



**GRUPO II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO-CONVENCIONAIS (GPT)**

**SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO INTEGRADO À ARQUITETURA DE EDIFICAÇÃO  
URBANA E INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA PÚBLICA**

Ricardo Rütther

LABSOLAR / Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC<sup>1</sup>

**RESUMO**

Sem peças móveis, de manutenção mínima, sem produzir ruído ou qualquer tipo de poluição e utilizando a energia praticamente inesgotável do sol, sistemas fotovoltaicos integrados ao entorno construído e interligados à rede elétrica pública vêm crescendo em importância e aplicação em todo o mundo. Edifícios solares fotovoltaicos integram à sua fachada e/ou cobertura painéis solares que geram, de forma descentralizada e junto ao ponto de consumo, energia elétrica pela conversão direta da luz solar e servem ao mesmo tempo como material de revestimento destas fachadas e/ou coberturas. O trabalho descreve uma instalação de 2kWp operando continuamente em Florianópolis/SC desde 1997.

**PALAVRAS-CHAVE**

Solar fotovoltaico, energia solar, edifício solar, geração descentralizada, telhado solar.

**1.0 INTRODUÇÃO**

Desde o início de sua comercialização, a energia elétrica tem sido fornecida a consumidores residenciais e comerciais por meio de geração centralizada e complexos sistemas de transmissão e distribuição. Edifícios solares fotovoltaicos integram à sua fachada e/ou cobertura painéis solares que geram, de forma descentralizada e junto ao ponto de consumo, energia elétrica pela conversão direta da luz solar e servem ao mesmo tempo como material de revestimento destas fachadas e/ou coberturas. Sem peças móveis, de manutenção mínima,

sem produzir ruído ou qualquer tipo de poluição e utilizando a energia praticamente inesgotável do sol, sistemas fotovoltaicos integrados ao entorno construído e interligados à rede elétrica pública vêm crescendo em importância e aplicação em todo o mundo, com programas nacionais de incentivo em vários países [1]. Em termos relativos, estas iniciativas vêm levando a grandes incrementos anuais na produção de painéis fotovoltaicos (a indústria cresceu 47% em 1997 [1]); em termos absolutos, no entanto, a penetração da energia solar fotovoltaica permanece diminuta. Um dos mais sérios impedimentos a uma maior penetração desta tecnologia para a geração de potência elétrica são os elevados custos envolvidos; o desconhecimento do potencial da tecnologia fotovoltaica é outra das principais causas de sua limitada penetração até o momento, principalmente no hemisfério sul em países com elevada incidência solar como o Brasil. Sistemas solares fotovoltaicos interligados à rede elétrica pública, integrados a edificações urbanas e utilizando as novas tecnologias de filmes finos são uma aplicação ideal da energia solar fotovoltaica, pois a conexão à rede elimina os altos custos de sistemas de acumulação (baterias) e o superdimensionamento necessários em sistemas isolados; a integração ao entorno construído pode reduzir custos de instalação e materiais, além de minimizar perdas por transmissão e distribuição; e as novas tecnologias fotovoltaicas de filmes finos (películas delgadas) têm o potencial de redução de custos a níveis competitivos com formas convencionais de geração elétrica se produzidas em grande escala [2]. No caso particular da tecnologia do silício amorfo (a-Si), utilizada neste trabalho e pouco conhecida no Brasil, as características peculiares deste semiconductor [3] o tornam uma opção interessante para aplicações sob temperaturas elevadas como é o caso de

<sup>1</sup> LABSOLAR – Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Caixa Postal 476, Florianópolis – S.C. 88040-900 BRASIL  
Tel.: (048) 234 2161 FAX: (048) 234 1519 e-mail: ruther@mbox1.ufsc.br

sistemas integrados ao entorno construído operando sob climas quentes e ensolarados [4,5]. Edifícios fotovoltaicos se justificam visto que mais de 40% do consumo de energia ocorre no entorno construído [6] (nos próximos 50 anos, 70% da população do planeta viverá em ambiente urbano) e porque tanto o recurso solar como a demanda energética apresentam caráter distribuído.

Alguns exemplos de projetos de implementação desta tecnologia no mundo são o *1000 Roofs Program* Alemão, recentemente estendido para 100 mil telhados, o programa Japonês de 70mil telhados solares, o *One Million Solar Roofs Initiative* anunciado pelo presidente americano em 1997 e o recente anúncio da Comunidade Econômica Européia de outro milhão de telhados solares na Europa. A viabilidade econômica da energia solar é hoje uma questão muito menos tecnológica do que de volume de produção, pois esta tecnologia se depara com o problema circular de ser ainda pouco utilizada por apresentar custos elevados que por sua vez se devem às pequenas escalas de produção atuais, que são pequenas devido ao custo elevado dos sistemas fotovoltaicos. Nos próximos anos, no entanto, não se espera reduções de custo para nenhuma das tecnologias de geração elétrica convencionais com as quais sistemas fotovoltaicos possam vir a competir, pelo contrário. Assim, para a geração fotovoltaica se esperam reduções de custo acentuadas nos próximos 20 anos, ao mesmo tempo em que para a competição se esperam aumentos nos custos [7].

## 2.0 VANTAGENS DOS EDIFÍCIOS SOLARES

Algumas vantagens dos edifícios solares fotovoltaicos incluem:

- \*A energia é gerada junto ao ponto de consumo e na tensão de consumo (perdas na transmissão e distribuição são eliminadas);
- \*Usina geradora que não ocupa espaço extra; está integrada a telhados/fachadas;
- \*Coincidência entre geração e consumo em casos específicos (demanda por ar-condicionados coincide com oferta solar);
- \*Redução da exigência (superaquecimento) sobre transformadores; (adiamento de *upgrading* de linha, aumento de vida útil de equipamento, etc.);
- \*Planejamento de expansão: Pode ser considerado um *just-in-time* de adição de capacidade (curtos prazos de instalação e posta-em-marcha);
- \*Capital investido começa a gerar energia (e retorno \$) quase que imediatamente;

\*Modularidade: Aliada aos curtos prazos de instalação, elimina necessidade de capacidade instalada ociosa. Inovações tecnológicas podem ser prontamente utilizadas, ao contrário do que ocorre com grandes usinas centralizadas, onde, devido aos longos prazos de instalação, a tecnologia utilizada pode estar defasada quando a usina entra em operação;

\*Energia limpa, renovável, silenciosa;

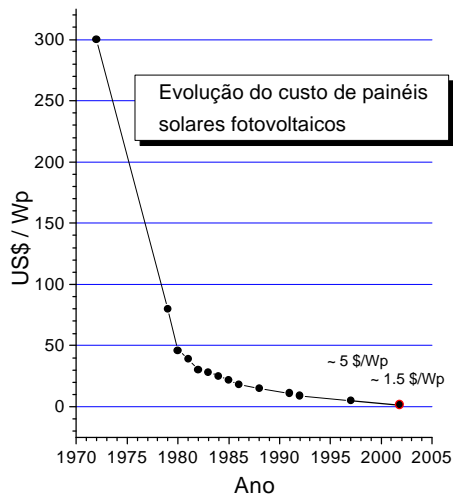
\*Substituição de materiais de revestimento e recobrimento, com a respectiva redução de custo da instalação solar.

## 3.0 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS E POTENCIAL DE REDUÇÃO DE CUSTOS

Painéis solares fotovoltaicos baseados na tecnologia tradicional do silício cristalino (tanto na forma monocristalina m-Si, como na forma policristalina p-Si, doravante denominados genericamente por c-Si), sofreram uma redução de custos apreciável desde suas primeiras aplicações no fornecimento de energia elétrica para satélites. A figura 1 mostra a evolução do custo de painéis solares fotovoltaicos em US\$/Wp [1,8]. Tecnologias mais recentes apresentam hoje custos mais baixos em comparação ao c-Si e seu potencial de redução de custos a curto prazo é tal que despontam agora como alternativa economicamente viável na geração de potência elétrica no futuro próximo.

Dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem decrescente de maturidade e utilização o silício cristalino c-Si; o silício amorfo hidrogenado a-Si:H ou simplesmente a-Si; o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio CuInSe<sub>2</sub> ou CIS. Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, In, Cd), ou ambos, o que inicialmente se mostrou um obstáculo considerável ao uso mais intensivo destas tecnologias. Com relação à toxicidade, convém mencionar que lâmpadas fluorescentes (contêm mercúrio) e telas de computador (contêm chumbo), são classificados da mesma maneira, devendo ser descartados de forma apropriada, o que também deverá ocorrer com painéis solares de CdTe e CIS. O silício, por outro lado, é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25 % da crosta terrestre é silício [9]) e é 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima [10].

FIGURA 1: Evolução do custo de painéis solares fotovoltaicos no mercado internacional e projeção do custo para o ano 2002, assumindo o cenário atual de crescimento e redução de custos [1].



O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro ~10cm) relativamente espessas (300-400micra), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos. As demais tecnologias se baseiam em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1micra) de material semiconductor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm. Filmes finos para aplicações fotovoltaicas estão sendo desenvolvidos para a geração de potência elétrica por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, das pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção, do elevado grau de automação dos processos de produção (grande capacidade de produção) e seu baixo custo de capital [3]. A eficiência do processo de fotossíntese, no qual toda a vida em nosso planeta está baseada, é da ordem de 0.2% [11] em média. Em termos de eficiência de conversão fotovoltaica, a tecnologia do c-Si é, entre as tecnologias utilizadas em aplicações, a que apresenta a maior eficiência, ao redor de 15% para painéis disponíveis no mercado. As tecnologias de filmes finos, sendo inerentemente menos eficientes e também por estarem ainda na infância de seu desenvolvimento, têm no momento um rendimento ao redor de 8% para painéis comerciais, o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos painéis de c-Si. Apesar de que painéis solares de filmes finos têm já hoje um preço menor por Wp (\$/potência, ou \$/energia) que os de c-Si, a área ocupada para uma determinada potência instalada deve ser levada em consideração na análise econômica quando da opção por uma ou outra tecnologia. As principais características de cada uma destas tecnologias será abordada a seguir.

### 3.1. Silício cristalino (c-Si)

A mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que ainda hoje apresenta maior escala de produção a nível comercial, o c-Si se consolidou no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema robustez e confiabilidade. O custo de produção destes painéis solares é, no entanto, bastante elevado como mostraremos a seguir, e as possibilidades de reduzi-los já foram praticamente

esgotadas, razão pela qual esta tecnologia é desconsiderada por muitos analistas como séria competidora com formas convencionais de geração de potência em larga escala. O c-Si segue sendo, no entanto, o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres em qualquer escala.

No caso de células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si), o monocristal é “crescido” a partir de um banho de silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora). Sendo que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1400°C, o consumo de energia neste processo é extremamente intenso e o chamado “energy pay-back time” (tempo necessário para que o painel gere energia equivalente à utilizada em sua fabricação) é superior a três anos. Etapas complementares ao crescimento do monocristal envolvem usinagem do tarugo; corte de lâminas por serras diamantadas; lapidação, ataque químico e polimento destas lâminas (processos estes todos em que ocorrem consideráveis perdas de material); processos de difusão/dopagem, deposição da máscara condutora da eletricidade gerada e finalmente a interconexão de células em série para a obtenção do painel fotovoltaico.

O recorde de eficiência para células de c-Si individuais em laboratório é atualmente de 24% [12], bastante próximo do máximo rendimento teórico. Os melhores painéis disponíveis no mercado porém, têm eficiência ao redor de 15% (diferenças entre a eficiência da melhor célula de laboratório e painéis comerciais incluem perdas de interconexão entre células no painel, área ativa do painel e rendimento do processo produtivo).

O silício policristalino (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, tendo também um mais baixo custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do c-Si e o processamento mais simples. O material de partida é o mesmo que para o m-Si, que é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta num cristal com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica. Os processamentos posteriores até se obter um painel fotovoltaico são semelhantes aos utilizados no caso do m-Si. Em termos de custo final por potência (\$/Wp), no entanto, a diferença entre p-Si e c-Si é pouco significativa.

### 3.2. Silício amorfo hidrogenado (a-Si)

No início dos anos 80 o a-Si era visto como a única tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas) comercialmente viável. Tendo sido pela primeira vez empregado em células solares em meados da

década de 70, imediatamente despontou como tecnologia ideal para aplicação em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo elétrico é baixo. Por apresentar uma resposta espectral mais voltada para o azul, tais células se mostraram extremamente eficientes sob iluminação artificial (principalmente sob lâmpadas fluorescentes), com eficiência nestes casos superior à do c-Si. Os processos de produção de a-Si ocorrem a temperaturas relativamente baixas ( $< 300^{\circ}\text{C}$ ), em processos a plasma, o que possibilita que estes filmes finos sejam depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Desta forma, foram desenvolvidos painéis solares hoje disponíveis no mercado que são flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes, com superfícies curvas, que estão ampliando o mercado fotovoltaico por sua maior versatilidade. Por sua aparência estética mais atraente, o a-Si tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil.

O recorde de eficiência em células de a-Si individuais em laboratório é da ordem de 15% e os melhores painéis de a-Si disponíveis no mercado estão na faixa de 8-9%. Em algumas aplicações arquitetônicas como material de revestimento é que o a-Si leva grande vantagem sobre o c-Si, pois o custo por  $\text{m}^2$ , e não o custo por  $\text{Wp}$ , é a grandeza de interesse e neste aspecto já hoje o a-Si tem custo inferior à metade do custo do c-Si. O “energy pay-back time” para o a-Si é outro atrativo desta tecnologia e está em torno de um ano (devido principalmente à energia utilizada na fabricação do substrato de vidro, ou aço inox), consideravelmente menor que o do c-Si.

### 3.3. Telureto de cádmio (CdTe)

O mais recente competidor no mercado fotovoltaico para geração de potência é o CdTe, também na forma de filmes finos. Para aplicações em calculadoras este material já vem sendo usado há quase uma década, mas nas assim chamadas aplicações terrestres, somente agora é que começam a ser comercializados painéis solares de grandes áreas (o maior disponível no momento tem área de  $\sim 0,67 \text{ m}^2$ ). Estes painéis, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro, também apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si e as empresas envolvidas com esta tecnologia vêm buscando as aplicações arquitetônicas como um nicho de mercado enquanto desenvolvem seu produto, ampliam seus volumes de produção e reduzem custos. Assim como no caso do a-Si, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala e a tecnologia tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de potência elétrica. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos

que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção. Com o recorde de eficiência de células individuais de pequenas áreas em laboratório ao redor de 16%, painéis solares encontrados no mercado apresentam eficiência entre 7 e 9%.

### 3.4. Disseleneto de cobre e índio (CIS)

Outro sério competidor no mercado fotovoltaico no futuro próximo são os compostos baseados no disseleneto de cobre e índio ( $\text{CuInSe}_2$ , ou simplesmente CIS), principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas. Células de CIS de pequenas áreas produzidas em laboratório apresentam no momento eficiências em torno dos 18%. Painéis de grande área foram recentemente lançados no mercado, com eficiências ao redor de 9 – 10%. Painéis solares de CIS apresentam, como o a-Si e o CdTe, uma ótima aparência estética, encontrando aplicações arquitetônicas diversas. Assim como no caso do CdTe, a pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção.

## 4.0 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E RESULTADOS

O primeiro sistema solar fotovoltaico no Brasil a ser integrado à arquitetura de uma edificação urbana e interligado à rede elétrica pública foi instalado na Universidade Federal de Santa Catarina em Setembro de 1997 com o objetivo de demonstrar esta tecnologia no Brasil. Esta planta geradora está conectada em paralelo com a rede convencional e foi projetada para operar sem necessidade de manutenção. O sistema monofásico é completa e continuamente monitorado; a potência instalada de 2 kWp foi projetada para, em regime anual, atender à demanda energética de uma família de quatro pessoas. Desta forma, quando os painéis solares geram mais energia do que a necessária para atender à instalação consumidora, o excesso é injetado na rede elétrica pública (o relógio medidor, que é bidirecional, gira ao contrário e o consumidor acumula um crédito energético). Por outro lado, quando o sistema fotovoltaico gera menos energia do que o necessário para atender à instalação consumidora (como por exemplo à noite ou em períodos de céu encoberto), então busca na rede elétrica pública o complemento. O sistema foi integrado à fachada superior norte de uma edificação de três pavimentos que abriga o LABOLAR do Departamento de Engenharia Mecânica/UFSC em Florianópolis. O sistema, com superfície total de  $\sim 40 \text{ m}^2$ , foi montado com uma inclinação igual à latitude local ( $27^{\circ}$ ) e orientado para o norte geográfico a fim de maximizar a incidência solar anual.

O rendimento de painéis fotovoltaicos é proporcional aos níveis de radiação incidentes e Florianópolis se caracteriza por um dos mais baixos níveis de radiação solar dentre as capitais brasileiras. A instalação completou um ano de operação em setembro de 1998 e apesar da relativamente baixa insolação local gerou no período uma quantidade de energia superior a 2.5 MWh, o suficiente para abastecer uma residência urbana média ao longo de um ano. O sistema operou com manutenção zero, demonstrando a confiabilidade desta forma descentralizada de geração elétrica. A instalação solar fotovoltaica é mostrada esquematicamente no diagrama da figura 2 e compreende, além dos painéis solares, um sistema inversor CC/CA, medidores de irradiação solar e temperatura e um sistema de aquisição de dados com computador dedicado. A planta fotovoltaica, que pode ser visualizada nas figuras 3 e 4, utiliza 54 painéis opacos e 14 painéis semitransparentes de a-Si:H de junção dupla, com uma potência nominal total de  $2078W_p$  (CC) sob condições standard. A utilização de ambos painéis solares do tipo opaco e semitransparente visa chamar a atenção às características arquitetônicas e estéticas de ambos as versões. A instrumentação para medição da radiação solar inclui solarímetros e piranômetros montados tanto horizontalmente quanto com a inclinação dos painéis solares e se utiliza em parte da completa e sofisticada instalação solarimétrica do LABSOLAR. As medidas de temperatura incluem a temperatura do painel solar e do ambiente. O monitoramento da energia gerada inclui potência CC, potência CA efetiva e energia total gerada.

## 5.0 CONCLUSÕES

O sistema elétrico brasileiro se encaminha para a condição de mercado livre, com a recente introdução da figura do produtor independente de energia, do autoprodutor e do consumidor livre. A geração descentralizada e junto ao ponto de consumo proporcionada por sistemas solares fotovoltaicos integrados a edificações urbanas e interligados à rede elétrica pública como demonstrado neste trabalho é uma alternativa tecnicamente atraente e de grande potencial competitivo no futuro próximo. As novas tecnologias fotovoltaicas que utilizam células solares de filmes finos apresentam grande potencial de redução de custos, a níveis competitivos com formas convencionais de geração de potência elétrica. Associado ao atrativo de sua

característica modular e dos curtos prazos de instalação e posta em marcha, estes fatores fazem da energia solar fotovoltaica uma alternativa interessante na geração de potência elétrica. No Japão, nos EUA e na Europa instalações interligadas à rede elétrica, principalmente as do tipo integrada a prédio urbano (telhado ou fachada), estão sendo vistas como uma fonte alternativa de geração de energia economicamente viável para o futuro próximo e os investimentos destinados a tais projetos vêm crescendo ano a ano.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação Alexander von Humboldt pelo apoio recebido para a realização deste projeto (Referat I, V – 8151/96074 – 1024102).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MAYCOCK, P.D., PV News, vol. 16 (1997).
- [2] OVSHINSKY, S.R., Solar Energy Materials and Solar Cells **32** (1994) 443.
- [3] RÜTHER, R., LIVINGSTONE, J., 31<sup>st</sup> ANZSES Solar Energy Conference, Perth – Australia (1993) p. 548.
- [4] RÜTHER, R., LIVINGSTONE, J., Solar Energy Materials and Solar Cells **36** (1994) 29.
- [5] RÜTHER, R., KLEISS, G., EuroSun '96, Freiburg – Germany (1996) p. 862.
- [6] LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F.O.R. Eficiência energética na arquitetura, PW Editores, 1997.
- [7] CALLAGHAN, W.T., Expanding photovoltaic energy usage: the competitive energy environment, 10<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Portugal (1991) p.830.
- [8] KUWANO, Y. Correspondência pessoal, Sanyo Solar Industries 1992.
- [9] HAMMOND, C.R. The elements, Handbook of chemistry and physics, Ed. LIDE, D.R., CRC Press, Ann Arbour, USA, 1992, p.4-1.
- [10] SHAH, A., MEIER, J, TSCHARNER, R, WYRSCH, N. Photovoltaic power generation, Plasma physics & controlled fusion, vol. 37, 1992, p. 1837.
- [11] BORGSTROM, G. Harvesting the earth, Abelard-Schulman, New York, 1973, p. 58.
- [12] GREEN, M., EMERY, K. BÜCHER, K. KING, K. IGARI, S., Solar cell efficiency tables (version 11), Progress in photovoltaics, **6** (1998) 35.

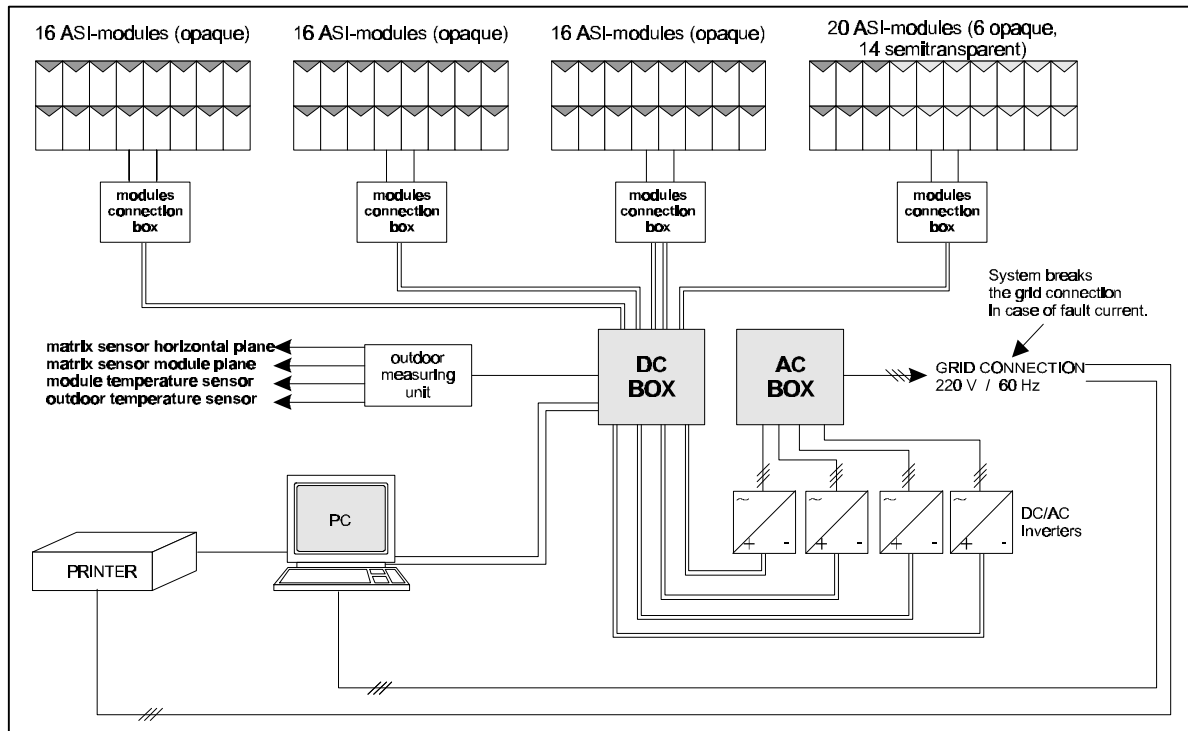


FIGURA 2: Diagrama esquemático da instalação elétrica do sistema solar fotovoltaico de 2kWp. Com superfície total de 40m<sup>2</sup> em um plano único inclinado de 27 graus e orientado para o norte geográfico, o sistema pode ser visto aqui como quatro subsistemas independentes e conectados em paralelo. Cada subsistema de 500Wp está conectado a um inversor de 650W. O sistema é integralmente monitorado, coletando dados continuamente a cada 4 minutos.



FIGURA 3: Vista do sistema solar fotovoltaico de 2kWp integrado ao prédio do LABSOLAR/UFSC e interligado à rede elétrica pública.



FIGURA 4: Vista da instalação fotovoltaica de 2kWp utilizando painéis solares de filmes finos de a-Si. A instalação de 40m<sup>2</sup> está voltada para o norte geográfico, com inclinação igual à latitude local (27°).