



## ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA ISOLADO HÍBRIDO DIESEL/FOTOVOLTAICO

**Edson Bazzo**

**Ricardo Rütther**

Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Eng. Mecânica  
88040-900 - Florianópolis, SC, Brasil

**Denizar C. Martins**

Universidade Federal de Santa Catarina, Depto. de Eng. Elétrica  
88040-900 - Florianópolis, SC, Brasil

**Resumo.** *O presente trabalho aborda aspectos relativos à instalação de uma usina híbrida diesel-fotovoltaico, com perspectivas de ser montada na região norte do Brasil. Tomando-se por base o perfil de consumo de energia elétrica de comunidades isoladas daquela região, são apresentados resultados relativos à análise de viabilidade técnica e econômica para um sistema fotovoltaico de até 150 kW, associado a uma usina termelétrica diesel (300 kVA) existente.*

**Palavras-chave:** *Energia solar, Painéis fotovoltaicos, Sistema híbrido diesel/fotovoltaico*

### 1. INTRODUÇÃO

A utilização de energia solar na geração de energia elétrica vem progressivamente se apresentando como uma alternativa economicamente viável, sobretudo no meio rural ou regiões isoladas, onde os custos para instalação de sistemas convencionais são relativamente altos. Sistemas fotovoltaicos se caracterizam por sua elevada confiabilidade e pouca manutenção. Seu elevado custo inicial é compensado pelo baixo custo de operação e manutenção. Através do efeito fotovoltaico, as células solares contidas em painéis fotovoltaicos convertem a energia luminosa do sol diretamente em energia elétrica, de forma estática, segura, não poluente, renovável e de manutenção mínima.

A energia solar fotovoltaica vem sendo intensamente aplicada por países como Alemanha, Japão e EUA. Além do mais, programas recentemente lançados por esses países visam aumentar a escala de produção de painéis fotovoltaicos e, com isto, reduzir os custos para produção em massa, dos atuais 4,25 US\$/watt para 2,50 US\$/watt até o ano de 2004 (Curry, 1999). Resultados recentemente publicados (Narayanan et al., 1996) apontam a solução mais econômica para a instalação de sistemas híbridos na proporção de 40% de energia fotovoltaica na média anual.

A proposta de se instalar sistemas híbridos diesel/fotovoltaico não é recente. Valente e Almeida (1998) publicaram artigo também sobre geração de energia elétrica em comunidades isoladas, focalizando a região norte brasileira, onde expressivo número de usinas apresenta

capacidade instalada inferior a 100 kVA. Narayanan et al.(1996) apresentam resultados referentes a pequenas unidades localizadas na Índia, na faixa de 10 kVA. Aubrée et al. (1993) descrevem vantagens técnicas de um sistema de 1,5 kW instalado numa região remota dos Alpes, com a finalidade de atender o sistema de telefonia francesa e que vem operando satisfatoriamente.

Em termos gerais, a necessidade de altos investimentos iniciais tem inibido uma aplicação imediata de sistemas fotovoltaicos como fonte alternativa de energia. Entretanto, as comunidades isoladas se apresentam como candidatas fortes, uma vez que elas não dispõem de redes de energia elétrica e têm forte dependência de combustíveis derivados do petróleo, geralmente subsidiados. Cabraal et al. (1998) relatam projetos recentes na Indonésia, Filipinas e República Dominicana, ressaltando a necessidade de arranjos econômicos, que estimulem ou que viabilizem a instalação de sistemas fotovoltaicos (sistemas PV), para consumidores localizados no meio rural. No mesmo artigo, são também identificadas as condições favoráveis para comunidades isoladas, como uma função da densidade populacional, em que sistemas fotovoltaicos se apresentam como investimento mais atraente do que sistemas convencionais de geração de energia.

Reportando-se ao Brasil, a extensão territorial aliada a condições climáticas favoráveis oferece grande possibilidade de sucesso na aplicação de energia solar, principalmente se ela estiver agregada a um sistema híbrido. Existem numerosos casos no Brasil, onde pequenas unidades geradoras termoeletricas a diesel (30 a 10000 kW) atendem pela demanda local, apresentando elevados custos com operação e manutenção por kWh gerado. No caso específico de Tocantins, 50% das usinas diesel de comunidades isoladas apresentam capacidade instalada inferior a 100 kVA (Bazzo et al., 1998). É importante lembrar que em algumas regiões, o transporte do combustível, ou o porte reduzido da unidade termoeletrica torna o custo de geração elevado, favorecendo a competição de sistemas híbridos. Além disto, sabe-se que para um dado gerador diesel, o custo de geração aumenta acentuadamente quando sob operação abaixo de 50% da capacidade nominal (Valente e Almeida, 1998). As curvas de demanda diária dos sistemas diesel típicos (ver Fig. 2), abordados neste estudo, se enquadram nesta situação. Ao mesmo tempo, um sistema fotovoltaico irá fornecer energia principalmente neste período, de tal forma que um sistema híbrido terá neste caso o gerador diesel otimizado. Dados recentes, obtidos de concessionárias de energia elétrica do norte brasileiro, apontam para custos de geração variáveis na faixa de 60 a 150 US\$/MWh (95 a 240 R\$/MWh). Isto se deve ao fato dessas unidades atenderem comunidades com baixa densidade populacional e pouca ou nenhuma atividade industrial, além de se localizarem em regiões distantes dos centros distribuidores de óleo diesel. Atualmente os custos com geração são subsidiados através de conta especial para custear a geração de energia elétrica (CCC – Conta de Consumo de Combustíveis). Tal condição deve se manter por pouco tempo, uma vez que o governo vem anunciando cortes substanciais de todos os subsídios. Como consequência imediata haverá um aumento nos custos com geração da energia elétrica e um reajuste das tarifas. Nestes casos, a geração solar fotovoltaica pode ser uma alternativa interessante a ser conjugada com os geradores diesel existentes, formando um sistema híbrido diesel/fotovoltaico. Uma opção por energia fotovoltaica deverá certamente minimizar impactos ambientais com a queima de combustíveis fósseis ou com o transporte de energia elétrica através de linhas de transmissão de localidades onde já há disponibilidade de energia firme.

## 2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

O sistema diesel descrito neste trabalho, é composto basicamente de uma máquina primária, utilizando óleo diesel como combustível, acoplada mecanicamente a um gerador síncrono, responsável pela geração de energia elétrica em tensão alternada de 220 volts, com frequência de 60 Hz. Esse sistema diesel é capaz de gerar até 300 kVA de potência, e se constitui no sistema principal de alimentação da carga.

O sistema fotovoltaico é um sistema secundário auxiliar de geração de energia, com capacidade de gerar uma potência elétrica em corrente contínua de até 153,6 kW. Ele é interconectado em paralelo com o sistema diesel, através de um conversor CC/CA sincronizado pelo gerador diesel. O sistema fotovoltaico tem como principal finalidade aliviar o grupo gerador diesel, durante os períodos de incidência solar. Desse modo, o combustível economizado durante esses períodos poderá ser utilizado nas horas de pico da carga e/ou na ausência da energia solar.

Um esquema simplificado em diagrama de blocos da instalação completa é mostrado na Fig.1. O sistema fotovoltaico utiliza 2.400 painéis solares, com capacidade de potência de 64 Wp por unidade, cobrindo uma área total de 2.200 m<sup>2</sup>, o que é equivalente a duas piscinas olímpicas 25x50m. Os painéis são distribuídos em ligação série/paralelo, constituindo 100 arranjos em paralelo de 24 painéis em série. A interconexão entre os painéis solares e o sistema diesel se torna possível através da utilização de um inversor estático, colocado na saída dos painéis solares. A tensão de entrada no inversor é de 288 volts em corrente contínua. Na saída, tem-se uma tensão alternada senoidal, na frequência de 60 Hz, cujo valor em volts é compatível com a tensão de saída do grupo gerador diesel. É importante salientar que a tensão alternada na saída do grupo gerador diesel serve de referência para a operação do sistema fotovoltaico, de modo que na eventualidade de falha do motor diesel, o sistema fotovoltaico também deixa de operar.

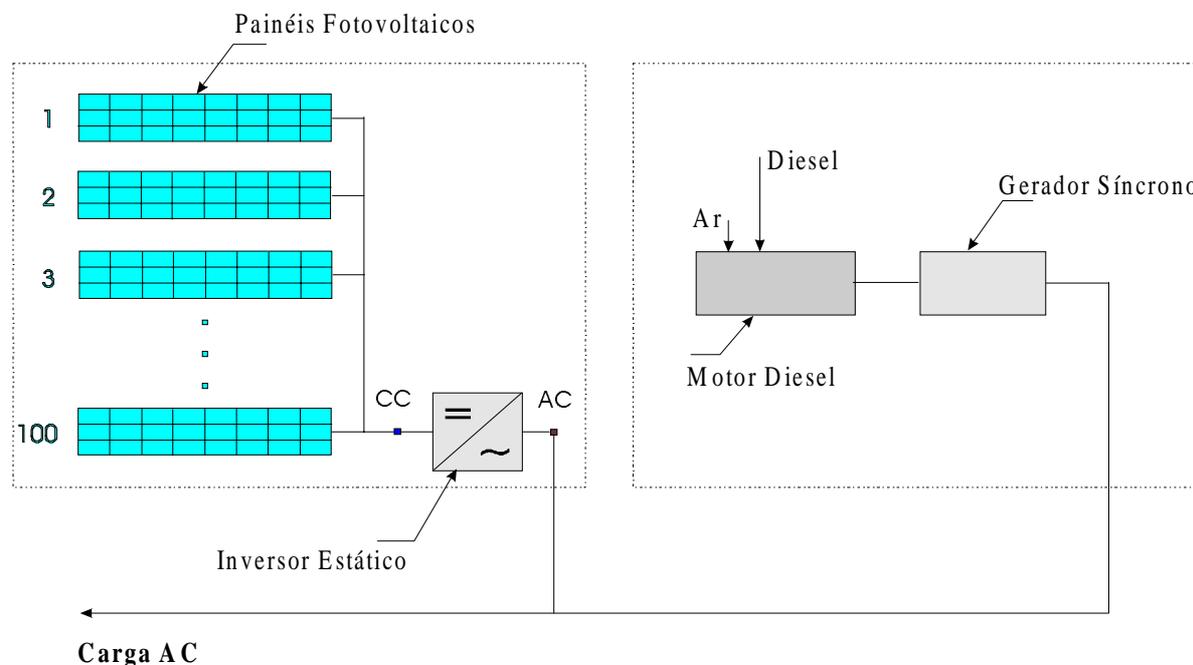


Figura 1 - Esquema simplificado de um sistema isolado híbrido diesel/fotovoltaico.

A estratégia básica de instalação já foi proposta na literatura especializada desta área (Aubrée et al., 1993; Cabraal et al., 1998; Seeling-Hochmuth, 1997). Contudo, na maioria dos casos, ela apresenta como inconveniente o fato de se utilizar sistemas acumuladores (baterias), que apresentam baixa vida útil e uma manutenção dispendiosa. Adicionalmente, o processo frequente de carregamento e descarregamento de baterias envolve perdas energéticas significativas (ABNT, 1997). A proposta deste trabalho é mais racional do ponto de vista de eficiência energética, considerando que dispensa o uso de baterias.

### 3. LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS

Uma análise econômica representativa deve considerar uma curva de consumo que corresponda ao comportamento típico de uma usina que atenda comunidades isoladas, para a qual se deseja agregar o sistema fotovoltaico. A Fig. 2 mostra a curva correspondente à carga de consumo da comunidade de Currálinho, localizada na região norte do Brasil. Neste caso, pode-se observar um consumo de energia praticamente constante ao longo do dia e um pico de carga entre 18:00 e 24:00 horas. De fato, tal comportamento representa o consumo típico para uma comunidade isolada onde não haja atividade industrial ou comercial significativa. A taxa diária de irradiação solar para o mesmo local varia de 4,64 a 6,81 kWh/m<sup>2</sup>, de acordo com valores mostrados na Fig. 3 (Colle e Pereira, 1998).

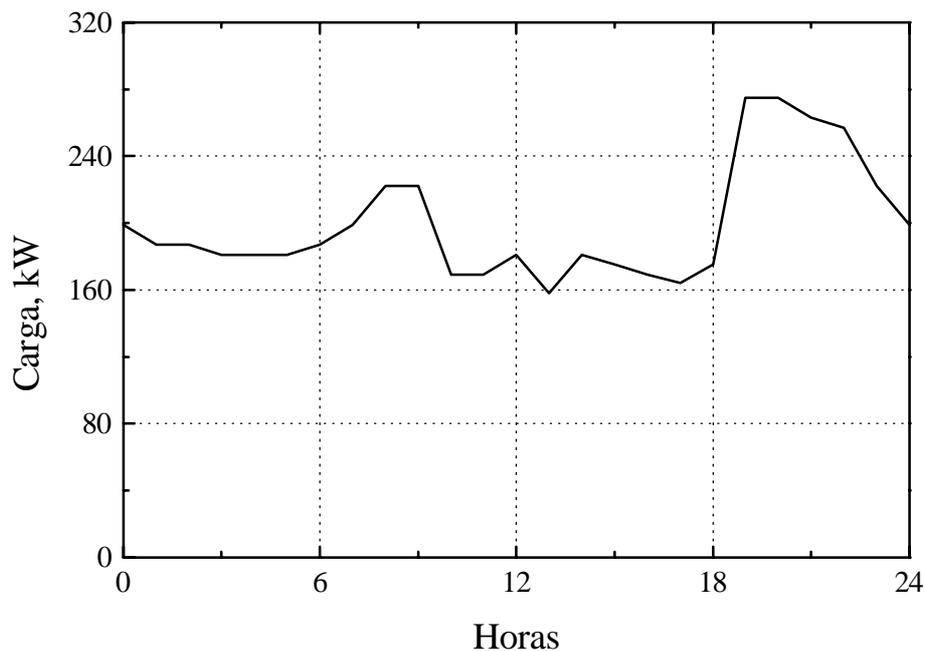


Figura 2 - Curva de consumo de energia elétrica para a comunidade isolada de Currálinho-PA.

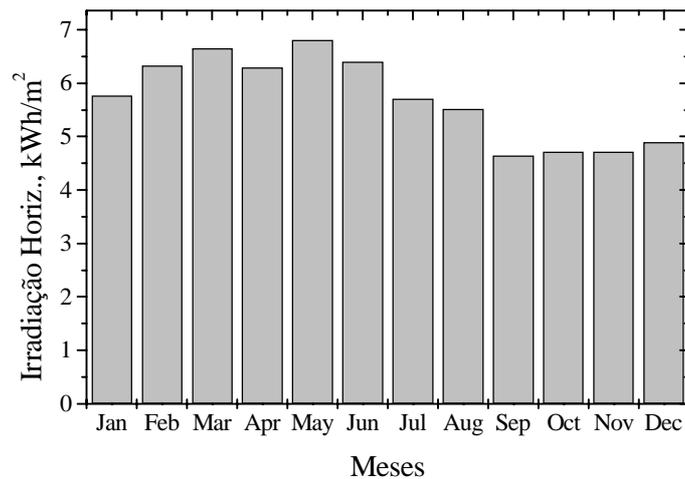


Figura 3 – Irradiação solar medida no Estado do Pará, ao longo do ano de 1998.

O custo do kWh gerado depende de fatores relacionados à manutenção, operação e ao transporte de óleo diesel até a comunidade isolada. Tomando-se por base a instalação de painéis fotovoltaicos com capacidade para 150 kWp e assumindo-se que, em média, a insolação local diária no plano inclinado (de até  $10^0$ ) é da ordem de  $5 \text{ kWh/m}^2$ , o equivalente a 5 horas de operação a 150 kW (273 MWh/ano), a economia anual associada com o consumo de óleo diesel,  $C_d$  (kg/ano), pode ser calculado como

$$C_d = 5 \cdot 365 \cdot m_d \quad (1)$$

onde  $m_d$  representa o consumo de óleo diesel em kg/h, calculado por

$$m_d = 3600 \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{150}{P_{ci}} \quad (2)$$

sendo  $\eta$  o rendimento do grupo gerador ( $\eta = 0,30$  a  $0,35$ ) e  $P_{ci}$  o poder calorífico inferior do óleo diesel ( $P_{ci} = 45600 \text{ kJ/kg}$ ). Tendo em vista o funcionamento em carga parcial, é razoável supor que o equipamento opere com  $\eta = 0,30$ . Nessas condições, assumindo-se o preço praticado no mercado da ordem de  $0,29 \text{ US\$/kg}$  ( $0,47 \text{ R\$/kg}$ ), tem-se uma economia anual de óleo diesel igual a 20890 dólares, o equivalente a 77 US\$/MWh gerado.

Naturalmente, o custo real do kWh deve levar em conta despesas com manutenção e operação. Dados obtidos de concessionárias de energia elétrica indicam custos com operação e manutenção variáveis entre 7000 e 23000 dólares por ano, valores esses correspondentes a pequenas usinas de comunidades isoladas, instaladas para operarem com potências de até 300 kVA. Entretanto, não há estudos que permitam avaliar com detalhes a economia adicional com manutenção, uma vez que a usina continuará operando com o grupo gerador diesel, principalmente no período noturno. Da mesma forma, não há informações precisas relativas a custos adicionais com o transporte do óleo diesel até a usina. Informações complementares, também obtidas de concessionárias de energia elétrica, indicam custos com geração de energia elétrica que variam entre 60 e 150 US\$/MWh. Resultados publicados recentemente apontam custos consideravelmente maiores, de até 500 US\$/MWh para o Brasil (Valente e

Almeida, 1998) e Índia (Narayanan et al., 1996). No presente trabalho, para efeito de análise econômica, assume-se uma economia no valor de 150 US\$/MWh, o equivalente a US\$ 41.062,00 anuais.

Atualmente, o investimento requerido para a instalação de placas fotovoltaicas é da ordem de 4,25 US\$/Wp (Curry, 1999). Considerando a necessidade de instalação de um inversor e componentes periféricos e estruturais, o investimento deve subir para algo em torno de 6,00 US\$/Wp. Cálculos são conduzidos levando em conta os programas recentemente lançados nos Estados Unidos e Europa, que visam aumentar a escala de produção de painéis fotovoltaicos e, com isto, reduzir os custos para produção em massa, dos atuais 4,25 US\$/watt para 2,50 US\$/watt até o ano de 2004 (Curry, 1999). Acompanhando uma tendência de queda contínua, no presente trabalho são analisados quatro casos específicos para custos de instalação variáveis entre 1 e 6 US\$/Wp (ver Figura 4).

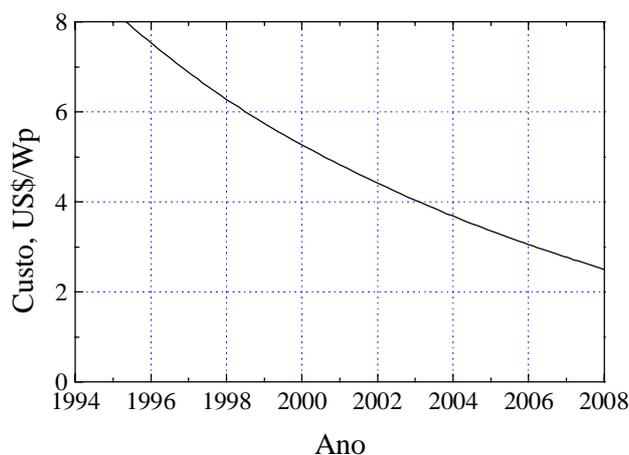


Figura 4 - Custo de instalação de sistemas fotovoltaicos (Expectativa para os próximos anos)

#### 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

As Figs. 5 e 6 mostram resultados relativos à Taxa Interna de Retorno (TIR) e prazo de retorno para os quatro casos estudados, assumindo-se investimentos a fundo perdido variáveis entre 0 e 100% e levando em conta as seguintes premissas:

- Receita de 41.062 US\$/ano.
- Taxa de câmbio comercial: 1,60 R\$/US\$.
- Juros de 6% ao ano.
- Taxa mínima de atratividade de 12%.
- Parcela financiada de 50%.
- Prazo de amortização do Principal de 10 anos.

A Fig. 5 mostra, que aos preços atuais de 6 US\$/Wp, para taxas internas de retorno superiores a 12%, somente com subsídios superiores a 60% o investimento se torna atraente. Para a mesma situação, uma análise da Fig. 6 revela prazos de retorno da mesma ordem de grandeza da vida útil do sistema. A garantia máxima atualmente oferecida pelos fabricantes de painéis fotovoltaicos é de 25 anos. Com a expectativa de redução acentuada nos custos de sistemas fotovoltaicos, no prazo de 5 anos (3,5 US\$/Wp), para uma mesma taxa de retorno,

seriam necessários subsídios de apenas 30%. Nesse caso, o prazo de retorno cai para aproximadamente 20 anos. De fato, nas condições estabelecidas anteriormente, o panorama passa a ser mais animador na medida que os custos evoluem para valores da ordem de 1 a 2 US\$/Wp.

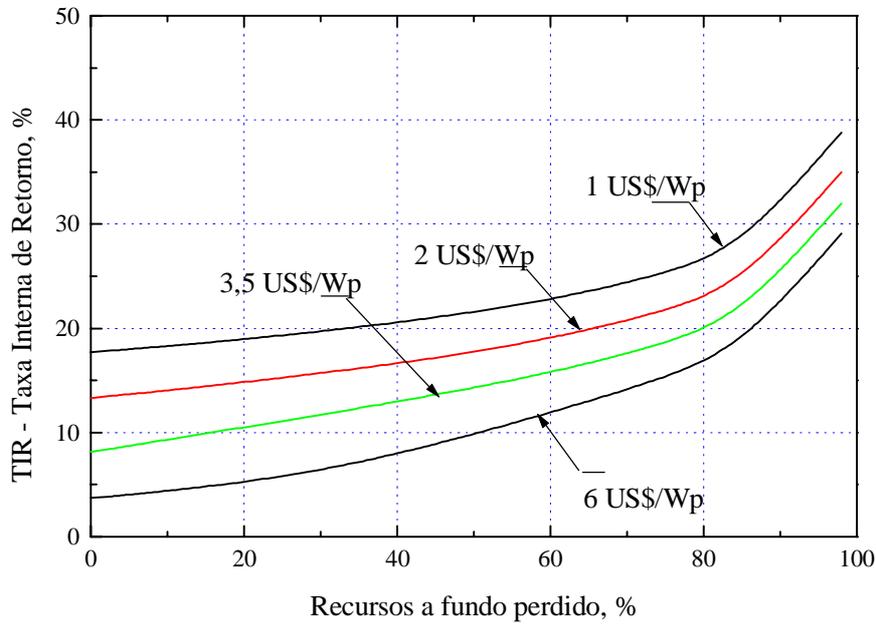


Figura 5 – Taxa Interna de Retorno para diferentes custos de instalação de painéis fotovoltaicos.

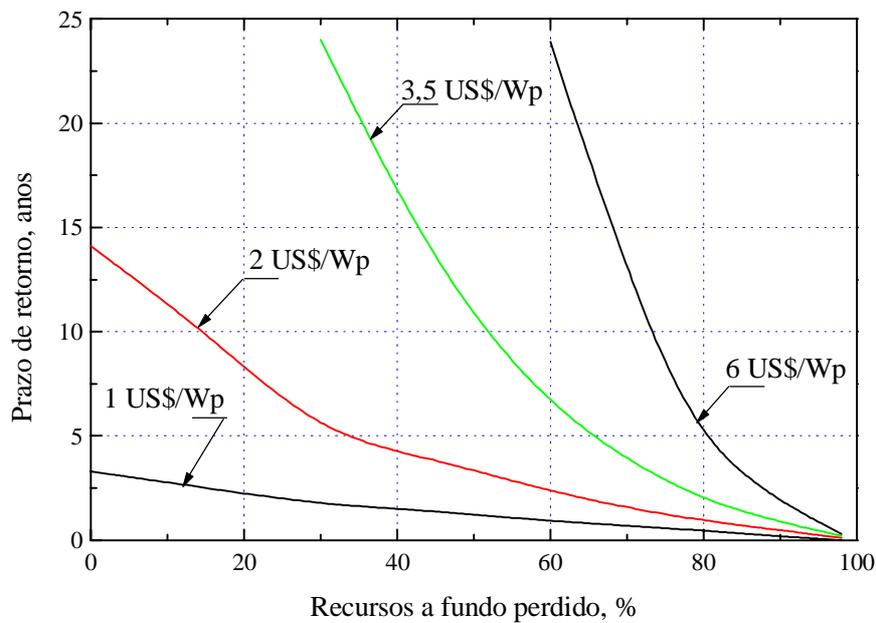


Figura 6 - Prazo de Retorno para diferentes custos de instalação de painéis fotovoltaicos.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste artigo são característicos para uma usina típica, localizada na região norte do Brasil, com capacidade instalada de 300 kVA e que tem o pico de carga no período noturno. De fato, aos preços de mercado atuais, a opção por um sistema híbrido diesel/fotovoltaico deverá exigir investimentos parcialmente subsidiados, na ordem de 60% ou mais, para se obter taxas internas de retorno superiores a 12%. Embora a implantação de painéis fotovoltaicos possa parecer pouco animadora, o interesse por esta nova tecnologia aumenta significativamente, na medida em que o preço do óleo diesel tende a aumentar e os custos de instalação tendem a diminuir com o tempo. Com a expectativa de redução acentuada nos custos de sistemas fotovoltaicos, no prazo de 5 anos (3,5 US\$/Wp), seriam necessários subsídios de apenas 30%, mantido o preço atual do óleo diesel. Estudos complementares prosseguem, no sentido de se buscar informações precisas relativas ao custo real do kWh gerado pelas centrais diesel e, dessa forma, obter resultados que de fato reflitam as vantagens econômicas relativas à instalação de usinas híbridas na região norte brasileira.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem o apoio prestado pelo acadêmico Ricardo Santa Catarina na elaboração dos cálculos econômicos e a atenção dispensada pelo pessoal técnico da Guascor, CERON e CELTINS no trabalho de levantamento de dados.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, 1997, Dimensionamento de banco de baterias para sistemas fotovoltaicos puros, Projeto 3:082.01-009, pp. 1-14.
- Aubrée, M., Martin, R. and Pigli, A., 1993, The soldiese hybrid system – Operation on a high altitude relay for mobile radiocommunications, INTELEC 93 – International Telecommunication Energy Conference, S.33.B Autonomous Systems in Extreme Climatic Conditions, France, pp. 354-359.
- Bazzo, E. Martins, D.C., Barcellos, E.O., Colle, F. e Guimarães, C.E., 1998, Análise técnica das condições operativas de centrais termelétricas de pequeno porte, instaladas no Estado de Tocantins, Relatório Técnico UFSC/ANEEL, pp. 1-95.
- Benslama, N., Annabi, M. and Requier, J.P., Power conditioning and conceptual design of photovoltaic hybrid systems, European Power Electronics, vol. 2, Set. 1987, pp. 665-670.
- Cabraal, A., Mac Cosgrove-Davies and Shaeffer, L., 1998, Accelerating sustainable photovoltaic market development, Progress in Photovoltaics Research and Applications 6, pp. 297-306.
- Colle, S. e Pereira, E.B., 1998, Atlas - Irradiação Solar do Brasil (Arquivo de dados originais do Labsolar/UFSC), INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, pp. 1-58.
- Curry, R., 1999, PV Insider's Report, vol. 18 (3), USA.
- Narayanan, M.R., Jayakumar, V.S.M. and Nayar, C.V., 1996, SPV-Diesel hybrid power systems – A technoeconomic analysis based on a project implementation in India, Technical Digest of the International PVSEC-9, Japan, pp. 815-816
- Seeling-Hochmuth, G.C., 1997, A combined optimization concept for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems, Solar Energy, vol. 61 (2), pp. 77-87.
- Valente, L.C.G. and Almeida, S.C.A., 1998, Economic analysis of a diesel/photovoltaic hybrid system for decentralized power generation in northern Brazil, Journal Energy, Vol. 23, Issue 4, pp. 317-323.

Title: Technical and economical analysis of a hybrid diesel/photovoltaic system.

Abstract: This paper presents some technical and economic considerations on a hybrid diesel-photovoltaic system likely to be installed in north Brazil. Based on the electricity demand profiles of remote and isolated communities typical of that region, a 150 kW photovoltaic system is proposed to be installed on a hybrid configuration with a 300 kVA existing Diesel generator. A technical and economic feasibility analysis is carried out for the proposed hybrid configuration under existing and future fuel scenarios in Brazil.

Key words: Solar energy, Photovoltaic system, Hybrid diesel-photovoltaic system.