

Análise Comparativa Econômica entre Diferentes Opções para a Eletrificação Domiciliar Rural

Heitor Scalabrini Costa

Doutorado em Energética – Comissariado de Energia Atômica/Centro de Estudos de Cadarache (França)

Rodrigo Amon Lima da Costa

Engenheiro Eletrotécnico, Universidade Federal de Pernambuco

Resumo

Compara os custos associados à extensão da rede elétrica em função da distância e do número de residências a serem beneficiadas. Parte da constatação de que os sistemas convencionais energéticos nem sempre se apresentam como a melhor opção para satisfazer às necessidades do setor rural, em parte, dado o alto nível de dispersão das populações das zonas rurais e às baixas demandas de energia por essas populações. A dificuldade de acesso às comunidades afastadas, o tamanho das propriedades e a baixa renda familiar também contribuem para que seja técnica e economicamente inviável proporcionar eletricidade por rede elétrica convencional. O custo da geração de energia elétrica para o setor rural por métodos convencionais é elevado, pois o transporte e a distribuição acabam se tornando mais dispendiosos em relação à própria geração. Propõe a tecnologia solar fotovoltaica, entre outros recursos, como uma das melhores alternativas para o fornecimento de eletricidade às pequenas comunidades rurais isoladas.

Palavras - Chave

Eletrificação Rural Convencional; Sistema de Iluminação de Chama; Sistema Fotovoltaico Domiciliar.

1 - INTRODUÇÃO

Um dos requisitos básicos para o desenvolvimento auto-sustentável e humano de um país é o desenvolvimento de suas regiões rurais, sobretudo no que se refere à melhoria da qualidade de vida dos habitantes dessas regiões. Uma das causas do subdesenvolvimento das regiões rurais é a falta de energia elétrica. Basicamente, a eletricidade pode atender às seguintes necessidades:

- Necessidades básicas: domésticas ou comunitárias, incluindo iluminação, lazer, educação, saúde, água potável e comunicação;

- Necessidades produtivas: derivadas de operações agroindustriais, incluindo o bombeamento de água para fins de irrigação e processamento de produtos, entre outras.

Além de produzir exclusão social, a falta de energia elétrica provoca problemas à saúde, devido à utilização da iluminação de chama, que envolve a queima direta dos derivados do petróleo para a obtenção de iluminação por parte das famílias.

Além disso, pequenos produtores rurais de baixa renda não são capazes, geralmente, de fazer uso intensivo de energia, demorando muito para agregar novos equipamentos à produção. Suas instalações se espalham por áreas muito dispersas, de difícil acesso, muitas vezes sem estrada, constituindo um mercado que não compra e não cresce, onde se registra alto nível de perdas. O suprimento de energia implica altos custos nessas áreas, sendo considerado um mercado inviável pelas concessionárias.

Neste estudo são apresentados detalhes dos custos referentes à eletrificação rural convencional, à geração local com sistemas fotovoltaicos domiciliares e à iluminação de chama utilizando derivados do petróleo, mais o uso de bateria automotiva para televisão e de pilhas secas para

rádio. São analisadas as possibilidades técnico-econômicas dos três sistemas para atender à demanda de setores mais carentes e distantes da rede de energia elétrica convencional.

2 - OPÇÕES PARA ILUMINAÇÃO DOMICILIAR RURAL

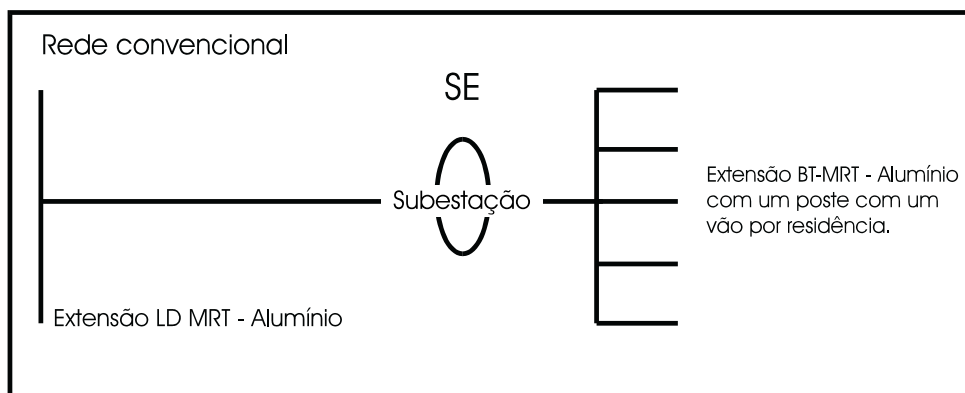
2.1 - Eletrificação Através da Extensão da Rede Convencional

2.1.1- Descrição dos projetos de extensão da rede convencional

Dependendo da carga a ser alimentada e das perspectivas de expansão do sistema, as Linhas de Distribuição (LDs) no meio rural podem ser trifásicas ou monofásicas. Como as necessidades energéticas do consumidor rural de baixa renda são pequenas e, por haver pouca ou nenhuma perspectiva de aumento da demanda de energia elétrica devido aos fatores sócio-econômicos, o modelo mais utilizado para as LDs é a linha monofásica com retorno por terra (MRT-alumínio). Esse modelo substitui o modelo MRT-aço, pois as perdas da potência são menores, melhorando assim a extensão da rede em longas distâncias. Segundo os critérios utilizados pela Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), o comprimento máximo utilizando o transformador de 5 Kilo Volts-Ampère (KVA) é de 32 km para MRT-alumínio e de 8 km para MRT-Aço.

Como as LDs monofásicas transmitem numa tensão de 7,97 kV e o consumidor utiliza tensão de 220 V, é necessário acrescentar subestações ao sistema. Estas subestações são formadas por transformadores monofásicos com potência aparente de 5 kVA atendendo no máximo 5 consumidores, assumindo que cada consumidor necessite de uma potência média de 0,5 KVA. As ligações entre a subestação e os consumidores são realizadas por linha de Baixa Tensão (BT) de alumínio, que necessita de um vão e de um poste para cada consumidor, não podendo ultrapassar 1 km.

FIGURA 1
DIAGRAMA UNIFILAR DA REDE CONVENCIONAL



FONTE: Companhia Elétrica de Pernambuco (1997).

2.1.2 - Cálculo dos custos de extensão da rede

Os valores utilizados para o cálculo dos custos de extensão da rede são tomados da TABELA 1, que indica uma média de preços obtidos nas cooperativas de eletrificação rural de Pernambuco a partir de custos de obras realizadas no 2º semestre de 1998.

Para obter-se o custo domiciliar pela extensão da rede utilizam-se os critérios técnicos definidos pela CELPE para a elaboração de projetos de eletrificação rural, mostrados no QUADRO 1.

Seguindo os critérios técnicos, o custo domiciliar foi calculado para a eletrificação rural convencional no estado de Pernambuco, em função da distância da rede elétrica mais próxima e do número de residências a serem atendidas (TABELA 2).

TABELA 1
PREÇOS MÉDIOS FORNECIDOS PELAS COOPERATIVAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL DE PERNAMBUCO

DESCRIÇÃO	CUSTO (US\$)
LD MRT-ALUMÍNIO/KM	3,326.71
BT/km, monofásica - Fase-Neutro	5,255.37
BT - 1vão + 1 poste (monofásica)	274.54
SE (subestação) + 5 kVA (monofásica)	1,043.41

FONTE: Elaboração dos Autores
Valores convertidos em dólar (US\$ 1 = R\$ 1,16 – Julho/98)

QUADRO 1
CRITÉRIOS TÉCNICOS UTILIZADOS PELA CELPE

• Número de propriedades por km	8
• KVA por domicílio doméstico	0,5
• Consumidores por transformador	5
• Postes por km BT	20

FONTE: Companhia Elétrica de Pernambuco (1997)

O custo ao longo da vida útil do sistema de eletrificação rural convencional foi associado apenas ao investimento inicial, devido à falta de informações relativas aos custos de reposição de peças, de operação e de manutenção. Constatou-se que não há manutenção preventiva neste sistema, mas apenas manutenção corretiva.

2.2 - Eletrificação Utilizando o Sistema Fotovoltaico Domiciliar

2.2.1- Descrição de projetos utilizando energia solar fotovoltaica para eletrificação rural domiciliar

Um sistema fotovoltaico domiciliar, também conhecido como Solar Home System (SHS), é destinado a satisfazer as necessidades elétricas de uma residência. Por exemplo, suprir as necessidades de iluminação, e de um rádio e uma televisão. Este sistema fotovoltaico domiciliar consiste de módulo(s) com potências variando de 40 a 100 Watts pico (Wp), gerando corrente

TABELA 2
CUSTO DOMICILIAR DA ELETRIFICAÇÃO RURAL CONVENCIONAL EM FUNÇÃO DO
NÚMERO DE RESIDÊNCIAS A SEREM ATENDIDAS E DA DISTÂNCIA DA REDE ELÉTRICA

NÚMERO DE DOMICÍLIOS	DISTÂNCIAS (KM)						
	0,5	1	2	5	8	9	10
1	2,964.89	4,644.69	7,971.42	17,951.59	27,931.76	31,258.48	34,585.21
5	1,619.71	2,459.62	4,644.69	9,634.78	14,624.87	16,288.23	17,951.59
10	647.92	815.91	1,148.58	2,459.62	3,770.66	4,207.68	4,644.69
15	593.02	705.01	926.80	1,731.26	2,605.29	2,896.63	3,187.98
20	565.58	649.57	815.91	1,367.08	2,022.60	2,241.11	2,459.62
30	538.12	594.12	705.01	1,037.69	1,439.91	1,585.59	1,731.26
50	516.16	549.76	616.30	815.91	1,617.19	1,082.04	1,148.58

FONTE: Elaboração dos Autores a partir de informações fornecidas pela Companhia Elétrica de Pernambuco e Cooperativas de Eletrificação

• Valores convertidos em dólar (1US\$=R\$ 1,16 – Julho/98)

elétrica DC armazenada em bateria(s) eletroquímica(s) de 50 a 150 Ampére-hora (Ah). O controlador de carga utilizado é um componente que tem como função básica proteger a bateria contra descargas profundas e sobrecargas – situações que contribuem para a redução de seu tempo de vida útil.

A tecnologia atual de fabricação de módulos fotovoltaicos tem mostrado sua maturidade, implicando em tempo de funcionamento superior a vinte anos, garantido pelos fabricantes. Os outros componentes não têm apresentado maiores problemas para os sistemas fotovoltaicos de pequeno porte.

Do ponto de vista da engenharia, um dos aspectos a ressaltar é o correto dimensionamento do sistema, que deve levar em consideração o consumo (os equipamentos instalados) e o perfil de carga da unidade de consumo (uma residência). Dessa maneira a otimização é realizada caso a caso, em relação à quantidade de módulos e à capacidade de armazenamento das baterias, levando em conta a energia gerada e a energia demandada. No caso de grupos de casas ou de pequenas comunidades, estabelece-se a melhor configuração que satisfará as necessidades de carga de cada consumidor medi-

ante estudos técnicos e socioeconômicos. A FIGURA 2 mostra o diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico domiciliar.

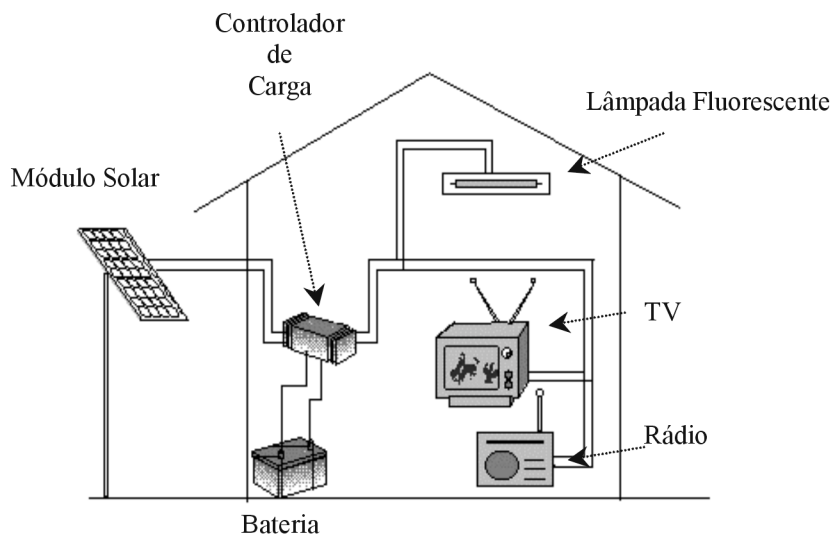
2.2.2 - Análise do custo total de sistemas fotovoltaicos domiciliares

Foram determinados os custos ao longo de vinte anos de funcionamento de uma instalação SHS para iluminação e lazer, levando em conta o investimento inicial, a reposição de peças/equipamentos e a manutenção/operação. Esses custos são assim divididos:

- **Investimento inicial:** corresponde ao preço da compra do módulo fotovoltaico, bateria, divisor de tensão, controlador de carga, três a quatro lâmpadas fluorescentes completas, suporte para módulo e componentes para a instalação – fiação e interruptores, entre outros materiais. Considera-se que a mão-de-obra para a instalação está incluída;

- **Custo de reposição:** tanto para a bateria, como para o controlador de cargas e as lâmpadas. Considera-se que cada um desses componentes tem um tempo médio de funcionamento e que deverão ser repostos;

FIGURA 2
DIAGRAMA DE UM SHS



FONTE: Elaboração de Autores

- **Custo anual:** o sistema fotovoltaico tem a vantagem de não apresentar custos anuais, uma vez que não emprega combustível, mas energia solar gratuita;

- **Custo de operação e manutenção:** foi considerado o valor de US\$ 20 por mês (valor típico).

O custo do investimento inicial está detalhado na TABELA 3. Os custos de reposição estão relacionados com a vida útil dos componentes. Assim, as lâmpadas são trocadas a cada dois anos, a bateria a cada quatro anos e o controlador de carga a cada oito anos. Ao multiplicar os custos presentes desses componentes pelos fatores de desconto P_r e P_a , obtém-se os valores necessários para o cálculo dos gastos na reposição.

Os fatores de desconto e as expressões utilizadas estão descritos abaixo. A TABELA 4 mostra os fatores de desconto calculados.

$$P_r = \frac{(1+i)}{(1+d)^n} \text{ (fator de descapitalização)}$$

$$P_a = \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n} \text{ (fator de amortização)}$$

i = taxa de inflação (considerada nula)

d = 0,1 (taxa de desconto)

n = período no qual o pagamento será realizado (20 anos)

Os custos totais ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico domiciliar estão detalhados em ANEXO.

2.3 - Sistema de Iluminação de Chama

2.3.1 - Descrição dos materiais utilizados na iluminação de chama

O sistema de iluminação de chama é utilizado para a iluminação de uma residência rural de baixa renda, devido à falta do sistema convencional ou de outro sistema de geração de eletricidade alternativo. Neste trabalho, o sistema de iluminação de chama também leva em consideração, além da iluminação com candeeiro, o uso de pilhas secas e de bateria para acionar o rádio e a televisão, respectivamente.

TABELA 3
CUSTOS RELATIVOS AO INVESTIMENTO INICIAL
(EQUIPAMENTOS E MÃO-DE-OBRA)

COMPONENTES	VALOR UNITÁRIO(US\$)	N.º DE UNIDADES	CUSTO (US\$)
Módulo solar (50 Wp)	400.00	1	400.00
Controlador de carga	67.24	1	67.24
Bateria 100 Ah/12 V	128.45	1	128.45
Divisor de tensão	21.55	1	21.55
Luminária completa (4xfluorescentes 20 W/12 V)	17.24	4	68.96
Parte elétrica (condutores, interruptores, ...)	43.10	1	43.10
Poste, suporte e acessórios	75.86	1	75.86
Instalação (mão-de-obra)	77.59	1	77.59
CUSTO TOTAL			882.75

FONTE: Elaboração dos Autores a partir de informações obtidas do Programa de Eletrificação Rural com Energia Solar Fotovoltaica (PERESF), da Universidade Federal de Pernambuco

- Valores convertidos em dólar (US\$ 1 = R\$ 1,16 – Julho/98)

TABELA 4
FATORES DE DESCONTO CALCULADOS

ANOS	PR	PA
2	0,83	1,74
4	0,68	3,17
6	0,56	4,36
8	0,47	5,33
10	0,39	6,14
12	0,32	6,81
14	0,26	7,31
16	0,22	7,82
18	0,18	8,20
20	0,15	8,51

FONTE: Elaboração dos Autores

A iluminação é obtida pela queima direta de querosene ou óleo diesel, utilizando o candeeiro como recipiente armazenador e o pavio como elemento absorvedor e inflamador do combustível. Esse tipo de iluminação é precário, pois o nível de iluminação (em lúmens) é baixo, provocando problemas visuais. Além disso, ocorre eliminação de fumaça tóxica na queima do combustível fóssil, provocando problemas respiratórios.

Para o uso de rádio e televisão são utilizadas pilhas secas de 1,5 Volts (V) (seis unidades) e

uma bateria automotiva de 40 Ah/12 V respectivamente. As pilhas são substituídas mensalmente, enquanto a bateria é recarregada duas vezes ao mês. Essa rotina de reposição de carga é inconveniente e dispendiosa, pois o local de recarga, que possui energia elétrica convencional, é distante, perdendo-se um dia inteiro para a recarga lenta da bateria.

Como se pode verificar, esse sistema não é eficiente e gera desconforto e problemas à saúde, apesar de ter um custo relativamente baixo, como será verificado a seguir.

2.3.2 - Cálculo dos custos da iluminação de chama

No cálculo dos custos da iluminação de chama, também é utilizado o método de desconto para um período de vinte anos, assim dividido:

- Investimento inicial: corresponde ao custo dos materiais necessários para o funcionamento do sistema. Os materiais são dois candeeiros e uma bateria automotiva para a televisão de 40 Ah/12 V. O custo de investimento inicial está detalhado na TABELA 5;

- **Custo de reposição:** corresponde ao custo da reposição de cada material no fim da vida útil. Os materiais de reposição são o candeeiro, com vida útil de cinco anos e a bateria, com vida útil de quatro anos. O pavio do candeeiro não foi levado em conta por ser fabricado pelos próprios usuários;

- **Custo anual:** deve-se ao uso de combustível – querosene ou diesel –, recarga da bateria e pilhas;

- **Custo de operação e manutenção:** o custo de operação corresponde à compra de quatro litros mensais de querosene e de seis pilhas secas de 1,5 V (valores médios determinado por uma pesquisa de campo realizada em 1.414 domicílios rurais). A manutenção é realizada pelos próprios usuários.

Para obter-se o custo anual utilizou-se o mesmo método empregado no cálculo do sistema fotovoltaico.

Os custos totais, ao longo da vida útil do sistema de iluminação de chama, estão detalhados em ANEXO.

3 - CONCLUSÕES

Analisando o sistema de eletrificação rural convencional, verifica-se que os custos aumentam com a distância da Linha de Distribuição (LD) e diminuem com o aumento do número de residências beneficiadas.

No sistema fotovoltaico, os custos permanecem constantes, pois o sistema é dimensionado para uso específico, não possuindo variáveis. Para um sistema domiciliar, o custo de investimento inicial é de US\$ 882.75, enquanto o custo ao longo de vinte anos corresponde a US\$ 1,586.04.

No sistema de iluminação de chama, levando-se em conta o uso de bateria e de pilhas secas, os custos também permanecem constantes. O investimento inicial é de US\$ 45.68, enquanto o custo durante vinte anos é de US\$ 671.32.

Na comparação dos três sistemas, constata-se que o mais barato é o de iluminação de chama, que apresenta como desvantagens principais a ineficiência na iluminação, o uso de combustíveis fósseis e os problemas provocados à saúde dos usuários. Além disso, esse sistema marginaliza seus consumidores, pois a inclusão de novos equipamentos para uma melhoria nas condições de vida do usuário não é tecnicamente viável.

Em relação aos dois sistemas restantes – fotovoltaico e convencional –, conclui-se que um é mais vantajoso que o outro, dependendo da situação analisada. Os casos em que o sistema fotovoltaico é mais econômico que a extensão da rede podem ser verificados na TABELA 2, na qual a parte sombreada corresponde à região cujos custos para estender a rede são superiores aos da eletrificação fotovoltaica.

TABELA 5
CUSTO DE INVESTIMENTO INICIAL DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE CHAMA
E DO USO DE BATERIA AUTOMOTIVA

COMPONENTES	VALOR (US\$)	Nº DE UNIDADES	CUSTO (US\$)
Candeeiros	1.29	2	2.58
Bateria 40 Ah/12 V	43.10	1	43.10
CUSTO TOTAL			45.68

FONTE: Elaboração dos Autores

NOTA: Os custos foram convertidos em dólar (US\$ 1 = R\$ 1,16 - Julho/98).

ca (considerando-se somente o investimento inicial). Nota-se que é mais barato eletrificar quinze residências localizadas a 2 km da rede, através da eletricidade solar, do que estender a rede elétrica.

Portanto, a escolha do sistema fotovoltaico ou convencional para a eletrificação rural dependerá, entre os critérios técnicos a serem adotados, da distância do consumidor em relação à linha de distribuição mais próxima e do número de domicílios a serem atendidos. Sendo o sistema de iluminação de chama ineficiente, o sistema fotovoltaico constitui uma excelente opção técnica e econômica para suprir as necessidades elétricas das comunidades rurais de baixa renda.

Abstract

Conventional systems of energy operation, developed mainly by means of production units and highly centralized distribution, are not always the best option to satisfy the needs of the rural area. This is partly due to the high dispersion level of the rural zones populations and to their low demands for electric energy, since the economic activities of those populations are generally quite reduced, as well as their energy consumption. The problems to reach distant communities, the farms extent and the low family income make it too expensive to provide electricity via the extension of the conventional electric network. The electric energy generation costs for the rural area by conventional methods are too high, once the conduction and distribution of the energy needed is more expensive than its own generation. Because of this, other options such as the use of renewable energy resources should be considered, as they offer multiple advantages. Some of them are the easy access to materials and to local workers, besides its compatibility with the environment. Moreover, it favours the economic production of small scale useful energy. Among other resources, photovoltaic technology is one of the best alternatives for the supply of electricity to small isolated rural communities. This paper intends to compare the costs associated to the elec-

tric network extension in function of distance and of the number of dwellings to be benefitted. It uses a model for the cost, which is validated and compared to the costs of a photovoltaic system for low income rural users, and of a flame illumination system as well. The relative total costs of the initial investment and its maintenance and operation are also evaluated.

Key-Words

Conventional Rural Electricity System, Flame Illumination System, Home Photovoltaic System.

4 - BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

COMPANHIA ELÉTRICA DE PERNAMBUCO.

Critérios técnicos para a elaboração de projetos de eletrificação rural. Recife, 1997.

COSTA, H. S., CHAVES, F. C. Esquema de financiamento apropriado para compra direta pelos pequenos produtores rurais de sistemas fotovoltaicos residenciais. In: ENCONTRO DO FÓRUM PERMANENTE DE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 4., 1998, Recife. **Anais...** Recife, 1998.

_____. **O papel da energia solar fotovoltaica na eletrificação rural doméstica em Pernambuco.** Recife, 1998. 69 p. Trabalho (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco.

COSTA, H. S, ECK, M., COSTA, R. A. L. Análise econômica comparativa da eletrificação rural comercial e fotovoltaica. In: CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL, 17., 1999, Recife. **Anais...** Recife, 1999.

Recebido para Publicação em 29.10.1999

ANEXO

COMPARAÇÃO DOS CUSTOS ENTRE O SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE CHAMA (INCLUINDO BATERIA E PILHAS) E O SISTEMA DOMICILIAR FOTOVOLTAICO, EM US\$ (JULHO 1998).

CUSTOS DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO DE CHAMA (INCLUINDO BATERIA E PILHAS)				CUSTOS DO SISTEMA DOMICILIAR FOTOVOLTAICO			
• INVESTIMENTO INICIAL				• INVESTIMENTO INICIAL			
Iluminação de chama		45.68		Sistema completo		882.75	
• CUSTO DE REPOSIÇÃO				• CUSTO DE REPOSIÇÃO			
- 2 Candeeiros		2.58		- Bateria (100 Ah - 12 V)		128.45	
Anos	Fator Pr	Valor Atual		Anos	Fator Pr	Valor Atual	
3	0,75	1.94		4	0,68	87.35	
6	0,56	1.46		8	0,47	60.37	
9	0,42	1.09		12	0,32	41.10	
12	0,32	0.82		16	0,22	28.26	
15	0,24	0.62					
18	0,18	0.46		- Regulador de carga 67.24			
- Bateria (40 Ah - 12 V)		43.10		Anos	Fator Pr	Valor Atual	
Anos	Fator Pr	Valor Atual		8	0,47	31.60	
4	0,68	29.44		16	0,22	14.79	
8	0,47	20.11		- Lâmpada de 20 W 68.96			
12	0,32	13.73		Anos	Fator Pr	Valor Atual	
16	0,22	9.38		2	0,83	57.23	
Total		79.05		4	0,68	46.89	
• CUSTO ANUAL (Reposição de combustível)				6	0,56	38.62	
- Querosene (4 litros/mês)		23.60		8	0,47	32.41	
- Bateria (2 recargas/mês)		49.02		10	0,39	26.89	
- Pilhas (6 unidades/mês)		29.41		12	0,32	22.07	
Total		102.03		14	0,26	17.93	
Anos	Fator Pa	Valor Atual		16	0,22	15.17	
20	8,51	868.68		18	0,18	12.47	
• CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO				Total 533.15			
Total		0.00		• CUSTO ANUAL 0.00			
• CUSTO EM 20 ANOS 993.41				(Reposição de combustível)			
• CUSTO ANUAL		116.69		• CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO			
• CUSTO MENSAL		10.24		- Custo anual		20.00	
Anos	Fator Pa	Valor Atual		Anos	Fator Pa	Valor Atual	
20	8,51	170.20		20	8,51	170.20	
• CUSTO EM 20 ANOS 1,586.10				• CUSTO ANUAL 186.38			
• CUSTO ANUAL				• CUSTO MENSAL 16.35			
• CUSTO MENSAL							

FONTE: Elaboração dos Autores

ANÚNCIO