastante complexa e demorada.

Uma avaliação ao longo de todo um ano através de simulação dinâmica é bastante demorada, com cálculo prévio do fator de contribuição de parcelas de céu para pontos do plano de análise, os Daylight Coeficientes (TREGENZA et al., 1983), utilizados com Arquivos Climáticos Digitais (EPW) que descrevem características anuais do céu a cada dia, por hora.

Os arquivos climáticos digitais fornecem dados derivados de medições reais, que são interpretados através de modelos matemáticos para obtenção de diferentes indicadores, inclusive de iluminação natural. Em termos de iluminação natural, o mais utilizado é conhecido como Modelo de Perez (PEREZ et al., 1990), que utiliza fórmulas de eficácia luminosa para obter dados de iluminâncias naturais global, difusa e direta a partir da radiação solar.

Estes valores, derivados de séries de medições reais, fundamentaram a determinação de 15 modelos de céu que caracterizam distribuições de luminância celeste e iluminância direta do Sol (KITTLER et al., 2000) que irão configurar a norma internacional de Distribuição Espacial de Luz Natural, a ISO:CIE 15469:2003 (CIE, 2003), que será utilizada neste modelo, através dos algoritmos do MVE que manipulam adequadamente os modelos padronizados conforme demonstrado por Cunha et al. (2012b).

3.0 - MÉTODO SINTÉTICO: MASCARAMENTO INTEGRAL PARA ANÁLISE COMBINADA DE INCIDÊNCIA ANUAL DE RADIAÇÃO SOLAR E INDICADORES DO POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DE LUZ NATURAL

O método proposto apresenta os seguintes passos:

3.1 Calculo dos arquivos de visibilidade

- a. Determinação da máscara de visibilidade de cada vértice de cada plano físico, exceto dos planos considerados “Uniformes Iniciais”. Estes planos específicos são projetados, mas são considerados apenas como fontes iniciais.

A determinação da visibilidade dos planos a partir de um dado vértice é relativamente simples e fornece para um ponto as direções desobstruídas do hemisfério de visibilidade que permitem calcular a incidência inicial de radiação no vértice, independente de sua relação com todos os outros vértices.

Desta forma, teremos, para cada vértice de cada plano físico, a proporção do hemisfério de visibilidade que está desobstruído, localizada segundo as direções da resolução adotada. Se considerarmos que parte do hemisfério representa a porção onde transita o Sol, em algum momento específico do ano, é possível identificar a região do trânsito solar que está desobstruída, dentro da parcela visível da abóbada celeste.

- b. Determinação da visibilidade e fatores de forma dos planos de análise: Considerando-se planos de análise, não físicos, podemos estabelecer para estes planos a plena visibilidade dos vértices em que estão divididos os planos dos ambientes, de sorte que a equação da radiosidade possa ser aplicada para cada vértice dos planos de análise, computando o fluxo que emana inicialmente de cada vértice dos planos do ambiente.
- c. Determinação dos indicadores de áreas e refletâncias médias visíveis a partir de cada ponto físico do ambiente para determinação do fluxo interiorizado, que é a parcela do fluxo total refletido ou transmitido difusamente que efetivamente penetram o ambiente para serem interrefletidos em suas superfícies.

A máscara de Visibilidade permite estimar o quanto do fluxo incidente em um vértice dos planos físicos é devolvido para o ambiente na reflexão (ou transmissão, no caso de planos transmissores difusos, suportados no modelo).

3.2 Processamento dos fluxos

A proporção de área obstruída por planos físicos (excluídos os uniformes iniciais) em relação ao hemisfério multiplicada pela refletância / transmitância do plano que contém o vértice, determinam o quanto do fluxo incidente é efetivamente devolvido ao ambiente. Se considerarmos uma refletância média do ambiente, e o conjunto do fluxo refletido por cada vértice para dentro do ambiente, podemos estimar uma interreflexão média a ser distribuída como estimativa complementar à iluminância inicial efetivamente calculada. Assim, podemos distribuir no ambiente hipoteticamente de maneira uniforme este fluxo interrefletido, de sorte que, ao final, aplicando o fluxo dos planos aos vértices de análise, computaríamos a iluminância inicial dos planos de análise, a contribuição efetiva de cada plano com sua iluminância inicial, e o indicador do fluxo interiorizado direto.

Desta forma, o processamento ocorrerá, para cada situação específica anualizada a partir de arquivos climáticos digitais através de:

- a. Determinação da Incidência inicial de Radiação e Iluminância nos vértices dos planos físicos.
- b. Determinação do fluxo luminoso médio refletido interno a partir dos coeficientes calculados, que teoricamente distribui-se pelos planos do ambiente.
- c. Determinação da incidência inicial de radiação e iluminância nos vértices dos planos de análise.
- d. Determinação do fluxo recebido pelos vértices de análise de cada um dos vértices dos planos físicos.
- e. Estimativa do Fluxo Inicial Interiorizado diretamente do Sol e difusamente da abóbada.

3.3 Dados do mascaramento integral

A máscara de visibilidade é tomada a partir do hemisfério definido pelo plano que contém o ponto, independentemente da orientação do plano. No exemplo tomamos um ponto do plano de análise, horizontal. No algoritmo, de fato, a análise é feita nas proporções esféricas, e não através da projeção plana, como vista no exemplo para facilitar.

- a. **HEMISFÉRIO DE VISIBILIDADE DE UM PONTO DO AMBIENTE** – Representa o espaço para o qual se volta a superfície que contém o ponto, independente de sua posição no espaço. Este hemisfério contém os elementos de troca luminosa do ponto, recebendo ou emitindo luz.
- b. **VISIBILIDADE DA ABÓBADA** – Representa a porção visível da abóbada celeste do ponto, que fornece a iluminância inicial do ponto segundo um determinado tipo de céu, incluindo, quando é o caso, a luz direta do Sol.
- c. **VISIBILIDADE DO AMBIENTE** – Representa a porção do hemisfério de visibilidade do ponto que é ocupado por superfícies do ambiente. Quando são do tipo “Uniformes Iniciais”, representam fontes secundárias iniciais de luz refletida da abóbada, contribuindo na iluminância inicial do ponto. Quando são do tipo “Difusos”, sejam “Opacos” ou “Transmissores”, representam superfícies de troca luminosa. Os planos “Transmissores Especulares” somente têm o efeito de reduzir a transmitância da luz nas direções que os interceptam.
- d. **TRANSITO SOLAR VISUALIZADO** – Representa a porção da abóbada onde o Sol se encontra, em algum momento do ano, e que é visível do ponto.
- e. **TRANSITO SOLAR NÃO VISUALIZADO** – Representa a porção da abóbada onde o Sol se encontra, em algum momento do ano, e que não é visível do ponto. A soma destas duas áreas representa o total de 4.380 horas em que o Sol se encontra no céu, em qualquer latitude ou longitude do planeta.

3.4 Indicadores heurísticos

Os indicadores heurísticos não representam diretamente os dados físicos, mas utilizam a lógica de comportamento da luz e a medianização de determinados valores obtidos do cálculo físico para extrair indicadores que permitam comparar potencialidades de diferentes soluções.

- a. **RADIAÇÃO POTENCIAL INCIDENTE ANUALIZADA:** A proporção entre a área da abóbada que representa o transito solar visualizado e a área total do trânsito solar, a partir de uma latitude dada, representam o número de horas, no ano em que o ponto receberá Sol diretamente, e pode fornecer um indicador, considerando-se condições de céu limpo, sobre o potencial de incidência de radiação solar naquele ponto.
- b. **FLUXO MÉDIO REFLETIDO POTENCIAL** – A partir da máscara de um ponto é possível estimar, considerando-se ele difusor ideal, o quanto efetivamente de um fluxo inicialmente recebido é refletido pelo ponto para o interior do ambiente.

4.0 - RESULTADOS INICIAIS

Atualmente já estão sendo testados os algoritmos fundamentais de processamento, principalmente o procedimento de determinação e análise das máscaras.

A partir deste procedimento, estão sendo elaborados os resultados de cálculo visando a etapa principal, que é a determinação do potencial anual de radiação e iluminação obtido a partir da leitura e interpretação dos arquivos climáticos. Estão em testes os procedimentos:

- a. O modelo de processamento estático, que determina para uma situação horária / climática específica a radiação luminosa inicialmente incidente, do Sol e do Céu, em todos os vértices do ambiente, inclusive do plano de análise, assim como a parcela da reflexão inicial do ambiente que chega aos pontos do plano de análise. Neste procedimento também são calculados o Fluxo Inicial Interiorizado o Fluxo Refletido Interiorizado.
- b. Determinação do Potencial Ideal de Radiação Anual obtido a partir da suposição de um céu limpo ideal anualizado.

4.1 Radiação Luminosa Inicial

Foram processados 3 modelos relacionados, a partir de uma sala de 8m x 10 m com Janela de 25% da fachada voltada para o Norte. Em dois dos modelos foram colocados diferentes tipos de protetores, conforme a Figura 2 abaixo:

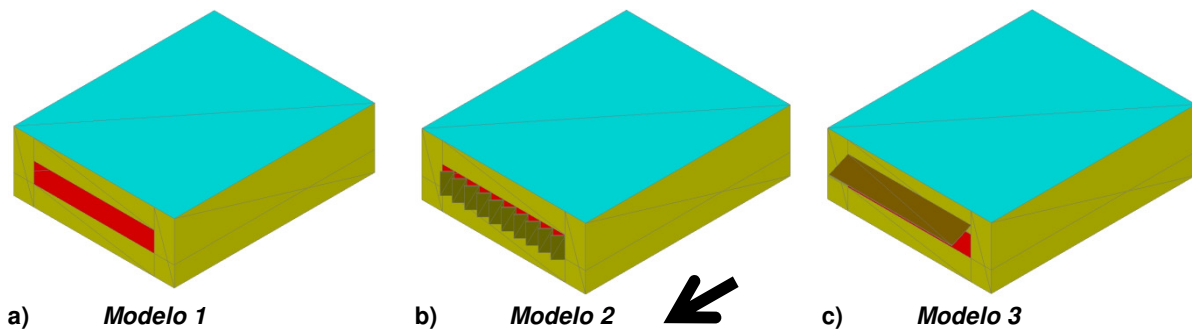


Figura 2: Características dos modelos Simulados: a) Modelo 1: sem protetores; b) Modelo 2: com protetores verticais inclinados; c) Modelo 3: com platibanda Superior. Todos os modelos contém um plano de análise situado a 75 cm do piso. A janela está orientada para Norte.

Para processamento foram consideradas refletâncias monocromáticas de 30 % no piso, 50% nas paredes e 70% nos tetos e protetores. O plano de análise, igual nos 3 modelos, foi situado a 0,75 m do piso e os ambiente foram discretizados em unidades de áreas não superiores a $0,02 \text{ m}^2$, resultando: a) Modelo 1: 9.534 vértices; b) Modelo 2: 11.734 vértices; c) Modelo 3: 1.274 vértices; d) Plano de Análise: 4.290 vértices.

Os resultados de cálculo foram representados nas superfícies do Projeto através da Iluminância Total. Os resultados permitem separar a iluminância difusa da iluminância direta do Sol, no caso das superfícies físicas do ambiente, conforme a Figura 3.

Os resultados para os planos de análise de Iluminância Total estão representados na Figura 4. Para os planos de análise é possível obter, além das Iluminâncias Iniciais Direta e Difusa, também a componente da primeira reflexão da iluminância inicial do ambiente.

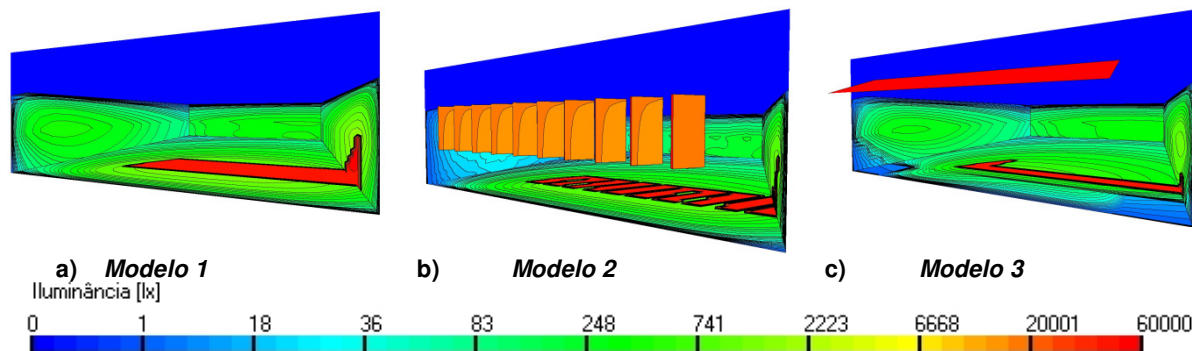


Figura 3: Gráficos de Cores Indicando a Iluminância Inicial (em lux) de uma dada situação, em Florianópolis, 30 de junho, às 10:00 h, com Céu Limpo (Padrão 12 – CIE)

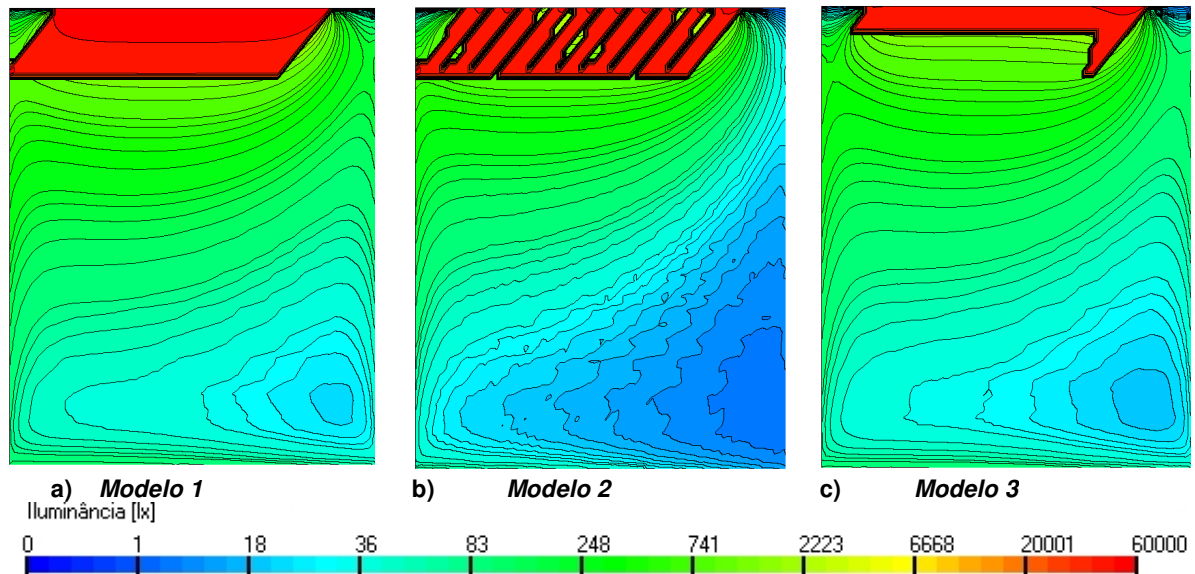


Figura 4: Planos de análise: Gráficos de Iluminância Total (em lux), das situações calculadas na Figura 3.

Fluxo Refletido Interiorizado pelo ambiente, sem a parcela inicial incidente, em cada um dos modelos na situação dada está na Tabela 1.

Tabela 1: Fluxos interiorizados em cada um dos modelos simulados.

| | |
|--------------------------------|---------------|
| Modelo 1 – sem protetor | 90.260 lumens |
| Modelo 2 – protetor vertical | 75.910 lumens |
| Modelo 3 – Protetor horizontal | 36.930 lumens |

Observa-se que apesar do fluxo interiorizado significativamente menor no modelo 3, a distribuição de iluminâncias iniciais é bastante similar ao modelo 1, o que pode indicar maior eficiência luminosa da solução, em termos de distribuição do fluxo que ingressa no ambiente.

Este modelo também apresenta significativa incidência de radiação na superfície superior do protetor, indicando grande potencial de geração fotovoltaica.

4.2 Potencial Ideal de Radiação Anual

Na Figura 5 está representado um estudo feito com 8 painéis em orientações distintas, considerando-se um entorno que possui blocos de edificações. Os painéis foram discretizados em 1560 vértices cada e considerado um céu ideal com turvamento de meio urbano, limpo o ano todo. A radiação potencial incidente foi considerada segundo o ângulo de incidência e o fluxo determinado através da leitura da máscara de cada vértice.

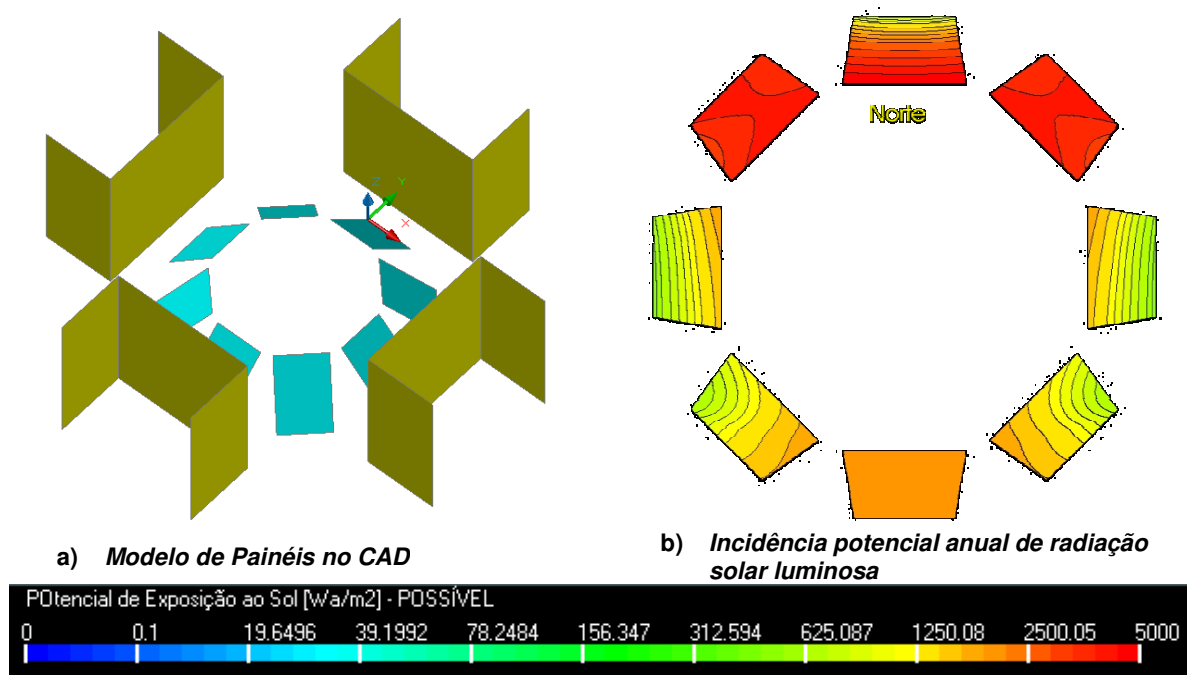


Figura 5: Avaliação de painéis em 8 orientações de 45 graus a partir do Norte, para cálculo do potencial anual de incidência de radiação solar.

O estudo exemplifica uma situação em que as orientações Noroeste e Nordeste recebem maior incidência de raios solares que a Norte. O modelo permite determinar a radiação “potencial possível”, considerado o plano desobstruído, e a radiação “potencial Incidente”, que leva em conta as perdas causadas por obstruções, descritos mensalmente para cada ponto.

Estes resultados anualizados pelos indicadores de potencial, assim como os resultados futuros que se pretende anualizar com base nos arquivos climáticos, permitiriam estimar, no desenvolvimento futuro, um potencial de geração, através da determinação da eficiência de sistemas fotovoltaicos, a exemplo de Tessaro et al. (2006).

5.0 - CONCLUSÃO

Quanto à incidência de luz natural nos ambientes, os métodos concebidos são efetivos e fornecem os dados pretendidos inicialmente colocados, permitindo diferenciar com clareza o comportamento de cada um dos modelos estudados quanto ao potencial dos indicadores pretendidos. Quanto ao Potencial de Radiação Incidente, a anualização dos procedimentos através da análise de mascaramento também se mostra plenamente viável a partir dos resultados iniciais obtidos nos estudos dos painéis, fornecendo o indicador heurístico que permite aplicar os coeficientes de eficiência dos painéis fotovoltaicos de diferentes naturezas. Observe-se que estes indicadores também permitem avaliar o potencial de geração de aquecimento d'água por painéis solares. O método também permite afirmar a viabilidade de anualização dos dados a partir dos arquivos climáticos digitais.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CIE – Comissão Internationale de L'Eclairage: Spatial Distribution of Daylight – CIE Standard General Sky S011/E:2003. Viena, 2003.
- (2) CLARO, A.: Iluminação Natural: Um Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade - PPG em Engenharia de Produção - UFSC - 1998. Tese. Orientador: Prof. Fernando O. R. Pereira.
- (3) CLARO, A., PEREIRA, F.O.R., LEDO, Rafael Z - APOLUX - An Innovative Computer Code for Daylight Design and Analysis in Architecture and Urbanism In: 9th International IBPSA Conference, 2005, Montreal. Proceedings of Building Simulation 2005. Montreal: IBPSA, 2005. v.único. p.199 – 206.
- (4) CUNHA, A. V. L., CLARO, A. - Avaliação do Programa Apolux segundo os Protocolos 5.8, 5.9 E 5.11 do Relatório Técnico CIE 171:2006 In: XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012, Juiz de Fora - MG. Anais XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012.

- (5) CUNHA, A. V. L., CLARO, A. - Avaliação do Programa Apolux segundo os Protocolos de Modelos de Céu do Relatório Técnico CIE 171:2006 In: PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, 2012, Lima - Peru. Anais PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, 2012.
- (6) DRETTAKIS, G.; SILLION, F.X. – Accurate Visibility and Meshing Calculations for Hierarchical Radiosity. Proceedings of 7th. EUROGRAPHICS WORKSHOP ON RENDERING, Portugal, 1996.
- (7) KITTLER R.; DARULA S. - Determination of Sky Types from Global Illuminance. Lighting Res. Technol., 32, 4, 187-193, 2000.
- (8) PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART R. – Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance. Solar Energy. Vol. 44, no. 5, pp 271-289. USA, 1990
- (9) TESSARO, A. R. et al. - Desempenho de um painel fotovoltaico acoplado a um rastreador solar. Anais do 6º Encontro de Energia no Meio Rural, 2006, Campinas, SP, Brasil [online]. [citado 13 Março 2015]. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100046&lng=en&nrm=iso>
- (10) TREGENZA, P.; WATERS, I. – Daylight Coefficients. Lighting Res. & Tech. Vol 15(2) pp.65-71. 1983

DADOS BIOGRÁFICOS

Anderson Claro é graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo (1978), Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo (1991) e Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (1998). Atualmente é Professor Associado IV da Universidade Federal de Santa Catarina e Pesquisador (Simulação em Iluminação Natural e Artificial) do Laboratório de Conforto Ambiental - LabCon - ARQ / CTC / UFSC. Avaliador do Instituto Anísio Teixeira de Pesquisas Educacionais - INEP na área de Arquitetura e Urbanismo.

