AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICO-EÓLICO-DIESEL PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NA AMAZÔNIA

Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa – cfob@ufpa.br
João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br
Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

Resumo. *O objetivo deste trabalho é contribuir com informações econômicas sobre os Sistemas Híbridos de Energia implantados em comunidades isoladas da Região Amazônica e baseados no aproveitamento das fontes de energia renováveis solar e eólica, e não renovável diesel-elétrica. O trabalho apresenta primeiramente uma breve identificação e caracterização dos três sistemas em estudo, através das referências bibliográficas existentes. Os custos iniciais, o balanço econômico (receitas versus despesas) e o custo do kWh gerado são analisados em seguida para vários cenários de demanda. Os resultados obtidos dessa análise revelam que o elevado custo inicial dos sistemas híbridos e, conseqüentemente, o valor do seu kWh gerado, constitui-se como a principal barreira para sua replicabilidade. Desenvolver equipamentos nacionais e apropriados para a Região Amazônica poderia ajudar a transpor tal barreira. Com relação ao balanço econômico, uma alternativa de se encontrar um melhor ponto de equilíbrio seria a adoção de um subsídio como, por exemplo, a conta de consumo de combustível. Subsídio este estudado no trabalho.*

Palavras-chave: *Sistemas Híbridos de Energia, Sistemas Isolados, Fontes de Energia Renováveis, Fonte de Energia Não Renovável, Avaliação Econômica*

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, dado o seu tamanho continental e a própria forma de ocupação ao longo do tempo, o serviço de eletricidade não contempla todos os cidadãos, apesar dos esforços do Governo Federal em reverter esse quadro nos últimos anos (implementação da Universalização do Serviço de Eletricidade e do Programa Luz Para Todos). Por exemplo, em muitas áreas isoladas da Região Amazônica, o fornecimento de eletricidade pela rede elétrica convencional não existe, dadas as dificuldades de acesso e os custos elevados para construção de subestações e de longos circuitos de transmissão e distribuição, que somente atenderão algumas poucas unidades consumidoras.

Por este motivo, até o presente momento, a alternativa mais comum para o atendimento dessas vilas isoladas é através de pequenos e médios sistemas de geração diesel-elétricos.

Entretanto, a operação dos sistemas diesel-elétricos nessas áreas não é tão simples, pois, além das dificuldades de disponibilidade do combustível no local, do seu armazenamento e manuseio, existem ainda os custos associados à aquisição e transporte do combustível e à manutenção e operação do conjunto motor-gerador.

A utilização de fontes de energia locais e renováveis, tais como a solar (fotovoltaica) e a eólica, combinadas com os sistemas diesel-elétricos (eventualmente utilizados para complementar o déficit da geração renovável) na configuração de sistemas híbridos de energia, mostra-se tecnicamente viável, flexível e, dependendo do caso, bem atrativa economicamente para o atendimento das pequenas e médias demandas nessas áreas.

Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma avaliação econômica de três sistemas híbridos de energia implantados para geração de eletricidade e distribuição através de minirredes na Amazônia, mais precisamente no Estado do Pará, a saber: sistema eólico-diesel de Praia Grande, município de Ponta de Pedras (ano de início de operação – 1998); sistemas fotovoltaico-eólico-diesel de Tamaruteua, município de Marapanim (ano de início de operação – 1999, sendo revitalizado em 2007, condição de estudo), e de São Tomé, município de Maracanã (ano de início de operação – 2003). Esses sistemas são caracterizados na Seção 1.

Na Seção 2, levantam-se os custos iniciais dos sistemas e, em seguida, abordam-se o balanço econômico anual e o custo do kWh gerado de cada sistema híbrido para várias condições de demanda média. Tais aspectos econômicos são comparados e analisados com os referentes ao atendimento somente diesel-elétrico. Além disso, para as duas formas de atendimento, simula-se a situação em que o custo do óleo diesel total para os sistemas elétricos é subsidiado pela conta de consumo de combustível (CCC).

2. IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS

2.1 Sistema híbrido eólico-diesel da vila de Praia Grande

Em setembro de 1998, com financiamento do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)/Programa do Trópico Úmido (PTU), implantou-se o sistema híbrido

eólico-diesel da vila de Praia-Grande (1º 22' 54'' S e 48º 50' 10'' W, Ponta de Pedras/Pará – Fig. 1) para abastecer as residências, o centro comunitário, a escola, o sistema de bombeamento de água da vila e a iluminação pública (Rego, 1999; Vale, 2000). A figura 2 apresenta o diagrama de blocos do sistema.

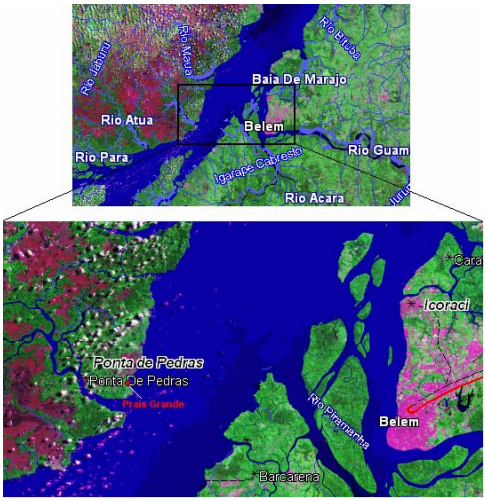

Figura 1- Mapa de localização de Praia Grande.

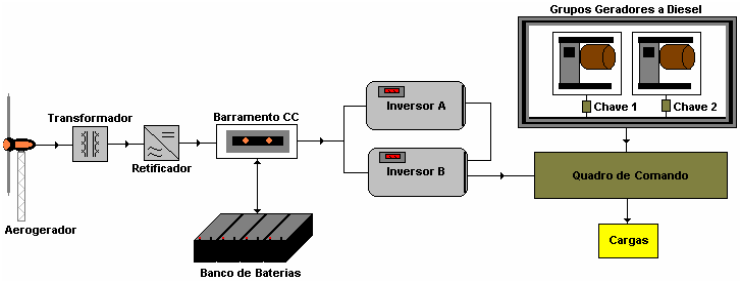

Figura 2- Diagrama de blocos do sistema de Praia Grande.

Os parceiros desse projeto foram o Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas/Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA, executor), o Instituto de Desenvolvimento Econômico-Social do Pará (IDESP), a Prefeitura Municipal de Ponta de Pedras, a Associação dos Produtores Rurais de Praia Grande (ASPRADE) e a concessionária local (Grupo Rede/Celpa).

Os principais dados desse sistema elétrico são: 1 aerogerador de 10 kW (7,5 kW referência); 1 controlador de carga (retificador); 1 transformador de 30 kVA; 2 inversores estáticos de 4 kW cada; 1 banco de baterias - 20 unidades chumbo-ácido, 12 V_{CC}/150 Ah (série/paralelo 48 V_{CC}); 1 torre treliçada estaiada (20 m de altura); 2 grupos geradores a diesel de 7,5 kVA (6 kW) cada. A Fig. 3 mostra alguns dos componentes.

a. Aerogerador. b. Banco de baterias.

Figura 3- Componentes do sistema de Praia Grande.

2.2 Sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel da vila de Tamaruteua

O sistema fotovoltaico-eólico-diesel de Tamaruteua (0º 34' 57'' S e 47º 45' 28'' W, Marapanim/Pará – Fig. 4), financiado pelo MCT/CNPq/PTU, foi implantado em junho de 1999. Sua geração abastece residências, escola, comércios, igrejas, prédios de uso diverso (salga de peixe, depósito e casa de farinha) da vila e iluminação pública (Macedo, 1999; Projeto PNUD BRA/99/11, 2002).

Figura 4- Mapa de localização de Tamaruteua.

A Fig. 5 apresenta o diagrama de blocos desse sistema.

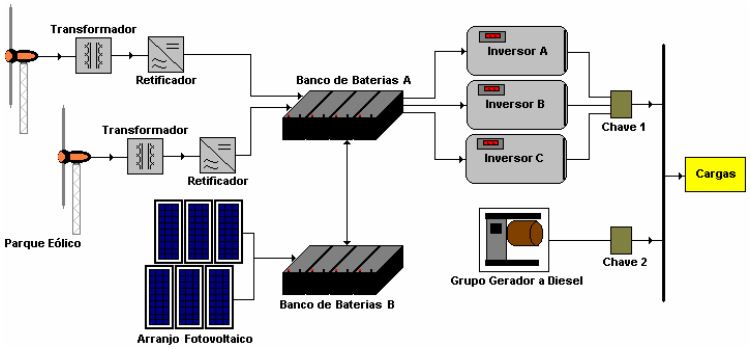

Figura 5- Diagrama de blocos do sistema de Tamaruteua.

O executor do projeto foi o GEDAE/UFPA, com apoio do Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE)/Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTAM), Prefeitura Municipal de Marapanim e Grupo Rede/Celpa.

Os principais dados desse sistema são: 1 arranjo fotovoltaico de 1,92 kWp (módulos de 120 Wp); 1 banco de baterias - 64 unidades chumbo-ácido, 6 V_{CC}/350 Ah (série/paralelo 48 V_{CC}); 3 inversores estáticos de 5,5 kW cada; 1 grupo gerador a diesel de 30 kVA (24 kW); 2 aerogeradores de 10 kW cada (7,5 kW referência); 2 controladores de carga (retificador); 2 transformadores de 30 kVA cada; 2 torres treliçadas estaiadas (24 m e 30 m de altura). A Fig. 6 mostra alguns dos componentes desse sistema.

a. Módulos fotovoltaicos.

b. Sistema de condicionamento de potência (retificação/inversão).

Figura 6- Componentes do sistema híbrido de Tamaruteua.

Em 2007 este sistema foi expandido e revitalizado com financiamento do Ministério de Minas e Energia (MME) e CNPq, através do fundo CT-ENERG. As atividades desenvolvidas foram realizadas pelo GEDAE/UFPA e resumem-se a:

- Aumento de 100 % da capacidade de geração fotovoltaica (de 1,92 para 3,84 kWp);
- Manutenção nos conjuntos torre/aerogeradores (substituição dos cabos de estaiamento, apertos de parafusos de fixação da torre, limpeza das pás e nacele, verificação dos cabos elétricos e chaves, etc.);
- Substituição do grupo gerador a diesel por um automático e dos inversores de tensão por uma única unidade de inversão/retificação;
- Instalação de controladores de carga no sistema fotovoltaico e de uma unidade de retificação (responsável em retificar a tensão CA do grupo gerador em CC para o carregamento do banco de baterias);
- Automação do sistema;
- Revitalização da minirrede de distribuição e instalação de conjuntos elétricos residenciais contendo lâmpadas eficientes, interruptores, tomadas e fiação elétrica adequada;
- Instalação de medidores de pré-pagamento pelo serviço de energia (sistema pré-pago).

A Fig. 7 mostra configuração do sistema após a revitalização.

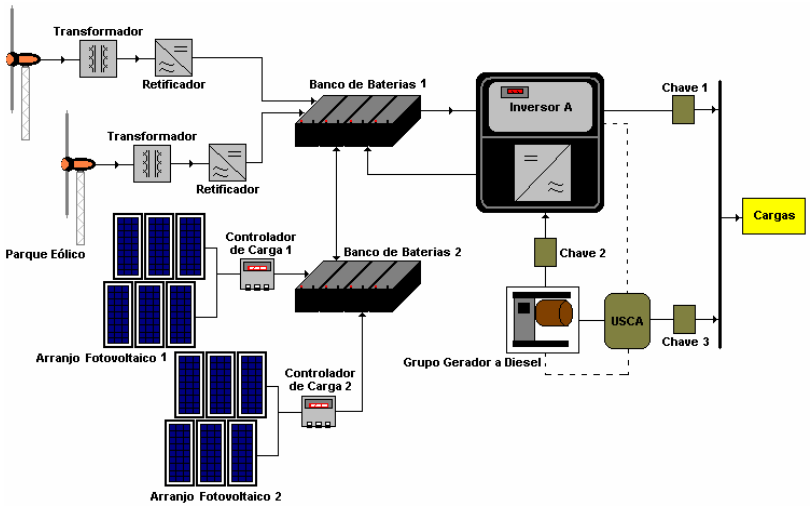

Figura 7- Diagrama de blocos do sistema de Tamaruteua revitalizado.

Os principais dados desse sistema são: 1 arranjo fotovoltaico de 3,84 kWp (módulos de 120 Wp); 2 controladores de carga; 2 aerogeradores de 10 kW cada (7,5 kW referência); 2 controladores de carga (retificador); 2 transformadores de 30 kVA cada; 2 torres treliçadas estaiadas (24 m e 30 m de altura); 1 banco de baterias - 64 unidades chumbo-ácido, 12 V_{CC}/185 Ah (série/paralelo 48 V_{CC}); 1 inversor estático de 18 kW; 1 grupo gerador a diesel de 40 kVA (32 kW). A Fig. 8 mostra alguns dos novos equipamentos instalados.

(a) Banco de baterias.

(b) Grupo gerador a diesel.

Figura 8- Novos componentes do sistema de Tamaruteua.

2.2 Sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel da vila de São Tomé

O sistema fotovoltaico-eólico-diesel de São Tomé (0º 44' 24'' S e 47º 28' 59'' W, Maracanã/Pará – Fig. 9), financiado pela Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRÁS) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), através do fundo CT-PETRO, foi implantado em setembro de 2003, com a finalidade de abastecer as 67 unidades consumidoras da vila (Barbosa, 2004).

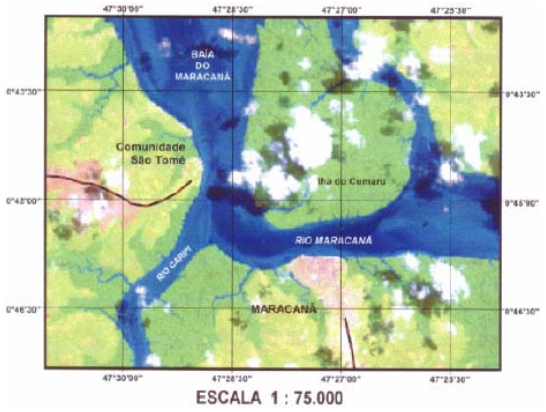

Figura 9- Mapa de localização da vila de São Tomé.

A Fig. 10 mostra o diagrama de blocos do sistema híbrido.

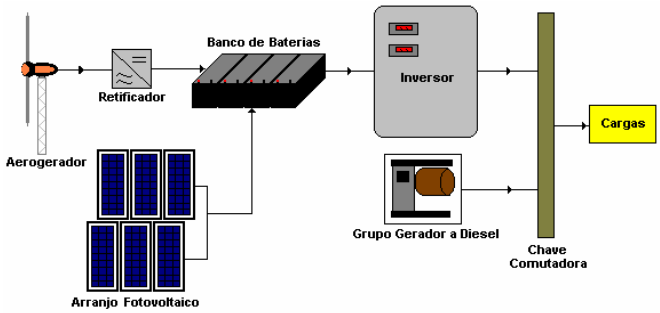

Figura 10- Diagrama de blocos do sistema de São Tomé.

O projeto foi também executado pelo GEDAE/UFPA, com apoio da Agência Estadual de Regulação e Controle de Serviços Públicos (ARCON), Prefeitura Municipal de Maracanã e o Grupo Rede/Celpa.

Os seus principais componentes são: 1 arranjo fotovoltaico de 3,2 kWp (módulos de 80 Wp); 1 aerogerador de 10 kW (7,5 kW referência); 1 controlador de carga (retificador); 1 torre treliçada estaiada (30 m de altura); 1 banco de

baterias - 40 unidades chumbo-ácido, 12 V_{CC}/150 Ah (série/paralelo 120 V_{CC}); 1 inversor estático de 15 kW; 1 grupo gerador a diesel de 20 kVA (16 kW). A Fig. 11 mostra alguns dos componentes do sistema híbrido.

(a) Inversor de tensão.

(b) Aerogerador.

Figura 11- Componentes do sistema de São Tomé.

3. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Na avaliação econômica a seguir, são abordados como estudos de caso os sistemas híbridos de Praia Grande, Tamaruteua (revitalizado) e São Tomé. A análise conta com a exposição dos custos iniciais, do balanço econômico anual e do custo do kWh gerado de cada sistema, para várias condições de demanda. Os últimos dois aspectos econômicos são comparados com os referentes ao atendimento somente diesel-elétrico.

Ademais, para as duas formas de atendimento supracitadas, simula-se a situação em que o custo do óleo diesel total para os sistemas é subsidiado pela conta de consumo de combustível (CCC), reduzindo-o a apenas 26 % do valor real. A CCC é um subsídio dado pelo Governo Federal aos sistemas isolados que utilizam óleo combustível como fonte primária.

3.1 Custos iniciais

A Tab. 1 mostra a composição e a distribuição percentual dos custos dos sistemas híbridos.

Tabela 1. Custos iniciais dos sistemas híbridos.

DESCRIÇÃO	PRAIA GRANDE		TAMARUTEUA		SÃO TOMÉ	
	R$	%	R$	%	R$	%
I - Geração renovável	38.451,94	55,73	221.722,83	62,24	134.132,57	49,50
II - Geração diesel-elétrica	11.590,00	16,80	28.000,00	7,86	11.940,00	4,41
III - Materiais elétricos e construção	9.754,99	14,14	8.296,62	2,33	17.352,50	6,40
IV - Serviços	5.416,00	7,85	49.042,12	13,77	88.011,63	32,48
V - Acessórios	3.787,91	5,48	49.204,52	13,80	19.533,50	7,21
Total	69.000,84	100	356.266,09	100	270.970,20	100

Nota: O custo da minirrede de cada sistema está distribuído em III a V.

Da Tab. 1, constata-se que o maior dispêndio para implantação de um sistema híbrido corresponde à aquisição dos equipamentos que compõem o subsistema de geração renovável. Por exemplo, os subsistemas de geração renovável de São Tomé e de Tamaruteua, em comparação com os de geração diesel-elétrica (grupo gerador a diesel), chega a ser cerca de 10 e 8 vezes superior, respectivamente. Tal discrepância entre os custos envolvidos na geração renovável e diesel-elétrica (não renovável) é em virtude dos altos custos que ainda se aplicam à tecnologia dos “geradores renováveis”.

3.2 Balanço econômico

Para o balanço econômico foram considerados:

- Praia grande - Taxa média cobrada por unidade consumidora: 10,00 R$/mês (total da vila: 220,00 R$/mês). 15 % do valor total da receita é destinado ao pagamento dos operadores, compra de óleo lubrificante, pequenas manutenções, entre outros (despesas operacionais).
- Tamaruteua - Custo da energia: 0,50 R$/kWh. 5 % do valor total da receita é destinado à compra de óleo lubrificante, peças do grupo gerador a diesel, pequenas manutenções, entre outros (despesas operacionais).
- São Tomé - Custo da energia: 0,40 R$/kWh. 15 % do valor total da receita é destinado ao pagamento dos operadores, compra de óleo lubrificante, pequenas manutenções, entre outros (despesas operacionais).

A curva de consumo de óleo diesel (Fig. 12) das unidades geradoras a diesel de cada sistema também é utilizada no cálculo do balanço, bem como, posteriormente na avaliação do custo do kWh gerado.

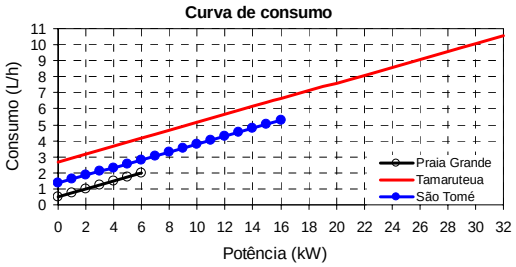

Figura 12- Curva de consumo de combustível dos grupos geradores.

As Tab. 2 a 4 mostram o balanço econômico anual dos sistemas.

Tabela 2. Balanço econômico anual em R$ da vila de Praia Grande.

D	RECEITA	D. O.	SEM CCC				COM CCC			
			DESPESA/ÓLEO		BALANÇO		DESPESA/ÓLEO		BALANÇO	
			A	B	A	B	A	B	A	B
1	2.640,00	396,00	14.454,00	0,00	12.210,00	2.244,00	3.758,04	0,00	1.514,04	2.244,00
2	2.640,00	396,00	19.272,00	6.085,11	17.028,00	3.841,11	5.010,72	1.582,13	2.766,72	661,87
3	2.640,00	396,00	23.897,28	12.996,12	21.653,28	10.752,12	6.213,29	3.378,99	3.969,29	1.134,99
4	2.640,00	396,00	28.715,28	18.891,05	26.471,28	16.647,05	7.465,97	4.911,67	5.221,97	2.667,67
5	2.640,00	396,00	33.340,56	24.215,23	31.096,56	21.971,23	8.668,55	6.295,96	6.424,55	4.051,96
6	2.640,00	396,00	38.158,56	29.455,21	35.914,56	27.211,21	9.921,23	7.658,36	7.677,23	5.414,36

Nota: A - somente diesel; B - com geração renovável; D - demanda média em kW; D. O. - despesas operacionais; os valores destacados são de déficit; despesas/óleo são baseadas na curva de consumo de combustível e em 2,20 R$/L.

Tabela 3. Balanço econômico anual em R$ da vila de Tamaruteua.

D	RECEITA	D. O.	SEM CCC				COM CCC			
			DESPESA/ÓLEO		BALANÇO		DESPESA/ÓLEO		BALANÇO	
			A	B	A	B	A	B	A	B
1	4.380,00	219,00	51.487,78	0,00	47.326,78	4.161,00	13.386,82	0,00	9.225,82	4.161,00
2	8.760,00	438,00	55.797,70	5.418,99	47.475,70	2.903,01	14.507,40	1.408,94	6.185,40	6.913,06
3	13.140,00	657,00	60.107,62	23.927,87	47.624,62	11.444,87	15.627,98	6.221,25	3.144,98	6.261,75
4	17.520,00	876,00	64.417,54	35.372,31	47.773,54	18.728,31	16.748,56	9.196,80	104,56	7.447,20
5	21.900,00	1.095,00	68.727,46	43.879,04	47.922,46	23.074,04	17.869,14	11.408,55	2.935,86	9.396,45
6	26.280,00	1.314,00	73.037,38	51.074,28	48.071,38	26.108,28	18.989,72	13.279,31	5.976,28	11.686,69
7	30.660,00	1.533,00	77.347,30	57.335,15	48.220,30	28.208,15	20.110,30	14.907,14	9.016,70	14.219,86
8	35.040,00	1.752,00	81.657,22	63.217,66	48.369,22	29.929,66	21.230,88	16.436,59	12.057,12	16.851,41
9	39.420,00	1.971,00	85.967,14	68.766,28	48.518,14	31.317,28	22.351,46	17.879,23	15.097,54	19.569,77
10	43.800,00	2.190,00	90.277,06	73.937,61	48.667,06	32.327,61	23.472,03	19.223,78	18.137,97	22.386,22
11	48.180,00	2.409,00	94.586,98	79.079,65	48.815,98	33.308,65	24.592,61	20.560,71	21.178,39	25.210,29
12	52.560,00	2.628,00	98.896,90	83.945,84	48.964,90	34.013,84	25.713,19	21.825,92	24.218,81	28.106,08
13	56.940,00	2.847,00	103.206,82	88.861,15	49.113,82	34.768,15	26.833,77	23.103,90	27.259,23	30.989,10
14	61.320,00	3.066,00	107.516,74	93.699,98	49.262,74	35.445,98	27.954,35	24.362,00	30.299,65	33.892,00
15	65.700,00	3.285,00	111.826,66	98.323,53	49.411,66	35.908,53	29.074,93	25.564,12	33.340,07	36.850,88
16	70.080,00	3.504,00	116.136,58	103.050,16	49.560,58	36.474,16	30.195,51	26.793,04	36.380,49	39.782,96

Nota: A - somente diesel; B - com geração renovável; D - demanda média em kW; D. O. - despesas operacionais; os valores destacados são de déficit; despesas/óleo são baseadas na curva de consumo de combustível e em 2,00 R$/L.

Tabela 4. Balanço econômico anual em R$ da vila de São Tomé.

D	RECEITA	D. O.	SEM CCC				COM CCC			
			DESPESA/ÓLEO		BALANÇO		DESPESA/ÓLEO		BALANÇO	
			A	B	A	B	A	B	A	B
1	3.504,00	525,60	27.856,80	0,00	24.878,40	2.978,40	7.242,77	0,00	4.264,37	2.978,40
2	7.008,00	1.051,20	32.236,80	13.321,85	26.280,00	7.365,05	8.381,57	3.463,68	2.424,77	2.493,12
3	10.512,00	1.576,80	36.441,60	22.186,85	27.506,40	13.251,65	9.474,82	5.768,58	539,62	3.166,62
4	14.016,00	2.102,40	40.821,60	28.845,56	28.908,00	16.931,96	10.613,62	7.499,84	1.299,98	4.413,76
5	17.520,00	2.628,00	45.201,60	34.592,78	30.309,60	19.700,78	11.752,42	8.994,12	3.139,58	5.897,88
6	21.024,00	3.153,60	49.406,40	39.743,33	31.536,00	21.872,93	12.845,66	10.333,26	5.024,74	7.537,14
7	24.528,00	3.679,20	53.786,40	44.769,49	32.937,60	23.920,69	13.984,46	11.640,07	6.864,34	9.208,73
8	28.032,00	4.204,80	57.991,20	49.484,61	34.164,00	25.657,41	15.077,71	12.866,00	8.749,49	10.961,20
9	31.536,00	4.730,40	62.371,20	54.238,68	35.565,60	27.433,08	16.216,51	14.102,06	10.589,09	12.703,54
10	35.040,00	5.256,00	66.751,20	58.917,94	36.967,20	29.133,94	17.355,31	15.318,67	12.428,69	14.465,33

Nota: A - somente diesel; B - com geração renovável; D - demanda média em kW; D. O. - despesas operacionais; os valores destacados são de déficit; despesas/óleo são baseadas na curva de consumo de combustível e em 2,00 R$/L.

Da Tab. 2, na situação do atendimento somente com a geração diesel-elétrica há elevadas quantias de déficits. Com o advento da geração renovável as mesmas quantias são reduzidas, dado o bom potencial eólico local registrado. Essa redução não é mais significativa devido ao fato de não se tarifar (R$/kWh) efetivamente o real consumo da vila (aplicação de taxa média por unidade consumidora). Considerando o auxílio da CCC, tanto a operação somente diesel-elétrica quanto à geração renovável têm suas quantias de déficits bastante reduzidas.

Analogamente à situação do atendimento somente com a geração diesel-elétrica da vila de Praia Grande, elevadas quantias de déficits também se fazem presentes no sistema de Tamaruteua (Tab. 3). Com a geração renovável, as quantias de déficits são reduzidas. No entanto, para a carga de 6 kW (demanda média da vila) o valor ainda é elevado (cerca de R$ 26.100,00). Para o custo do óleo diesel subsidiado pela CCC e restringindo a operação do sistema elétrico à geração diesel-elétrica, verifica-se superávit na faixa de carga média entre 5 e 16 kW. Tal situação ocorre também em todos os valores de cargas com a contribuição da geração renovável, o que mostra o quanto é essencial alguma forma de subsídio para estes tipos de sistemas de geração.

Como esperado (Tab. 4), há elevadas quantias de déficits na operação somente diesel-elétrica, o que mostra o quanto são elevados os custos de operação e manutenção dos sistemas que utilizam essa fonte. Em São Tomé, percebe-se ainda que mesmo com a penetração da geração renovável os valores de déficits são bem significativos. Na operação somente diesel-elétrica subsidiada pela CCC, há déficit para as demandas médias solicitadas de 1 a 3 kW, nas demais demandas, o superávit se destaca. Essa situação de balanço ocorre também em todos os valores de cargas com a contribuição da geração renovável. Nesta situação, essas quantias poderiam ser destinadas a um fundo que custeasse a substituição de equipamentos (por exemplo, término da vida útil de baterias, grupos geradores, entre outros), o aumento do número de unidades de geração (módulos fotovoltaicos, aerogeradores, etc.), ou até mesmo ser empregado em uma atividade socioeconômica, visando benefícios à coletividade local.

3.3 Custo do kWh gerado

Para se determinar os custos do kWh gerado pelos sistemas híbridos para os valores de cargas médias, foram empregadas as equações 1 a 4 (Blasques *et alii*, 2005).

$$CE = \frac{CCVa}{Ec} \tag{1}$$

onde:

CE - custo da energia elétrica (R$/kWh);

$CCVa$ - custo do ciclo de vida anualizado do sistema (R$);

Ec - energia elétrica consumida (kWh).

e

$$CCVa = \left[(CI + CRp).FRC(i,n)\right] + CO + CM + CF \tag{2}$$

onde:

CI - custo do investimento em R$ (custo do sistema de geração);

CRp - custos de reposições dos componentes trazidos a valor presente (R$);

$FRC(i,n)$ - fator de recuperação de capital;

CO - custo do óleo diesel (R$);

CM - custos de manutenção dos componentes do sistema (R$);

CF - custos fixos (R$).
e

$$FRC(i,n) = \frac{i.(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \tag{3}$$

onde:
i - taxa de juros;
n - período de análise (anos),
e

$$CRp = \sum_{j=1}^{k}\left(\sum_{m=1}^{R_j}\frac{CI_j}{(1+i)^{mT_j}}\right) \tag{4}$$

onde:
k - número de componentes do sistema;
R_j - número de reposições do componente j durante o período de análise;
CI_j - custo do componente j;
T_j - vida útil do componente j (anos).

Praia Grande

Com relação aos cálculos para o sistema híbrido, foram considerados valores de custos fixos iguais a 1 % do custo do investimento do sistema (Cartaxo, 2000), e custos de manutenção dos subsistemas de geração eólica e diesel-elétrica, como sendo: 2 % do custo de aquisição apenas do aerogerador; e 0,10 US$/kWh (0,172 R$/kWh, considerando a cotação do dólar do dia 13/03/2008 – R$ 1,717) referente à energia (kWh) fornecida pelo grupo gerador a diesel (Blasques *et alii*, 2005; Blasques, 2005). As taxas anuais de juros consideradas foram 10 e 15 %, e os custos anuais de óleo diesel são baseados na curva de consumo de combustível (Fig. 12) e 2,20 R$/L. O horizonte de planejamento selecionado é de 20 anos

Os custos dos principais equipamentos do sistema são: grupo gerador a diesel - R$ 5.000,00; aerogerador – R$ 21.139,40; inversores – R$ 7.819,38 (custo total); e banco de baterias – R$ 3.656,38. Com relação ao número de reposições desses equipamentos, têm-se: quatro do banco de baterias (vida útil estimada de 4 anos), um dos inversores (vida útil estimada de 10 anos), e um do grupo gerador a diesel (vida útil estimada de 10 anos).

Com relação aos cálculos para o sistema diesel-elétrico, foram considerados os seguintes parâmetros: custo de investimento de cerca de R$ 19.636,00 (constituído da seguinte forma: II + 60 % de III + 30 % de IV + 15 % de V – Tab. 1); custos fixos de cerca de 2 %; custo de manutenção de 0,172 R$/kWh; custos de óleo baseados na curva de consumo; taxas de juros de 10 e 15 %; e período de análise de 20 anos. O custo do grupo gerador a diesel, sua vida útil e o número de reposições durante o período de análise são os mesmos utilizados anteriormente.

Os valores obtidos dos custos do kWh são mostrados na Tab. 5.

Tabela 5. Custos do kWh de Praia Grande.

D	SEM CCC				COM CCC			
	SISTEMA HÍBRIDO		SISTEMA DIESEL		SISTEMA HÍBRIDO		SISTEMA DIESEL	
	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %
1	1,21	1,55	2,19	2,28	1,21	1,55	0,97	1,06
2	0,99	1,18	1,46	1,50	0,75	0,92	0,64	0,69
3	0,99	1,11	1,20	1,23	0,63	0,74	0,53	0,56
4	0,95	1,04	1,08	1,10	0,56	0,64	0,48	0,50
5	0,92	0,99	1,01	1,02	0,51	0,58	0,44	0,46
6	0,89	0,95	0,96	0,97	0,48	0,54	0,42	0,44

Nota: D - demanda em kW; Tj - taxa de juro.

Tomando-se como base a carga de 3 kW, o custo da geração do sistema híbrido é igual 1,11 R$/kWh (taxa de juros, 15 %), o que corresponde anualmente a um custo de R$ 29.170,80; para operação de 24 horas. Sabendo-se que a receita anual do sistema corresponde a R$ 2.640,00; um déficit de R$ 26.530,80 ao ano é verificado. Tal déficit é reduzido para cerca de R$ 16.807,00 com o subsídio da CCC. Para a mesma situação de carga e taxa de juros, o atendimento somente diesel-elétrico têm déficits anuais nos custos da energia gerada sem e com a CCC em torno de R$ 29.684,00 (superior ao caso da geração híbrida) e R$ 12.077,00; respectivamente.

Da Tab. 5, percebe-se ainda que os custos da geração diesel-elétrica sem o subsídio da CCC são superiores aos do sistema híbrido. Essa vantagem é devida basicamente ao bom potencial da fonte eólica – fator de capacidade eólico

médio anual igual 20,24 % (Barbosa, 2006). Quando aplicado o subsídio da CCC sobre a conta do óleo diesel, os custos da geração diesel-elétrica tornam-se inferiores aos da geração híbrida (eólica-diesel) e, conseqüentemente, o sistema diesel-elétrico fica mais atrativo.

Tamaruteua

As mesmas considerações do sistema híbrido de Praia Grande, referentes aos custos fixos, de manutenção (adicionado o do subsistema fotovoltaico – 1 %), às taxas de juros e ao horizonte de planejamento, são utilizadas para o cálculo do custo do kWh gerado pelo sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel de Tamaruteua após revitalização.

Os custos anuais de óleo diesel são baseados na curva de consumo de combustível (Fig. 12) e 2,00 R$/L, e os custos dos principais equipamentos do sistema são: grupo gerador a diesel – R$ 28.000,00; aerogeradores – R$ 76.000,00 (custo total); módulos fotovoltaicos – R$ 55.520,00 (R$ 28.800,00 módulos antigos); inversor – R$ 62.399,00; controladores de carga – R$ 2.051,83; e banco de baterias – R$ 23.552,00.

Com relação ao número de reposições dos equipamentos, têm-se: quatro do banco de baterias (vida útil estimada de 4 anos), um do inversor (vida útil estimada de 10 anos), um dos controladores de carga (vida útil estimada de 10 anos), um dos aerogeradores (vida útil estimada de 20 anos, sendo utilizados a cerca de 8 anos), um dos módulos fotovoltaicos que compõem o arranjo antigo (vida útil estimada de 20 anos, sendo utilizados a cerca de 8 anos) e um do grupo gerador a diesel (vida útil estimada de 10 anos).

Também de maneira semelhante à Praia Grande, para o cálculo do custo da geração, sem a contribuição da geração renovável, foram considerados os seguintes parâmetros: custo de investimento de cerca de R$ 55.071,00 (constituído da seguinte forma: II + 60 % de III + 30 % de IV + 15 % de V – Tab. 1); custos fixos de cerca de 2 %; custo de manutenção de 0,172 R$/kWh; custos de óleo baseados na curva de consumo; taxas de juros 10 e 15 %; e período de análise de 20 anos. O custo do grupo gerador a diesel, sua vida útil e o número de reposições durante o período de análise são os mesmos utilizados para o caso do sistema híbrido.

Os resultados obtidos dos custos do kWh são mostrados na Tab. 6.

Tabela 6. Custos do kWh de Tamaruteua.

D	SEM CCC				COM CCC			
	SISTEMA HÍBRIDO		SISTEMA DIESEL		SISTEMA HÍBRIDO		SISTEMA DIESEL	
	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %
1	7,01	8,68	7,06	7,31	7,01	8,68	2,71	2,96
2	3,83	4,67	3,86	3,98	3,60	4,44	1,50	1,63
3	3,32	3,87	2,80	2,88	2,64	3,20	1,10	1,19
4	2,86	3,27	2,26	2,32	2,11	2,53	0,90	0,96
5	2,51	2,85	1,94	1,99	1,77	2,11	0,78	0,83
6	2,26	2,54	1,73	1,77	1,54	1,82	0,70	0,74
7	2,06	2,30	1,58	1,61	1,37	1,61	0,64	0,68
8	1,91	2,12	1,46	1,49	1,24	1,45	0,60	0,63
9	1,79	1,97	1,37	1,40	1,14	1,33	0,57	0,59
10	1,69	1,85	1,30	1,33	1,06	1,23	0,54	0,57
11	1,60	1,75	1,25	1,27	0,99	1,15	0,52	0,54
12	1,53	1,67	1,20	1,22	0,94	1,08	0,50	0,52
13	1,47	1,60	1,16	1,17	0,89	1,02	0,48	0,50
14	1,41	1,53	1,12	1,14	0,85	0,97	0,47	0,49
15	1,37	1,48	1,09	1,11	0,81	0,92	0,46	0,48
16	1,33	1,43	1,06	1,08	0,78	0,89	0,45	0,47

Nota: D - demanda em kW; Tj - taxa de juro.

Considerando o atendimento pelo sistema híbrido, a demanda média da vila (7 kW) e a taxa de juros de 15 %, o custo do kWh gerado é de R$ 2,30. Tal custo comparado com a tarifa praticada de 0,50 kWh chega a ser cerca de 4,5 vezes maior, representado um déficit no custo de geração de 1,80 R$/kWh (operação de 24 h/d), o que equivale anualmente em termos econômicos a R$ 110.376,00. Aplicando o subsidio da CCC, o custo do kWh ficaria em cerca de 1,61 R$/kWh. Esse valor representa um déficit no custo do kWh de R$ 1,11.

Comparando os custos do kWh gerados pelos sistemas híbrido e diesel-elétrico, observa-se que os custos do último são inferiores, ao contrário do verificado em Praia Grande. Essa vantagem, do ponto de vista econômico, é principalmente devida ao custo inicial elevado do sistema híbrido (necessidade de importação dos equipamentos de geração). Com a CCC tal vantagem é ampliada. Por exemplo, considerando-se a tarifa praticada, a taxa de juros, e a faixa de carga média avaliadas anteriormente para o sistema híbrido com o referido subsídio, o valor de déficit seria de apenas 0,18 R$/kWh.

São Tomé

As mesmas considerações do sistema híbrido de Tamaruteua, referentes aos custos fixos, de manutenção, às taxas de juros e ao horizonte de planejamento, são utilizadas para o cálculo do custo do kWh gerado pelo sistema híbrido de São Tomé.

Os custos anuais de óleo diesel são baseados na curva de consumo de combustível (Fig.12) e 2,00 R$/L. Para o horizonte de planejamento selecionado, têm-se: quatro reposições do banco de baterias (vida útil estimada de 4 anos), uma reposição do inversor (vida útil estimada de 10 anos), e uma reposição do grupo gerador a diesel (vida útil estimada de 10 anos). Outras informações referentes ao cálculo do custo da energia elétrica são os custos dos principais equipamentos do sistema: grupo gerador a diesel – R$ 11.940,00; módulos fotovoltaicos – R$ 36.433,99 (custo total); aerogerador – R$ 52.875,97; inversor – R$ 32.662,61; e banco de baterias – R$ 10.520,00.

Para os cálculos do kWh gerados pelo sistema diesel-elétrico, foram considerados os mesmos custos fixos, de manutenção, taxas de juros e horizonte de planejamento dos estudos dos casos anteriores.

Outros parâmetros considerados foram o custo de investimento do sistema igual a R$ 51.685,02 (constituído por: II + 60 % de III + 30 % de IV + 15 % de V – Tab. 1) e os custos de óleo baseados na curva de consumo. O custo do grupo gerador a diesel, sua vida útil e o número de reposições durante o período de análise (20 anos) são os mesmos utilizados para o sistema híbrido estudado anteriormente. É importante dizer que devido à operação de 24 h/dia do grupo gerador a diesel o mesmo provavelmente terá uma vida útil menor em relação a sua utilização no sistema híbrido. Isto é válido também para os demais casos dos sistemas já estudados.

Os resultados obtidos dos custos do kWh são mostrados na Tab.7. Esses resultados revelam elevadas importâncias, as quais são incrementadas com o aumento do valor da taxa de juros.

Tabela 7. Custos do kWh de São Tomé.

D	SEM CCC				COM CCC			
	SISTEMA HÍBRIDO		SISTEMA DIESEL		SISTEMA HÍBRIDO		SISTEMA DIESEL	
	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %	Tj 10 %	Tj 15 %
1	4,60	5,94	4,22	4,47	4,60	5,94	1,87	2,11
2	3,13	3,80	2,45	2,57	2,57	3,24	1,09	1,21
3	2,48	2,93	1,85	1,93	1,86	2,30	0,82	0,90
4	2,09	2,43	1,55	1,62	1,49	1,82	0,69	0,75
5	1,84	2,11	1,38	1,43	1,26	1,52	0,61	0,66
6	1,66	1,88	1,26	1,30	1,10	1,32	0,56	0,60
7	1,53	1,72	1,17	1,21	0,99	1,18	0,52	0,56
8	1,43	1,60	1,11	1,14	0,91	1,07	0,50	0,53
9	1,35	1,50	1,06	1,09	0,84	0,99	0,47	0,50
10	1,28	1,42	1,02	1,05	0,79	0,92	0,46	0,48

Nota: D - demanda em kW; Tj - taxa de juro.

Avaliando os custos para o atendimento com o sistema híbrido através da comparação entre a tarifa de 0,40 R$/kWh (atualmente praticada na vila) e a média (2,27 R$/kWh) do custo de geração na faixa de 4 e 5 kW, taxas de juros 15 %, verifica-se um déficit no custo da geração de 1,87 R$/kWh, na operação de 24 horas diárias, o que representa anualmente um déficit médio em torno de R$ 73.715,00. Adotando a CCC, o custo médio da geração ficaria aproximadamente 1,67 R$/kWh. Esse valor ainda representa um déficit de R$ 1,27 no custo do kWh gerado pelo sistema.

Para o atendimento somente diesel-elétrico, percebe-se que seus custos de geração são inferiores aos do sistema híbrido. Essa vantagem é devida a dois fatores: o custo inicial elevado do sistema híbrido e o pequeno potencial renovável verificado, principalmente da fonte eólica – fator de capacidade eólico médio anual igual a 12,42 % (Barbosa, 2006). Com o subsídio da CCC a vantagem do sistema diesel-elétrico é incrementada.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Em síntese, a análise econômica para os vários cenários de demanda e operação dos sistemas elétricos de Praia Grande, Tamaruteua e São Tomé mostra o quanto é elevado o custo operacional de um sistema unicamente a diesel.

Tais custos são reduzidos com a contribuição da geração renovável e hibridismo das fontes de energia, o que agrupa os benefícios de cada subsistema de geração. Porém, considerando o balanço econômico atual, a redução não compensa significativamente os custos operacionais dos sistemas híbridos em si (há registros de déficits elevados). Uma forma de se encontrar um maior equilíbrio no fluxo de caixa (despesas e receitas) desses sistemas, como estudado, seria a aplicação do subsídio da CCC na conta do óleo diesel, ou, futuramente, de um subsídio no próprio kWh gerado por esses sistemas no atendimento isolados através de minirredes de distribuição.

Salienta-se que, com ou sem subsídio, é de fundamental importância uma tarifação efetiva, adequada e justa pelo serviço prestado, e não a aplicação de taxas que não refletem a verdadeira solicitação das unidades consumidoras.

Ainda em relação à questão econômica, constata-se o elevado custo do kWh gerado pelos sistemas híbridos, em comparação com a tarifa média cobrada na Região para o atendimento convencional, ou do valor atribuído (taxas) pelas comunidades como reembolso pelo serviço. O desenvolvimento de equipamentos com tecnologia nacional de baixo custo poderá amenizar esse quadro.

É importante comentar que os valores dos custos de geração avaliados não devem ser tomados como regra geral, isto é, sistemas híbridos fotovoltaico-eólico-diesel com custos de geração superiores aos dos diesel-elétricos, e estes últimos com custos maiores que os híbridos eólico-diesel, pois são resultados obtidos para as condições aqui consideradas, servindo apenas como indicativos para análises posteriores. Todavia, percebe-se que, dependendo do potencial renovável e dos custos relativos à utilização do diesel, os sistemas híbridos podem ser bem competitivos (caso de Praia Grande).

Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro dado ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Barbosa, C. F. O., 2004. Montagem, Comissionamento e Telesupervisão de um Sistema Híbrido Solar-Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA – Belém, Pará.

Barbosa, C. F. O., 2006. Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade na Região Amazônica. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, Pará.

Blasques, L. C. M., 2005. Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade. Dissertação de Mestrado, UFPA, Belém, Pará.

Blasques, L. C. M., Tupiassú, A. F. e Pinho, J. T., 2005. Análise Econômica de Tecnologias para Eletrificação de uma Pequena Comunidade Isolada da Amazônia. XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Paraná.

Cartaxo, E. F., 2000. Fornecimento de Serviço de Energia Elétrica para Comunidades Isoladas da Amazônia: Reflexões a partir de um Estudo de Caso. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, São Paulo.

Macedo, W. N., 1999. Montagem, Comissionamento e Monitoração de um Sistema Híbrido Solar-Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA – Belém, Pará.

Projeto PNUD BRA/99/11., 2002. Levantamento de Projetos de Eletrificação de Comunidades Isoladas Utilizando Fontes Renováveis de Energia. Relatório: Região 2 – Pará, Maranhão, Amapá e Tocantins.

Rêgo, J. L. C., 1999. Definição, Montagem, Comissionamento e Monitoração de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA – Belém, Pará.

Vale, S. B., 2000. Monitoração e Análise de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade. Dissertação de Mestrado, UFPA – Belém, Pará.

ECONOMICAL EVALUATION OF HYBRID SYSTEMS PHOTOVOLTAIC/WIND/DIESEL FOR GENERATION OF ELECTRICITY IN AMAZONIAN

Abstract. *The objective of this work is to contribute with economical information on the Hybrid Power Systems implanted in isolated communities in the Amazon Region and based on the use of the renewable energy sources solar and wind, and not renewable diesel-electric. The work presents a brief identification and characterization of the three systems in study, through the available references. The initial costs, economic balance (incomes versus expenses) and the cost of the generated kWh are analyzed for several demand scenarios. The obtained results for that analysis reveal that the high initial cost of the hybrid systems and, consequently, the value of the generated kWh, constitutes the main barrier for reproducibility. The development of national appropriate equipments for the Amazon area could help to overcome such barrier. Regarding the economic issue, an alternative for finding a better balance would be the adoption of a subsidy such as, for instance, the bill of consumption of fuel, which is proposed in this work.*

Key words*:* Hybrid Power Systems, Isolated Systems, Renewable Energy, No Renewable Energy, Economical Evaluation