

SIMULAÇÃO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO INTEGRADO À EDIFICAÇÃO

Francisco Daniel Lima Silva – fdanielce@yahoo.com.br

Paulo Otto Beyer – paulo.beyer@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Neste trabalho foi utilizado o software EnergyPlus como ferramenta de simulação de um sistema fotovoltaico interligado a uma edificação. Busca-se contribuir com o desenvolvimento de uma metodologia de análise de edificações com energia solar fotovoltaica, através de simulações computacionais que possibilitam análises térmicas e energéticas de edificações com sistemas fotovoltaicos. O trabalho exemplifica duas possibilidades de simulação solar fotovoltaica com o software proposto e estuda a atuação oportuna de sistemas fotovoltaicos com sistemas de ar condicionado, explicitando vantagens da aplicação destes sistemas em edificações. Este estudo serve de base e motivação a aplicações da energia solar fotovoltaica como promissora alternativa energética em edificações, e demonstra a aplicação do software EnergyPlus como poderosa ferramenta de análise também neste setor.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Simulação computacional, EnergyPlus, Refrigeração

1. INTRODUÇÃO

A motivação deste trabalho é contribuir com a demonstração de uma simulação computacional, que serve de base e estímulo à aplicação da energia solar fotovoltaica em edificações como promissora alternativa energética, e também a aplicação do software EnergyPlus como poderosa ferramenta de análise.

Os benefícios, tanto econômicos quanto ecológicos, da aplicação da energia solar fotovoltaica no entorno construído não estão completamente estabelecidos. Existe a necessidade de demonstrar que a integração de instalações solares fotovoltaicas ao entorno construído é muito mais que simplesmente uma boa idéia, ela pode também trazer grandes benefícios ao usuário, ao sistema elétrico nacional e a sociedade (Rüther, 2004).

Tendo em vista a utilização de sistemas de ar condicionado e seu proporcional consumo energético e também o grande potencial da energia solar fotovoltaica como fonte limpa e renovável, um estudo da união oportuna destes dois sistemas se faz pertinente.

Neste trabalho será analisado um ambiente construído, no caso o sétimo e último andar de um prédio, com todas suas zonas internas climatizadas e que diariamente consomem considerável parcela da energia demandada com climatização. Será analisado como a energia solar fotovoltaica poderia contribuir à melhora energética e térmica deste sistema.

Na fig. 1 mostra o ambiente montado na simulação e a rosa dos ventos indica a orientação do prédio em relação aos pontos cardeais.

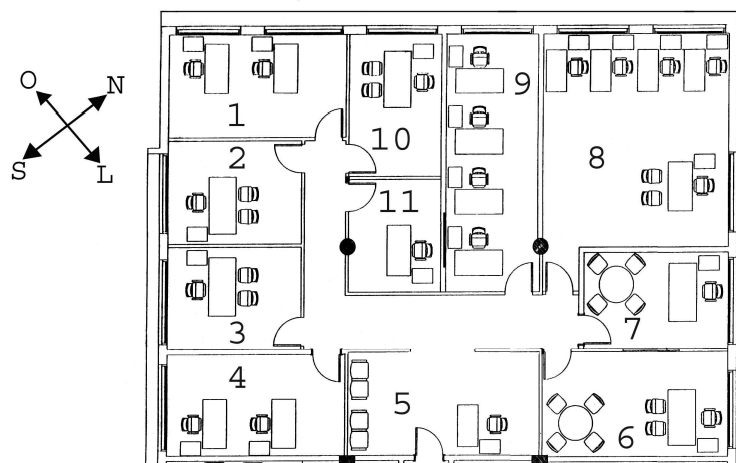


Figura 1 - Planta baixa

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia solar em edificações

A pesquisa de Salamoni et al., 2004, conclui que a conversão solar fotovoltaica integrada à edificação e interligada à rede elétrica pública traz inúmeros benefícios à concessionária, tanto de caráter energético quanto financeiro. Pelo fato de o sistema ser instalado próximo do ponto de consumo, as perdas por transmissão e distribuição ocorrentes na conversão centralizada convencional são eliminadas, fazendo com que aumente a eficiência energética da concessionária. Por mais que, em alguns casos, o sistema não seja auto-suficiente, em termos de quantidade de energia, haveria um benefício tanto para o sistema de transmissão e distribuição, quanto para a diminuição de sobrecarga da rede elétrica.

2.2 Simulação solar em edificações

Existem diversos programas dedicados à simulação de edificações, e um trabalho que realiza uma bateria de ensaios comparativos entre alguns destes programas é o de Crawley et al., 2005, onde é enfatizada esta vasta gama de programas de simulação que foram desenvolvidos e são aperfeiçoados pela comunidade de estudos energéticos de edificações.

Dentre os vinte programas de simulação de edificações comparados em seu trabalho os que têm a possibilidade de simular sistemas de energia solar fotovoltaica são: Bsim, ECOTEC, Energy-10, EnergyPlus, eQUEST, ESP-r, IES<VE> e o TRNSYS.

E dentre estes os que possibilitam o sistema fotovoltaico integrado na construção para remover o calor das camadas da superfície são: BSim, EnergyPlus, eQUEST, ESP e o TRNSYS

3. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consta em comparar a aplicação de dois modelos de representação de arranjos fotovoltaicos disponíveis no *software* EnergyPlus, instalados sobre um ambiente virtual. Este ambiente reproduzido é parte do sétimo e último andar da reitoria da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O ambiente virtual é construído passo a passo, desde a declaração dos materiais como, por exemplo, tijolos, madeiras, vidros, espaços de ar todos com suas devidas propriedades físicas. Cada superfície é construída por camadas de materiais. Na declaração de cada superfície se define com qual tipo de ambiente esta superfície vai trocar calor ou se ela está exposta ao sol e ao vento. As uniões das superfícies formam as zonas térmicas. Também foram declaradas superfícies de sombreamento internas e externas. Equipamentos, luzes, número de usuários foram devidamente declarados com suas respectivas influencias térmicas e respectivos horários de atuação.

Os arranjos foram instalados acima do telhado do ambiente para aproveitar a influencia direta do efeito do sombreamento sobre as áreas condicionadas em estudo.

O *software* disponibiliza três modelos para o cálculo da conversão fotovoltaica, o simples o modelo de um diodo e o Sandia. Neste trabalho foram utilizados o modelo simples e o de um diodo.

3.1 Modelo Simples

O modelo simples tem a intenção de dar um controle completo ao usuário sobre a performance de conversão fotovoltaica. Em vez de uma modelagem da eficiência baseada em condições operacionais, o modelo simples usa as condições de eficiência de conversão arbitradas pelo usuário. A eficiência da conversão solar fotovoltaica pode ser definida por um valor fixo ou pode ter um agendamento pré-definido.

Foram adotados os valores de 12% fixo para eficiência de conversão do arranjo, considerando células de silício monocristalino, 83% de área efetiva de células e 80% de eficiência de conversão do inversor.

Este modelo é utilizado especialmente na fase inicial de desenvolvimento de um projeto, este modelo permite que o usuário faça uma simulação inicial para estimar a produção anual e o pico de potência, sem a necessidade de detalhados coeficientes de performance de um painel fotovoltaico.

Neste modelo também se pode especificar a forma como o painel fotovoltaico interage com a construção, podendo estar destacado, integrado dentro da construção, integrado com um espaço de ar, ou integrado a um trocador de calor [Griffith, et al., 2004]. Os modos integrados exigem uma maior complexidade na declaração de entrada dos dados, pois os arranjos serão vistos como superfícies de transferência de calor e se é necessário declarar até as camadas de cada elemento que compõe o arranjo como o vidro e o tedlar. Neste trabalho a superfície dos arranjos foi declarada como destacada da construção.

3.2 Um diodo

Este modelo emprega equações para o modelo empírico do circuito equivalente da célula solar para prever a voltagem e corrente características de um módulo.

Este circuito demonstrado na fig. 2 consiste numa fonte de corrente contínua que representa a foto-corrente gerada, um diodo que representa a junção PN, um resistor em série que representa a queda de tensão devida à resistência dos materiais nas células e nas ligações das células e um resistor em paralelo que representa fugas de corrente. A intensidade da fonte de corrente é dependente a radiação solar e as características $I \times V$ do diodo são dependentes da temperatura. O resultado de um único circuito equivalente é multiplicado para prever a conversão fotovoltaica de um arranjo (EnergyPlus, 2007).

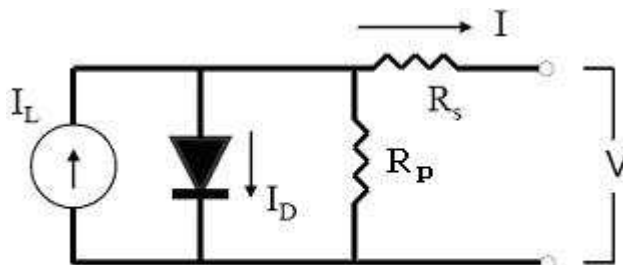


Figura 2 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica

Os dados necessários à simulação com o modelo do diodo foram obtidos das seguintes fontes: dados de placa do painel, manuais técnicos do painel, sugestões do manual do EnergyPlus e de recomendações técnicas do Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

Este modelo é eletricamente mais completo para prever uma conversão fotovoltaica é mais realista que o modelo simples, pois a eficiência dos módulos varia de acordo com a temperatura do mesmo, porém não abre a possibilidade que existe no modelo simples de se declarar fisicamente os módulos de forma detalhada camada por camada.

Neste trabalho a representação dos módulos tanto no modelo simples quanto no modelo de um diodo foi declarada como uma superfície de sombreamento destacada da construção, possibilitando assim avaliar o efeito do sombreamento dos mesmos na edificação.

A tab. 1 apresenta todos os dados de entrada necessários à simulação com este método.

Tabela 1 - Dados de entrada do modelo de um diodo

Campo	Unidade	Objeto	Observações
Nome do arranjo		Arranjo 1	
Tipo do arranjo		Monocristalino	(só informação)
Nome da superfície		Superfície_arranjo_1	
Modelo de temperatura da célula	Adimensional	2	Usando 1 usa as condições NOCT ¹ . Usando 2 vai considerar os dois últimos campos no cálculo.
Número de células em série	Adimensional	72	por painel
Número de módulos em paralelo	Adimensional	5	
Número de módulos em série	Adimensional	8	Tensão de projeto aproximadamente 250VCC
Área ativa	m ²	0,712224	Área ativa do painel
Produto <i>Tau-alpha</i>	Adimensional	0,9	Manual energy
<i>Bandgap</i> do semiconductor	eV	1,12	“
Resistência Shunt	Ohms	400	(Krenzinger, informação verbal ²)
Corrente de curto circuito	A	3,3	placa

¹ Temperatura nominal de operação da célula

² Em visita ao laboratório de energia solar da UFRGS, em março de 2008.

Tabela 1 - Dados de entrada do modelo de um diodo (Continuação)

Campo	Unidade	Objeto	Observações
Tensão de circuito aberto	V	42,35	placa
Temperatura de referência	C	25	padrão
Corrente de curto circuito	A	3,3	placa
Insolação de referência	W/m ²	1000	padrão
Corrente do módulo no ponto de máxima potência	A	2,9	placa
Tensão do módulo no ponto de máxima potência	V	33	placa
Coefficiente de temperatura de Isc (corrente de curto circuito)	A/k	0,017	Catálogo
Coefficiente de temperatura de Voc (tensão de circuito aberto)	V/k	- 0.15984	valor para 72 células
Temperatura ambiente nas condições de ensaio padrão	C	20	catálogo
Temperatura da célula nas condições de ensaio padrão	C	47	“
Insolação de ensaio padrão	W/m ²	800	“
Coefficiente de perda de calor do módulo W/m ² -k	W/m ² -k	30	Manual energy
Capacidade total de calor	J/m ⁻² k	50000	Manual energy

O modelo disponibiliza relatórios da conversão fotovoltaica de forma horária, mensal ou anual. Também se podem pedir relatórios da temperatura da célula, tensão e corrente, corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, eficiência, etc.

4. SIMULAÇÕES E INTERPRETAÇÕES

Instalações solares fotovoltaicas integradas a prédios comerciais e interligadas à rede elétrica pública são exemplos de aplicação ideal destes sistemas, onde os picos de consumo e de conversão fotovoltaica são muitas vezes coincidentes. A conversão solar fotovoltaica atinge valores máximos, principalmente em períodos de calor intenso, onde a demanda energética nestas edificações aumenta de forma acentuada em consequência da utilização intensa de aparelhos de ar-condicionado, devido a que nestes horários, ocorre uma maior incidência solar. Desta forma, alivia o sistema de transmissão e distribuição da concessionária elétrica (Marinoski, et al., 2004).

Um sistema fotovoltaico estabelece um elo funcional oportuno com um sistema de ar condicionado, o que pode ser verificado observando dois pontos característicos.

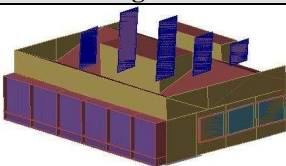
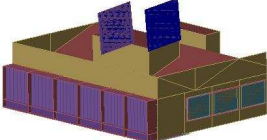
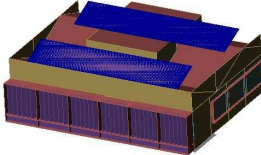
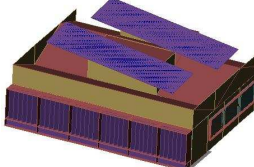
Primeiro, tendo os arranjos fotovoltaicos dispostos na superfície do ambiente, os mesmos proporcionam uma barreira à irradiação incidente a esta superfície, por efeito de sombreamento e proporciona um alívio na carga térmica dos ambientes subjacentes.

Em segundo lugar esta irradiação solar que proporcionaria aquecimento e conseqüente esforço elétrico do sistema de refrigeração, agora incidindo sobre os arranjos fotovoltaicos, será repassada em forma de energia elétrica para suprir o sistema de refrigeração, o que mais uma vez faz o sistema solar fotovoltaico trabalhar em prol do sistema de refrigeração.

A carga térmica em cada sala, entre outros fatores, será diferente de acordo com o efeito causado pelo sombreamento dos arranjos fotovoltaicos no telhado do prédio.

Para a comparação entre os modelos de representação e para se verificar a influência dos arranjos ao ambiente construído foram propostas as seguintes orientações fotovoltaicas, demonstradas na tab. 2, cada uma com um total de 80 painéis dispostos na cobertura do ambiente.

Tabela 2 - Orientações propostas

Orientação	Figura	Descrição
1		Arranjos com 80 painéis dispersos norte Inclinação 20°
2		Arranjos com 80 painéis em dois blocos norte Inclinação 20°
3		Arranjos com 80 painéis Azimute 317,5° Inclinação 20°
4		Arranjos com 80 painéis Azimute 331° Inclinação 20°

A tab. 3 mostra a comparação entre relatórios da edificação sem painéis e as quatro possibilidades propostas. A tab. 3 também mostra o consumo do ar condicionado ao ano, o somatório dos picos de potência de refrigeração e a conversão fotovoltaica anual calculada pelo modelo simples e pelo modelo de um diodo. A projeção das sombras dos arranjos fotovoltaicos varia ao longo do dia de acordo com a orientação solar. O efeito de sombreamento dos painéis na edificação é observado pela redução do consumo do ar condicionado no ano quando comparados com os valores da edificação sem a cobertura de painéis fotovoltaicos.

O somatório dos picos de refrigeração serve para estimar a potência total instalada para o sistema de refrigeração.

Tabela 3 - Efeito de diferentes orientações na carga térmica

Orientação	Descrição	Consumo do ar-condicionado no ano (kWh)	Efeito do sombreamento no consumo do ar-condicionado no ano (kWh)	Somatório dos picos de potência de refrigeração* (W)	Conversão fotovoltaica total anual modelo simples (kWh)	Conversão fotovoltaica total anual modelo diodo (kWh)
	Sem painéis	10237	-	30727	0	-
1	Arranjos com 80 painéis dispersos norte	9920	- 318	29979	9063	10004
2	Arranjos com 80 painéis em dois blocos norte	9942	- 295	30003	9105	10884
3	Com 80 painéis azimute 317,5°	9925	- 313	29827	8912	10652
4	Com 80 painéis Azimute 331°	9939	- 298	30005	8979	10733

* Somatório dos picos de consumo dos dias de projeto

Percebe-se que a orientação proposta 1 ofereceu o maior efeito de sombreamento na edificação, porém a orientação 2 proporcionou a maior conversão fotovoltaica anual.

Analisando os resultados das quatro orientações propostas, percebe-se que a diferença entre os modelos adotados está na conversão fotovoltaica anual, onde o modelo de um diodo eletricamente mais complexo expressa um resultado superior ao modelo simples. Os dois modelos oferecem a possibilidade de avaliar a redução no consumo do ar condicionado por efeito de sombreamento, e pode-se perceber que diferentes posicionamentos dos painéis na cobertura resultam em efeitos de sombreamento diferentes.

Esta avaliação cria a opção de se buscar uma orientação dos arranjos fotovoltaicos que seja personalizada para a edificação em estudo, privilegiando sombrear áreas que apresentem elevada carga térmica.

Por fim pode-se avaliar, dentre as opções propostas, qual melhor orientação para esta edificação com a análise econômica anual do consumo elétrico, pois tanto o efeito do sombreamento quanto a conversão fotovoltaica anual terão um peso na redução desta conta final.

4.1 Sugestão de inversor para o sistema

Os inversores para este sistema devem suportar um arranjo de 40 painéis de aproximadamente 95,7 W e 24 Vcc cada, ligados 8 em série e 5 em paralelo. Algumas características técnicas dos inversores sugeridos estão na tab. 4.

Dois inversores com essas características são necessários para acoplar os 80 painéis propostos.

Tabela 4 - Características do inversor

Inversor	
Tecnologia	Onda senoidal real PWM
Potência máxima da saída alternada	3800W 240V CA
Máxima corrente alternada de saída	16A CA
Máxima tensão CC de entrada	500 Vcc
Máxima corrente de entrada CC	20A CC
Fator de potência	>0.99 na potência nominal

4.2 Vantagens para o sistema elétrico:

- Minimiza perdas de transmissão e distribuição
- Redução no investimento em transmissão e distribuição
- Capacidade de oferecer suporte a pontos críticos da rede de distribuição
- Não necessita área física dedicada, utiliza a área da edificação
- Quando distribuídos estrategicamente apresentam mínima capacidade ociosa de conversão
- Modularidade e curto prazo de instalação
- Conversão de energia quando e onde a demanda está concentrada como no caso da demanda por ar condicionado (Rüther, 2004).

5. CONCLUSÃO

O *software* se mostrou eficaz como ferramenta de simulação de sistemas fotovoltaicos integrados em edificações com a possibilidade do usuário escolher o modelo mais atrativo para a sua análise em questão.

Uma simulação com um grande detalhamento desde a construção do ambiente até a forma de utilização do mesmo pode gerar um perfil térmico e elétrico característico, que vai revelar tanto quais áreas da edificação são termicamente mais afetadas quanto quais os horários de utilização exigem um maior esforço elétrico. De posse destes dados se pode dedicar a instalação fotovoltaica tanto para sombrear melhor determinadas áreas quanto para privilegiar um horário específico com o pico da conversão fotovoltaica.

Esta metodologia que envolve desde uma construção virtual detalhada do ambiente que irá receber os arranjos fotovoltaicos até a experimentação de diversas possibilidades de instalação dos mesmos de forma virtual, possibilita chegar a uma instalação fotovoltaica personalizada a edificação a qual ela se aplica.

REFERÊNCIAS

- Deivis Luis Marinoski, Isabel Tourinho Salamoni, Ricardo Rüther, 18-21 julho 2004. Pré-Dimensionamento de Sistema Solar Fotovoltaico: Estudo de Caso do Edifício Sede do Crea-Sc I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, São Paulo. ISBN 85-89478-08-4. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/linhas_pesquisa/energia_solar/publicacoes/pre_dimensionamento.pdf> Acesso em: fevereiro de 2008.
- Drury B. Crawley, Jon W. Hand, Michael Kummert, Brent T.Griffith, version 1.0 July 2005. Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulations Programs. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/pdfs/contrasting_the_capabilities_of_building_energy_performance_simulation_programs_v1.0.pdf>, Acesso em: abril de 2008.
- EnergyPlus Manual Documentation, October 2007, Version 2.1, <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, acessado em 29 de Novembro de 2007
- Rüther, Ricardo. Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Integrada à Rede Elétrica Pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SIMULATION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM IN A BUILDING

Abstract. *In this work the software EnergyPlus was used as tool of simulation of a photovoltaic system in a building, to contribute with the development of a methodology of analysis buildings with photovoltaic solar energy, through computational simulations that make possible thermal and energy analyses of buildings with photovoltaic systems. The work shows the possibilities of photovoltaic solar simulation with considered software and studies the opportune performance of photovoltaic systems with refrigeration systems, showing advantages of the application of these systems in buildings. This study serves of base and motivation to applications of the photovoltaic solar energy as promising energy alternative in constructions, and demonstrates the application of EnergyPlus software as powerful tool of analysis in this sector.*

Key Words: *Computational simulation, Refrigeration, Solar energy, EnergyPlus*