

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

Arno Krenzinger - arno@mecanica.ufrgs.br

César W. M. Prieb - cprieb@ufrgs.br

João Batista Dias - jbdias@mecanica.ufrgs.br

Yeddo Braga Blauth - yeddo@iee.ufrgs.br

Wagner Vieira Silvério – wagnersilverio@hotmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Luis Horácio Vera - lhvera@yahoo.com.ar

Universidad Nacional de Nordeste, Departamento de Ingeniería Mecánica e PROMEC/UFRGS

Felipe Hernández García - fhdez99@yahoo.com

Centro de Investigaciones de Energía Solar, Santiago de Cuba

3.6 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Resumo: Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de energia elétrica têm apresentado uma forte expansão recentemente. Têm a seu favor o uso de uma energia limpa, renovável, confiável e com geração distribuída, contrastando com formas mais poluentes de gerar eletricidade. A eletricidade proveniente de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em instalações urbanas é, em diversos países desenvolvidos, adquirida pelas concessionárias por um preço mais alto que a eletricidade convencional. No Brasil ainda não há regulamentação para comercialização desta energia, mas espera-se que isto ocorra em um futuro próximo. Há então necessidade de, urgentemente, conhecer com profundidade o comportamento destes sistemas e seu impacto sobre a própria rede. Para tanto está em desenvolvimento no Laboratório de Energia Solar da UFRGS um programa de computador que simula detalhadamente a operação de sistemas desta natureza. O desenvolvimento do programa faz parte de um projeto financiado pela FINEP e pela ELETROBRÁS, envolvendo ensaios de componentes e criação de modelos matemáticos para representar os mesmos. Estão sendo preparadas bancadas para ensaios de módulos fotovoltaicos, monitoramento de arranjos fotovoltaicos completos, ensaios de inversores conectados à rede e ensaios térmicos. Este trabalho descreve as atividades experimentais e os modelos matemáticos que estão sendo utilizados neste projeto, apresentando resultados parciais e a proposta do programa de simulação.

Palavras-chave: Energia Solar, Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede, Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Dentre diversas formas de obter eletricidade, aquelas que empregam tecnologias limpas tendem a se destacar. No Brasil a hidroelétrica domina, mas a História já mostrou a importância de manter um bom grau de diversificação. A energia eólica decola, apoiada em uma legislação que garante sua compra e, com isto, o retorno dos investimentos. A energia solar fotovoltaica será a próxima. Isto é inevitável, pois no Brasil são seguidos os passos percorridos em países mais adiantados.

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de eletricidade têm aumentado vertiginosamente sua participação em muitos países. Este fato ainda não é muito estrondoso porque a participação da energia solar fotovoltaica na matriz mundial de eletricidade é tão pequena que esta alta taxa de crescimento ainda não perturba as energias convencionais. Mas, seguramente, é momento para os técnicos brasileiros prepararem-se para receber a companhia de mais esta forma de conversão de energia. Conhecer com profundidade o funcionamento dos sistemas só pode trazer benefícios para o futuro acompanhamento das instalações. Este conhecimento pode ser obtido

através da análise de alguns protótipos que já existem, através de simulação computacional ou ainda através da combinação destas duas atividades.

A simulação computacional pode substituir muitos anos de experimentos por apenas poucas horas de processamento, desde que seja implementada de forma a incluir um modelo matemático representando cada componente adequadamente. Supondo que se disponha de um procedimento de cálculo que seja capaz de reproduzir detalhadamente o comportamento dos componentes do sistema físico, e que os resultados deste procedimento de cálculo estejam em concordância com os resultados experimentais medidos em diferentes condições, é possível repetir este procedimento para seqüências de condições climáticas e obter resultados refinados, com a mesma confiabilidade de resultados medidos.

Para garantir que um processo computacional com tal envolvimento seja efetivamente representante de um processo físico verdadeiro, é necessário validar o software de simulação com resultados experimentais. Não apenas resultados experimentais de características de cada componente, mas resultados de sistemas completos operando em condições reais, como é o caso do sistema da UFRGS (Krenzinger et al, 2004). Quando nesta comparação as diferenças entre os dados simulados e os dados medidos estiverem na mesma ordem de grandeza das incertezas experimentais, se saberá que o procedimento chegou à sua melhor qualidade.

Pensando em desenvolver um sistema computacional de simulação para instalações fotovoltaicas conectadas à rede de distribuição, e também atendendo à demanda de um edital do CTENERG/FINEP, o Laboratório de Energia Solar da UFRGS (LES) propôs um projeto de pesquisa sob o título "*Desenvolvimento Dinâmico Otimizado de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição*", o qual está atualmente em desenvolvimento.

O objetivo do projeto citado é desenvolver um programa computacional que simule em detalhes o comportamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição. O programa conterá modelos computacionais de cada componente, iniciando pela célula fotovoltaica e concluindo na conexão do sistema interligado, e poderá prever a qualidade da energia resultante, o desempenho da instalação e seu impacto na rede de distribuição. O programa permitirá o monitoramento de todas as grandezas envolvidas no processo de geração e poderá ser utilizado tanto para planejamento futuro quanto para análise de acompanhamento de uma instalação real já existente. O programa deverá incorporar um banco de dados com as características de cada um dos equipamentos que compõem o sistema, o qual poderá ser atualizado futuramente com a introdução de novas tecnologias ou novas características.

O presente trabalho descreve as metodologias propostas para este projeto, a abordagem computacional, os modelos a serem empregados e os resultados preliminares já obtidos.

2. PROGRAMA FVCONNECT

O programa de computador em desenvolvimento irá receber o nome FVCONNECT atendendo ao fato de simular um sistema FotoVoltaico COneCtado à rede. O desenvolvimento de um programa no porte pretendido envolve muitos anos de trabalho, mas será possível no escopo bianual do projeto porque várias das rotinas necessárias já estavam desenvolvidas no LES. O pacote de programas SOLARCAD vem sendo desenvolvido há vários anos no LES com apoio do CNPq, contando com uma coleção de *softwares* para o dimensionamento de sistemas de conversão de energia solar. Entre estes programas, o CREARRAY, descrito por Krenzinger (2001), o PVWIND descrito por García (2004) e o PVSIZE descrito por Vera (2004) envolvem as principais sub-rotinas que estão sendo aproveitadas no desenvolvimento do FVCONNECT.

A finalidade básica do programa FVCONNECT é realizar uma simulação do comportamento elétrico de cada componente de um sistema conectado a rede ao longo de um período pré-determinado pelo usuário, que pode se estender desde uma hora até alguns anos. A simulação deverá produzir dados de temperatura dos componentes, corrente elétrica e tensão em vários pontos do circuito e quantidade e qualidade da energia entregue.

2.1 Dados Necessários para o Funcionamento do FVCONECT

Para poder simular um equipamento deve-se partir do fato de ter conhecidos os parâmetros construtivos do equipamento. Isto inclui um grande número de dados sobre cada um dos componentes de um sistema fotovoltaico que estarão reunidos em um banco de dados, o qual deverá ser preparado ao longo do projeto. Muitos dos dados necessários são fornecidos de forma bastante confiável pelo fabricante do equipamento, e serão apenas aferidos. Outros devem ser medidos através de ensaios específicos. Na falta de alguns dados, a simulação pode ficar com sua precisão prejudicada, mas ainda é melhor ter resultados de uma simulação com alguns dos parâmetros aproximados do que desistir de realizar a simulação. Quase sempre há valores típicos para os parâmetros desconhecidos, de forma que o prejuízo não seja muito elevado na falta de algum deles.

Os dados que devem estar registrados no início da simulação são:

Dados meteorológicos e de localização. Se a simulação for realizada sobre uma base concreta de dados existentes, seria interessante ter dados em seqüências horárias (ou até em intervalos menores se houver disponibilidade) de temperatura ambiente, velocidade de vento e radiação solar. Na falta destes dados, o programa utiliza um sintetizador de dados que necessita apenas a localização geográfica (latitude e longitude), mas ainda assim seriam úteis dados médios sobre temperatura (média, mínima e máxima) e radiação solar. Além disto é necessário conhecer o perfil do horizonte local e de eventuais bloqueios da radiação, para calcular os efeitos de sombreamento.

Dados do módulo fotovoltaico. Tecnologia de fabricação da célula, dimensões do módulo, principais materiais construtivos do módulo e suas propriedades térmicas, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e tensão e corrente de máxima potência nas condições padrão, número de células em série e número de células em paralelo, fator de ocupação das células, coeficientes de variação da tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito e potência máxima com a temperatura, resistência série, resistência paralela, fator de idealidade, coeficientes de variação da temperatura com a radiação solar e vento.

Dados do inversor. Curva de eficiência em relação ao carregamento, distorção harmônica total, eficiência do seguidor de máxima potência, potência nominal e máxima, máxima corrente de operação, mínima e máxima tensão de corrente contínua na entrada, variação da eficiência com a tensão CC de entrada, frequência e tolerância à frequência na saída, máxima temperatura de operação, fator de dissipação de calor, temperaturas mínima e máxima de operação.

Dados da rede. Tensão no ponto de conexão, frequência, tolerância de tensão e frequência, impedância, composição harmônica, número de fases disponíveis.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA UTILIZADA

3.1 Modelagem de Variáveis Atmosféricas

Quando o único objetivo do cálculo é obter o dimensionamento sem levar em conta o comportamento da instalação, os métodos que utilizam valores médios horários de radiação podem ser considerados adequados. Porém, ao pretender analisar o comportamento da instalação através da simulação do sistema por computador, torna-se necessário que os dados meteorológicos, em especial os dados de radiação solar, sejam compatíveis com seqüências de dados que possam ocorrer na realidade.

Existem muitos métodos para estimar a radiação solar média na superfície terrestre, tais como as correlações entre número diário de horas de brilho de sol e radiação solar, modelos estatísticos baseados em satélite e os métodos baseados em modelos físicos. Entretanto todos estes se referem a dados médios e não a seqüências de radiação.

Uma possibilidade para analisar as variações efetivas das condições meteorológicas é utilizar o que se conhece como Ano Típico Meteorológico (TMY) que armazena um ano de dados em intervalos horários escolhidos entre os que foram medidos como representantes da média dos dados medidos em muitos anos para cada mês.

Ainda que a utilização dos dados TMY seja muito boa quando há dados disponíveis, existem ainda duas limitações: são poucos os lugares que dispõem desta informação e os dados, ao representar as médias de muitos anos, não levam em conta os meses que apresentem más condições meteorológicas.

Para delimitar o problema da falta de seqüências de dados de radiação solar, os pesquisadores têm procurado gerar sinteticamente estes dados para que apresentem semelhantes características estatísticas (média, autocorrelação, etc.) com as séries observadas.

Radiação Solar Diária Seqüencial. Neste trabalho utilizam-se modelos estocásticos para sintetização de dados. Para gerar dados de radiação solar diária seqüencial o modelo selecionado é baseado nas Matrizes de Transição de Markov (MTM), que consideram a correlação de primeira ordem entre dados medidos depois de classificar os dados segundo o índice de transparência médio mensal. Este método foi proposto por Aguiar et al. (1988) e analisado em comparação com outros métodos por Krenzinger e Macagnan (1988) e Macagnan (1989). O método MTM possibilita a sintetização de seqüências de radiação diária tendo como único dado de entrada a série de 12 valores médios mensais de radiação. As matrizes produzidas por Macagnan naquela época utilizavam dados de poucas cidades e não tão confiáveis como os que são disponíveis hoje. Uma recente comparação entre as seqüências sintetizadas e dados reais (Alves, 2006) mostra resultados muito bons para diversas localidades mas também resultados piores para outras localidades, ensejando que seja o momento para reconstrução das matrizes para aplicações futuras.

Radiação Solar Horária Seqüencial. Collares-Pereira e Rabl (1979) propuseram equações universalmente adotadas para calcular o valor médio estimado da radiação incidente em cada hora a partir da radiação diária. A partir desta distribuição média foi proposto (Krenzinger, 1994) o modelo utilizado neste projeto que soma uma componente aleatória cuja amplitude é modulada pelo valor do índice de transparência atmosférico diário. O resultado já foi comprovado e tem sido utilizado no LES-UFRGS desde então. A Eq. (1) apresenta a síntese do modelo, onde kt é o índice horário de transparência da atmosfera, ktm é o correspondente valor de kt obtido das equações do valor médio da radiação horária, RND é um número aleatório de distribuição uniforme entre 0 e 1, e Kt é o índice diário de transparência da atmosfera.

$$kt = ktm + 2 (RND - 0,5) [2 (Kt - 0.4)^2 - 0.25] \quad (1)$$

A combinação dos modelos de radiação diária e de radiação horária permite que, através de 12 dados de médias mensais de radiação solar, seja produzida uma seqüência anual de dados de radiação horária. A transformação dos dados de radiação horizontal em radiação inclinada é feita com a utilização do modelo de Perez.

Modelagem da Temperatura Ambiente. Existem muitos modelos propostos em diferentes literaturas para sintetizar dados de temperatura. Alguns destes modelos utilizam dados históricos de séries de temperatura observados em uma localidade e o resultado de estas observações serve para gerar seqüências futuras de temperaturas.

No projeto descrito neste trabalho está sendo utilizado o modelo proposto por Krenzinger e Farenzena, 2003. A metodologia para gerar os dados sintetizados de temperatura ambiente começa com valores de radiação solar horária gerada conforme apresentado previamente. Estes dados de radiação solar são necessários como pré-requisitos porque foi considerada uma relação entre a irradiância e a temperatura ambiente.

Os dados necessários para esta sintetização são: latitude do local, temperatura média mensal, temperatura média das máximas mensais, temperatura média das mínimas mensais, máxima irradiância solar diária e duração do dia. As correlações entre estes dados foram determinadas através dos dados de nove cidades brasileiras. O algoritmo completo é muito longo para apresentação neste trabalho, estando descrito na referência citada. Os resultados foram amplamente testados dentro de bases estatísticas e recentemente foi corroborado (Alves, 2006) o adequado funcionamento dos modelos empregados para todo o território brasileiro.

3.2 Modelagem das Células e Módulos Fotovoltaicos

O comportamento de cada célula fotovoltaica é calculado com o modelo de um diodo, através de um circuito equivalente que envolve uma fonte de corrente simulando a corrente fotogerada I_L , dois resistores para simular a resistência série e a resistência paralela e um diodo para simular a junção PN. A Eq. (2) apresenta este modelo:

$$i = i_L - i_0 \left[\exp \frac{e(v + i \cdot r_s)}{mkT_C} - 1 \right] - \frac{v + i \cdot r_s}{r_p} \quad (2)$$

onde i_L é a corrente fotogerada da célula, i_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, e é a carga elétrica do elétron, v é a tensão nos terminais da célula, m é o fator de idealidade do diodo, k é a constante de Boltzmann, T_C é a temperatura de junção da célula, r_s é a resistência série da célula, r_p é a resistência paralela da célula. A partir deste modelo, estabelecendo o valor dos cinco parâmetros (r_s , r_p , i_0 , i_L e m) obtém-se a curva I - V completa.

A equação característica de uma célula fotovoltaica pode ser adaptada para módulos fotovoltaicos, considerando que são associações de células, resultando na Eq. (3):

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{(V + IR_s)}{V_T} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3)$$

onde I e V são corrente e tensão do módulo, R_s e R_p representam a resistência série e paralela correspondente ao módulo fotovoltaico, respectivamente, $V_T = N_s mkT_C / e$ onde N_s é o número de células em série. Da mesma forma, para desenvolver a curva completa, são necessários os valores de I_L , I_0 , R_s , R_p e m .

Um desenvolvimento analítico apresentado em Krenzinger (2001) mostra que é possível determinar estes cinco parâmetros a partir dos pontos de curto-circuito, de máxima potência e de circuito aberto, dados que são acessíveis a partir dos catálogos dos módulos. No entanto, devido ao fato de que os dados que constam nos catálogos são dados médios e nem sempre plenamente confiáveis, é preferível medir a curva completa de módulos e formar um catálogo com os valores dos parâmetros extraídos das curvas características dos módulos.

Para condições diferentes da *standard*, calculam-se novos valores para a corrente de curto-circuito I_{SC} e para a tensão de circuito aberto V_{OC} através da Eq. (4) e Eq. (5):

$$I_{SC} = I_{SC}^{STD} \frac{G}{1000 \text{ W m}^{-2}} [1 + \alpha (T_C - 298 \text{ K})] \quad (4)$$

$$V_{OC} = V_{OC}^{STD} + N_s \beta (T + 298 \text{ K}) + V_T \ln \left(\frac{G}{1000 \text{ W m}^{-2}} \right) \quad (5)$$

onde α é o coeficiente de variação relativa de I_{SC} com a temperatura e β é o coeficiente de variação de V_{OC} com a temperatura para uma célula.

Dos valores resultantes das equações são calculados novos I_L e I_0 , mantendo-se constantes m , R_S e R_P .

3.3 Modelagem da Temperatura das Células

Em 1985 foi realizada uma comprovação experimental de um modelo muito simples que prevê a temperatura de um módulo fotovoltaico evoluindo acima da temperatura ambiente como uma função linear da radiação solar incidente (Krenzinger, 1987). Dias (2006) utilizou um grande número de dados medidos na instalação conectada à rede da UFRGS e também comprovou esta linearidade utilizando uma equação mais geral, similar à Eq. (6), a qual está sendo considerada neste projeto. Nesta equação λ e κ são coeficientes que serão determinados para cada tipo de módulo e que dependem da temperatura e da velocidade do vento e T_a é a temperatura ambiente.

$$T_c = T_a + \lambda G + \kappa \quad (6)$$

3.4 Modelo da Reflexão no Vidro

O vidro de um módulo fotovoltaico tem uma característica de reflexão igual à dos vidros planos comuns, a qual é bastante conhecida. Considerando as equações de Snell e de Fresnell (Lorrain e Corson, 1970) a refletância do vidro ρ pode ser obtida para um ângulo de incidência θ_1 , considerando $n_1=1$ para o ar e $n_2=1,5$ para o vidro, nas Eq.(7) e (8):

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (7)$$

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} \left(\frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{n_1 \cos(\theta_2) - n_2 \cos(\theta_1)}{n_1 \cos(\theta_2) + n_2 \cos(\theta_1)} \right)^2 \quad (8)$$

Durante a simulação, a cada passo de tempo a radiação solar direta incidente no plano dos módulos é ponderada pelo fator de correção da reflexão no vidro $FR(\theta_1)$ dada pela Eq. (9) que relaciona a refletância angular do vidro com a refletância normal. Esta correção não deve ser feita quando a simulação utiliza dados de radiação solar medidos com uma célula solar de referência no mesmo plano dos módulos, pois este dados já sofreram o efeito da reflexão do vidro.

$$FR(\theta_1) = \frac{\rho(\theta_1)}{\rho(0)} \quad (9)$$

3.5 Modelo do Arranjo Fotovoltaico

Um arranjo fotovoltaico corresponde a uma associação de módulos em série e em paralelo. Assim como as células, os módulos têm sua tensão aumentada ao serem associados em série e sua corrente aumentada com a associação em paralelo. No entanto é mais comum encontrar diferenças entre os módulos de um arranjo do que entre as células de um módulo. Neste caso não é adequado utilizar um modelo analítico (analogamente às Eqs. (2) e (3)) para o arranjo. O programa realiza o cálculo da associação separando em primeiro lugar os segmentos do arranjo que correspondem a cadeias de módulos conectados em série. Neste caso para uma mesma corrente (estabelecidas previamente a irradiância solar e a temperatura), cada módulo tem uma única tensão correspondente. A soma das tensões dos módulos será a tensão na cadeia série. Logo são calculados os efeitos da associação paralela: cada cadeia série se polariza na mesma tensão das outras cadeias às quais se associa em paralelo. Para cada tensão do arranjo corresponde uma única corrente em cada cadeia série. O resultado desta análise numérica é a curva completa do arranjo na condição

estabelecida. Como não há pontos calculados previamente para cada possibilidade de tensão e corrente, utiliza-se uma interpolação para estabelecer com precisão os resultados de cada função.

O resultado deste modelo são dois vetores indexados, um para tensão e outro para corrente, definindo a curva completa do arranjo, com todas as suas imperfeições, quando houver. Estes dados deverão necessariamente iterar com o algoritmo do seguidor do ponto de máxima potência (geralmente embutido no inversor) para encontrar o ponto de trabalho. Conhecida a tensão, haverá apenas uma corrente correspondente, a qual é o resultado final do modelo do arranjo.

3.5 Modelo do Inversor

Os modelos de inversores procuram, através de uma equação matemática, representara potência de saída em função da potência de entrada para poder prever o rendimento do inversor em função da carga. Em geral, trata-se de modelos matemáticos que procuram associar os parâmetros com as diferentes perdas de potência que ocorrem no inversor.

O modelo proposto para a eficiência (Jantsch, 1992), adotado neste trabalho, é uma equação de segundo grau escrita de maneira normalizada com relação à potência nominal do inversor

$$\eta = \frac{P'_{saída}}{K_0 + K_1 P'_{saída} + K_2 P'_{saída}^2} \quad (10)$$

onde $P'_{saída} = P_{saída}/P_{nom}$. P_{nom} é a potência nominal do inversor e o termo K_0 representa o autoconsumo. As quedas de tensão estão representadas por K_1 e as quedas ôhmicas estão representadas por K_2 . Com a variação dos parâmetros K_i se obtém o perfil que apresentam diferentes tipos de inversores. É interessante observar que variando os parâmetros K_i a curva da eficiência em função da potência nominal pode mudar completamente seu formato.

Além do modelo da curva de eficiência, o inversor incorpora o seguidor de máxima potência, que representa uma eficiência separada. O seguidor de máxima potência tem o papel de polarizar o arranjo de módulos em cada instante na tensão em que o mesmo produza a máxima potência. No projeto há intenção de medir vários inversores, em um amplo leque de características. Destes resultados será tentado extrair o algoritmo que melhor represente o seguidor do ponto de máxima potência de cada modelo de inversor. Nos modelos testados até agora esta eficiência é realmente muito elevada, tratando-se de equipamentos de alta qualidade. De qualquer forma o programa contará com a possibilidade de inserir desvios da tensão ideal, para averiguar a influência destes fatos no resultado da simulação.

Finalmente será necessário contemplar também o modelo dos inversores com sua variação térmica e limitação de potência. A curva da Eq. (10) tem limites de utilização e o próprio equipamento geralmente tem dispositivos limitantes para sua autoproteção. Tais limitações ficaram evidenciadas no acompanhamento do sistema da UFRGS (Dias, 2006).

3.6 Modelo da Rede de Distribuição

A rede de distribuição irá receber a energia elétrica injetada pelo inversor. Para simular este acoplamento é necessário fazer com que a simulação do inversor reaja a possíveis modificações de comportamento da rede da mesma forma que reagiria em uma instalação real. O equipamento deve sentir variações de impedância na rede, variações de tensão e mesmo de frequência. Bons inversores se desconectam da rede sempre que ocorrem variações que possam comprometer a instalação. Além disto, as concessionárias não desejam sistemas que persistam sua conexão no caso de desligamento proposital, por motivos de segurança. Os algoritmos a utilizar ainda serão estudados para este acoplamento, mas já está estabelecido que o programa deverá responder nos dois sentidos, isto é, sobre o impacto da rede (ou mau funcionamento da rede) no sistema fotovoltaico e sobre o impacto do sistema fotovoltaico (ou seu mau funcionamento) na rede.

4. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Além das análises teóricas e do desenvolvimento de *software*, o projeto tem uma importante abordagem experimental. Esta pode ser dividida em dois grupos com diferentes objetivos, mas ambos com importantes contribuições ao conhecimento deste tipo de instalação. O primeiro grupo diz respeito a ensaios de componentes que produzirão dados para montar os bancos de dados do *software* e o segundo grupo corresponde a ensaios de duas instalações operando em Porto Alegre para validar os resultados das simulações.

4.1 Ensaios de Componentes

Ensaios de módulos fotovoltaicos. Para os ensaios de módulos o LES-UFRGS desenvolveu uma bancada de testes, há cerca de sete anos, constituída basicamente por uma fonte bipolar de potência (utilizada como carga eletrônica) comandada por um gerador de varredura e um conjunto de multímetros controlados por um computador, descrita em Prieb (2002). Com os recursos deste projeto este sistema será modernizado com multímetros mais rápidos e precisos e uma fonte de maior potência. A fonte permite polarizar o módulo sob teste continuamente desde o segundo quadrante (tensão negativa, corrente positiva), passando pelo primeiro (tensão e corrente positivas) até o quarto quadrante (tensão positiva, corrente negativa). Ao mesmo tempo em que é aplicada uma varredura de tensão no módulo, são registrados os valores de tensão, corrente e irradiância incidente. A irradiância é determinada a partir da corrente de curto circuito de uma célula de referência calibrada, instalada no plano do módulo. Todo o instrumental é controlado por um *software* dedicado, que garante a concomitância das medidas. Os ensaios são realizados ao ar livre, utilizando-se o Sol como fonte luminosa, em dias de céu limpo e em horários que propiciem níveis adequados de irradiância. Uma câmara refrigerada controla a temperatura do módulo sob ensaio. Ensaios em várias temperaturas e intensidades de radiação solar permitem encontrar todos os parâmetros necessários para o banco de dados do programa de simulação. Além disto pesquisas em desenvolvimento no LES propiciam alternativas para determinar parâmetros dos módulos através de curvas no escuro (Bühler e Krenzinger, 2006).

Ensaios de arranjos fotovoltaicos. Serão realizados ensaios de medida de curvas características de arranjos fotovoltaicos, que serão utilizados como comprovação do adequado funcionamento das sub-rotinas que fazem parte do FVCONECT. Preliminarmente foram já realizados ensaios com uma carga resistiva, obtendo-se bons resultados, conforme Prieb e Krenzinger (2007). Uma carga eletrônica deverá ser montada em breve para produzir uma varredura mais rápida e com maior flexibilidade de parâmetros. No sistema fotovoltaico que opera na UFRGS cada um dos módulos foi individualmente ensaiado antes da instalação (Krenzinger e Prieb, 2005), sendo assim possível comparar curvas de arranjos formados por estes módulos e os resultados dos modelos de associação aplicados às curvas de cada módulo.

Ensaios da operação de sistemas conectados à rede. O sistema da UFRGS já dispunha de um sistema de aquisição de dados e uma significativa quantidade de informações já foi coletada durante mais de um ano de funcionamento. Muitas destas informações podem ser encontradas em Dias (2006). No âmbito deste projeto a coleta de dados será ampliada e será também acompanhado o sistema fotovoltaico conectado à rede da empresa *Intercâmbio Eletro Mecânico* em Porto Alegre. Serão utilizados de forma combinada unidades de aquisição de dados da marca *Agilent* e os equipamentos *Sunny Data Control* apropriados para este tipo de monitoramento.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho relatou o estágio da realização do projeto *Desenvolvimento Dinâmico Otimizado de Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição* apresentando e referindo alguns

modelos matemáticos e computacionais que estão sendo utilizados no desenvolvimento do programa FVCONNECT. No final do projeto estará disponível um *software* capaz de simular com grande exatidão e detalhe o comportamento dos componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Com a validação experimental concluída, este *software* será uma ferramenta segura para avaliar o efeito de diferentes equipamentos nos sistemas bem como testar a operação de um mesmo sistema em diferentes localidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro, para realização do projeto de pesquisa e deste trabalho, concedido pela ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., pela FINEP-Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério de Ciência e Tecnologia e do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, R.J., Collares-Pereira, M. e Conde, J.P. 1988. Simple Procedure for Generating Sequences of Daily Radiation Values Using a Library of Markov Transition Matrices. *Solar Energy*, 40:269-279.
- Alves, P.E. 2006. Aquisição de Dados Meteorológicos e Análise de Confiabilidade. Resumos do XVIII Salão de Iniciação Científica. UFRGS. Porto Alegre RS, Brasil.
- Bühler, A. J e Krenzinger, A. 2006. Análise de Curvas Características Sem Iluminação como Ferramenta para Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos. *Avances en Energía Solar y Medio Ambiente*, Argentina, Vol. 10, CD-ROM.
- Collares-Pereira, M. e Rabl, A. 1979. The Average Distribution of Solar Radiation – Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy*, 22:155-164.
- Dias, J.B. 2006. Instalação Fotovoltaica Conectada à Rede: Estudo Experimental para a Otimização do Fator de Dimensionamento. Tese de Doutorado. PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, Brasil.
- García, F.H. 2004. Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos. Tese de Doutorado. PROMEC. UFRGS. Porto Alegre RS, Brasil.
- Jantsch, M., Schmidt, H. e Schmidt, J. 1992. Results of the Concerted Action on Power Conditioning and Control. 11th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2001, Montreaux, Suíça. P. 1589-1593.
- Krenzinger, A. 1987. Contribución al Diseño de Sistemas Fotovoltaicos con Paneles Bifaciales en Combinación con Reflectores Difusos de Caracter General. Tese de Doutorado. Esc. Téc. Sup. Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha.
- Krenzinger, A. e Macagnan, M. H. 1988. Estudo Comparativo de Diferentes Modelos de Geração de Séries de Radiação Solar. Anais do III Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Águas de Lindóia SP, Brasil.
- Krenzinger, A. 1994. Modelo do Peixe – Seqüências Horárias de Radiação Solar. Anais do V Encontro Nacional de Ciências Térmicas, São Paulo SP, Brasil.
- Krenzinger, A. 2001. An Algorithm for PV Array Analysis. Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2001, Munique, Alemanha. p. 816-819.
- Krenzinger, A. e Farenzena, D.S. 2003. Synthesizing Sequences of Hourly Ambient Temperature Data. Proceedings of the 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo SP, Brasil.
- Krenzinger, A., Dias, J.B. e Prieb, C.W.M. 2004. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede no Sul do Brasil. Libro de Actas de XII Congreso IBÉRICO e VII Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Espanha. v. 2, p. 1019-1024

- Krenzinger, A e Prieb, C.W.M. 2005. Clasificación y Selección de Módulos Fotovoltaicos para una Central Conectada a la Red. Avances en Energía Solar y Medio Ambiente, Argentina, Vol. 9, N. 4, pp 19-23.
- Lorrain P.E e Corson, D.R. 1970. Electromagnetic Fields and Waves. W.H.Freeman & Co, San Francisco, Estados Unidos. pp.508-519.
- Macagnan, M.H. 1989. Estudo de Modelos de Sintetização de Dados de Radiação Solar. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, Brasil.
- Prieb, C.W.M. 2002. Desenvolvimento de um Sistema de Ensaio de Módulos Fotovoltaicos. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, Brasil.
- Prieb, C.W.M. e Krenzinger, A. 2007. Determinação de Curva Característica de Arranjo Fotovoltaico (a ser publicado nos anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar).
- Vera, L.H. 2004. Programa Computacional para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Dissertação de Mestrado. PROMEC. UFRGS. Porto Alegre RS, Brasil.

COMPUTATIONAL SIMULATION OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

***Abstract.** The dissemination of grid-connected photovoltaic systems has increased strongly in the last decade. Such systems present the advantages of being a clean, renewable, reliable and non-concentrated electricity generation source, contrasting to more pollutant conventional energy sources. The energy produced by a grid connected photovoltaic systems is, in several developed countries, purchased by the electricity utilities for a price much higher than the regular electricity. Although at this moment there is no specific regulation in Brazil, laws for the trading of this energy are expected to be implemented in a near future. Thus emerges the need for a deep knowledge of the behavior of these systems and their impact on the distribution grid. The Solar Energy Laboratory of UFRGS is currently developing a software that simulates in detail the operation of such systems. The development of this software is part of a research project supported by FINEP and ELETROBRÁS concerning tests of components and creation of mathematical models for their representation. Test systems are being assembled for the testing of photovoltaic modules, photovoltaic arrays and grid connected inverters, including thermal tests. In this work are described the experimental activities and the mathematical models that are being implemented in this project. Partial results are shown, as well as the fundamentals of the simulation program.*

Key words: Solar Energy, Grid-Connected Photovoltaic Systems, Simulation.