



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

**ANÁLISE ECONÔMICA DE TECNOLOGIAS PARA ELETRIFICAÇÃO DE UMA PEQUENA COMUNIDADE
ISOLADA DA AMAZÔNIA**

Luis Carlos Macedo Blasques *

Álvaro Ferreira Tupiassú

João Tavares Pinho

GEDAE/UFPA

PETROBRAS S.A.

GEDAE/UFPA

RESUMO

Objetivando disponibilizar informações e fornecer meios para viabilizar o uso de fontes renováveis no processo de universalização dos serviços de eletricidade, realizou-se uma análise de sensibilidade do custo da energia elétrica fornecida a uma pequena comunidade, com características tipicamente Amazônicas, por diferentes tecnologias (interligação à rede, geração diesel-elétrica, solar fotovoltaica, eólica, biomassa e com sistema híbrido), em relação ao consumo e à disponibilidade de recursos energéticos. Verificou-se que a solução híbrida pode ser competitiva frente ao diesel e à rede, particularmente quando esta dista mais de 10 km da comunidade, e que a biomassa é vantajosa em relação ao diesel e à rede, se o seu custo inicial por capacidade instalada for inferior a US\$ 3.000,00/kW, considerada a premissa de que há combustível disponível e uma logística para sua obtenção, armazenamento e utilização.

PALAVRAS-CHAVE

Energias renováveis, Sistemas elétricos isolados, Análise econômica.

1.0 - INTRODUÇÃO

Na atual realidade do mercado elétrico brasileiro, onde o atendimento de locais remotos passa a ser obrigatório em um determinado período de tempo, dois aspectos são imediatamente abordados: o técnico e o econômico. Soluções convencionais, como a extensão da rede ou a instalação de grupos geradores a diesel, são aparentemente preferidas por representarem soluções tecnicamente consagradas. Entretanto, quando o aspecto econômico é abordado, muitas vezes essas soluções tornam-se inviáveis a longo prazo, principalmente quando a situação de isolamento é crítica, sendo este panorama particularmente verdadeiro na Região Amazônica.

Entretanto, quando há nesses locais disponibilidade de recursos naturais renováveis, tais como o solar, o eólico, o hídrico e a biomassa, a utilização desses recursos de forma ótima para geração de energia pode representar uma alternativa bastante interessante para o atendimento de pequenas e médias demandas. Um modelo de geração que parece adequado para essas localidades é o de sistemas híbridos, com a participação de grupos geradores a diesel, de forma a complementar o déficit ocasional de geração das fontes renováveis.

Tendo em vista esse cenário, este trabalho apresenta análises técnico-econômicas de diversas tecnologias para eletrificação de uma pequena comunidade isolada, típica da Amazônia. A partir de uma descrição das variáveis econômicas como funções analíticas de parâmetros técnicos dos sistemas, calcula-se a sensibilidade do custo da energia elétrica fornecida em relação à disponibilidade dos recursos energéticos e ao consumo da comunidade.

Nas seções seguintes, apresentam-se as características da comunidade considerada, o método de análise utilizado e os resultados obtidos do estudo.

2.0 - DESCRIÇÃO DO CENÁRIO

As premissas adotadas baseiam-se na experiência de campo do GEDAE – Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (1), da Universidade Federal do Pará, que, desde 1994, tem desenvolvido projetos de eletrificação com energia renovável no interior do estado do Pará.

* Caixa Postal 8605, CEP 66075-900, Belém - Pará - Brasil.
Tel.: (91) 3183-1977, Fax: (91) 3183-1299, e-mail: lblasqs@ufpa.br

O cenário é uma pequena comunidade isolada, típica da Amazônia. Considera-se que, após a eletrificação, as pequenas edificações da comunidade, que são em número de 50, incluindo residências, pequenos comércios, centro comunitário, igreja, escola, posto de saúde, e iluminação pública, comporão um total de 15 kW de potência instalada. Para esta estimativa, considera-se uma média de 300 W por edificação. Embora não seja conhecido o perfil da curva de carga, considera-se um fator de carga médio de 25%, valor comum em residências desse tipo de comunidade. Contudo, as análises econômicas consideram a influência da variação do fator de carga em torno da média adotada.

A característica do recurso energético da comunidade também é a típica para a região, com radiação solar exibindo média de 4,5 horas de Sol pleno (HSP) e velocidades de vento na faixa de 4 a 8 m/s. Entretanto, a ausência de dados confiáveis sobre radiação, vento e disponibilidade de biomassa também é considerada como parte do cenário. Com isso, a geração de cada fonte é estimada a partir de fatores de capacidade típicos, e a sensibilidade do desempenho econômico do sistema à variação desses fatores é calculada e analisada.

3.0 - CÁLCULO PARAMÉTRICO DE GERAÇÃO E CONSUMO

No dimensionamento dos sistemas de geração de energia elétrica, o rigorosamente correto é determinar a conformação dos sistemas e as potências nominais de seus elementos a partir do conhecimento detalhado das variações do recurso energético e da carga com o tempo. Entretanto, devido à inexistência de dados sobre as intensidades e variações diárias e sazonais dos recursos energéticos e da demanda, adota-se um método baseado em balanços energéticos anuais, descritos como funções analíticas de dois parâmetros: o fator de capacidade do sistema de geração e o fator de carga, que descrevem a geração e o consumo, respectivamente. O fato de os sistemas interligados à rede, a diesel e a biomassa serem despacháveis, e de os sistemas baseados em fontes intermitentes (solar e eólica) utilizarem armazenamento em baterias (o que lhes confere alguma inércia temporal no que concerne à simultaneidade geração-carga), torna essa aproximação menos passível de erro. Com a parametrização das características dos sistemas em função de fatores comuns a todos eles, torna-se mais fácil a comparação direta entre as tecnologias.

3.1 Definições

Antes de descrever o método de análise e as características das tecnologias, convém lembrar as definições de dois fatores muito utilizados neste trabalho.

3.1.1 Fator de capacidade (C)

É a razão entre a energia elétrica efetivamente gerada por um sistema durante um determinado intervalo de tempo e a energia elétrica que seria gerada caso o sistema operasse em sua potência nominal durante esse mesmo intervalo de tempo. O fator de capacidade é expresso por:

$$C = \frac{E_G}{P_N \times \Delta t}, \quad (\text{eq. 1})$$

onde E_G é a energia elétrica gerada no intervalo de tempo Δt , e P_N é a potência nominal do sistema de geração.

3.1.2 Fator de carga (L)

É a razão entre a energia elétrica consumida por uma carga durante um determinado intervalo de tempo e a energia elétrica que seria consumida caso a carga operasse com sua potência instalada durante esse mesmo intervalo de tempo. O fator de carga é expresso por:

$$L = \frac{E_C}{P_L \times \Delta t}, \quad (\text{eq. 2})$$

onde E_C é a energia consumida no intervalo de tempo Δt , e P_L é a potência instalada de carga. A razão $E_C/\Delta t$ é a demanda média do sistema.

3.2 Cálculo paramétrico do consumo de energia elétrica

É importante conhecer a energia elétrica consumida porque, conforme mostrado na seção 4.0, esse consumo é utilizado para calcular a receita proveniente da operação do sistema. De acordo com a eq. 2, o consumo de energia elétrica da comunidade é expresso por:

$$E_C = P_L \times \Delta t \times L. \quad (\text{eq. 3})$$

3.3 Cálculo paramétrico da geração de energia elétrica

É importante conhecer a energia elétrica gerada por cada sistema porque essa geração deve ser no mínimo suficiente para alimentar a carga e porque seu valor influencia o custo de operação. Em outras palavras, enquanto a energia consumida dá origem à receita, a energia gerada está relacionada com os custos do sistema.

3.3.1 Interligação à rede

Supondo-se que não haja restrição quanto ao uso da linha de transmissão que interliga a comunidade ao sistema de grande porte, a energia elétrica fornecida ("gerada") pelo sistema interligado segue o valor da carga. Para um sistema cuja única fonte é a interligação, a energia é expressa por:

$$E_{int} = k_{int} \times k_p \times P_L \times \Delta t \times L . \quad (\text{eq. 4})$$

onde E_{int} é a energia fornecida pelo sistema de grande porte à comunidade durante Δt , k_{int} é um fator para levar em conta as perdas na linha de transmissão e k_p é um fator para levar em conta as perdas na rede de distribuição da comunidade. Neste trabalho, adota-se $k_{int} = 1,15$ e $k_p = 1,10$, por considerá-los valores típicos em sistemas de transmissão e distribuição.

3.3.2 Sistema a diesel

Supondo-se que não haja restrição quanto ao abastecimento e uso de óleo diesel, a geração desse sistema também segue apenas a carga. Para um sistema cuja única fonte é o diesel, a geração é expressa por:

$$E_{diesel} = k_p \times P_L \times \Delta t \times L , \quad (\text{eq. 5})$$

onde E_{diesel} é a energia elétrica gerada pelo sistema a diesel durante Δt .

No caso de sistemas híbridos com N fontes, que incorporam o diesel como uma dessas fontes, a geração a diesel é expressa por:

$$E_{diesel} = k_p \times P_L \times \Delta t \times L - \sum_{k=1}^{N-1} E_k , \quad (\text{eq. 6})$$

onde E_k é a energia elétrica gerada pela fonte k durante Δt . Na eq. 6, considera-se que o diesel serve como reserva para eventuais déficits das outras fontes e que sempre que o gerador a diesel funcionar, estará alimentando toda a carga do sistema. O consumo de óleo diesel do sistema pode ser calculado por meio da relação de Skarstein-Uhlen, expressa pela equação abaixo (2):

$$F = 0,08415 P_{diesel} + 0,246 P , \quad (\text{eq. 7})$$

onde F é o consumo de óleo diesel, em litros por hora, P_{diesel} é a potência nominal do grupo gerador, em kW, e P é a potência demandada, também em kW. Considerando que P é a demanda média, igual a $k_p \times P_L \times L$, e convertendo o consumo de combustível para litros por ano, pode-se reescrever a eq. 7 como:

$$F = 737,154 P_{diesel} + 2.154,96 \times k_p \times P_L \times L , \quad (\text{eq. 8})$$

que fornece o consumo médio de óleo diesel por ano, em função do fator de carga.

3.3.3 Sistema solar fotovoltaico

Considera-se que a geração de um sistema fotovoltaico é expressa por:

$$E_{FV} = P_{FV} \times \Delta t \times C_{FV} , \quad (\text{eq. 9})$$

onde E_{FV} é a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico (FV) durante Δt , P_{FV} é a potência nominal do sistema de geração e C_{FV} é o fator de capacidade do sistema. Na prática, é mais comum expressar a geração FV em função de HSP, a quantidade diária de horas de Sol pleno, do que em função de C_{FV} . O fator de capacidade de um sistema FV é expresso em função de HSP por:

$$C_{FV} = k_{FV} \times \frac{HSP}{24} , \quad (\text{eq. 10})$$

onde k_{FV} é um fator de correção que considera a dispersão nas características nominais dos módulos, o efeito da temperatura e as perdas nos condutores, acessórios e demais componentes do sistema, como inversores e controladores de carga. Considera-se que $k_{FV} = 0,8$ (3). Como os valores típicos de HSP na Amazônia ficam na faixa de 3 a 5, fatores de capacidade típicos de sistemas FV na região ficam entre 10% e 17%.

3.3.4 Sistema eólico

Considera-se que a geração de um sistema eólico é expressa por:

$$E_{eolico} = P_{eolico} \times \Delta t \times C_{eolico} , \quad (\text{eq. 11})$$

onde E_{eolico} é a energia elétrica gerada pelo sistema eólico durante Δt , P_{eolico} é a potência nominal do sistema de geração e C_{eolico} é o fator de capacidade do sistema, que depende fortemente da turbina e do perfil de velocidade de vento do local onde esta for instalada. Valores típicos de C_{eolico} são da ordem de 25 a 35%, embora algumas situações, não tão comuns, apontem para valores inferiores e superiores a estes.

3.3.5 Sistema a biomassa

Por serem despacháveis como os sistemas interligado e a diesel, os sistemas isolados em que a única fonte é a biomassa têm geração expressa por:

$$E_{bio} = k_p \times P_L \times \Delta t \times L , \quad (\text{eq. 12})$$

onde E_{bio} é a energia elétrica gerada pelo sistema a biomassa durante Δt . O consumo de combustível do sistema pode ser calculado a partir do conhecimento do poder calorífico da biomassa utilizada, por meio da expressão:

$$F_{bio} = \frac{E_{bio}}{pc_{bio}} , \quad (\text{eq. 13})$$

onde F_{bio} é o consumo de combustível, em kg, e pc_{bio} é o poder calorífico do mesmo, em kWh/kg. Substituindo-se a eq. 12 na eq. 13, obtém-se:

$$F_{\text{bio}} = \frac{k_p \times P_L \times \Delta t \times L}{pC_{\text{bio}}} \quad (\text{eq. 14})$$

4.0 - CÁLCULO DO CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA

Qualquer que seja a tecnologia selecionada para eletrificação da comunidade, haverá custos de diversas naturezas. A necessidade do investidor de cobrir esses custos e auferir lucro é o que determinará o custo da energia para o consumidor. Considera-se que o custo da energia elétrica gerada pelo sistema é expresso por:

$$CE = \frac{CCVa}{E_C} \quad (\text{eq. 15})$$

onde CE é o custo da energia elétrica, CCVa é o custo do ciclo de vida anualizado do sistema e E_C é a energia elétrica consumida no período de um ano ($\Delta t = 8.760$ h). No denominador da eq. 15 é utilizado E_C , e não E_G , porque é do consumo de energia elétrica que virão as receitas para pagar o custo do sistema. Pode-se reescrever a eq. 15 em função de L como:

$$CE = \frac{CCVa}{L \times P_L \times \Delta t} \quad (\text{eq. 16})$$

O custo do ciclo de vida anualizado é expresso por:

$$CCVa = [(CI + CRp) \times FRC(i, n)] + CO + CM \quad (\text{eq. 17})$$

onde CI é o custo inicial do sistema, CRp a soma dos valores presentes dos custos de reposição dos componentes do sistema, CO o custo de operação, CM o custo de manutenção e FRC(i, n) o fator de recuperação de capital, expresso por:

$$FRC(i, n) = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{eq. 18})$$

onde i é o custo do capital e n é o período de análise. Os custos que aparecem na eq. 17, compondo o custo total do sistema, são:

- Custos iniciais (CI): referem-se a projeto, aquisição, transporte e instalação de todo o aparato necessário à entrada em operação do sistema de energia elétrica;
- Custos de reposição trazidos a valor presente (CRp): referem-se às substituições dos componentes principais do sistema, devido ao fim da vida útil dos mesmos. Pelo fato de as vidas úteis possuírem caráter aleatório intrínseco, determina-se, na prática, um tempo de vida útil contábil para cada equipamento, de acordo com médias conhecidas. Assim, se o equipamento durar tempo menor do que o contábil, arca-se com prejuízo. Por outro lado, se tiver boa sobrevida além da vida contábil, auferir-se lucro. A escolha da vida útil contábil depende do risco que o investidor deseja assumir. Certamente, vidas úteis contábeis longas reduzem o custo da energia. A atitude conservadora de escolher vidas úteis contábeis curtas diminui o risco para o investidor em troca de um aumento do custo da energia para o consumidor. A soma dos valores presentes dos custos de reposição é expressa por:

$$CRp = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{m=1}^{R_j} \frac{CI_j}{(1+i)^{mT_j}} \right) \quad (\text{eq. 19})$$

onde k é o número de componentes do sistema, CI_j o custo do componente j, T_j sua vida útil contábil e R_j o número de reposições do mesmo durante o período de análise n;

- Custos de operação (CO): referem-se aos custos necessários ao funcionamento do sistema. Considera-se que esses custos resumem-se praticamente aos custos com combustíveis. Por isso, esses custos são proporcionais à energia elétrica gerada pelo sistema (igual a consumo mais perdas);
- Custos de manutenção (CM): referem-se a custos com manutenções preventivas e pequenas manutenções corretivas. Não devem ser confundidos com os custos de reposição, que se dão pela compra de peças para reposição. Considera-se que o custo de manutenção é proporcional ao custo inicial, à potência nominal ou à energia elétrica anualmente gerada.

5.0 - DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS

Para fins de cálculos de viabilidade econômica, são descritos nesta seção os custos de todos os sistemas considerados. Nas informações sobre os custos dos equipamentos, aqueles fabricados fora do país têm seus custos apresentados em dólares, sendo considerada taxa cambial do dia 17/12/2004, US\$ 1,00 = R\$ 2,72. Assume-se ainda que todos os sistemas de geração propostos entregarão a energia a uma rede de distribuição de baixa tensão trifásica, em 127/220 V, 60 Hz. Os custos dessa rede, que são somados a todos os sistemas apresentados na seqüência, são:

- CI_{rede} = R\$ 30.500,00
- Cabos elétricos = R\$ 12.000,00
- Postes = R\$ 8.000,00

- Medidores = R\$ 7.500,00 (50 medidores de R\$ 150,00 cada)
- Instalação = R\$ 3.000,00
- $CM_{rede} = 10\% CI_{rede} = R\$ 3.050,00 /ano$
- $CO_{rede} = 0$
- $CRp_{rede} = 0$ (reposições incluídas no custo de manutenção)

5.1 Interligação à rede

Trata-se de uma linha de transmissão trifásica em 13,8 kV, com transformador abaixador trifásico de 30 kVA. Supõe-se que o circuito mais próximo em 13,8 kV, pertencente ao sistema interligado, de onde se pode fazer a ligação, está a uma distância $d = 10$ km da comunidade. Os custos do sistema são:

- $CI_{int} = (18.000 \times d + 4.000) = R\$ 184.000,00$
- Linha de transmissão = R\$ 18.000,00 /km
- Transformador = R\$ 4.000,00
- $CM_{int} = 10\% CI_{int} = (1.800 \times d + 400) /ano = R\$ 18.400,00/ano$
- $CO_{int} = R\$ 0,23108 /kWh * (calculado sobre E_{int})$
- $CRp_{int} = 0$ (reposições incluídas no custo de manutenção)

* Tarifa TE+TUSD+TUST (Tarifa de Energia + Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição + Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão) da concessionária local (CELPA) para consumidores do grupo B, baixa renda, faixa de consumo de 31 a 100 kWh/mês (conforme Resolução 192 da ANEEL, de 6 de agosto de 2004), acrescida de ICMS de 25%.

5.2 Sistema a diesel

Trata-se de um gerador a diesel de 20 kVA, 220/127 V, 60 Hz, operando 24 h/dia. Os custos do sistema são:

- $CI_{diesel} = R\$ 35.000,00$
- Gerador = R\$ 20.000,00
- Casa de força = R\$ 12.000,00
- Serviços = R\$ 3.000,00
- $CM_{diesel} = US\$ 0,10 /kWh = R\$ 0,272 /kWh (4) (calculado sobre E_{diesel})$
- CO_{diesel} dado pela eq. 8 multiplicada por C_{diesel}
- $C_{diesel} = R\$ 2,00 /litro$ (custo do óleo diesel)
- $CRp_{diesel} = 0$ (pequenas reposições incluídas no custo de manutenção)

5.3 Sistema solar fotovoltaico

Sabe-se que um sistema fotovoltaico autônomo, baseado na tecnologia atualmente disponível, não alimenta uma carga de 15 kW de forma econômica. Ainda assim, apenas para fins de comparação com os outros sistemas, calcula-se o custo da energia elétrica gerada por um sistema FV autônomo, dimensionado para carga instalada de 15 kW, com fator de carga de 50%. Os componentes são: 704 módulos FV de 80 W_p, 334 baterias de 12 V/150 Ah, 1 inversor de 15 kW e 14 controladores de carga de 30 A. Os custos básicos do sistema são:

- $CI_{FV} = R\$ 1.143.240,00$
- Módulo = US\$ 500,00 = R\$ 1.360,00
- Bateria = R\$ 300,00
- Inversor = R\$ 35.000,00
- Controlador = R\$ 400,00
- Casa de força = R\$ 15.000,00
- Serviços = R\$ 30.000,00
- $CM_{FV} = 0,1\% CI_{FV}$ (custo global do sistema, incluindo todos os componentes e serviços) = R\$ 1.143,24 /ano
- $CO_{FV} = 0$
- $CRp_{FV} \rightarrow 1$ reposição para o inversor, após 7 anos; 3 reposições para as baterias, uma a cada 3 anos.

5.4 Sistema eólico

Os componentes são: 4 aerogeradores de 7,5 kW em torres de 30 metros de altura, 334 baterias de 12V/150Ah e 1 inversor de 15 kW. Este sistema está dimensionado para atender carga semelhante à do FV. Os custos básicos do sistema são:

- $CI_{eolico} = R\$ 468.680,00$
- Aerogerador = US\$ 21.000,00 = R\$ 57.120,00
- Torre = R\$ 15.000,00
- Outros custos (bateria, inversor, casa de força e serviços): idênticos aos do sistema FV.
- $CM_{eolico} = US\$ 22,50 /kW = R\$ 61,20 /kW = R\$ 1.836,00 /ano (4)$
- $CO_{eolico} = 0$
- CRp_{eolico} idênticos aos do sistema FV.

5.5 Sistema a biomassa

Não se define uma tecnologia de bio-conversão a ser utilizada e um custo inicial para o sistema. Em vez disso, considera-se que esse custo (incluindo os equipamentos e a infra-estrutura de armazenamento e uso do

combustível, excluindo a casa de força) é um parâmetro variável, para que sua influência sobre o custo da energia elétrica seja observada. Os custos do sistema são:

$$CI_{\text{bio}} = 12.000 + c_{\text{kW}} \times P_{\text{bio}}, \text{ onde } P_{\text{bio}} = 15 \text{ kW e } c_{\text{kW}} \text{ varia de } 1.000 \text{ a } 8.000 \text{ US\$/kW ou } 2.720 \text{ a } 21.760 \text{ R\$/kW}$$

- Casa de força = R\$ 12.000,00
 $CM_{\text{bio}} = \text{US\$ } 0,20 / \text{kWh} = \text{R\$ } 0,544 / \text{kWh}$ (adotado como o dobro do sistema a diesel; calculado sobre E_{bio})
 CO_{bio} dado pela eq. 14 multiplicada por c_{bio}
 - c_{bio} = custo da biomassa = US\$ 0,10 /kg = R\$ 0,272 /kg *
 $CR_{\text{p}_{\text{bio}}} = 0$ (reposições incluídas no custo de manutenção)

* Há possibilidade de que esse custo seja menor ou até mesmo negativo, porque, em alguns casos, o usuário tem despesa para remoção de resíduos. O uso do resíduo como combustível pode ter o efeito de uma economia.

Supõe-se que seja gerado 1 kWh com um consumo de 1,2 a 1,4 kg de biomassa (5), o que faz com que o pc_{bio} médio seja de 0,77 kWh/kg. Supõe-se, também, que há combustível em quantidade suficiente para suprir a carga.

5.6 Sistema híbrido solar-eólico-diesel

O sistema é composto por três fontes primárias distintas: a eólica, a solar fotovoltaica e a diesel-elétrica. Os componentes básicos são: um aerogerador de 7,5 kW, instalado em torre de 30 metros de altura, 40 módulos FV de 80 Wp, 40 baterias de 12 V/150 Ah, 1 controlador de carga de 30 A, 1 inversor de 15 kW e um gerador a diesel de 20 kVA trifásico, em 127/220 V e 60 Hz (utilizado somente nos períodos de indisponibilidade de geração eólica e solar, sendo fundamental para garantir a continuidade do atendimento aos consumidores). O sistema de conversão DC-AC é compartilhado pelos sistemas FV e eólico. Considerando os custos dos equipamentos e da casa de força idênticos aos dos sistemas a diesel, solar e eólico autônomos, tem-se:

$$CI_{\text{híbrido}} = \text{R\$ } 248.920,00$$

- Serviços = R\$ 40.000,00
 $CM_{\text{híbrido}} = CM_{\text{diesel}} + CM_{\text{FV}} + CM_{\text{eólico}} = \text{R\$ } 0,272 / \text{kWh}_{\text{diesel}} + 2\% CI_{\text{módulos}}$ (custo de aquisição apenas dos módulos FV) + R\$ 61,20 /kWh_{eólico}
 $CO_{\text{híbrido}} = CO_{\text{diesel}}$
 $CR_{\text{p}_{\text{híbrido}}}$ idênticos aos do sistema FV.

6.0 - RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados das análises de sensibilidade do custo da energia elétrica de cada sistema (que também pode ser entendido como a tarifa a ser cobrada dos consumidores para viabilizar os sistemas de geração) em relação ao fator de carga e ao fator de capacidade. Para os cálculos econômicos, feitos com as eq. 15 a 19, considerou-se custo de capital $i = 15\%$ ao ano e período de análise $n = 10$ anos.

A Tabela 1 apresenta os custos anuais dos sistemas interligado, a diesel, híbrido e a biomassa, para $d = 10$ km, $L = 25\%$, $C_{\text{eólico}} = 27,5\%$ (fator de capacidade do subsistema eólico do sistema híbrido) e 4,5 HSP (subsistema FV).

A Figura 1 compara os sistemas FV e eólico autônomos aos outros sistemas, apenas para evidenciar a grande diferença entre os custos. O custo do sistema FV é altíssimo porque, conforme enfatizado na seção 5.3, um sistema FV autônomo não supre uma carga de 15 kW de forma econômica. Mais uma vez, frisa-se que o sistema FV só foi incluído neste trabalho para ilustração e generalização.

A Figura 2 compara os sistemas interligado ($d = 10$ km), a diesel e híbrido (4,5 HSP). Cada curva do sistema híbrido corresponde a um valor de $C_{\text{eólico}}$ (fator de capacidade do subsistema eólico). Quanto maior $C_{\text{eólico}}$, menor o custo da energia do sistema híbrido, pois menor é a participação do diesel em sua geração total.

A Figura 3 compara os sistemas interligado ($d = 10$ km), a diesel e a biomassa. Cada curva do sistema a biomassa corresponde a um valor de c_{kW} . Para os fatores de carga típicos (25% a 30%), a energia do sistema a biomassa tem custo menor do que a dos outros, desde que c_{kW} seja menor do que US\$ 3.000 /kW.

A Figura 4 compara os sistemas interligado ($d = 10$ km), a diesel, híbrido (4,5 HSP e $C_{\text{eólico}} = 27,5\%$) e a biomassa ($c_{\text{kW}} = \text{US\$ } 3.000 / \text{kWh}$), mostrando que todos apresentam custo de mesma ordem de grandeza, sendo que a interligação, o diesel e a biomassa revezam-se como a melhor opção, conforme varia o fator de carga. Para as condições descritas, se $L \leq 25\%$, a biomassa tem menor custo; se $25\% < L \leq 30\%$, o diesel é a melhor opção; se $L > 30\%$, é justificável a interligação à rede de grande porte.

TABELA 1 – Custos anuais dos sistemas interligado, a diesel, híbrido e a biomassa.

Ano	Consumo (MWh)	Interligado				Diesel			
		CI	CO	CM	CR	CI	CO	CM	CR
0	0	78.860,29	0,00	0,00	0,00	24.080,08	0,00	0,00	0,00
1	32,85	0,00	3.530,36	7.886,03	0,00	0,00	15.750,61	4.734,82	0,00
2	32,85	0,00	3.530,36	7.886,03	0,00	0,00	15.750,61	4.734,82	0,00
...
10	32,85	0,00	3.530,36	7.886,03	0,00	0,00	15.750,61	4.734,82	0,00

Ano	Consumo (MWh)	Biomassa				Híbrido			
		CI	CO	CM	CR	CI	CO	CM	CR
0	0	60.625,00	0,00	0,00	0,00	102.727,94	0,00	0,00	0,00
1	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	0,00
2	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	0,00
3	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	4.411,76
4	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	0,00
5	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	0,00
6	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	4.411,76
7	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	12.867,65
8	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	0,00
9	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	4.411,76
10	32,85	0,00	4.692,86	8.348,32	0,00	0,00	6.042,51	3.076,34	0,00

Obs.: valores em US\$; linhas omitidas nos dados dos sistemas interligado e a diesel têm valores idênticos aos do ano 2.

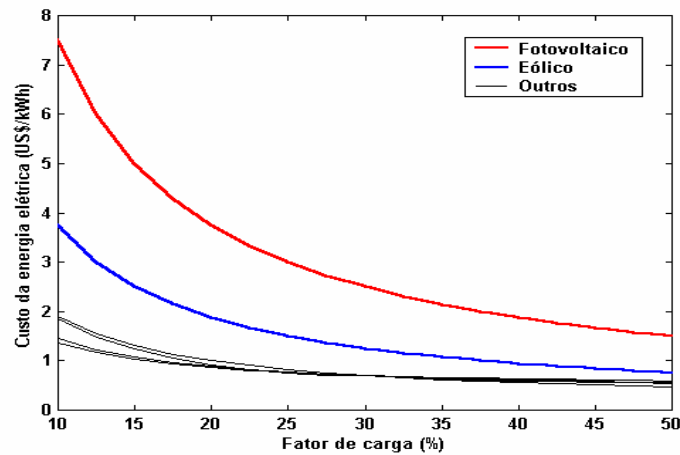
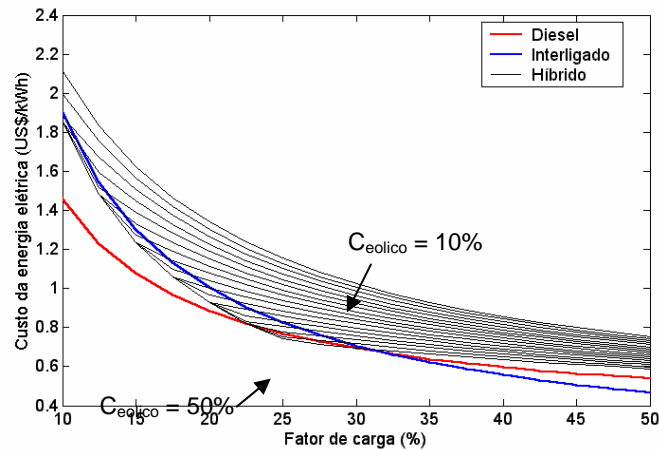


FIGURA 1 – Comparação dos sistemas FV e eólico autônomos com os outros sistemas.

FIGURA 2 – Comparação entre os sistemas interligado, a diesel e híbrido (C_{eolico} em passos de 2,5%).

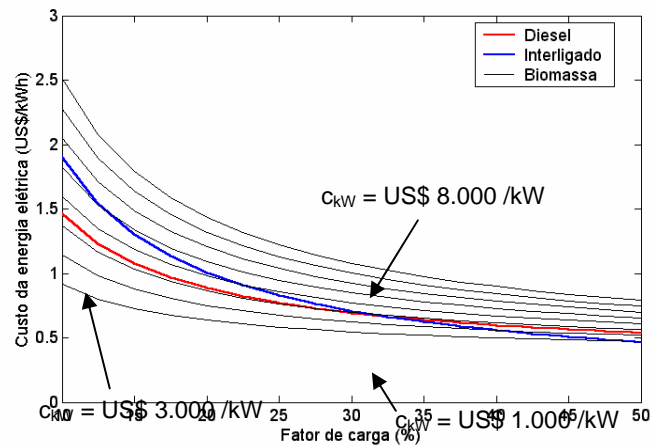


FIGURA 3 – Comparação entre os sistemas interligado, a diesel e a biomassa (c_{kW} em passos de US\$ 1.000 /kW).

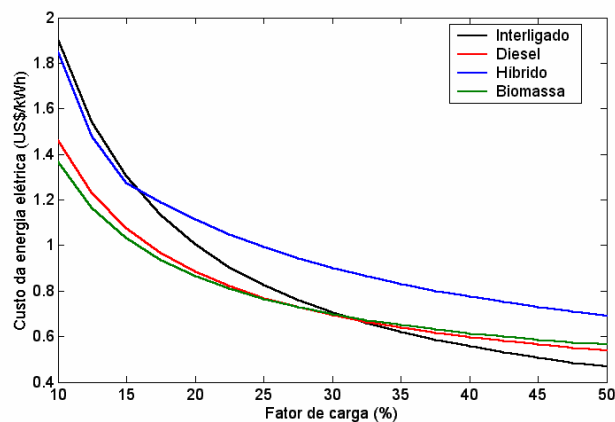


FIGURA 4 – Comparação entre os sistemas interligado, a diesel, híbrido e a biomassa.

7.0 - CONCLUSÕES

A solução híbrida solar-eólica-diesel reúne as vantagens de cada subsistema, reduz seus pontos fracos, e pode competir com o diesel e a interligação à rede, sobretudo se esta distar mais de 10 km da comunidade. O sistema a biomassa é uma boa opção ao diesel e à interligação, desde que seu custo inicial por capacidade instalada seja inferior a US\$ 3.000 /kW. Se questões ambientais, como o custo da emissão de gases, e sócio-econômicas, como atividades econômicas integradas à logística da biomassa, fossem levadas em conta, os sistemas híbrido e a biomassa seriam ainda mais favoráveis. É importante dizer que os valores apresentados não devem ser tomados como regra geral, pois só são verdadeiros nas condições aqui adotadas. De toda forma, os resultados sinalizam que já existem alternativas competitivas ao diesel e à interligação para a eletrificação de pequenas comunidades isoladas. Um fator que continua pesando em favor do diesel e contra as alternativas é o custo inicial destas, ainda muito elevado. O desenvolvimento de equipamentos com tecnologia nacional poderia reduzir esses elevados custos iniciais, abrindo ainda mais caminho para a eletrificação a partir de fontes renováveis de energia. Entre os possíveis trabalhos futuros, estão métodos para determinar de forma ótima a potência de cada fonte no esquema híbrido e, principalmente, a definição dos meios para aproveitar os combustíveis renováveis disponíveis na Amazônia, de forma integrada com as atividades econômicas necessárias ao desenvolvimento da região.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas, GEDAE/UFGA (<http://www.ufpa.br/gedae>).
- (2) Hunter, R. e G. Elliot, "Wind-Diesel Systems", Cambridge University Press, 1994.
- (3) BLASQUES, L.C.M. Análise de Características Técnicas e Viabilidade Econômica de Sistemas Solares Fotovoltaicos; Trabalho de Conclusão de Curso, UFGA, Belém, 2003.
- (4) BILLINTON, R., KARKI, R. Capacity Expansion of Small Isolated Power Systems Using PV and Wind Energy; IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, no. 4, November 2001.
- (5) LANE, N.W., BEALE, W.T. A biomass-fired 1 kWe Stirling Engine Generator and Its Applications in South Africa; disponível em <http://www.sunpower.com/technology/index.html>. Acesso realizado em 29/12/2004.