



GPT/001

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO II

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

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO USO DE SISTEMAS HIDRÁULICOS DE ARMAZENAMENTO ACOPLADOS À SISTEMAS FOTOVOLTAÍCOS.

*Doriana Marinho N. Oliveira
Selênio R. Silva
Aymoré de Castro A. Filho

CPDEE / PPGEE - UFMG

Carlos B. Martinez

CPH -UFMG

RESUMO

Este trabalho, apresenta um estudo comparativo entre as alternativas de utilização direta da energia solar através de painéis fotovoltaicos, acoplados a um inversor de frequência com um sistema de armazenamento de energia com baterias ou com um sistema híbrido solar hidráulico reversível, acoplado a um retificador e a um inversor de frequência. O sistema apresenta duas configurações básicas: uma é constituída por painéis solares, baterias e inversor; outra é constituída de painéis solares, baterias e um reservatório de água com a finalidade de operar como sistema reversível durante a noite ou em períodos de ponta de carga.

Palavras chaves: Energia Solar, Energia Alternativa, Planejamento Energético.

1.0 - INTRODUÇÃO

A pesquisa de fontes alternativas de energia é uma atividade que tem por objetivo suprir as futuras demandas a nível mundial. Este tipo de pesquisa tem sido impulsionado devido a: (i) previsão futura de escassez dos combustíveis fósseis, (ii) a saturação do potencial hidroelétrico e (iii) ao fato de que cerca de mais de 50% da população do planeta não ter acesso, ainda à energia elétrica convencional. Pode-se somar ainda a isto o fato das imensas disparidades econômicas e sociais encontradas entre as inúmeras áreas do país.

Dentre as demandas existentes, o fornecimento de energia elétrica, se apresenta de forma nefasta, pois às

dificuldades de desenvolvimento decorrentes do desequilíbrio entre a oferta e a demanda de energia elétrica, aliadas à falta de confiabilidade nos respectivos sistemas elétricos têm causados uma crônica fuga de investimentos na área. As regiões com razoável oferta de energia elétrica conseguem atrair investimentos e, principalmente, impulsionar a integração a nível nacional, chamando atenção de alguns setores da economia.

O estudo de fontes alternativas de energia, principalmente para fornecimento de eletricidade, vem melhorar as perspectivas para o futuro, e também contornar muitos problemas atuais, principalmente no que diz respeito à manutenção e melhora da qualidade de vida de comunidades isoladas.

2.0 - CONSTITUIÇÃO DO SISTEMA

O sistema em estudo apresenta duas configurações básicas. A primeira é constituída de painéis solares interligados a um sistema de baterias fornecendo energia elétrica trifásica através de um inversor de frequência. A segunda alternativa é constituída de painéis solares interligados a um reservatório de água que tem a finalidade de operar como sistema reversível durante a noite ou períodos de ponta de carga.

O sistema de fornecimento de energia alternativa híbrido solar hidráulico é mostrado na Figura 1, em que estão presentes os principais componentes: bomba funcionando como turbina (BFT), arranjo de painéis fotovoltaicos, retificador e inversor.

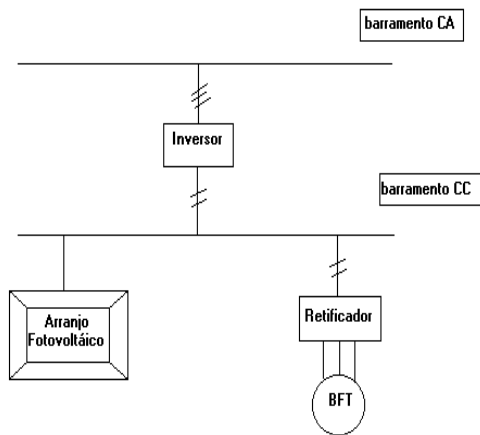


FIGURA 1. Diagrama básico do sistema de energia híbrido solar hidráulico e convencional.

2.1 Sistema fotovoltaico

Os sistemas de energia solar ou fotovoltaico são capazes de gerar energia elétrica instantânea a partir da simples captação da luz solar através de módulos fotovoltaicos. Esses módulos geram energia elétrica em corrente contínua. Os sistemas fotovoltaicos apresentam uma configuração clássica constituída de painéis solares fornecendo energia elétrica trifásica através de um inversor. As baterias têm a finalidade de operar o sistema durante a noite ou em períodos de ponta de carga.

O sistema proposto possui, além dos elementos clássicos, um conjunto motobomba que pode operar, nos períodos de baixa demanda, elevando água para um reservatório superior. Nos períodos de demanda elevada (ou noturno) um segundo sistema motobomba irá operar como uma bomba funcionando como turbina (BFT), revertendo energia para o sistema.

A contabilização dos custos dos sistemas propostos é feita de modo a se avaliar a opção de armazenamento de água versus um sistema convencional de baterias. A vantagem de se utilizar o sistema hidráulico está na maior vida útil do mesmo frente ao sistema de baterias, que via de regra tem um tempo de vida útil em torno de 6 anos.

As desvantagens comparativas estão ligadas à complexidade do sistema e a disponibilidade de local para instalação de um reservatório de água de baixo custo. Desta forma é mais indicado a utilização de reservatórios localizados em elevações naturais do terreno ou pequenos açudes de forma a reduzir os custos de implantação.

Pode-se visualizar a aplicação deste sistema em comunidades isoladas do estado de Minas Gerais, onde as alternativas de abastecimento de energia elétrica são restritas e onde a demanda não justifique a implantação de um sistema de transmissão convencional.

As avaliações da competitividade entre os sistemas híbrido solar hidráulico em comparação com os sistemas convencionais fotovoltaicos mostram a competitividade dos mesmos sistemas caracterizados por um baixo consumo de energia e com taxas de retorno reduzidas.

2.2 O sistema hidráulico

A modelagem do sistema hidráulico visa a determinação das perdas de carga no circuito de bombeamento/reversão e tem a finalidade de identificar pontos de operação dos mesmos. O equacionamento deste sistema leva em consideração as perdas de carga distribuídas e localizadas, e procura representar as condições de bombeamento de forma distinta da condição de reversão. Assim a Figura 2 mostra o tipo de sistema de bombeamento a ser estudado.

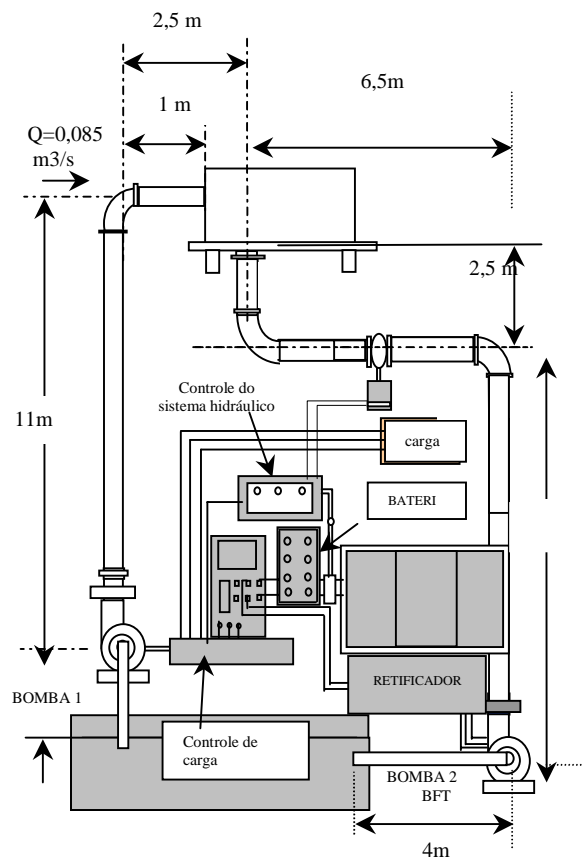


FIGURA 2. Esquema básico do sistema solar/híbrido hidráulico,(5).

Os cálculos do sistema hidráulico têm a finalidade de determinar as perdas de carga na tubulação. As perdas de carga ocorrem nos tubos retos, nas curvas e nas bifurcações, para este caso pode-se calcular a perda de carga do sistema de bombeamento pela equação (1). Devido ao fato do sistema de adução para operar a bomba funcionando como turbina ser diferente utiliza-se a equação(2) para o cálculo da perda de carga durante a reversão.

Para o cálculo da altura de elevação da bomba (h_{rec}) pode-se utilizar a equação (3). O cálculo da queda disponível para operar a BFT (h_{ad}) pode ser feito através da equação (4).

$$\Delta h_{fb} = 0,00178 * Q_b^{1,85} * D_b^{4,87} * (l_{suc} + l_{rec} + l_{eq.c}) \quad (1)$$

$$\Delta h_{fr} = 0,00178 * Q_{rb}^{1,85} * D_{rb}^{-4,87} * (l_{ad} + l_{ad.eq.c}) \quad (2)$$

$$h_{rec} = h_g + \Delta h_{fb} \quad (3)$$

$$h_{ad} = h_g - \Delta h_{fr} \quad (4)$$

sendo:

Q_b = vazão de bombeamento (m^3 / s);

Q_{rb} = vazão de reversão (m^3 / s);

D_b = diâmetro da tubulação de recalque (m);

D_{rb} = diâmetro da tubulação de reversão (m);

L_{suc} = extensão da tubulação de sucção da bomba (m);

L_{rec} = extensão da tubulação de recalque da bomba (m);

$L_{eq.c}$ = comprimento equivalente das conexões da tubulação de recalque (m);

L_{ad} = extensão da tubulação de adução no recalque da BFT (m);

$L_{ad.eq.c}$ = comprimento equivalente das conexões da tubulação de adução no recalque da BFT (m);

h_g = desnível geométrico entre o reservatório de jusante e de montante (m).

3.0 - ESCOLHA DO GRUPO BOMBA-TURBINA

O grupo bomba funcionando como turbina (BFT) pode ser escolhido através da metodologia proposta por Viana(8). Nesta levanta-se os coeficientes experimentais de altura e de vazão da BFT – BFB em função da rotação específica através de resultados experimentais de ensaios de laboratório. Foram feitos ensaios de laboratório no Centro de Pesquisas Hidráulicas da UFMG, onde foram observados resultados diferentes dos esperados a partir dos equacionamentos acima citados. A bancada de testes utilizada para execução destes ensaios pode ser vista na Figura 3 (a) e (b). Os resultados dos ensaios (700 rpm) apresentam um pequeno patamar de rendimento (η %), o que não pode ser considerado como ideal para a operação em um sistema deste tipo.

O rendimento da BFT é evidentemente menor que o rendimento de uma turbina convencional, entretanto uma análise comparativa de custos pode indicar a viabilidade de cada alternativa. Admitindo-se que o custo do grupo gerador seja em torno de 40% dos custos totais para este tipo de instalação tem-se:

Os custos de equipamentos hidro-eletromecânicos convencionais podem ser obtidos também obtidos pela Tabela 2 a seguir.

TABELA 1 – Custo atualizados de grupos geradores para micro centrais hidrelétricas

		Custos em US\$ / kW						
Potência (kW)		1	2	3	4	5	6	7
queda (m)	10	446	558	795	810			
	15	446	504	554	780	810	880	1064
	20	446	500	514	630	790	820	980
	25	446	502	494	610	750	796	890

(5): Oliveira, Doriana M.N., (2000).

TABELA 2: Custos atualizados dos equipamentos para micro centrais hidrelétricas ELETROBRÁS (1985).

		Custos em US\$ / kW			
Potência (kW)		2	5	10	15
queda (m)	10	1.650	954	697	563
	15	1.285	807	587	456
	20	1.100	734	514	416
	25	1.100	660	440	367

Obs: (3) ELETROBRÁS (1985), 1,00 US\$=2.724,00 CR\$ 11/ de 1984



FIGURA 3 (a) –Bancada de testes utilizada para execução dos ensaios da BFT.

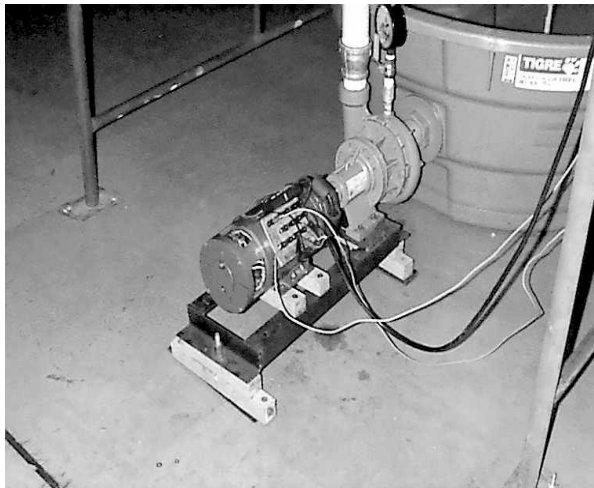


FIGURA 3 (b) –Bancada de testes utilizada para execução dos ensaios da BFT.

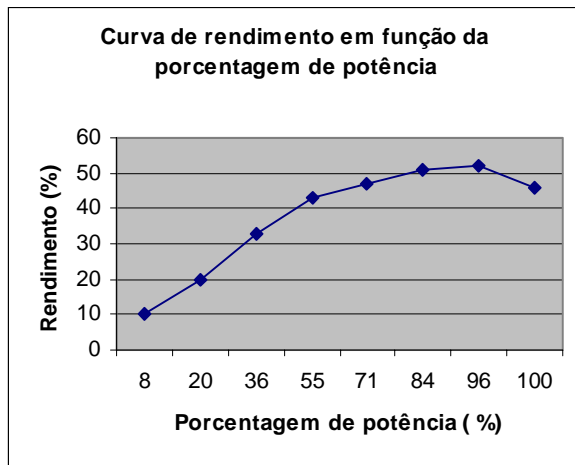


FIGURA 4 – Curva característica de rendimento da BFT,(ensaios realizados no CPH - UFMG).

TABELA 3: Custos de grupos geradores (BFT / gerador de indução trifásico).

Custos em US\$ / kW					
Potência (kW)		2	5	10	15
Queda (m)	10	295	565	870	1266
	15	298	570	910	1270
	20	280	575	915	1275
	25	290	575	920	1280

Obs: Ref: Custos de mercado em junho de 2000; 1,00 US\$=1,82 R\$ 06/ 2000, (5).

Optamos em trabalhar com o sistema BFT devido o sistema apresentar um menor custo em relação aos equipamentos convencionais em comparação com o sistema convencional (baterias) ,(5). Nas Tabelas 4 e 5 mostra os custos anuais dos equipamentos e uma taxa anual de juros com 15 e 06 anos de tempo de retorno.

Utilizou-se um sistema com baterias de descarga profunda, devido ao tipo de equipamento apresentar uma maior capacidade de descarga. No cálculo do sistema de reversão com BFT estão incluídos os custos dos controladores e das válvulas de comando do sistema hidráulico (5).

TABELA 4: Custos total e anual do sistema de inversores e controladores / 1 bateria e o custo unitário para o sistema híbrido solar – hidráulico

Potência (kW)	2	5	10	15
Custo total US\$	1.965	3.910	9.200	11.850
Custo Anual US\$ / ano (10 %)	258	501	1.210	1.560
Custo Anual US\$ / ano (08 %)	230	456	1075	1.385
Custo Anual US\$ / ano (06 %)	202	402	950	1.220
Custo unitário US\$/kWh (10 %)	0,030	0,023	0,028	0,023
Custo unitário US\$/kWh (08 %)	0,026	0,021	0,025	0,021
Custo unitário US\$/kWh (06 %)	0,023	0,018	0,021	0,019

Tempo de funcionamento de 12 horas / dia
tempo de retorno de 15 anos , (5).

TABELA 5: Custo total e anual de baterias para armazenar a energia do sistema solar em estudo.

Potência (kW)	2	5	10	15
Custo total US\$	2.700	6.750	13.500	20.250
Custo Anual US\$ / ano (10 %)	618	1.550	3.125	4.650
Custo Anual US\$ / ano (08 %)	585	1.460	2.800	4.375
Custo Anual US\$ / ano (06 %)	550	1.375	2.750	4.125
Custo unitário US\$/kWh (10 %)	0,071	0,071	0,071	0,071
Custo unitário US\$/kWh (08 %)	0,067	0,067	0,064	0,067
Custo unitário US\$/kWh (06 %)	0,063	0,063	0,063	0,063

Bateria de alta profundidade de descarga (80%)

Tempo de funcionamento de 12 horas / dia
Tempo de retorno de 6 anos , (5).

4.0 - ESTUDO DE CASO

O estudo de caso se refere a uma instalação com capacidade de fornecer 14.600 kWh/ano a partir de uma fonte solar. A característica do sistema mostra que o comportamento da demanda de energia pode-se aproximar pela curva apresentada na Figura 5 a seguir. Desta forma procura-se a melhor alternativa de armazenamento de energia nas opções hidráulica reversível com BFT ou bateria (5).

A capacidade de descarga (Cap_{desc}) das baterias é considerada como de 80% (2). Assim a potência a ser instalada no banco de baterias para fins de armazenamento é calculada de acordo com a equação (6).

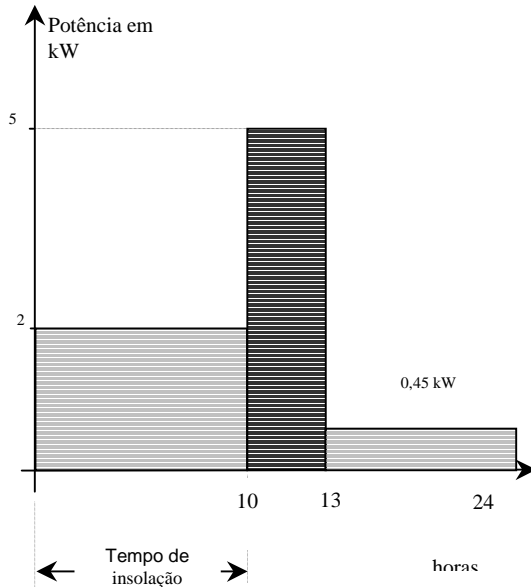


FIGURA 4 – Diagrama de carga do sistema em estudo,(6).

A capacidade de armazenamento é dada em função do período de insolação e da demanda do sistema elétrico. Assim a demanda é dada por:

$$D = Pot_p * t_p + Pot_b * t_b \quad (5)$$

Sendo:

D = demanda em kWh;
 Pot_p = potência requerida no patamar de ponta;
 Pot_b = potência requerida no patamar de base;
 t_p = tempo em horas de ponta;
 t_b = tempo em horas de base.

A demanda em período sem insolação é de aproximadamente 20 kWh/dia. Desta forma o banco de baterias terá uma capacidade calculada (Pot_{bb}) pela equação a seguir (2);

$$Pot_{bb} = D / Cap_{desc} \quad (6)$$

A capacidade de carga necessária para o banco de baterias será de 25 kW.

Para o sistema híbrido/hidráulico o cálculo da potência (Pot_r) pode ser feito pela equação (7). Considerando-se o rendimento do conjunto BFT (η_{BFT}) como de

42%, a potência será de 40 kW e a vazão será calculada pela equação (8):

$$Pot_r = D / \eta_{BFT} \quad (7)$$

$$Q = P / (9,81 * h_{rec} * \eta_{BFT}) \quad (8)$$

A vazão de projeto será então de 0,1024 m³/s, e o volume de acumulação será 360 m³. A vazão para períodos de baixa demanda (2 kW) será de 0,041 m³/s e para o período noturno (0,45 kW) será de 0,0091 m³/s.

Assim, de acordo com os coeficientes experimentais e teóricos(8), obtêm-se as características da bomba a ser instalada como BFT.

A condição de trabalho possui com característica uma vazão (Q) de 0,1024 m³/s e uma altura de queda de 12 metros. Assim calcula-se o n_{qat} e posteriormente a vazão e altura de recalque da bomba que irá funcionar como BTF (5).

Assim temos os coeficientes:

$$\text{Para } n_{qat} = 92 \Rightarrow k_a = 0.54$$

$$k_q = 0.77$$

$$H_{rb} = 22 \text{ metros};$$

$$Q_{rb} = 0,133 \text{ m}^3/\text{s}$$

Utilizando-se a equação (4) verifica-se a capacidade de geração do sistema. Assim temos:

$$Pot. = 9,81 * Q * h_{ad} * \eta_{BFT} \quad (9)$$

$$h_{ad} = 11,85 \text{ m}$$

$$Pot. = 5 \text{ KW}$$

A capacidade instalada em painéis (Cinst.P.) será de 45 kWh/dia para o sistema com baterias e de 60 kWh/dia para o sistema solar híbrido hidráulico. O fato da potência do sistema solar híbrido ser em torno de 33% maior que a com o sistema de baterias se deve ao fato do rendimento do sistema BFT ser consideravelmente menor que o banco de baterias ($\eta_{BFT}=42\%$ e $\eta_{bat}=80\%$).

Assim a potência em painéis (P_{inst}) será calculada em função do sol pleno (sp) pela equação (10), (2).

$$P_{inst} = (Cinst.P.b) / sp \quad (10)$$

A potência instalada em painéis para o sistema com baterias é então de 8,5 kWp e para o sistema solar híbrido hidráulico será de 11,5 kWp

Os custos de implantação do sistema solar com baterias e híbrido hidráulico estão mostrados na Tabela 6 e7,(5).

De modo a explorarmos melhor o tipo de proposta deste trabalho calculamos também o sistema par um tempo de retorno do painel solar e do sistema híbrido hidráulico para 30 anos. Os resultados são apresentados na Tabela 7 a seguir:

TABELA 6: Custos total e anual do sistema solar com baterias e com sistema híbrido solar - hidráulico. (15 anos)

Sistema		Paineis	Armaze- namento	Custo anual	CEG
	juros	US\$	US\$	US\$	US\$/MWh
baterias 40 kW	10 %			7.201,00	492
	8%	41.800,00*	7.425,00**	6.488,00	444
	6%			5.828,00	398
híbrido 60 kW	10 %			8.882,00	608
	8%	63.250,00*	4.301,00***	7.889,00	540
	6%			6.957,00	476

*Painéis solares - tempo de retorno de 15 anos

**Sistema com baterias - tempo de retorno de 06 anos

*** Sistema híbrido - tempo de retorno de 15 anos (5).

TABELA 7: Custos total e anual do sistema solar com baterias e com sistema híbrido solar – hidráulico (30 anos).

Sistema		Paineis	Armaze- namento	Custo anual	CEG
	juros	US\$	US\$	US\$	US\$/MWh
Baterias 40 kW	10 %			6.134,00	419
	8%	41.800,00*	7.425,00**	5.318,00	364
	6%			4.544,00	317
Híbrido 60 kW	10 %			7.160,00	490
	8%	63.250,00*	4.301,00***	5.998,00	410
	6%			4.907,00	335

* Painéis solares - tempo de retorno de 30 anos

** Sistema com baterias - tempo de retorno de 06 anos

*** Sistema híbrido - tempo de retorno de 30 anos (5).

5.0 - COMENTÁRIOS FINAIS

Pela análise do estudo de caso pode-se observar que o sistema híbrido solar-hidráulico não é competitivo para o universo de taxas de juros com tempos de retorno de 15 anos, entretanto para um período de análise maior (30 anos) os custos de energia gerada são interessantes sendo que para taxas de 6% a/a a diferença é de apenas 5,7%. Observa-se também que o maior impacto sobre o custo do sistema se deve a aquisição de painéis solares. Portanto na medida que seus custos dos painéis forem caindo os custos de energia gerada para o sistema híbrido hidráulico devem se tornar mais competitivos. Em estudos

anteriores (5) não considerou a variação do rendimento da BFT para cada faixa de potência de trabalho, entretanto podê-se observar que a diferença entre o estudo de caso anterior (5) e o do presente estudo de caso realizados no CPH mostrou uma pequena diferença, o que levou a instalação de híbrida a uma potência instalada em torno de 33% maior que para o caso das baterias. Mesmo assim no caso de taxas de juros em torno de 6% a/a e com 30 anos de retorno o sistema se mostra competitivo com o sistema de baterias. É importante citar que no estudo de caso apresentado o custo do reservatório e de sistemas auxiliares não foi considerado assim como no caso do sistema convencional as instalações para abrigo de baterias também foram desconsideradas. Sugere-se novos estudos que incorpore os custos dos demais equipamentos do sistema.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) ALVIM FILHO, AYMORÉ DE C.; SILVA, SELÊNIO R; MARTINEZ, CARLOS B. A utilização de geração hidráulica consorciada com sistemas de energia fotovoltaicos e termelétricos. Anais do XVII Congreso nacional del agua & II Simposio de recursos hidricos del cono sur, Santa Fe – Argentina, 1998.

(2) ALVIM FILHO, AYMORÉ DE C. Avaliação econômica do fornecimento de energia elétrica a partir de fontes de energia solar e eólica para sistemas isolados. Dissertação de mestrado, CPDEE – UFMG. Belo Horizonte - MG, 1999.

(3) ELETROBRÁS & DNAEE. Manual de micro centrais hidrelétricas, 1985.

(4) SOLAR FOTOVOLTÁICA. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CRESESB/CEPEL. Grupo de trabalho de energia 1995.

(5) OLIVEIRA, DORIANA M.N; MARTINEZ, CARLOS B; SILVA, SELÊNIO R; ALVIM FILHO, AYMORÉ DE C. Sistemas de fornecimento de energia elétrica híbrido solar hidráulico. 3º Encontro de energia no meio rural -2000, UNICAMP -Campinas – SP.

(6) SANTOS, R.S.F.; SALIBA, A.P.M.; MARTINEZ, C.B. Seleção de formas de geração/suprimento de energia elétrica. em sistemas elétricos isolados do Brasil, III Congresso. Latino-Americano: Geração e transmissão de EE, v.1, p.128-152. 1997.

(7) STEPANOFF, A.T.; Cenrifugal and axial flow pumps. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1962.

(8) VIANA, AUGUSTO N.C. Comportamento de bombas centrífugas funcionando como turbinas hidráulicas. Dissertação de mestrado, EFEI. Itajubá – MG, 1987.