



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CAMPUS DE PALMAS

FELIPE TOZZI BITTENCOURT

ANÁLISE DE UM SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO – CÉLULA
COMBUSTÍVEL (PV/CaC) POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

PALMAS - TO
2009

FELIPE TOZZI BITTENCOURT

ANÁLISE DE UM SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/CÉLULA
COMBUSTÍVEL (PV/CaC) POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação da Área de
Indústria como requisito parcial para
obtenção da conclusão do Curso Superior
de Tecnologia em Sistemas Elétricos do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Tocantins, Campus
Palmas.

Orientador Prof. M.Sc. Fabio Lima de
Albuquerque

Co-orientador Prof. M.Sc. Sérgio Batista
Silva.

PALMAS - TO
2009

B624a Bittencourt, Felipe Tozzi

Análise de um sistema híbrido fotovoltaico – célula combustível (PV/Cac) por simulação computacional / Felipe Tozzi Bittencourt. – – Palmas, 2009.
136f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Tecnológica em Sistemas Elétricos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Palmas, 2009.

Orientador: Prof. Me. Fábio Lima de Albuquerque

Co-orientador: Prof. Me. Sérgio Batista Silva

1. Energia solar. 2. Energia fotovoltaica. Título. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – Campus Palmas.

CDD 621.31244

FELIPE TOZZI BITTENCOURT

ANÁLISE DE UM SISTEMA HÍBRIDO FOTOVOLTAICO/CÉLULA
COMBUSTÍVEL (PV/CaC) POR SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como cumprimento às exigências legais do currículo do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Elétricos pela Coordenação da Área de Indústria do Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia do Tocantins - Campus de Palmas.

Palmas, 3 de Julho de 2009.

Prof. Dr. Sérgio Manuel Sanhueza Rivera
Supervisor do Trabalho de Conclusão de Curso

Prof. MSc. Mateus Lima Peduzzi
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. MSc. Fabio Lima de Albuquerque
Presidente e Orientador

Prof. MSc. Sérgio Batista Silva.
Co-Orientador

Prof. Dr. Élcio Precioso Paiva
Membro de Banca Examinadora

Prof. Max Portuguese Obeso
Membro de Banca Examinadora

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Fabio de Lima Albuquerque e Prof. Sérgio Batista Silva pela orientação e confiança depositadas durante o todo o curso.

Ao pessoal da Turma de Sistemas Elétricos egressos em julho/2006.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do estado do Tocantins principalmente a coordenação de Indústria pelo suporte fornecido.

Aos meus Pais Mário e Telma, que me ajudaram a tornar possível mais este sonho.

“A garantia de nos tornarmos invencíveis está em nossas próprias mãos.”

Sun Tzu

RESUMO

Neste trabalho foram realizados estudos sobre diversas fontes de energia renovável e não renovável que são utilizados para a alimentação de rede elétrica em comunidades da Amazônia não atendidas pela rede elétrica convencional. Entre as fontes de energia renovável que foram estudados estão os Painéis Fotovoltaicos (PV) e a Célula a Combustível (CaC), onde o funcionamento básico destes dois componentes, trabalhando em conjunto, tem como intermédio o eletrolisador para a produção de hidrogênio e com isso o armazenamento de energia do mesmo. A fonte de energia não renovável estudado foi o gerador elétrico a diesel, o qual é muito utilizado em comunidades isoladas para a produção de eletricidade. Porém, contém muitos empecilhos como, preço do combustível elevado, difícil logística de distribuição de combustível e manutenção devido à falta de acessibilidade destas comunidades. Outro problema também está na emissão de gases poluentes que agredem o meio ambiente e colaboram com o efeito estufa. Realizaram-se assim, simulações computacionais através do software HOMER para analisar a viabilidade técnica e financeira de projetos que englobem geração de energia através de dos Painéis Fotovoltaicos (PV) com Célula a Combustível (CaC) comparando os resultados com o projeto piloto no Centro de Pesquisa Canguçu (CPC), administrado pela Fundação Universidade Federal do Tocantins (UFT).

Palavras Chaves: Painel Fotovoltaico, Célula a Combustível e Gerador Diesel.

ABSTRACT

This work presents the studies which have been carried out on various renewable sources and non renewable energy that are used to supply energy to those communities in the Amazon area that are not served by conventional power lines. Among renewable energy sources that were studied are the photovoltaic panels (PV) and the Fuel Cell (CaC); the basic operation of these two components working together, has the electrolyser as its intermediate for the production of hydrogen and thus, the storage of energy from it. The non-renewable energy source studied was an electric diesel generator, which is widely used in isolated communities to produce electricity. However, there are many obstacles such as the high fuel prices, the difficult logistics of fuel distribution and the maintenance due to the lack of accessibility to those communities. Another problem is also on the emission of greenhouse gases that damage the environment and collaborate with the greenhouse effect. There were thus computational simulations using HOMER software to analyze the technical and financial feasibility of projects covering power generation through photovoltaic panels (PV) with the Fuel Cell (CAC) comparing the results with the pilot project at the Center for Search Canguçu (CPC), administered by the Federal University of the Tocantins (UFT).

Keywords: Photovoltaic Panel, the Fuel Cell and Diesel Generator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Célula solar fotovoltaica.....	
Figura 2 – Característica I-V de uma célula fotovoltaica.....	
Figura 3 – Gráfico da Potência X tensão.....	
Figura 4 - Dependência da característica corrente x tensão com a temperatura.....	
Figura 5 - Dependência da característica potência x tensão com a temperatura.....	
Figura 6 – Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação.....	
Figura 7 – Potência x tensão para uma célula fotovoltaica para quatro níveis de iluminação.....	
Figura 8 – Célula, módulo e conjunto fotovoltaico.....	
Figura 9 – Ilustração de uma bateria.....	
Figura 10 – Efeito da temperatura em relação à capacidade da bateria.....	
Figura 11 – Efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria.....	
Figura 12 – Número de ciclos em função da profundidade de descarga.	
Figura 13 – Diagrama esquemático dos eletrolisadores unipolares (a) e bipolares (b).....	
Figura 14 - Eletrólise alcalina da água.....	
Figura 15 – Gasômetro (Canguçu).....	
Figura 16 – Esquema básico de uma célula a combustível.....	
Figura 17 – Dualidade entre uma célula de combustível e um eletrolisador.....	
Figura 18 – Conversão direta de energia com células a combustível comparado com tecnologia convencional indireta.....	

Figura 19 – Ciclo do hidrogênio e do oxigênio.....	
Figura 20 - Curva de consumo de um grupo gerador a diesel (L/h).....	
Figura 21 – Motor Diesel e seus componentes.....	
Figura 22 – Esquema de combustão para motor de quatro tempos.....	
Figura 23 – Componentes de um motor de quatro tempos.....	
Figura 24 – Esquema de combustão para motor de dois tempos.....	
Figura 25 – Componentes de um motor de dois tempos.....	
Figura 26 – Campo magnético uniforme e espira girante.....	
Figura 27 – Tensão gerada por uma bobina móvel num campo uniforme.....	
Figura 28 – Estator e rotor de um gerador de energia elétrica.....	
Figura 29 – Formas de onda típicas dos inversores de frequência.....	
Figura 30 – Inversor para uma forma de onda quadrada.....	
Figura 31 – Inversor para uma forma de onda quadrada modificada.....	
Figura 32 – Inversor para uma forma de onda senoidal (esquema básico do PWM).....	
Figura 33 – Eficiência% / Potência de saída %.....	
Figura 34 – Diagrama de Blocos do Sistema Híbrido do CPC.....	
Figura 35 - PV – Bateria.....	
Figura 36 - PV – Diesel – Bateria.....	
Figura 37 – Diesel.....	
Figura 38 - PV – Célula a Combustível.....	
Figura 39 - PV – Célula a Combustível CPC.....	
Figura 40 – Demanda ao longo do dia do CPC.....	
Figura 41 – Demanda ao longo do dia da Vila Campinas.....	
Figura 42 – Inserção de equipamentos.....	

Figura 43 – Inserção da radiação Solar.....	
Figura 44 – Inserção do preço do Diesel.....	
Figura 45 – Inserção de variáveis econômicas.....	
Figura 46 – Inserção dos painéis fotovoltaicos.....	
Figura 47 – Inserção dos dados técnicos da Bateria.....	
Figura 48 – Inserção das cargas.....	
Figura 49 – Custo por material do Sistema PV – Bateria.....	
Figura 50 – Produção Mensal Média do Sistema PV – Bateria.....	
Figura 51 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV – Bateria.....	
Figura 52 – Descarga das Baterias para o Sistema PV – Bateria.....	
Figura 53 - Custo por material do Sistema PV – Diesel – Bateria.....	
Figura 54 - Produção Mensal Média do Sistema PV – Diesel – Bateria.....	
Figura 55 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV – Diesel – Bateria.....	
Figura 56 - Produção Mensal do gerador diesel para o Sistema PV – Diesel – Bateria.....	
Figura 57 - Custo por material do Sistema Diesel.....	
Figura 58 - Produção Mensal Média do Sistema Diesel.....	
Figura 59 - Produção Mensal do gerador diesel para o Sistema Diesel.....	
Figura 60 - Custo por material do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	
Figura 61 - Produção Mensal Média do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	
Figura 62 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	
Figura 63 - Produção Mensal da Célula a Combustível do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	

Figura 64 - Descarga das Baterias para o Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	
Figura 65 – Nível do Tanque de Hidrogênio para o Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	
Figura 66 - Custo por material do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	
Figura 67 - Produção Mensal Média do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	
Figura 68 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	
Figura 69 - Produção Mensal da Célula a Combustível do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	
Figura 70 - Descarga das Baterias para o Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	
Figura 71 - Nível do Tanque de Hidrogênio para o Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação da eficiência com a voltagem de operação e o consumo de energia por unidade de H ₂ gerado.....	
Tabela 2 – Principais processos de produção de hidrogênio.....	
Tabela 3 – Classificação e caracterização das células combustíveis atuais.....	
Tabela 4 – Características das formas de onda de um inversor de frequência.....	
Tabela 5 – Radiação solar na cidade de Porto Nacional.....	
Tabela 6 – Distribuição do consumo de energia elétrica da Vila Campinas.....	
Tabela 7 – Preço dos materiais utilizados no CPC.....	
Tabela 8 – Custo para simulações.....	
Tabela 9 – Sistema PV – Bateria.....	
Tabela 10 – Custo do Sistema PV – Bateria.....	
Tabela 11 – Sistema PV – Diesel - Bateria.....	
Tabela 12 - Custo do Sistema PV – Diesel – Bateria	
Tabela 13 – Emissão de Poluentes para o Sistema PV – Diesel – Bateria.....	
Tabela 14 – Custo do Sistema Diesel.....	
Tabela 15 – Emissão de Poluentes para o Sistema Diesel.....	
Tabela 16 - Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	
Tabela 17 - Custo do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC.....	
Tabela 18 - Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	
Tabela 19 - Custo do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	
Tabela 20 – Equipamento Utilizado para cada Simulação.....	
Tabela 21 – Custos por Componente.....	

Tabela 22 – Preço do kWh.....

Tabela 23 – Emissão de Poluentes.....

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
AFC	<i>Alkaline Fuel Cell</i> (Célula a combustível alcalina)
Ah	Ampére-hora
AM	Densidade Atmosférica
APA	Área de Proteção Ambiental
a-Si	Silício Amorfo Hidrogenado
a-Si:H	Silício Amorfo Hidrogenado
bar	Unidade de Pressão
CA	Corrente Alternada
CaC	Célula a Combustível
CC	Corrente Continua
CCC	Conta de Consumo de Combustível
CdTe	Telureto de Cádmio
CIS	Dissulfeto de Cobre e Índio
cm	Centímetros
CPC	Centro de Pesquisas Canguçu
c-Si	Silício Cristalino
CuInSe ₂	Dissulfeto de Cobre e Índio
F	Consumo de Combustível (L/h)
f	Frequência em Hz
G	Índice de Radiação Solar
GTES	Grupo de Trabalho de Energia Solar
H ₂	Hidrogênio

H ₂ O	Água
Hz	Frequência (Hertz)
I	Corrente elétrica (A)
I _M	Corrente Máxima em (A)
I _{SC}	Corrente de Curto Circuito (A)
kWh/m ³	Consumo de Energia por Unidade de H ₂ Gerado
m/s	velocidade em metros por segundo
m ²	Área em Metros Quadrados
m ³	Volume em metros cúbicos
MC	Tipo de Bateria do Fabricante Moura
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell</i> (Célula a combustível do tipo carbonato fundido)
MF	Tipo de Bateria do Fabricante Moura
m-Si	Silício Monocristalino
N	Velocidade de rotação em rpm
Nm ³ /h	Capacidade de produção de hidrogênio
NOCT	Temperatura nominal de Operação da Célula
O	Oxigênio
P	Potência em Watts (W)
p	Numero de pólos
Pa	Unidade de Pressão
PAFC	<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i> (Célula a combustível de ácido fosfórico)
P _{ci}	Potência Efetivamente pela Carga em Qualquer Instante (KW)
PEM	<i>proton exchange membrane</i> (membrana condutora de prótons)

PEMFC	<i>Photon Exchange Membrane Fuel Cell</i> (Célula a combustível com membrana condutora de prótons)
P _{gm}	Potência Nominal do Grupo Gerador (kW)
psi	Unidade de pressão
PV	Painel Fotovoltaico
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
RMS	<i>Root Mean Square</i> (valor quadrático médio)
S	Potência Aparente (VA)
SFV	Sistema fotovoltaico
Si	Silício
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOFC	<i>Solid Oxid Fuel Cell</i> (Célula a combustível do tipo óxido sólido)
T _a	Temperatura Ambiente
T _c	Temperatura da Célula
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFT	Fundação Universidade Federal do Tocantins
V	Tensão em Volts
V _M	Tensão Máxima em (V)
V _{OC}	Tensão de Circuito Aberto em Volts
W/m ²	Watt por metro quadrado
Wp	Watt pico
μm	Micrometros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	
1.1. Tema da Pesquisa.....	
1.2. Problema.....	
1.3. Hipótese.....	
1.4. Objetivos.....	
1.4.1. Objetivo Geral.....	
1.4.2. Objetivos Específicos.....	
1.5. Justificativa.....	
1.6. Método da Pesquisa.....	
1.7. Estrutura do Trabalho.....	
2. FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS.....	
2.1. Energia Solar Fotovoltaica.....	
2.1.1. Tecnologias Disponíveis.....	
2.1.1.1. Silício cristalino (c-Si).....	
2.1.1.2. Silício amorfo hidrogenado (a-Si).....	
2.1.1.3. Telureto de Cadmio (CdTe).....	
2.1.1.4. Disseleneto de Cobre e Índio (CIS).....	
2.1.2. Característica de corrente X tensão e desempenho da célula fotovoltaica.....	
2.1.3. Parâmetros que influenciam o comportamento básico das células fotovoltaicas.....	
2.1.3.1. Influência da Temperatura.....	
2.1.3.2. Influência da Intensidade da Radiação Solar.....	
2.1.4. O módulo fotovoltaico.....	
2.1.5. Principais Aplicações dos Sistemas Fotovoltaicos.....	
2.2. Baterias.....	
2.2.1. Efeitos que alteram o rendimento das Baterias.....	
2.3. Eletrolisador.....	
2.4. Armazenagem de Hidrogênio	
2.5. Célula a Combustível (CaC).....	
2.6. Gerador a Diesel.....	

2.6.1. Motor Diesel.....	.....
2.6.1.1. Motor de Quatro Tempos.....	.....
2.6.1.2. Motor de Dois Tempos.....	.....
2.6.2. Gerador Elétrico.....	.....
2.7. Inversor de Frequência.....	.....
2.8. Centro de Pesquisa Canguçu (CPC).....	.....
2.8.1. Característica do sistema híbrido do CPC.....	.....
2.9. HOMER.....	.....
2.9.1. O que é HOMER? .....	.....
2.9.2. Conceitos básicos sobre o HOMER.....	.....
3. DESENVOLVIMENTO.....	.....
3.1. Dimensionamento de Sistemas com Painéis Fotovoltaicos.....	.....
3.2. Configurações.....	.....
3.3. Características de Carga.....	.....
3.4. Custos dos Equipamentos.....	.....
3.5. Como o Homer Funciona.....	.....
3.6. Resultados das Simulações.....	.....
3.6.1. PV – Bateria.....	.....
3.6.2. PV – Diesel.....	.....
3.6.3. Diesel.....	.....
3.6.4. PV – Célula a Combustível do CPC.....	.....
3.6.5. PV – Célula a Combustível da Vila Campinas.....	.....
3.7. Análise de Resultados.....	.....
4. Conclusão.....	.....
REFERÊNCIAS.....	.....
APÊNDICE A – RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – BATERIA.....	.....
APÊNDICE B - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – DIESEL – BATERIA.....	.....
APÊNDICE C - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO DIESEL.....	.....
APÊNDICE D - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – CAC DO CPC.....	.....
APÊNDICE E - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – CAC DA VILA CAMPINAS.....	.....

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é uma das formas de energia mais versáteis e que melhor se adapta às necessidades da civilização no mundo atual. Sua utilização está tão estendida que dificilmente se concebe uma sociedade tecnologicamente avançada que não faça uso dela em larga escala. Pode-se dizer que todo o parque tecnológico, exceção feita em grande medida ao transporte, está baseado em eletricidade. No contexto mundial, a estrutura energética atual de geração de eletricidade está essencialmente baseada no consumo massivo de combustíveis não renováveis, o que conduz inevitavelmente, a um esgotamento das reservas e supõe uma ameaça real ao meio ambiente, manifestando-se principalmente através da acidificação do ciclo da água, do provável aquecimento global do Planeta e de outros problemas relacionados com a saúde dos seres vivos. Passando-se ao caso brasileiro, a situação é menos preocupante devido ao peso da hidroeletricidade na matriz energética nacional que é de cerca de 90%. Por outro lado, os grandes empreendimentos hidroelétricos têm provocado enormes transtornos ambientais, não somente no alagamento de terras como também com as linhas de transmissão e de distribuição, com conseqüências devastadoras para as populações atingidas, provocando perdas patrimoniais, culturais, de identidade e a própria desestruturação das comunidades.

Tendo em vista ainda os fins para os quais muitos dos grandes empreendimentos hidroelétricos foram construídos, o paradoxo vai mais além e têm-se no Brasil inúmeros casos nos quais as linhas de transmissão passam por centenas de quilômetros de terras habitadas, nas quais seus moradores não têm eletricidade em suas propriedades. Estes são alguns dos problemas que tornam questionável a eficácia do sistema energético atual, como base de um desenvolvimento sustentável e com justiça social. Outro problema relacionado com o acesso a energia elétrica, são os decorrentes das grandes distâncias existentes no território nacional. Os altos custos de distribuição aliados muitas vezes ao baixo consumo por ligação em comunidades isoladas, o que tornam estas populações pouco atraentes aos investimentos privados. Por outro lado, a baixa representação política destes grupos, dificulta sua capacidade de reivindicação no sentido de que sejam alvos de investimentos sociais. Assim, tanto no Brasil como no mundo atual,

há uma marcada necessidade de “saldar um débito social” e solucionarem muitos dos problemas de um grande contingente de desfavorecidos, que vivem de alguma forma isolados e sem acesso a energia elétrica. A carência energética atinge também a saúde destas populações no que se refere ao acesso à água para consumo em maior quantidade e principalmente de melhor qualidade.

Em vista disso, torna-se necessário buscar soluções energéticas de geração autônoma para as populações isoladas como as solares fotovoltaicas com armazenagem a hidrogênio utilizando Eletrolisador e Célula a Combustível, visando promover o acesso à energia elétrica a toda a população, indistintamente de sua condição econômica ou localização geográfica. E estas soluções serão tanto melhores, quanto mais baratas e menos prejudiciais para o ambiente.

1.1. Tema da Pesquisa

Estudo sobre as possibilidades de implantação de sistema híbrido Fotovoltaico/Célula Combustível em regiões isoladas da Amazônia por meio de simulações computacionais, comparando os resultados com um projeto-piloto implantado no Centro de Pesquisas Canguçu – CPC, administrado pela Fundação Universidade Federal do Tocantins - UFT.

1.2. Problema

No atual modelo elétrico do país, onde se utiliza o SIN (Sistema Interligado Nacional) ele ainda não abrange uma grande parte da Amazônia Legal pelo seu difícil acesso de Linhas de Transmissão e de redes de distribuição. Isso acarreta em uma dificuldade imensa para eletrificação de comunidades isoladas nesta região devido ao seu difícil acesso. Assim, são utilizados atualmente geradores elétricos a diesel o qual possui uma grande dificuldade tanto em relação ao custo dos combustíveis, como para a logística de transporte destes. Outro

problema enfrentado é o gasto com a Conta de Consumo de Combustível (CCC¹), o qual é uma taxa paga por todos os consumidores do sistema interligado para subsidiar os gastos com estes sistemas isolados.

Além dos sistemas isolados alimentados por geradores a diesel, algumas comunidades da Amazônia ainda não possuem a energia elétrica. Uma das soluções possíveis tanto para substituir os geradores diesel como para se levar energia elétrica para estas comunidades desassistidas é o uso de Sistema Híbrido Fotovoltaico/Célula Combustível, pois este não necessita de combustível fóssil e sua operação e manutenção é relativamente simples.

Em um projeto-piloto que está em implantação no Centro de Pesquisas Canguçu (CPC), administrado pela Universidade Federal do Tocantins (UFT), localizada em uma área de proteção ambiental próximo a Ilha do Bananal estão sendo estudados os efeitos deste sistema em comunidades isoladas. No trabalho de conclusão de curso será apresentada uma análise do projeto-piloto a partir da simulação computacional através do programa HOMER², com objetivos de verificar as possibilidades para re-aplicação desse sistema em comunidades isoladas da Amazônia.

1.3. Hipótese

Sistemas híbridos de energia por ser autônomo, poderão dispensar o uso de operador e reduzir na manutenção, acarretando numa redução de custos e, com dimensionamento correto e a utilização de software (HOMER), poderá ser viável economicamente, pois ele se chegará a um projeto mais otimizado.

¹ A Conta de Consumo de Combustíveis – CCC é administrada pela Eletrobrás tendo como finalidade precípua o reembolso de parte dos dispêndios com combustíveis utilizados na geração de energia elétrica nas usinas localizadas em regiões isoladas eletricamente.

² Software utilizado para simulações de sistemas híbridos de geração de energia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

Analisar por meio de simulações, as possibilidades técnicas e econômicas para implantação de um sistema híbrido Fotovoltaico – Célula a combustível em locais isolados da rede elétrica convencional.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar uma análise sobre algumas fontes de energia renovável (solar fotovoltaica e célula a combustível) ;
- Estudar os componentes básicos de um sistema híbrido Fotovoltaico e Célula a Combustível (Gerador Fotovoltaico, Célula a Combustível, Sistema de produção de Hidrogênio e Sistema de armazenamento de Hidrogênio);
- Simular computacionalmente um sistema híbrido PV/CaC, comparando os resultados técnicos e econômicos com um projeto-piloto instalado no CPC/UFT.

1.5. Justificativa

A justificativa deste trabalho está na necessidade de apresentar algumas alternativas às fontes de geração de energia atualmente utilizadas (grupo geradores a diesel) em comunidades isoladas e a eletrificação de locais onde não há nenhum tipo de geração elétrica. Isto se pode levar a redução significativa do consumo de combustíveis, reduzindo assim a CCC e beneficiando os locais desassistidos de energia elétrica.

Para a instituição os benefícios acadêmicos são de um grau de importância elevado, pois se torna uma área de atuação para os estudantes que tem por intenção seguir na área de energia alternativa, tomando este trabalho como modelo de referência de TCC. Também, a área de energia renovável é uma das em maiores crescimento atual no nosso planeta e com isso este trabalho vem também para apresentar aos acadêmicos, o que poderá possivelmente ser uma fonte de energia de um futuro próximo.

1.6. Método da Pesquisa

A metodologia a ser adotada consistirá de uma pesquisa bibliográfica, pesquisa documental sobre sistemas híbridos com utilização de painéis fotovoltaicos e célula a combustível, armazenamento de energia sob a forma de hidrogênio e utilização do HOMER como software de auxílio para análise técnica e financeira.

1.7. Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em quatro capítulos: no primeiro é mostrado uma introdução ao problema apresentado. No Capítulo 2 faz-se uma revisão da literatura e as técnicas computacionais para otimização dos sistemas híbridos de energia, bem como sobre os tópicos teóricos. Já no Capítulo 3 descreve em detalhes o desenvolvimento da metodologia proposta e ainda, relatam-se os resultados obtidos através desta metodologia e discussão dos resultados. O Capítulo 4 as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros. No apêndice do trabalho são apresentados os relatórios das simulações realizadas.

2. FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS

2.1. Energia Solar Fotovoltaica

Os módulos fotovoltaicos são compostos de células fabricadas de silício, material caracterizado como semicondutor. Excetuando-se o hidrogênio, o silício é o elemento mais freqüentemente encontrado na natureza, correspondendo em peso a aproximadamente 25% da crosta terrestre. Na forma natural, é encontrado em rochas e em minérios (quartzo, feldspato e mica). A areia é composta em parte por silício (SCHMIDT, 1983).

Através de métodos adequados, obtém-se o silício com alto grau de pureza de forma cristalino ou amorfo. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto é um mal condutor elétrico. Para alterar isto, acrescentam-se percentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem. Mediante a dopagem do silício com o fósforo, obtém-se um material com elétrons livres, ou materiais com portadores de cargas negativas (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas acrescentando Boro ao em vez de fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, déficit de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

Cada célula solar compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (Figura 1). Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, exatamente na união P-N, gera-se um campo elétrico devido aos elétrons do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P.

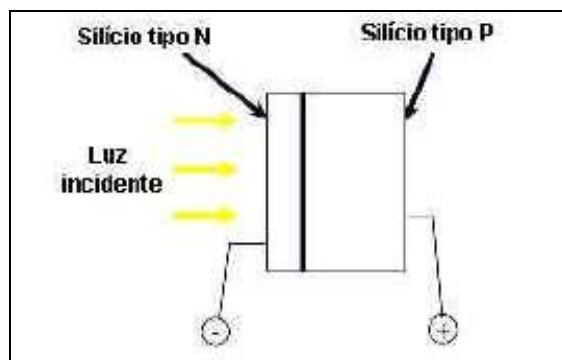


Figura 1 - Célula solar fotovoltaica.

Ao incidir a luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons que a integram chocam-se com os elétrons da estrutura do silício dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na união P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada "P" para a camada "N". Por meio de um condutor externo, liga-se a camada negativa à positiva. Gera-se assim um fluxo de elétrons (corrente elétrica) na ligação. Enquanto a luz continua a incidir na célula, o fluxo de elétrons manter-se-á. A intensidade da corrente gerada variará proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente. Cada módulo fotovoltaico é formado por uma determinada quantidade de células ligadas em série. Como se viu anteriormente, ao unir-se a camada negativa de uma célula com a positiva da seguinte, os elétrons fluem através dos condutores de uma célula para a outra. Este fluxo repete-se até chegar à última célula do módulo, da qual fluem para a carga ou para um acumulador de energia (bateria). Cada elétron que abandona o módulo é substituído por outro que regressa do acumulador ou da bateria. O cabo da interligação entre módulo e carga ou bateria, contém o fluxo, de modo que quando um elétron abandona a última célula do módulo e se encaminha para a carga outro elétron entra na primeira célula a partir da bateria. É por isso que, se considera inesgotável um dispositivo fotovoltaico. Produz energia elétrica em resposta à energia luminosa que entra no mesmo.

Deve-se esclarecer que uma célula fotovoltaica não pode armazenar energia elétrica.

2.1.1. Tecnologias Disponíveis

Em termos de aplicações terrestres, dentre os diversos semicondutores utilizados para a produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem decrescente de maturidade e utilização o silício cristalino c-Si; o silício amorfo hidrogenado a-Si:H ou simplesmente a-Si; o telureto de cádmio CdTe e os compostos relacionados ao dissulfeto de cobre e índio CuInSe₂ ou CIS. Neste último grupo aparecem elementos que são ou altamente tóxicos (Cd, Se, Te), ou muito raros (Te, Se, In, Cd), ou ambos, o que inicialmente se mostrou um obstáculo considerável ao uso mais intensivo destas tecnologias. Com relação à toxicidade, convém mencionar que lâmpadas fluorescentes (contêm mercúrio) e telas de

computador (contêm chumbo), são classificados da mesma maneira, devendo ser descartados de forma apropriada, o que também deverá ocorrer com painéis solares de CdTe e CIS. O silício, por outro lado, é o segundo elemento mais abundante na superfície de nosso planeta (mais de 25 % da crosta terrestre é silício) e é 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima (RÜTHER, 1993).

O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro ~10cm) relativamente espessas (espessura 300 - 400 μ m), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1 μ m) de material ativo semiconductor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que estas tecnologias detêm. Filmes finos para aplicações fotovoltaicas estão sendo desenvolvidos para a geração de potência elétrica por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, das pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção, do elevado grau de automação dos processos de produção (grande capacidade de produção) e seu baixo custo de capital (RÜTHER, 1993). Devido ao fato de que a luz solar contém relativamente pouca energia se comparada a outras fontes energéticas, painéis solares fotovoltaicos têm de ter um baixo custo para poder produzir energia elétrica a preços competitivos.

A eficiência do processo de fotossíntese, no qual toda a vida em nosso planeta está baseada, é da ordem de 0.2% em média. Em termos de eficiência de conversão fotovoltaica, a tecnologia do c-Si é, entre as tecnologias utilizadas em aplicações terrestres para gerar potência elétrica, a que apresenta a maior eficiência, ao redor de 15% para painéis disponíveis no mercado. As tecnologias de filmes finos, sendo inerentemente menos eficientes e também por estarem ainda na infância de seu desenvolvimento, têm no momento um rendimento ao redor de 8% para painéis comerciais, o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos painéis de c-Si. Apesar de que painéis solares de filmes finos têm já hoje um preço menor por Wp (ou seja \$/potência, ou \$/energia) que os de c-Si, a área ocupada para uma determinada potência instalada deve ser levada em consideração na análise econômica quando da opção por uma ou outra tecnologia

fotovoltaica. As principais características de cada uma destas tecnologias será abordada a seguir (RÜTHER, 1993).

2.1.1.1. Silício cristalino (c-Si)

A mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e a que ainda hoje apresenta maior escala de produção a nível comercial, o c-Si (figura 2) se consolidou no mercado fotovoltaico internacional por sua extrema robustez e confiabilidade. O custo de produção destes painéis solares é, no entanto, bastante elevado como mostraremos a seguir, e as possibilidades de reduzi-los já foram praticamente esgotadas, razão pela qual esta tecnologia é desconsiderada por muitos analistas como séria competidora com formas convencionais de geração de potência em larga escala. O c-Si segue sendo, no entanto, o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres em qualquer escala.

No caso de células fotovoltaicas de silício monocristalino (m-Si), o monocristal é “crescido” a partir de um banho de silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora). Sendo que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1400 °C, o consumo de energia neste processo é extremamente intenso e o chamado “energy pay-back time” (tempo necessário para que o painel gere energia equivalente à utilizada em sua fabricação) é superior a três anos. Etapas complementares ao crescimento do monocristal envolvem usinagem do tarugo; corte de lâminas por serras diamantadas; lapidação, ataque químico e polimento destas lâminas (processos estes todos em que ocorrem consideráveis perdas de material); processos de difusão/dopagem, deposição da máscara condutora da eletricidade gerada e finalmente a interconexão de células em série para a obtenção do painel fotovoltaico.

O recorde de eficiência para células de c-Si individuais em laboratório é atualmente de 24%, bastante próximo do máximo rendimento teórico. Os melhores painéis disponíveis no mercado, porém, têm eficiência ao redor de 15% (diferenças entre a eficiência da melhor célula de laboratório e painéis comerciais incluem perdas de interconexão entre células no painel, área ativa do painel e rendimento do

processo produtivo). O silício policristalino (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, tendo também um mais baixo custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do c-Si e o processamento mais simples. O material de partida é o mesmo que para o m-Si, que é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta num cristal com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica. Os processamentos posteriores até se obter um painel fotovoltaico são semelhantes aos utilizados no caso do m-Si.

Em termos de custo final por potência (\$/Wp), no entanto, a diferença entre p-Si e c-Si é pouco significativa.

2.1.1.2. Silício amorfo hidrogenado (a-Si)

No início dos anos 80 o a-Si era visto como a única tecnologia fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas) comercialmente viável. Tendo sido pela primeira vez empregado em células solares em meados da década de 70, imediatamente despontou como tecnologia ideal para aplicação em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo elétrico é baixo. Por apresentar uma resposta espectral mais voltada para o azul, tais células se mostraram extremamente eficientes sob iluminação artificial (principalmente sob lâmpadas fluorescentes), com eficiência nestes casos superior à do c-Si.

Os processos de produção de a-Si ocorrem a temperaturas relativamente baixas ($<300\text{ }^{\circ}\text{C}$), em processos a plasma, o que possibilita que estes filmes finos sejam depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Desta forma, foram desenvolvidos painéis solares hoje disponíveis no mercado que são flexíveis, inquebráveis, mais leves, semitransparentes, com superfícies curvas, que estão ampliando o mercado fotovoltaico por sua maior versatilidade. Por sua aparência estética mais atraente, o a-Si tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil (RÜTHER, 1993).

O recorde de eficiência em células de a-Si individuais em laboratório é inferior a 15% e os melhores painéis de a-Si disponíveis no mercado estão na faixa de 8-9%. Em algumas aplicações arquitetônicas como material de revestimento é que o a-Si leva grande vantagem sobre o c-Si, pois o custo por m^2 , e não o custo por Wp é a grandeza de interesse e neste aspecto já hoje o a-Si tem custo inferior à metade do custo do c-Si. O a-Si apresenta uma característica que a princípio se mostrou uma limitação para esta tecnologia. Painéis de a-Si sofrem um decréscimo intrínseco, mas reversível, em sua performance que se estabiliza após um declínio em eficiência de ~15 a 20%; é o chamado efeito Staebler-Wronski. Em termos práticos, no entanto, esta diminuição de rendimento é assumida pelo fabricante, que já na especificação do painel inclui a margem de degradação. Desta forma, logo que adquirido, um painel solar de a-Si apresenta uma performance superior à especificada para o produto. Após aproximadamente um ano em operação é que a performance estabiliza nos níveis da garantia do produto (RÜTHER, 1993).

O “energy pay-back time” para o a-Si é outro atrativo desta tecnologia e está em torno de um ano (devido principalmente à energia utilizada na fabricação do substrato de vidro, ou aço inox), consideravelmente menor que o do c-Si.

2.1.1.3. Telureto de Cadmio (CdTe)

O mais recente competidor do c-Si e a-Si no mercado fotovoltaico para geração de potência é o CdTe, também na forma de filmes finos. Para aplicações em calculadoras este material já vem sendo usado há quase uma década, mas nas assim chamadas aplicações terrestres, somente agora é que começam a ser comercializados painéis solares de grandes áreas (o maior disponível no momento tem uma área de ~ 0,67 m^2). Estes painéis, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro, também apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si e as empresas envolvidas com esta tecnologia vêm buscando as aplicações arquitetônicas como um nicho de mercado enquanto desenvolvem seu produto, ampliam seus volumes de produção e reduzem custos (RÜTHER, 1993).

Assim como no caso do a-Si, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tem ótimas

chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de potência elétrica. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção (RÜTHER, 1993).

Com o recorde de eficiência de células individuais de pequenas áreas em laboratório ao redor de 16%, painéis solares encontrados no mercado internacional apresentam eficiência entre 7 e 9%.

2.1.1.4. Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

Outro sério competidor no mercado fotovoltaico no futuro próximo são os compostos baseados no disseleneto de cobre e índio (CuInSe_2 , ou simplesmente CIS), principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas.

Células de CIS de pequenas áreas produzidas em laboratório apresentam no momento eficiências em torno dos 18%. Painéis de grande área (atualmente em escala piloto com $\sim 0.38 \text{ m}^2$) devem estar disponíveis no mercado dentro em breve (depois de vários anos de pesquisa e desenvolvimento), com eficiências ao redor de 9 – 10% inicialmente (RÜTHER, 1993).

Painéis solares de CIS apresentam, como o a-Si e o CdTe, uma ótima aparência estética e devem surgir no mercado com grandes superfícies, encontrando aplicações arquitetônicas diversas. Assim como no caso do CdTe, a pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção (RÜTHER, 1993).

2.1.2. Característica de corrente X tensão e desempenho da célula fotovoltaica

A característica corrente X tensão ($I \times V$) de uma célula fotovoltaica tem a forma padrão mostrada na figura 2.

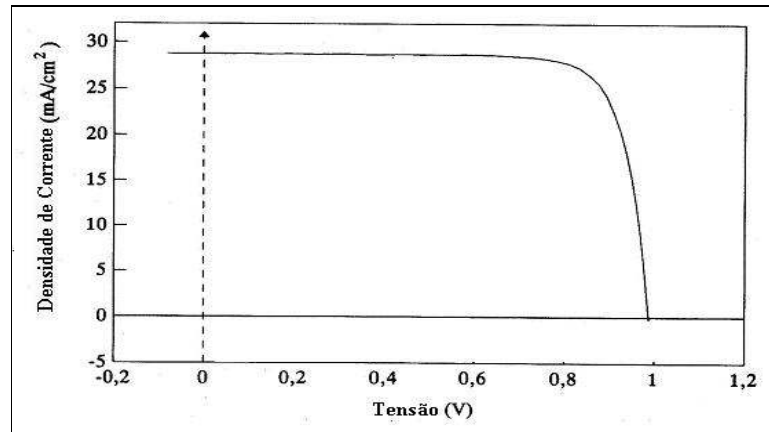


Figura 2 – Característica I-V de uma célula fotovoltaica.

Como se pode observar na figura 2, o maior valor da corrente de geração se obtém para condições de curto-circuito, ou $V = 0$.

Se o dispositivo se mantém em circuito aberto ($I = 0$), este se auto-polarizará com uma certa tensão. Trata-se da tensão de circuito aberto V_{OC} e seu valor é tal que a fotocorrente fica apenas como a corrente de polarização (LORENZO, 1994).

Como já dito anteriormente, a região da curva característica compreendida entre I_{SC} e V_{OC} corresponde ao funcionamento da célula como gerador. Se a energia é fornecida a uma carga, como é mostrado na figura 3, a potência fornecida é dada pelo produto $P = VI$, e existirá um ponto de funcionamento (I_M , V_M) em que a potência será máxima, o qual é denominado ponto de potência máxima, como mostra a figura 3 (LORENZO, 1994).

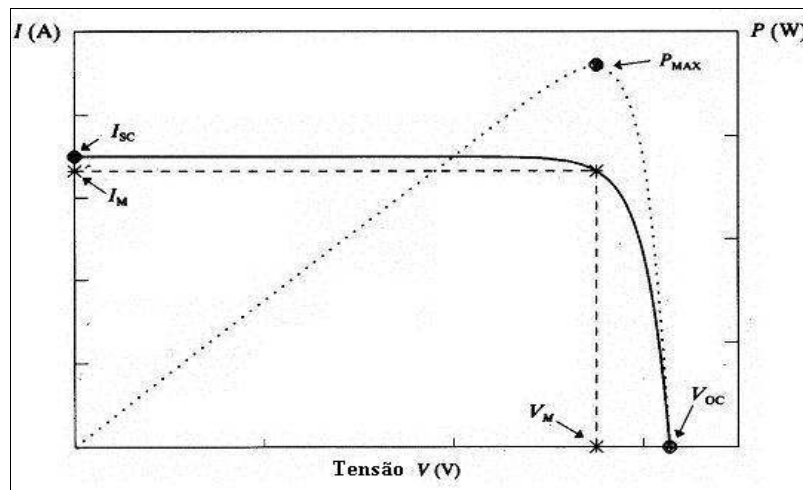


Figura 3 – Gráfico da Potência X tensão.

O produto $I_M * V_M$ determina a potência máxima entregue à carga, mostrado na figura 3 pela área do retângulo pontilhado.

2.1.3. Parâmetros que influenciam o comportamento básico das células fotovoltaicas

A temperatura e a intensidade de radiação solar são os fatores mais importantes quando se considera a utilização das células solares para a geração de eletricidade. Assim, este item tem por objetivo apresentar a influência destes fatores para o desempenho de uma célula fotovoltaica (MESSENGER, 1999).

2.1.3.1. Influência da Temperatura

O desempenho de uma célula fotovoltaica com a variação da temperatura é apresentado na figura 4, onde se verifica um pequeno aumento na corrente e uma considerável diminuição na tensão de circuito aberto quando ocorre a elevação da temperatura.

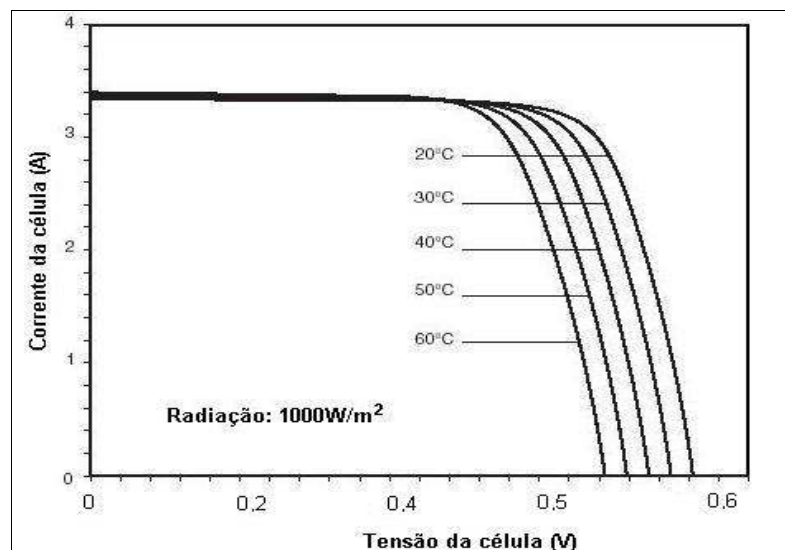


Figura 4 - Dependência da característica corrente x tensão com a temperatura.

Observa-se também através da figura 5 que, com o aumento da temperatura, a potência máxima da célula sofre um decréscimo considerável.

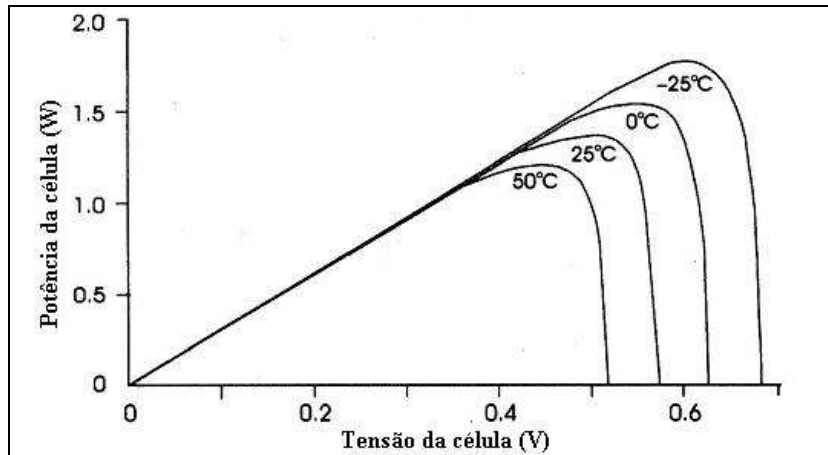


Figura 5 - Dependência da característica potência x tensão com a temperatura.

É importante salientar que quando a célula é iluminada, geralmente será convertida menos que 20% da radiação solar em energia elétrica. A outra parte é convertida em calor, resultando no aquecimento da célula. Como resultado, é esperado a célula operar em uma temperatura acima da ambiente. Assim, quando as células fotovoltaicas são montadas no módulo, elas devem ser caracterizadas como tendo uma Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT). O NOCT é a temperatura que a célula irá alcançar quando são operadas em circuito aberto e em temperatura ambiente de 20°C, densidade atmosférica (AM) de 1,5, condições de radiação com 0,8 kW/m² e com uma velocidade do vento menor que 1 m/s. Para variações na temperatura ambiente e na radiação, a temperatura da célula (°C) pode ser estimada com boa precisão com a aproximação linear, como mostra a equação 1 (MESSENGER, 1999).

$$T_c = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{0,8} \right) G \quad (1)$$

onde:

- T_c = Temperatura da célula;
- T_a = Temperatura ambiente;
- G = Índice de radiação solar.

Da equação (1) verifica-se que, por exemplo, se um módulo de 36 células tem um NOCT de 40°C com V_{OC} = 21 V, quando G = 0,8 Kw/m², então a

temperatura da célula irá aumentar para 55°C quando a temperatura ambiente aumentar para 30°C e G aumentar para 1 kW/m^2 . Este aumento de 15°C na temperatura da célula resultará em uma diminuição para $19,76\text{ V}$ na tensão de circuito aberto.

2.1.3.2. Influência da Intensidade da Radiação Solar

Como mostra a figura 6, com o aumento do índice de iluminação a corrente aumenta linearmente e a tensão de circuito aberto logarithmicamente.

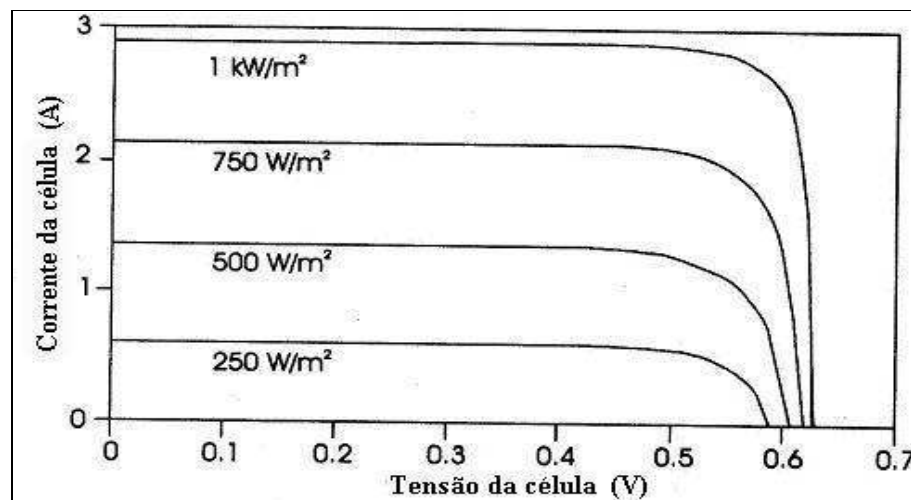


Figura 6 – Características I-V de células fotovoltaicas ideais com diferentes níveis de iluminação.

Observa-se também, através da figura 7, que a potência fornecida pelo módulo fotovoltaico aumenta linearmente com o aumento do índice de iluminação.

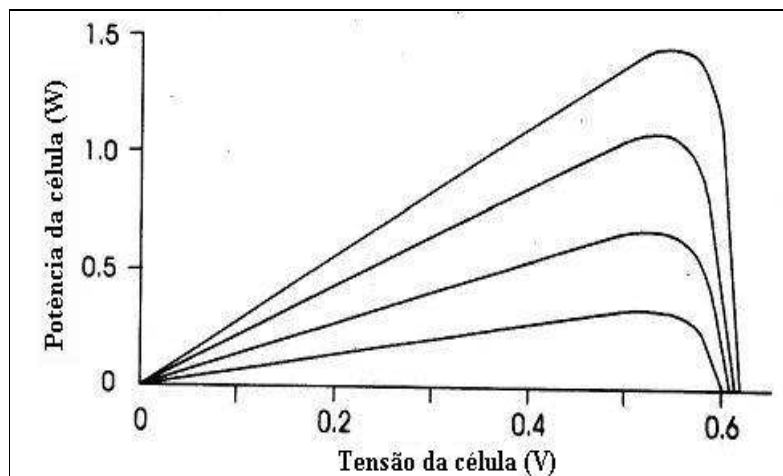


Figura 7 – Potência x tensão para uma célula fotovoltaica para quatro níveis de iluminação.

2.1.4. O módulo fotovoltaico

Para obter uma tensão de saída adequada, as células fotovoltaicas são conectadas em série para formar o módulo fotovoltaico. Como sistemas fotovoltaicos são comumente operados com valores próximos de 12 V, os módulos são normalmente projetados para uma operação ótima neste valor, pois estes são apropriados para a carga de baterias em sistemas autônomos, que possuem este valor de tensão. A meta do projeto é conectar um número suficiente de células em série para manter V_M com uma confortável variação de tensão do sistema para as condições médias de insolação. Se isso for feito, a potência de saída do módulo pode ser mantida bem próxima do máximo. Isto significa que abaixo das condições de insolação total, V_M deve estar aproximadamente entre 16 e 18 V. Como V_M é normalmente cerca de 80% de V_{OC} , sugere-se projetar o módulo com um V_{OC} de aproximadamente 20 V. Como as células de silício monocristalino possuem tensão de circuito aberto variando de 0,5 a 0,6 V, os módulos devem consistir de 33 a 36 células conectadas em série. A figura 8 mostra como as células são configuradas no módulo, e como os módulos são conectados para formar um sistema. Os módulos podem ter pequena potência de saída, como poucos watts, dependendo da necessidade de aplicação, até mais de 300 W. Sistemas fotovoltaicos (PV) típicos variam de centenas de watts de potência a até kilowatts. Porém sistemas com megawatts de potência já existem.

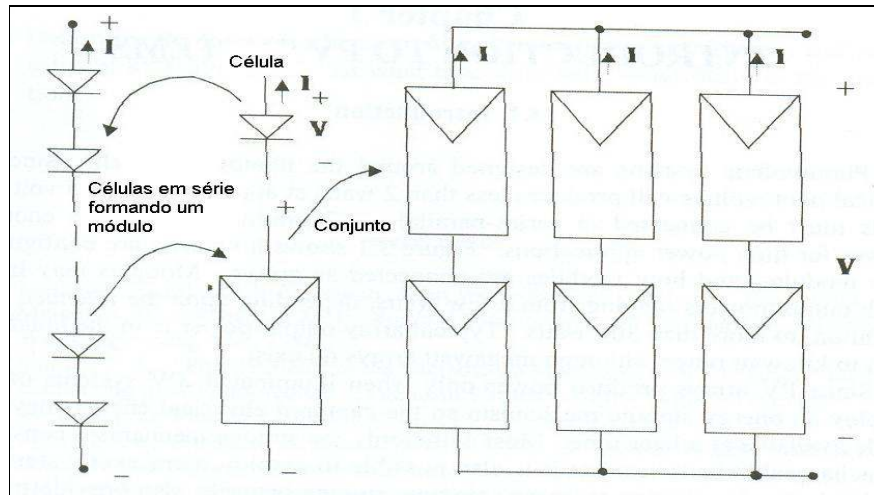


Figura 8 – Célula, módulo e conjunto fotovoltaico.

2.1.5. Principais Aplicações dos Sistemas Fotovoltaicos

O desenvolvimento deste tipo de sistemas iniciou-se com o objetivo de alimentar unidades autônomas para aplicações espaciais, e, em particular, dos satélites artificiais terrestres. Atualmente, os sistemas fotovoltaicos são utilizados essencialmente em locais isolados, onde outros tipos de produção clássicos são muito caros e onde são exigidos sistemas silenciosos e não poluidores (COCIAN, 1999).

Segundo COCIAN de um modo geral, os sistemas fotovoltaicos são utilizados nas seguintes situações:

- ✓ Eletrificação rural com sistemas individuais ou em mini-rede;
- ✓ Bombeamento de água (irrigação e abastecimento);
- ✓ Sistemas de telecomunicações: retransmissores de TV, telemóveis e rádio;
- ✓ Sinalização ferroviária (passagens de nível);
- ✓ Sinalização marítima (bóias, faróis);
- ✓ Sinalização nas estradas (Sinais de aviso de perigo: existência de gelo, escola);
- ✓ Telefones para socorro nas estradas;
- ✓ Parquímetros;
- ✓ Dessalinização (osmose inversa);
- ✓ Proteção catódica, vedações elétricas, candeeiros PV, lanternas;

- ✓ Aplicações de micro-potência (relógios, calculadoras);
- ✓ Sistemas conectados à rede elétrica convencional: Centrais PV (>100kWp) ou “Sistemas em Telhados Residenciais” PV (1- 10kWp).

2.2. Baterias

Hoje em dia as baterias possuem muitas aplicações, de uma maneira em geral, elas podem ser recarregáveis ou não, alguns exemplos de aplicações de baterias são: fonte portátil de energia elétrica, alimentação de sistemas automotivos, supridora de sistemas com curtos períodos de demanda, armazenadora de energia elétrica gerada por fontes renováveis e intermitentes, como solar e a eólica dentre outras (FURLAN, 2008).

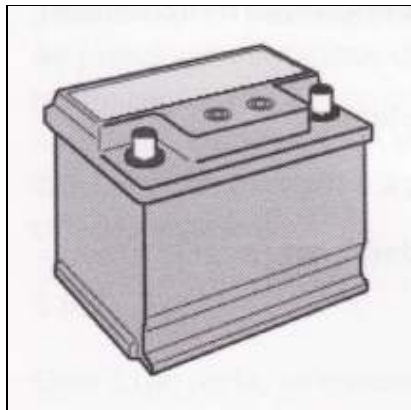


Figura 9 – Ilustração de uma bateria.
Fonte: (BARBOSA, 2007)

As baterias que hoje são muito utilizadas para sistemas isolados de energia têm como função básica armazenar energia e não produzir energia, este processo podemos descrever da seguinte maneira: se uma bateria esta conectada a um circuito elétrico, há fluxo de corrente devido a uma transformação eletroquímica, ou seja, há conversão de energia química em energia elétrica (GTES, 1999).

Baterias podem ser divididas em dois grupos que são: *células primárias* são as baterias que podem ser utilizadas apenas uma vez (não-recarregáveis) quando se descarregam totalmente sua vida útil termina e elas são inutilizadas e *células secundárias* que são baterias recarregáveis, ou seja, podem

ser recarregadas com auxílio de uma fonte externa de tensão ou corrente, podem ser reutilizadas várias vezes (GTES, 1999).

Para sistemas automotivos as baterias necessitam de uma elevada corrente por um curto intervalo de tempo para a ignição do veículo, e elas possuem como característica uma descarga de 1% a 5% de sua capacidade total, podendo danificar se for superior, já para sistemas isolados de energia as baterias são projetadas para operar em ciclos diários rasos, com taxas reduzidas de descarga e para suportar descargas profundas esporadicamente, e elas devem agüentar descargas até 80% de sua capacidade máxima sem se danificar (FURLAN, 2008).

Existem diversos tipos de bateria que variam de acordo de sua composição química e também de acordo com sua construção, as baterias mais utilizadas em sistemas de armazenamento de energia em sistemas isolados são de chumbo-ácido e alcalina (ALDABÓ, 2002).

Das duas baterias citadas acima podemos destacar segundo (BARBOSA, 2007):

Bateria de Chumbo-Ácido: são as mais utilizadas devido ao seu baixo custo e ampla disponibilidade comercial. Porém, têm o inconveniente de, ao serem totalmente descarregadas, sofrerem uma redução significativa no seu tempo de vida.

Bateria de níquel-cádmio (alcalina): são mais dispendiosas, mas tem uma longevidade superior às de chumbo-ácido e podem ser descarregadas completamente sem serem afetadas.

A capacidade de uma bateria é medida em Ah (Ampère-hora), ou seja, fornece 1A por uma hora. Um sistema de baterias 12V com capacidade de 800Ah pode drenar 100A de corrente durante 8 horas. Isso equivale a 1200W de potência por 2 horas (ALDABÓ, 2002).

Existem as baterias abertas e as baterias fechadas a diferença básica entre elas é que uma precisa de verificação periódica do nível de eletrólito e por esta razão devem trabalhar na posição vertical (bateria aberta) e a outra contém o eletrólito confinado no separador ou sob forma de Gel, elas não necessitam de manutenção, pois não requerem reposição de água (bateria selada) (GTES, 1999).

2.2.1. Efeitos que alteram o rendimento das Baterias

Existem diversos elementos que alteram a vida útil e sua operação normal de funcionamento iremos ver neste capítulo alguns destes.

Com o aumento da temperatura a capacidade de armazenamento da bateria aumenta como podemos verificar na figura 10.

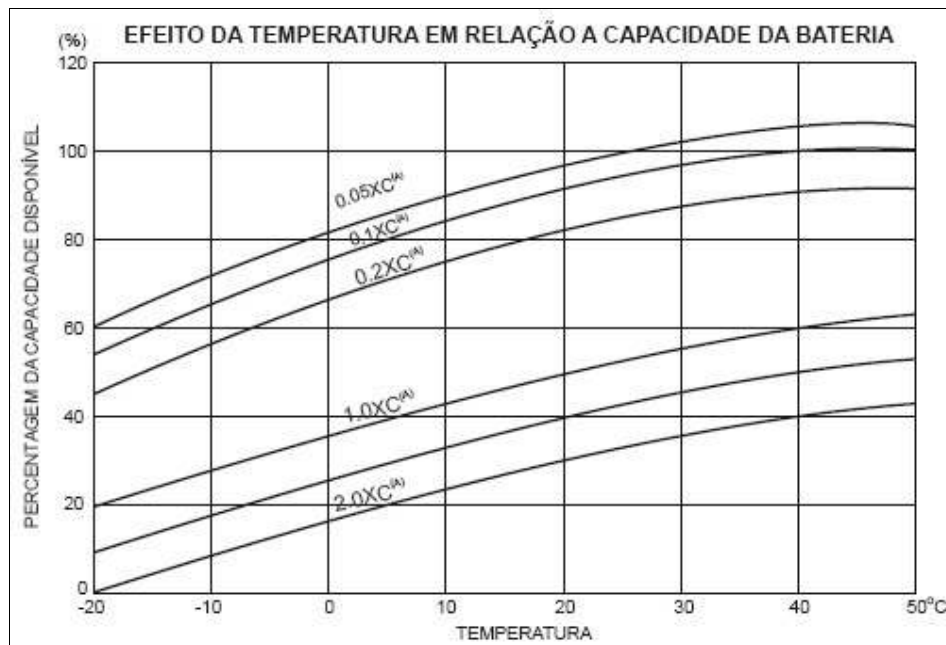


Figura 10 – Efeito da temperatura em relação à capacidade da bateria.
Fonte (FURLAN, 2008)

Mas este aumento de temperatura que ocasiona o aumento da capacidade acarreta em outro problema, pois com isso diminui e muito o número de ciclos da bateria diminuindo a sua vida útil como mostra a figura 11.

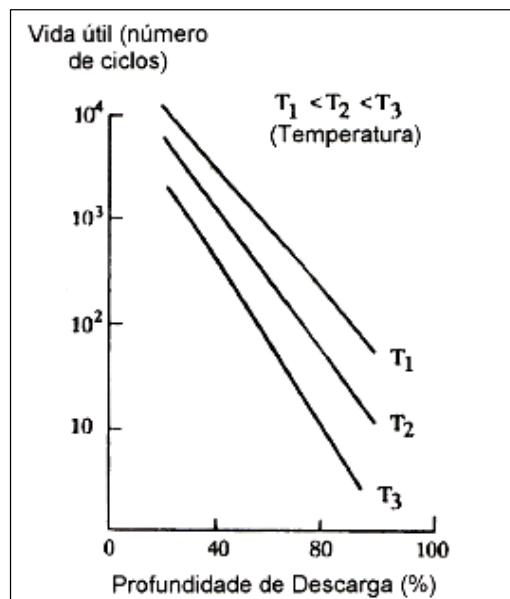


Figura 11 – Efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria.
Fonte: (GTES, 1999)

Outro fator que interfere na vida útil de uma bateria é o número de ciclos de descarga profunda que a bateria pode fornecer. A sequência de descarga e posterior carga de uma bateria são denominadas ciclo. O número de ciclos alcançado por uma bateria até que sua capacidade seja reduzida a 80% é chamado ciclo de vida da bateria. Esse número depende da profundidade da descarga, que pode ocorrer antes que ela tenha atingido sua carga completa, da corrente de descarga fornecida (FURLAN, 2008).

Vida útil de uma bateria está ligada diretamente ao número de ciclos e tão quanto ela é descarregada nestes ciclos como podemos ver na figura 12, que compara duas famílias distintas de bateria da marca Moura.

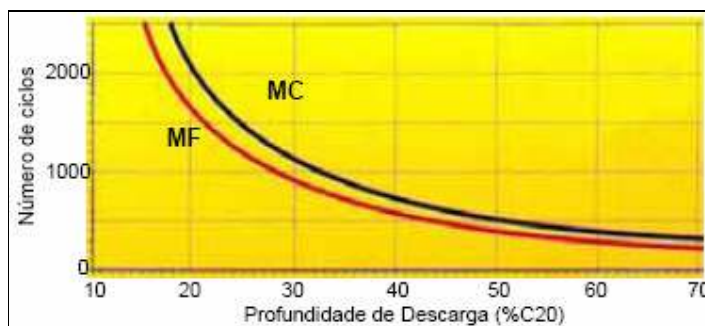


Figura 12 – Número de ciclos em função da profundidade de descarga.
Fonte: (FURLAN, 2008)

2.3. Eletrolisador

O hidrogênio é o mais simples dos elementos químicos e o átomo mais abundante do universo. Porém não é possível sua obtenção direta do ar. Desta forma é necessário que ele seja extraído de outras substâncias e não pode ser considerado uma fonte de energia primária e sim um vetor energético (FURLAN, 2008).

A eletrólise é o processo inverso da pilha, ou seja, utiliza energia elétrica para forçar a ocorrência de uma reação química não-espontânea pela neutralização da carga de íons e a obtenção de substâncias simples (FONSECA, 2001). Segundo FONSECA, a eletrólise é um processo não-espontâneo de descarga de íons, no qual, à custa de energia elétrica, se faz o cátion receber elétrons e o ânion doar elétrons, de modo que ambos fiquem com carga elétrica zero e com energia química acumulada.

Para que o processo de eletrólise seja efetuado, é necessário que haja íons livres no sistema, o que só pode ser conseguido de duas maneiras: pela fusão (passagem para a fase líquida) de uma substância iônica e pela dissociação ou pela ionização de certas substâncias em meio aquoso (FONSECA, 2001).

A eletrólise da água começou com a revolução industrial, quando em 1800, Nicholson e Carlisle descobriram a possibilidade de ruptura eletrolítica da molécula de água. Em 1902, já existiam 400 eletrolisadores industriais em operação (SPADACIO, 2006).

Na década de 60, apareceram os eletrolisadores com membranas de condução protônica (Nafion da DuPont) e começaram a desenvolver óxidos cerâmicos condutores de O^{-2} (do tipo YSZ: "Ytria Stabilized Zirconia".) para eletrólise de vapor de água (SPADACIO, 2006).

Eletrólise da água é o processo pelo qual se pode obter o hidrogênio a partir da água e eletricidade (FURLAN, 2008). A eletrólise da água é uma maneira direta de obter hidrogênio e oxigênio no estado gasoso com elevado grau de pureza. Desses elementos àquele que apresenta maior aplicação prática é o hidrogênio, pois pode ser utilizado como, por exemplo, para hidrogenação de moléculas orgânicas, fabricação de semicondutores, produção e refino de metais de alta pureza e produção de energia através de Células a Combustíveis (CaC) (SPADACIO, 2006).

Denomina-se eletrólise da água, ou processo eletrolítico, ao processo eletroquímico de dissociação da água, onde os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares (FURLAN, 2008).

Com a aplicação de uma diferença de potencial entre os eletrodos (catodo e anodo) e com a existência, entre eles, de um meio condutor iônico líquido (solução aquosa ácida ou básica) ou sólido (membranas poliméricas ou cerâmicas permiônicas), esta decomposição é realizada através do fornecimento de corrente contínua por uma fonte de energia elétrica (FURLAN, 2008). Quando se aplica a força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo há passagem de corrente entre os eletrodos, desencadeando as reações eletrolíticas para evolução de hidrogênio no catodo (redução) e oxigênio no anodo (oxidação) (FURLAN, 2008).

Segundo FURLAN, para o caso de um meio condutor básico, as reações do processo são as seguintes:

- No catodo:



- No anodo:



- Global:



Para melhor visualizar a fórmula global podemos descrever da seguinte maneira:



A Tabela 1 apresenta a variação da eficiência do processo de eletrólise e consumo de energia do eletrolisador com a voltagem de operação nas condições padrões.

Tabela 1 – Variação da eficiência com a voltagem de operação
E o consumo de energia por unidade de H₂ gerado.

Eficiência	Voltagem de Operação (V)	Consumo de energia (kWh/m ³)
100%	1,481	3,544
96%	1,543	3,692
92%	1,610	3,852
88%	1,683	4,027
84%	1,763	4,219
80%	1,839	4,400
78%	1,899	4,544
76%	1,949	4,663
74%	2,001	4,789
72%	2,057	4,922
70%	2,116	5,063

Fonte: (FURLAN, 2008)

Eletrolisadores são geralmente classificados em convencionais e avançados, de forma que os convencionais são divididos em dois tipos: unipolar (tipo tanque) e bipolar (filtro prensa). Ambos os tipos de eletrolisadores são compostos por células individuais justapostas, ligadas em paralelo no tipo unipolar e em série no tipo bipolar (FURLAN, 2008). Conforme ilustrado na Figura 13.

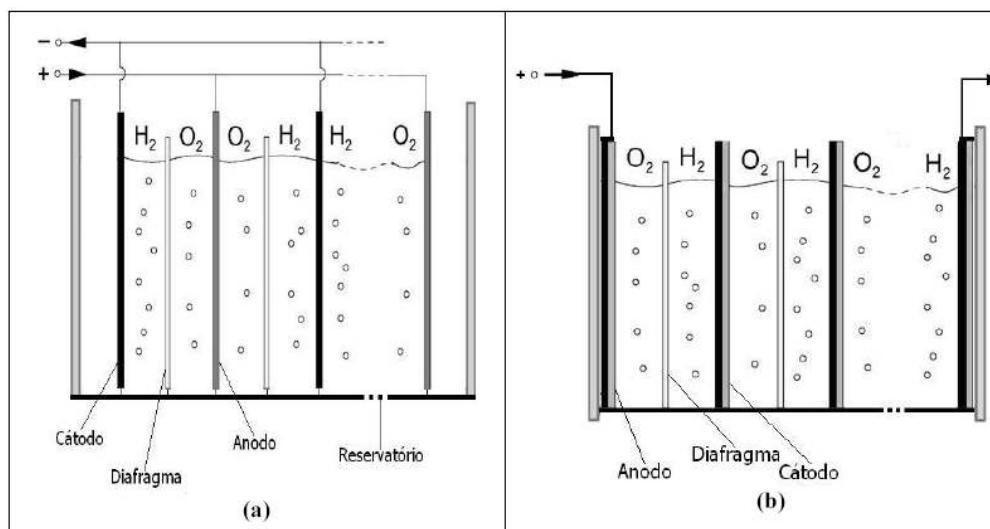


Figura 13 – Diagrama esquemático dos eletrolisadores unipolares (a) e bipolares (b). Fonte: (FURLAN, 2008)

No caso dos eletrolisadores unipolares, um tanque grande de aço ao carvão aloja um eletrólito alcalino. Os eletrodos são lâminas planas de mesmo material e com polaridades alternadas; os ânodos são cobertos por um depósito

galvânico de níquel e envoltos por uma bolsa para separar o oxigênio gerado do hidrogênio catódico (SPADACIO, 2006).

Os eletrolisadores do tipo filtro-prensa são feitos de capas alternadas de eletrodo e diafragma fracamente selado e com circulação forçada de eletrólito. Os eletrodos são geralmente de aço a carbono recoberto por níquel e operam de modo bipolar, isto é, um mesmo lado serve como cátodo em uma célula e o outro como ânodo na próxima (SPADACIO, 2006).

Segundo SPADACIO, o princípio da eletrólise alcalina da água ocorre de acordo com a figura 14:

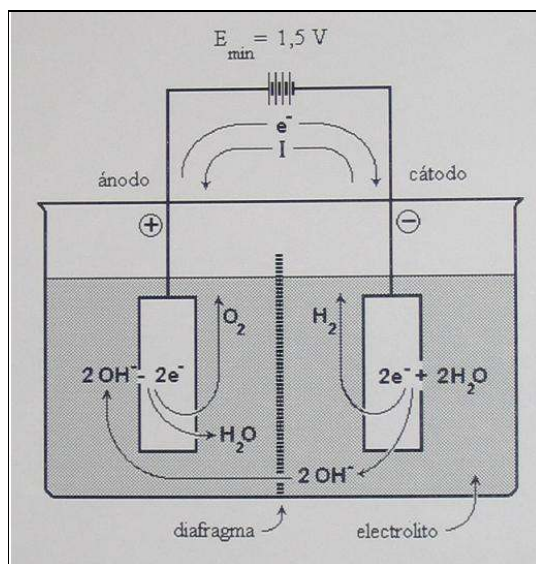


Figura 14 - Eletrólise alcalina da água.
Fonte: (SPADACIO, 2006)

Conforme a figura 14 pode-se dizer que duas moléculas de água são reduzidas no cátodo formando uma molécula de hidrogênio e dois íons hidroxila. O hidrogênio gasoso escapa da superfície do cátodo enquanto que os íons hidroxilas migram através do diafragma poroso, devido ao campo elétrico existente, e se descarregam no ânodo, gerando uma molécula de água e O_2 gasoso (SPADACIO, 2006).

Existem também outros métodos para a produção de hidrogênio como podemos ver na tabela 2.

Tabela 2 – Principais processos de produção de hidrogênio

Processo	Insumo básico	Fonte de energia
Eletrólise	Água	Elettricidade
Reforma a vapor de hidrocarbonetos	Hidrocarbonetos leves (metano, nafta) + Água	Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos
Oxidação parcial de óleos pesados	Hidrocarbonetos Pesados + Água	Calor gerado pela queima de
Oxidação parcial do Carvão	Carvão + Água	Calor gerado pela queima do carvão
Termoquímica	Água	Calor gerado por usinas nucleares/energia solar
Eletrólise fotovoltaica	Água	Radiação solar

Fonte: (FURLAN, 2008)

2.4. Armazenagem de Hidrogênio

Depois de ser produzido, o hidrogênio em estado gasoso é armazenado em gasômetros a selos d'água, quando a baixas pressões, ou em vasos de pressão, a pressões intermediárias de 5 a 50 bar (FURLAN, 2008).

A tecnologia de tanques para armazenamento de hidrogênio evoluiu das ligas convencionais de cromo-molibdênio para tanques multicamadas, que utilizam em sua construção metais leves (como o alumínio) e polímeros de alta densidade ultra-resistentes. O armazenamento de hidrogênio gasoso tem sido realizado sobre altíssimas pressões para aplicações veiculares, aproximadamente 700 bar (70 MPa), podendo atingir 1.000 bar em tanques para aplicações estacionárias (FURLAN, 2008).

Os compressores para este tipo de armazenamento de hidrogênio devem receber especial atenção devido à reatividade e fugacidade do gás, que em tais condições termodinâmicas podem provocar sérias fragilizações dos componentes internos do compressor. (FURLAN, 2008). Este equipamento não deve

também ocasionar contaminação do gás purificado, sendo aconselhável à aplicação de compressores do tipo diafragma (FURLAN, 2008).

Outra possibilidade é o armazenamento de hidrogênio em hidretos metálicos (estruturais ou intersticiais) ou ainda na forma de vetores químicos. Estas tecnologias estão em contínuo desenvolvimento, mas os produtos disponíveis ainda possuem elevado preço, baixo tempo de vida ou desempenho insatisfatório (FURLAN, 2008).

Na figura 15 temos o gasômetro que é utilizado no canguçu.



Figura 15 – Gasômetro (Canguçu)

2.5. Célula a Combustível (CaC)

Sua descoberta foi realizada em 1839, por *Sir* William Grove, a tecnologia evolui sensivelmente e tem sido utilizada, desde 1960, em vôos espaciais tripulados dos programas Apollo e Gemini como fonte de energia e água potável para as necessidades a bordo (REIS, 2003).

Atualmente, órgãos governamentais e empresas privadas do mundo inteiro se dedicam ao estudo e à pesquisa para utilização de células de combustível em motores para veículos e em unidades estacionárias para produção de energia (REIS, 2003).

A célula a combustível (CaC) é uma tecnologia nova e que vem se mostrando como um futuro vetor energético para diminuir a dependência que hoje o planeta terra tem sobre o petróleo. Elas são dispositivos eletroquímicos que utilizam combustível de uma fonte externa, nos quais produzem eletricidade sem emitir gases poluentes quando este combustível for o hidrogênio (CAVALCANTE, 2005).

Células a combustível são dispositivos eletroquímicos que produzem energia elétrica a partir do combustível hidrogênio (REIS, 2003). Segundo FURLAN, são dispositivos semelhantes às baterias, com a vantagem de dispensarem recargas. Fornecem energia elétrica enquanto for fornecido combustível. Estes dispositivos são classificados em termos do tipo de eletrólito empregado e da temperatura de operação. (FURLAN, 2008).

Na célula a combustível, mostrada esquematicamente na figura 16, o combustível (hidrogênio puro ou um gás rico em hidrogênio), suprido constantemente em um dos eletrodos – o anodo -, reage eletroquimicamente com um oxidante (em geral, o oxigênio) suprido no outro eletrodo – o catodo (REIS, 2003).

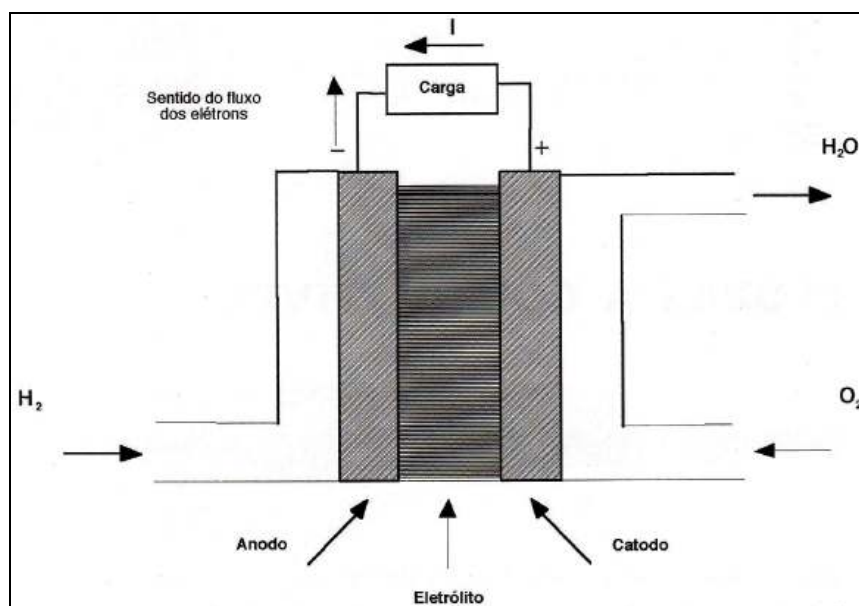


Figura 16 – Esquema básico de uma célula a combustível
Fonte: (REIS, 2003)

Entre os eletrodos, encontra-se o eletrólito, composto de material que permite o fluxo de íons entre os eletrodos, mas impede a passagem dos elétrons, que são obrigados a percorrer um circuito externo, produzindo assim uma corrente elétrica (REIS, 2003). Além do calor liberado pela reação, ocorre também a formação de água, resultante da combinação entre o hidrogênio e o oxigênio envolvidos no processo (REIS, 2003).

Por convenção, o sentido da corrente elétrica é aquele contrário ao do fluxo dos elétrons e, dessa forma, a corrente elétrica numa célula de combustível sai pelo catodo (pólo positivo) e entra pelo anodo (pólo negativo), caracterizando assim a célula de combustível como um elemento elétrico ativo, gerador de energia elétrica (REIS, 2003).

A PEMFC (*Photon Exchange Membrane Fuel Cell* - Célula a combustível com membrana condutora de prótons) é considerada uma das tecnologias mais promissoras. Ela utiliza platina como catalisador e uma membrana sólida, apresentando a desvantagem de operar somente com H₂ puro, aumentando em muito os cuidados com a origem do combustível, uma vez que até mesmo pequenas quantidades de CO podem prejudicar permanentemente os catalisadores dos eletrodos (FURLAN, 2008). Este tipo de tecnologia é a que é utilizada no centro de pesquisa canguçu.

As reações eletroquímicas que ocorrem segundo FURLAN são:

Reação Anódica:



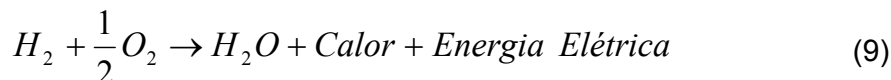
Reação Catódica:



Reação global:



Segundo CAVALCANTE pode-se definir a reação global da seguinte maneira:



Pode-se reparar que a CaC é o processo inverso do eletrolisador, tornando-os dispositivos duais entre si (REIS, 2003).

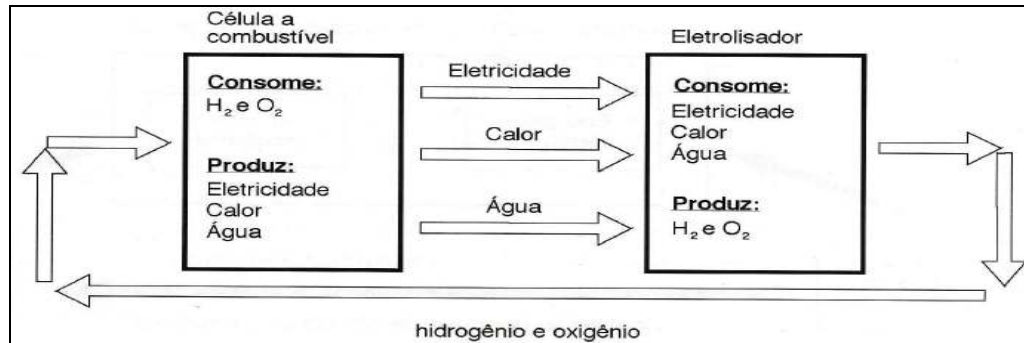


Figura 17 – Dualidade entre uma célula de combustível e um eletrolisador.
Fonte: (REIS, 2003)

Pode-se observar na figura 17 que a célula a combustível e o eletrolisador não emitem gases de efeito estufa o tornando então uma fonte de energia limpa. Se for comparada com outros tipos de máquinas convencionais (exemplo gerador diesel) ela produz energia elétrica com maior eficiência. (REIS, 2003)

Como diz Reis: [...] Contrariamente ao que ocorre nas máquinas e motores convencionais, as células de combustível convertem a energia química do combustível diretamente em energia elétrica sem que se processe a combustão. Em consequência, as células de combustíveis são capazes de produzir energia elétrica com maior eficiência, mais silenciosamente e sem poluição. (REIS, 2003)

Esses dois processos descritos pelo Reis podem-se visualizar sua conversão na figura 18.

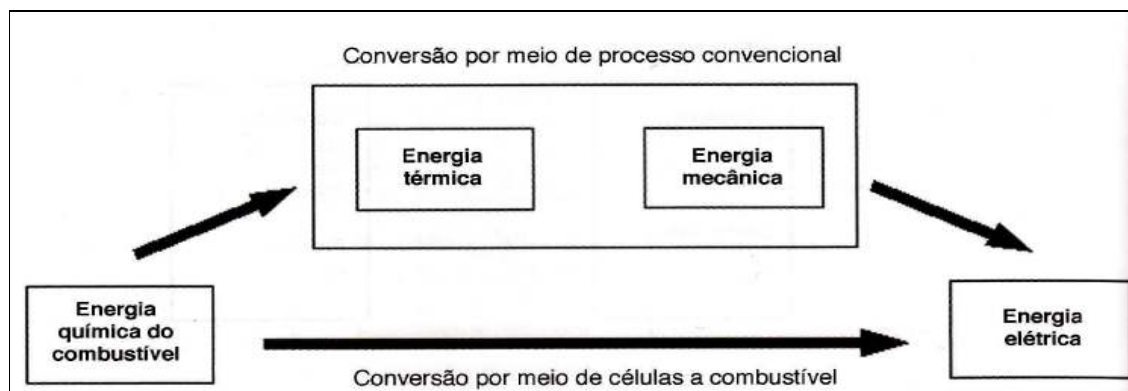


Figura 18 – Conversão direta de energia com células a combustível comparado com tecnologia convencional indireta. Fonte: (REIS, 2003)

Há vários tipos de tecnologias de CaC que são normalmente classificadas de acordo com as temperaturas de funcionamento das células e o tipo de eletrólito utilizado (FURLAN, 2008). Variando de 60°C até 1000°C (REIS, 2003).

Na tabela 3, pode-se visualizar tecnologias de células combustíveis a algumas de suas características de operação.

Tabela 3 – Classificação e caracterização das células combustíveis atuais

Tipo	T (°C)	Eficiência Energética	Eletrólito	Combustível	Agente de Oxidação
AFC	60 a 80	60%	45% g/g KOH a 28,5 bar ou 80% a 85% KOH a pressões entre 2 e 3 bar.	H ₂ puro	O ₂ puro
PEMFC	60 a 100	60%	Membrana polimérica	H ₂ puro	O ₂ puro
PAFC	160 a 220	45%	H ₃ PO ₄ 95% a 97% g/g	H ₂ puro. Eletrodos cobertos: gás reformado ou gás de carvão	O ₂ puro O ₂ puro
MCFC	600 a 700	60%	Mistura de carbonatos alcalinos fundidos (Na, K e Li)	H ₂ (impuro), CO, hidrocarbonetos	O ₂ (impuro) ar
SOFC	800 a 1200	60%	Liga estabilizada de ítrio-zircônio (ZrO ₂ e 8-10% de Y ₂ O ₃ ; YSZ)	H ₂ (impuro), CO, hidrocarbonetos	ar

Fonte: (FURLAN, 2008)

Na figura 19, podemos reparar que se utilizado para gerar eletricidade o conjunto célula a combustível, eletrolisador e armazenamento de hidrogênio, não lança gases de efeito estufa para o meio ambiente e também o ciclo dela é renovável, o tornando assim uma fonte de energia limpa e renovável.

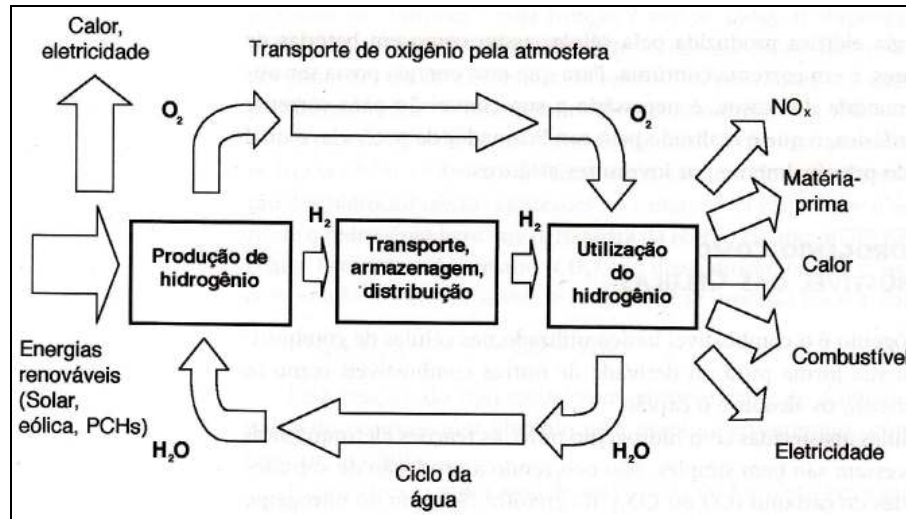


Figura 19 – Ciclo do hidrogênio e do oxigênio.
Fonte: (REIS, 2003)

2.6. Gerador a Diesel

Os grupos geradores a diesel têm sua aplicação principalmente nos sistemas isolados, a maioria no norte do país (REIS, 2003). Este tipo de geração tem apresentado grandes problemas associados à manutenção dos equipamentos e a disponibilidade de combustíveis sem contar na emissão de gases de efeito estufa (REIS, 2003).

O consumo de combustível pode ser definido pela seguinte equação:

$$F = 0,246 \cdot P_{ci} + 0,08415 \cdot P_{gmg} \quad (10)$$

Onde:

F=consumo de combustível (L/h);

P_{gmg} =potência nominal do grupo gerador (kW);

P_{ci} =potência efetivamente pela carga em qualquer instante (kW).

Na figura 20, representa a curva de consumo de um grupo gerador a diesel de 32 kW, para uma carga variando de 0 a 32 kW.

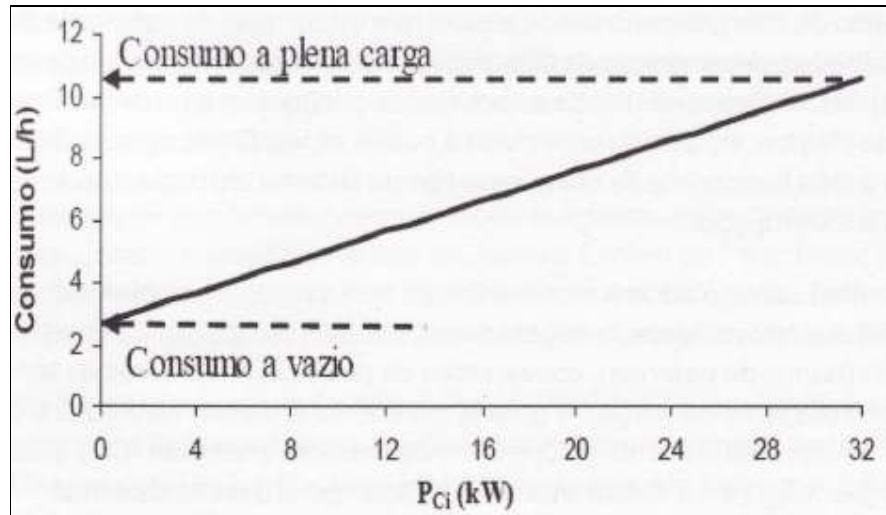


Figura 20 - Curva de consumo de um grupo gerador a diesel (L/h).
Fonte: (BARBOSA, 2007)

Os geradores dieísel são separados por dois blocos que são: *Motor diesel* responsável pela combustão interna do combustível para gerar energia mecânica e o *Gerador elétrico* responsável de pegar esta energia mecânica e transforma-la em energia elétrica.

2.6.1. Motor Diesel

Os motores dieísel são conhecidos como o de ignição por compressão, pois eles não necessitam de centelhamento como é o caso dos motores de ciclo Otto (Gasolina, entre outros), neste caso o ar é admitido na câmara de combustão e comprimido até uma pressão e temperatura suficientes para que ocorra a combustão espontânea quando o combustível for injetado (BARBOSA, 2007).

Alguns exemplos de aplicação de motores dieísel são: grandes motores dieísel lentos, estacionários e navais com potências que ultrapassam 60MW e motores dieísel rápidos, empregados no transporte terrestre, embarcações de médio porte e para geração de energia elétrica com potências até 5MW (BARBOSA, 2007).

Podemos reparar na figura 21 o aspecto construtivo do motor diesel e suas características físicas.

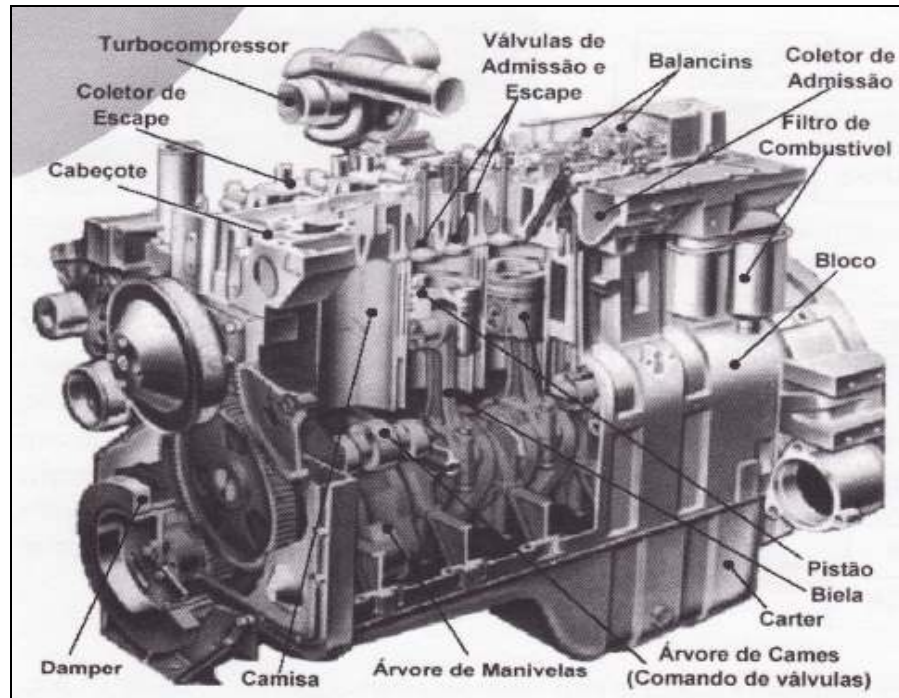


Figura 21 – Motor Diesel e seus componentes.
Fonte: (BARBOSA, 2007)

Os motores podem ser classificados em dois tipos as de ciclo Otto ou Diesel e dentro desses dois a também a classificação como o de quatro tempos ou dois tempos.

2.6.1.1. Motor de Quatro Tempos

O funcionamento de um motor de quatro tempos é definido pela figura 22, como podemos descrever abaixo segundo Barbosa, 2007.

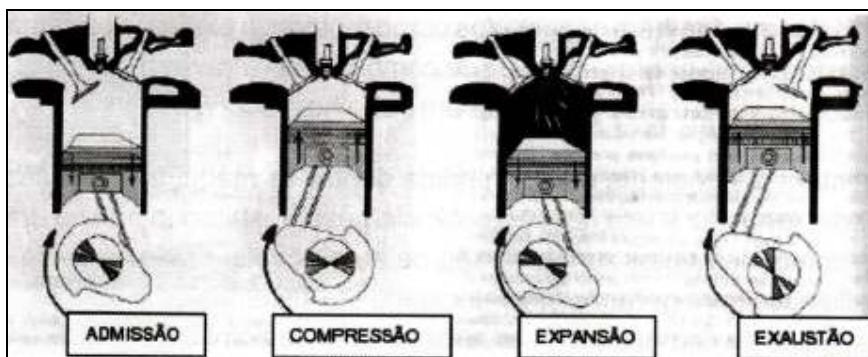


Figura 22 – Esquema de combustão para motor de quatro tempos.
Fonte: (BARBOSA, 2007)

Durante a admissão que é considerado o primeiro tempo, onde o pistão apresenta um movimento descendente e o motor aspira uma quantidade de ar, neste processo a válvula de admissão permanece aberta e a válvula de exaustão fechada.

No segundo tempo é onde se realiza a compressão, seu início é quando se fecha a válvula de admissão e pelo movimento ascendente do pistão. O ar juntamente com óleo diesel é comprimido pelo movimento do pistão para cima, diminuindo o volume do cilindro. No final da compressão, com o pistão próximo a sua posição superior máxima, denominado de ponto morto superior, ocorre à auto-ignição.

No terceiro tempo é onde ocorre à expansão, o pistão move-se para sua posição inferior, o volume do cilindro aumenta e a mistura em seu interior se expande. É durante a expansão que a potência do motor é gerada, de acordo com a força exercida sobre o pistão pela energia liberada da combustão.

No quarto tempo, pouco antes de o pistão atingir sua posição mínima, denominada ponto morto inferior, a válvula de exaustão é aberta dando-se início à exaustão da mistura queimada no cilindro para a atmosfera. A mistura é expelida do cilindro para a atmosfera à medida que o pistão move-se para cima.

Quando o pistão está próximo de atingir seu ponto máximo, a válvula de admissão é aberta e a válvula de exaustão é fechada, dando início a um novo ciclo.

Os componentes do motor de quatro tempos podem ser visto na figura 23, e esta descrita abaixo:

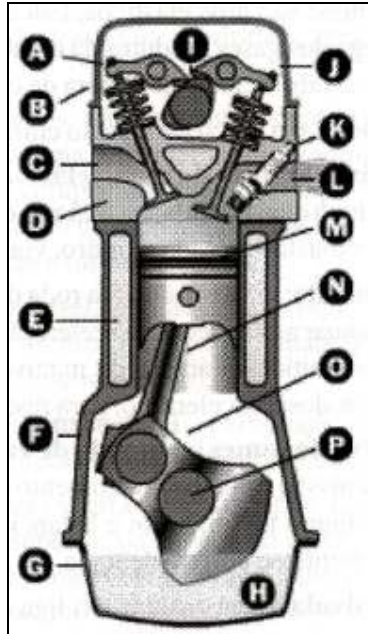


Figura 23 – Componentes de um motor de quatro tempos.
Fonte: (LORA, 2004)

Onde cada componente corresponde segundo LORA, 2004:

- A - Válvula de admissão, braço oscilante e mola;
- B - Tampa de válvula;
- C - Janela de admissão;
- D - Cabeçote;
- E - Refrigerante;
- F - Bloco do motor;
- G - Reservatório de óleo;
- H - Cárter;
- I - Eixo de cames;
- J - Válvula de exaustão, braço oscilante e mola;
- K - Vela de ignição;
- L - Janela de exaustão;
- M - Pistão;
- N - Biela;
- O - Mancal da biela;
- P - Eixo de manivela.

2.6.1.2. Motor de Dois Tempos

No motor de dois tempos o pistão apresenta somente dois movimentos durante o ciclo, um para cima e outro para baixo. O ciclo do motor de dois tempos é ilustrado na figura 24.

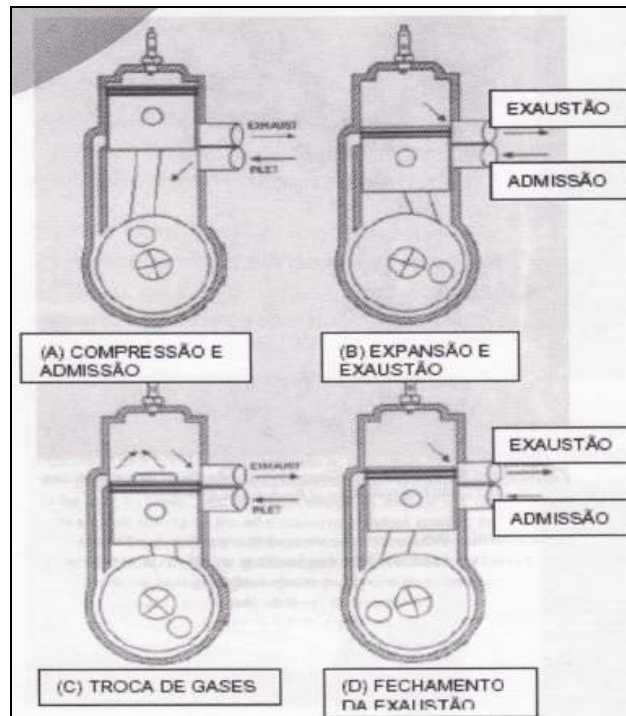


Figura 24 – Esquema de combustão para motor de dois tempos.
Fonte: (BARBOSA, 2007)

Segundo BARBOSA, 2007 o funcionamento da figura 24 é realizada da seguinte maneira:

A combustão da mistura ar-combustível acima do pistão produz um rápido aumento na pressão e na temperatura, empurrando o pistão para baixo e produzindo potência (A). Abaixo do pistão, a janela de admissão induz ar da atmosfera para o cárter, devido ao aumento de volume do cárter reduzir a pressão a um valor inferior à atmosférica. O cárter é isolado ao redor do eixo de manivelas para assegurar a máxima depressão em seu interior.

A janela de exaustão então se abre permitindo a saída do gás de exaustão (B). A área da janela aumenta como giro do eixo de manivelas, e a pressão no cilindro se reduz. O processo de exaustão está quase se completado e,

com ambas as janelas desobstruídas pelo pistão, o cilindro se conecta diretamente ao cárter através do duto de admissão (C).

Se a pressão no cárter for superior à pressão no cilindro, então uma nova mistura entra no cilindro e se iniciam os processos de admissão e lavagem. O pistão então se aproxima do ponto de fechamento da janela de exaustão e o processo de lavagem se completa (D).

Após a janela de exaustão estar totalmente fechada, o processo de compressão se inicia até que o processo de combustão novamente ocorra.

Os componentes do motor de dois tempos podem ser visto na figura 25, e esta descrita abaixo:

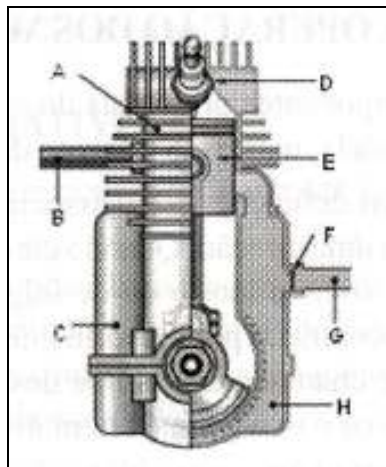


Figura 25 – Componentes de um motor de dois tempos.
Fonte: (LORA, 2004)

Onde cada componente corresponde segundo LORA, 2004:

- A - Câmara de combustão;
- B - Janela de exaustão;
- C - Cárter;
- D - Vela de ignição;
- E - Pistão;
- F - Válvula de palheta;
- G - Admissão de combustível;
- H - Combustível.

2.6.2. Gerador Elétrico

O gerador elétrico tem como função transformar energia mecânica, aplicada em seu eixo, em energia elétrica entregue as cargas pelos seus terminais (BARBOSA, 2007).

Se o gerador tem como tensão de saída CC então é chamada de dínamo, e se for CA é chamado de alternador (BARBOSA, 2007). Na grande maioria dos geradores dieleis são utilizados alternadores que geram tensão CA.

A conversão eletromecânica de energia de, praticamente, todas as maquinas elétricas girantes, depende de dois princípios básicos do eletromagnetismo, que estão intimamente inter-relacionados, ou seja, indução eletromagnética e força eletromagnética (KOSOW, 2005, p. 26).

O princípio de funcionamento do alternador é descrito acima, baseia-se nos fenômenos de indução eletromagnética a que está sujeito um condutor ou uma espira quando submetido a uma variação de fluxo magnético. A variação de fluxo pode ser produzida rodando-se a espira no campo magnético uniforme fixo ou rodando-se o campo magnético uniforme na espira fixa. Estas duas maneiras de provocar a variação do fluxo caracterizam os dois tipos fundamentais de alternadores, isto é, de espira fixa – campo girante, e o de espira girante - campo fixo (BARBOSA, 2007).

Na figura 26, é mostrado uma espira que gira em torno de seu eixo, dentro de um campo magnético uniforme fixo, fazendo com que surjam em seus terminais uma tensão alternada (KOSOW, 2005).

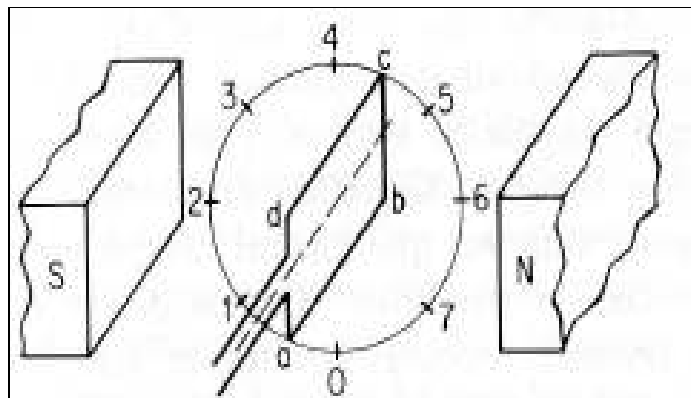


Figura 26 – Campo magnético uniforme e espira girante.

Fonte: (KOSOW, 2005)

E a forma de onda que sai é vista na figura 27, de acordo com a imagem acima temos:

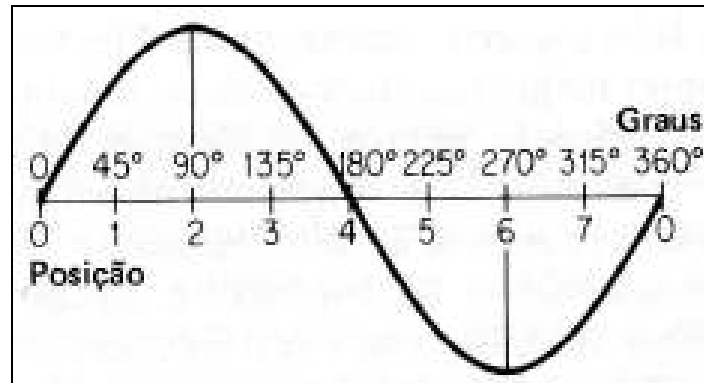


Figura 27 – tensão gerada por uma bobina móvel num campo uniforme. Fonte: (KOSOW, 2005)

Principais partes do gerador segundo BARBOSA, 2007:

Estatore e rotor: Construtivamente geradores síncronos mais comumente são empregados em geração termelétrica e são constituídos por dois componentes bem definidos: um girante acoplado mecanicamente ao eixo da turbina, que é denominado de rotor, e o outro fixo, mais externo, montado na carcaça do gerador, que é denominado de estator. A figura 28 ilustra o estator e o rotor de um alternador.

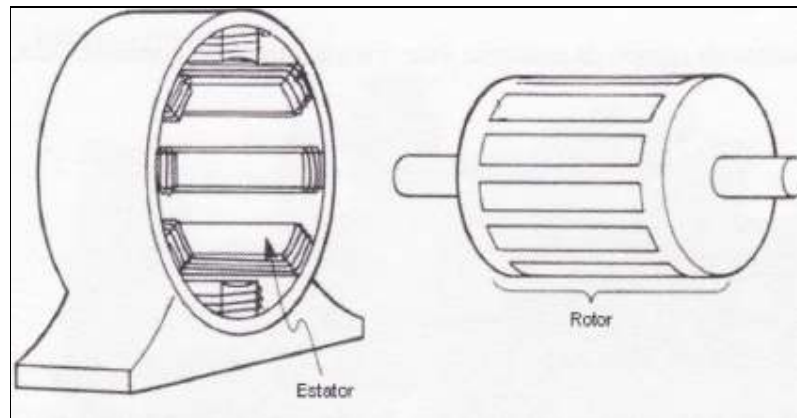


Figura 28 – Estatore e rotor de um gerador de energia elétrica
Fonte: (BARBOSA, 2007)

O rotor tem como função de produzir, através dos enrolamentos, um campo magnético constante para gerar tensões induzidas nos enrolamentos do estator. Na parte estática é onde circula toda a corrente gerada, sendo que tanto a

tensão quanto a corrente elétrica que circulam é bastante elevada em relação ao campo magnético.

Pólos: São bobinas enroladas no núcleo de ferro, e colocadas no eixo do gerador, que são responsáveis pela recepção da corrente proveniente da excitação e que criam o campo magnético que induz tensão nas bobinas do estator.

Excitatriz: equipamento responsável pelo envio de corrente contínua ao campo (pólos) do gerador.

Mancais (rolamentos): Equipamentos colocados entre a tampa e o eixo do gerador, a fim de possibilitar a livre rotação.

Aletas de ventilação: são aberturas para a passagem de ar, com o objetivo de refrigerar o gerador durante a sua operação.

Basetas de terminais: local onde são conectados os cabos de saída do gerador para o quadro de comando.

Anéis coletores: Elementos circulares colocados na ponta traseira do gerador, onde se apresentam as escovas e fazem a conexão da excitatriz ao campo do gerador.

A frequência do gerador é dada pela seguinte equação: (KOSOW, 2005):

$$f = \frac{P \cdot N}{120} \quad (11)$$

Onde:

P = número de pólos;

N = velocidade de rotação em rpm;

f = frequência em Hz.

A potência do gerador é dada pela seguinte equação:

$$S = V \cdot I \quad (12)$$

Para geradores monofásicos.

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (13)$$

Para geradores trifásicos.

Onde:

S = potência aparente (VA);

V = tensão (V);

I = Corrente (A).

2.7. Inversor de Freqüência

Inversor de freqüência é um dos componentes de fundamental importância em um sistema de geração renovável, pois é ele que irá alimentar as cargas CA (Corrente alternada), transformando a tensão continua CC (Corrente continua) em tensão alternada CA (BARBOSA, 2007). Ele comumente trabalha com as seguintes tensões de entrada: 12, 24, 48 ou 120V (CC), que geralmente são convertidos em 120V ou 240V (CA), na freqüência de 50 ou 60Hertz (GTES, 1999).

Os inversores mais simples são compostos essencialmente por um conjunto de interruptores automáticos que fornecem inversões de polaridade da tensão fornecida (BARBOSA, 2007). Alguns inversores mais modernos do tipo síncrono podem ser usados para converter CC em CA, sendo este conectado a rede elétrica convencional (ALDABÓ, 2002).

Segundo ALDABÓ, A energia elétrica fornecida pelos atuais inversores de onda senoidal possui qualidade superior à fornecida pelas redes de distribuição convencionais (ALDABÓ, 2002, p.92).

Existem três tipos de forma de onda de saída de um inversor de freqüência, que são: onda quadrada, onda quadrada modificada e onda senoidal. Na tabela 4 podemos reparar em suas características.

Tabela 4 – Características das formas de onda de um inversor de frequência.

Forma de onda na saída	Características
Onda quadrada	- A tensão de onda quadrada é obtida apenas alternando-se a contínua e, por este fato, oferece baixa regulação e um alto conteúdo harmônico. - Comparando-se a operação de um motor elétrico com a tensão CA fornecida pelo inversor e a tensão senoidal da rede elétrica comercial, verifica-se que o motor possui apenas 60% do seu torque e aquecimentos indesejáveis. - São mais baratos (se compararmos aos demais) e adequados para uso com cargas resistivas como, por exemplo, lâmpadas incandescentes. Não são recomendados para cargas indutivas, como motores elétricos.
Onda quadrada modificada	- Trata-se de uma versão melhorada dos inversores de onda quadrada, ou seja, chaveamentos adicionais são feitos para que a forma de onda se aproxime de uma senoidal, diminuindo assim a quantidade de harmônicos. - São adequados para o uso com diversos tipos de cargas, tais como, lâmpadas, equipamentos eletrônicos e a maioria dos motores elétricos. Para estes últimos tipos de cargas, o inversor permite obter um menor aquecimento e melhor torque de partida/operação.
Onda Senoidal	- Utiliza-se da técnica PWM somente como uma filtragem posterior. São os mais caros; porém, desde que adequadamente dimensionados, são os que produzem tensão de saída e desempenho mais adequados para alimentação de qualquer tipo de carga CA.

Fonte (BARBOSA, 2007)

As três formas de onda descritas na tabela 4 podem ser visualizadas na figura 29:

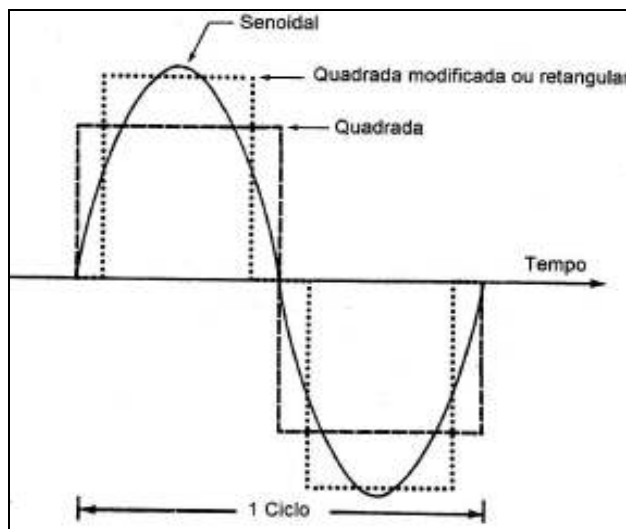


Figura 29 – Formas de onda típicas dos inversores de frequência.
Fonte: (GTES, 1999).

Para cada tipo de onda visto nas figuras, se tem um circuito eletrônico básico, como vemos nas figuras 30, 31, 32.

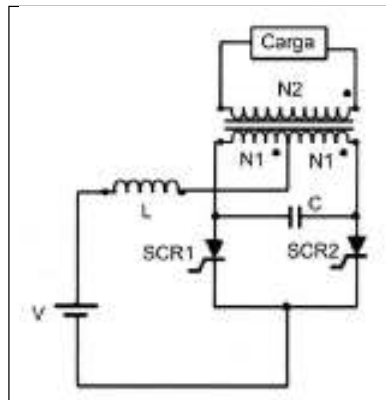


Figura 30 – Inversor para uma forma de onda quadrada. Fonte: (ALDABÓ, 2002).

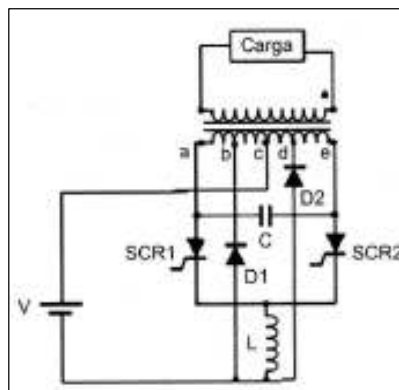


Figura 31 – Inversor para uma forma de onda quadrada modificada. Fonte: (ALDABÓ, 2002).

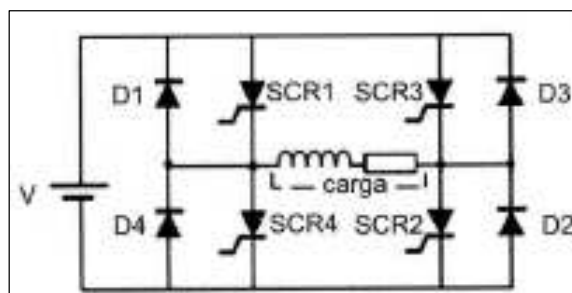


Figura 32 – Inversor para uma forma de onda senoidal (esquema básico do PWM). Fonte: (ALDABÓ, 2002).

A eficiência dos inversores é a relação entre a potência de saída e a potência de entrada, para uma carga resistiva. Quando utilizado em sistema isolado

o inversor varia significativamente com o tipo de carga. Ela varia, normalmente, na faixa de 50% a 90% e deve-se projetar ele para níveis superiores a 90%. Se a forma de onda utilizada no inversor não for senoidal é necessário utilizar equipamentos *True – RMS* (RMS verdadeiro) para realizar medições, por causa dos altos níveis de componentes harmônicos (GTES, 1999).

Em muitos inversores sua eficiência tende a ser mais baixa quando estão operando bem abaixo de sua potência nominal, como podemos ver na figura 33 (GTES, 1999).

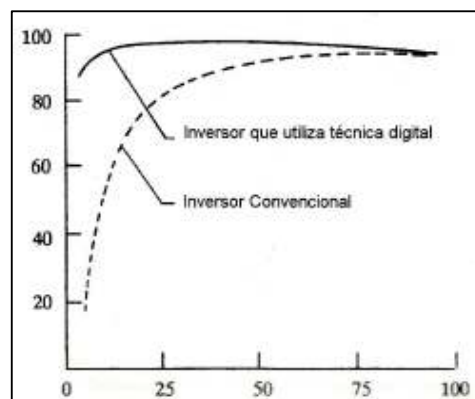


Figura 33 – Eficiência% / Potência de saída %.
Fonte: (GTES, 1999).

2.8. Centro de Pesquisa Canguçu (CPC)

O centro de pesquisa canguçu (CPC) é localizado no município de Pium, sudoeste do estado do Tocantins, a 220 km de Palmas, entre duas importantes Unidades de Conservação: o Parque Nacional do Araguaia e o Parque Estadual do Cantão (UFT, 2009). Esta localizada na latitude 09°58'41"S e na longitude 50°02'12"O, em uma área de proteção ambiental (APA) (SILVA, 2008).

O CPC é atualmente administrado pela Fundação Universidade federal do Tocantins (UFT). Lá há suporte para pesquisadores nacionais e internacionais cujos interesses são o estudo sobre as mudanças climáticas na região da Amazônia e o estudo sobre quelônios (SILVA, 2008).

Um dos projetos é o “Seqüestro de Carbono”, primeiro projeto a ser desenvolvido, o qual foi financiado pela instituição britânica AES Barry Foundation e tem por objetivo geral reduzir o índice de desmatamento e reflorestar as áreas

degradadas, avaliando a quantidade de carbono retida em diversos tipos de vegetação (UFT, 2009).

2.8.1. Característica do sistema híbrido do CPC

Segundo Silva, 2008 os equipamentos foram especificados considerando-se a exigência de operabilidade na faixa de 5 °C a 45 °C com até 100 % de umidade relativa do ar. Os equipamentos utilizados são os seguintes:

Sistema fotovoltaico (SFV): Os módulos são de filme fino flexível de células solares de silício amorfo. A capacidade do sistema é de cerca de 19 kWp, com 154 módulos de 124 Wp cada, conectados em arranjo série-paralelo.

Eletrolisador: Esse equipamento de 6 kW, 230 Vca, 60 Hz, é de tecnologia *proton exchange membrane* (PEM). Tem capacidade máxima para produzir 1 Nm³/h de hidrogênio a 99,95% de pureza, com pressão máxima de saída de hidrogênio igual a 250 psi.

Sistema de armazenamento de hidrogênio: O sistema utiliza recipientes padronizados de hidrogênio a 2.200 psi.

Célula a combustível: Esse equipamento de 5 kW, 48 Vcc, é de tecnologia PEM modular, com 25 módulos de 200 W cada um, a 48 Vcc, e consome 0,9 m³ de hidrogênio com pureza de 99,95 %o para cada quilowatt-hora produzido.

Inversores: O sistema utiliza quatro inversores CC/CA de 6 kW cada, 230 Vca, 60 Hz e quatro inversores CC/CA de 4,2 kW cada.

Este sistema é eletricamente equivalente a uma vila com dez famílias residentes em local isolado da região Amazônica (SILVA, 2008).

Na figura 34, podemos visualizar o diagrama de blocos do sistema híbrido do CPC.

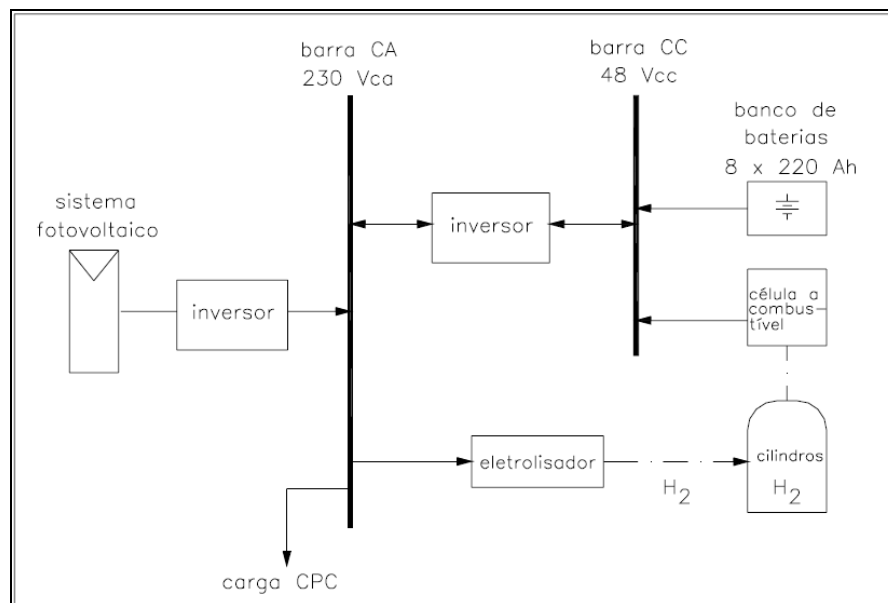


Figura 34 – Diagrama de Blocos do Sistema Híbrido do CPC.
Fonte: (SILVA, 2008)

Com incidência solar suficiente, o sistema fotovoltaico SFV alimenta carga do CPC, e o excedente energético alimenta o eletrolisador, produzindo hidrogênio que é armazenado nos cilindros, e carrega o banco de baterias, permanecendo a Célula a Combustível CaC em modo de *standby* (SILVA, 2008).

Situação em que não há incidência solar, o SFV não está apto a suprir toda a energia requerida pela carga, o eletrolisador então é desligado, e a CAC entra imediatamente em operação para gerar energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado, parando de funcionar quando o SFV recupera a sua capacidade de suprimento ou acaba o estoque de hidrogênio (SILVA, 2008).

2.9. HOMER

2.9.1. O que é HOMER?

O HOMER (do inglês *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), é um programa para otimização de micro sistemas de potência, buscando simplificar a tarefa de avaliação dos projetos de sistemas isolados ou conectados a rede elétrica para uma variedade de aplicações (NREL, 2009).

Quando um usuário projeta um sistema de energia, ele deve tomar diversas decisões sobre a configuração do sistema, como: quais componentes fazem sentido incluir na concepção do sistema; quantos e qual a capacidade de cada componente que o usuário deve usar.

O grande número de opções tecnológicas e a variação dos custos em tecnologia e disponibilidade de recursos energéticos tornam essas decisões difíceis (NREL, 2009).

O programa HOMER realiza então uma série de otimizações dos componentes e avalia por meio de algoritmos a análise de sensibilidade que tornam mais fáceis de avaliar as muitas possíveis configurações de sistema (NREL, 2009).

2.9.2. Conceitos básicos sobre o HOMER

O HOMER simula o funcionamento de um sistema, calculando o balanço energético para cada uma das 8.760 horas em um ano. Para cada hora, o HOMER compara a demanda elétrica e a produção de energia que o sistema pode fornecer e calcula os fluxos de energia de cada componente do sistema. Para sistemas que incluem baterias, geradores a células a combustível ou diesel, o HOMER decide para cada hora como operar os geradores e se carrega ou descarrega as baterias (NREL, 2009).

O programa ainda realiza balanço energético destes cálculos para cada configuração de sistema que o usuário deseja examinar. Em seguida, determina se uma configuração é viável, ou seja, pode-se satisfazer a demanda elétrica, nas condições especificadas, estimando os custos da instalação e manutenção do sistema durante toda a vida útil do projeto. Os sistemas de cálculos dos custos do projeto incluem o capital investido, a substituição, operação e manutenção, combustível, e os juros (NREL, 2009).

Na otimização, depois de simular todas as possíveis configurações de sistema, o HOMER exibe uma lista de configurações, ordenado pelo custo presente líquido (ou custo de vida do sistema), usado para comparar as opções do sistema.

Quando o usuário define sensibilidade variável como entrada, HOMER repete o processo de otimização para cada sensibilidade variável especificada pelo usuário. Por exemplo, se o usuário definir a velocidade do vento como uma

sensibilidade variável, o HOMER irá simular configurações de sistema para a gama de velocidades do vento especificado (NREL, 2009).

3. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será descrito e desenvolvido diversas simulações de várias configurações envolvendo geração, armazenagem e transformação de energia com diversos tipos de tecnologias disponíveis com foco principal em Geração Solar e sistema de armazenagem de energia a Hidrogênio. Serão avaliados estes sistemas tecnicamente e economicamente utilizando o software HOMER, e será descrito também a sua operabilidade.

3.1. Dimensionamento de Sistemas com Painéis Fotovoltaicos

Para dimensionar sistemas envolvendo energia elétrica fornecida por painéis fotovoltaicos, inicialmente deve-se conhecer a incidência da radiação solar do local correspondente, bem como as informações referentes às características do consumo energético a ser atendido. O dimensionamento consiste no balanço entre a energia disponível e a consumida, levando em conta os rendimentos dos diferentes componentes envolvidos na transformação (FURLAN, 2008).

O dimensionamento requer saber os níveis de incidência solar no local, como a estação meteorológica do CPC está desativada, utilizaremos os dados do censo solar de 1993 da cidade de Porto Nacional que é a mais próxima do local e onde possui as fontes mais confiáveis para este tipo de estudo.

Porto Nacional que está localizado no estado do Tocantins nas seguintes coordenadas: 10,708° Sul e 48,417° Oeste. A inclinação dos painéis fotovoltaicos deve seguir a latitude dada, só que para o lado oposto, neste caso 10° para o Norte. A Tabela 5 apresenta a característica de incidência solar durante o ano de 1993 na cidade de Porto Nacional.

Tabela 5 – Radiação solar na cidade de Porto Nacional

Mês	Radiação Solar kWh/m ² /dia
Janeiro	4,67
Fevereiro	4,34
Março	4,64
Abril	4,69
Maió	5,20
Junho	5,64
Julho	6,12
Agosto	6,19
Setembro	5,28
Outubro	4,99
Novembro	5,00
Dezembro	4,75
Média diária anual	5,12

Fonte: (SEVERINO, 2008)

Podemos reparar que no mês de Fevereiro é o menor índice registrado, este fato se deve pelos altos níveis de incidências de chuvas na região nesta época, que interferem diretamente a radiação solar. Já no mês de Agosto é o maior índice, pois é o mês que há estiagem, praticamente não havendo nuvens no céu, fazendo com que este índice seja elevado.

3.2. Configurações

As configurações que iremos simular são as seguintes: PV - Bateria, PV – Diesel, Diesel e PV – Célula a Combustível. Estas quatro simulações são necessárias para compararmos algumas tecnologias disponíveis para a energização de comunidades eletricamente isoladas. E essas quatro simulações foram dimensionadas de acordo com as cargas do CPC (Centro de Pesquisa Canguçu). Serão realizadas mais duas simulações comparando o CPC com outra característica de carga de comunidade isolada.

A configuração PV – Bateria são necessários os seguintes componentes: Painel Fotovoltaico, Baterias e Inversores de Frequência para a

geração de energia e mais a característica de carga do CPC. A figura 35 apresenta o esquema que o HOMER utiliza para este tipo de sistema.

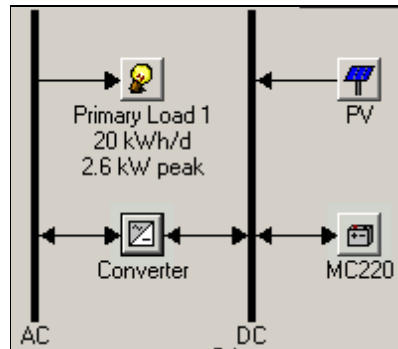


Figura 35 - PV – Bateria
Fonte: HOMER

A sua operação é da seguinte maneira: de dia quando a inserção de luz solar sobre os painéis fotovoltaicos, o mesmo produz energia elétrica que a manda para a barra CC, na barra CC estão conectados também o inversor de frequência e a Bateria. O inversor de frequência utilizado é bidirecional (Retifica e Inverte o sinal de Tensão) funcionando também como um controlador de carga, que direciona o fluxo de corrente para as cargas da barra CA e o excedente para as Baterias que recebe este excedente de energia para a armazenagem de eletricidade, quando não houver inserção de luz solar o mesmo deve suprir eletricamente a demanda de energia.

A configuração PV – Diesel – Bateria são necessários os seguintes componentes: Painel Fotovoltaico, Gerador Diesel, Inversores de Frequência e Baterias para a geração de energia e mais a característica de carga do CPC. A figura 36 apresenta o esquema que o HOMER utiliza para este tipo de sistema.

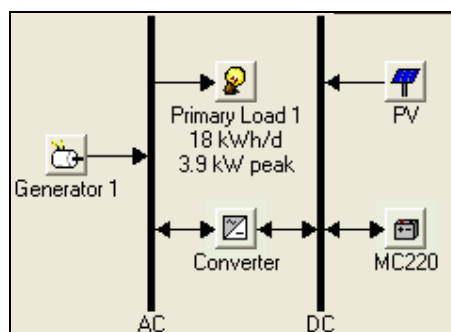


Figura 36 - PV – Diesel – Bateria
Fonte: HOMER

A sua operação é da seguinte maneira: de dia quando a inserção de luz solar sobre os painéis fotovoltaicos, o mesmo produz energia elétrica que a manda para a barra CC, nesta barra está conectado a bateria e o Inversor de frequência que é bidirecional e manda energia para a barra CA, onde lá estão conectados as cargas e o gerador diesel. O gerador diesel entre em funcionamento quando os painéis fotovoltaicos e as baterias não dão conta de suprir eletricamente as cargas, são duas situações possíveis: a noite onde não há inserção de sol e em dias nublados onde não se gera energia solar suficiente para suprir as cargas.

Na configuração diesel é somente necessário o gerador diesel como componente para a geração de energia e mais as características de carga do CPC. A figura 37 apresenta o esquema que o HOMER utiliza para este tipo de sistema.

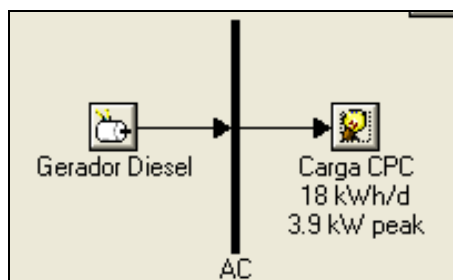


Figura 37 - Diesel
Fonte: HOMER

Sua operação é simples: o gerador diesel tem seu funcionamento intermitente e varia a potência de acordo com a carga elétrica solicitada.

Na configuração PV – Célula a Combustível são necessários os seguintes componentes: Painel Fotovoltaico, Célula a Combustível, Eletrolisador, Armazenagem de Hidrogênio e Inversores de Frequência para a geração de energia e mais a característica de carga do CPC. A figura 38 apresenta o esquema que o HOMER utiliza para este tipo de sistema.

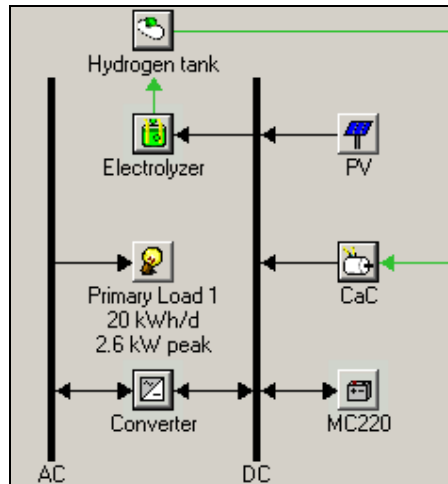


Figura 38 - PV – Célula a Combustível
Fonte: HOMER

A sua operação é da seguinte maneira: de dia quando a inserção de luz solar sobre os painéis fotovoltaicos, o mesmo produz energia elétrica que a manda para a barra CC, nesta barra estão conectados os seguintes equipamentos: Célula a combustível, Inversor de Frequência bidirecional e Bateria se houver. Já na barra CA está conectada as cargas e o eletrolizador.

Célula a combustível tem como função gerar energia através do combustível hidrogênio quando os painéis fotovoltaicos não dão conta de suprir as cargas elétricas.

Inversor de Frequência bidirecional tem como função inverter o sinal de entrada CC em sinal CA para alimentar as cargas que estão na barra CA e também pode funcionar como retificador.

Bateria neste caso tem como função única e exclusiva a geração de um sinal CC de referência para o inversor de frequência.

Eletrolizador tem como função transformar energia elétrica em Hidrogênio, este hidrogênio é armazenado e depois aproveitado para alimentar a célula a combustível.

A energia elétrica provida do sol excedente alimenta o eletrolizador, que gera hidrogênio para ser armazenado. Este hidrogênio alimenta a célula a combustível quando os painéis fotovoltaicos não suprem as cargas. A célula a combustível deve entrar em funcionamento para suprir a demanda.

O CPC apresenta a seguinte configuração como podemos ver na figura 39.

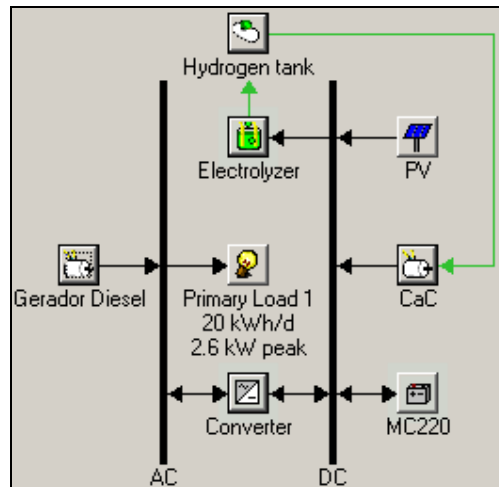


Figura 39 - PV – Célula a Combustível CPC
Fonte: HOMER

Esta configuração é similar a mostrada anteriormente (PV – Célula a Combustível), porém ela possui o gerador diesel. Para este caso gerador diesel funciona somente como *back-up*. Se o sistema falhar ele entra e supre as cargas, não faltando energia no CPC.

A outra simulação que será executado é similar ao do CPC, porém com cargas diferentes, e estas cargas serão similares a de comunidades isoladas de menor porte. O CPC foi projetado para suprir eletricamente 10 famílias com características daquela região.

3.3. Características de Carga

As comunidades isoladas da Região Amazônica dispõem de uma oferta de energia elétrica bem abaixo dos padrões encontrados nos centros urbanos. A demanda de energia elétrica está relacionada basicamente a eletrodomésticos, equipamentos para centros comunitários, postos de saúde e escolas (FURLAN, 2008).

O Centro de Pesquisa Canguçu (CPC) antes de sua remodelação tinha os seguintes equipamentos: um freezer horizontal, uma televisão, um motor acoplado a uma bomba d'água e diversas lâmpadas incandescentes e era alimentado por um gerador diesel com potência de 9,5 kVA (SEVERINO, 2008).

Como já foi citada, a potência instalada no CPC é possível alimentar uma comunidade com 10 famílias. Sua característica de carga pode ser visualizada na figura 40, e o valor médio de carga diária do ano de 2007 foi de 18,0 kWh/dia, e todos os cálculos do CPC no software HOMER foram realizados em baseado nestes valores.

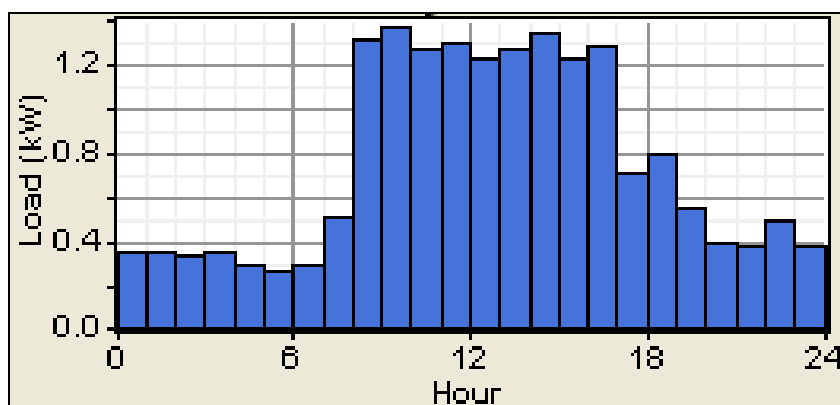


Figura 40 – Demanda ao longo do dia do CPC

A outra simulação que iremos realizar é sobre uma carga da comunidade Vila Campinas que está localizada às margens do rio Manacapuru, próximo ao Paraná do Anamã, aproximadamente 53 km da sede de seu município, Manacapuru, distante 80 km de Manaus, capital do Estado (FURLAN, 2008).

Segundo Furlan, está proposto um único sistema que atenda a uma escola (um televisor e cinco lâmpadas), um centro comunitário (um televisor, cinco lâmpadas e dois refrigeradores), um posto de saúde (três lâmpadas e um refrigerador) e três casas (três televisores, doze lâmpadas e dois refrigeradores) e mais uma carga adicional equivalente a 5 lâmpadas, totalizando um consumo de energia elétrica de 10,4 kWh/dia. A tabela 6 apresenta a distribuição do consumo de energia elétrica para o caso citado acima.

Tabela 6 – Distribuição do consumo de energia elétrica da Vila Campinas

Aplicação	Quantidade	Potência (kW)	Uso (h/dia)	Energia (kWh/dia)
Televisor	5	0,05	4	1,0
Refrigerador	5	0,10	12	6,0
Lâmpada	25	0,02	6	3,0
Outros	5	0,02	4	0,4
Total (kWh/dia)				10,4

Fonte: (FURLAN, 2008)

Pode-se perceber que o total do consumo das cargas diárias da vila campinas é muito similar com o CPC, já na figura 41 apresentamos a carga hora em hora durante um dia.

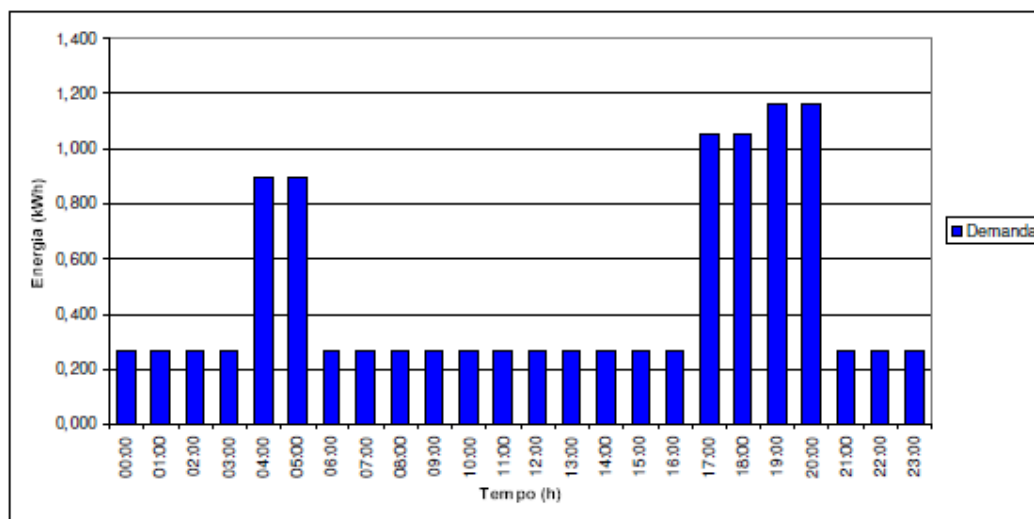


Figura 41 – Demanda ao longo do dia da Vila Campinas
Fonte: (FURLAN, 2008)

Os relatórios gerados pelo software HOMER sobre os aspectos técnicos e econômicos serão colocados em apêndice para melhor visualizar estas características citadas acima.

3.4. Custos dos Equipamentos

Os custos dos equipamentos variam de acordo com vários fatores entre eles a economia de mercado, fabricante, tecnologia aplicada entre outros. Esses tipos de investimentos possuem um problema financeiro, pois como quase todo material empregado nesses tipos de sistemas são importados de outros países e com isso tem que se pagar a taxa de importação, que pode chegar até 60%, tornando o investimento elevado. Também tem que se considerar a logística desse material e da mão de obra especializada para implementar esta tecnologia em locais isolados.

Todo o custo dos materiais foi retirado da tese de doutorado de Mauro Severino e é apresentado na tabela 7.

Tabela 7 – Preço dos materiais utilizados no CPC

Item	Valor Gasto (R\$)
Sistemas fotovoltaico (SFV)	R\$ 327.201,25
Importação/Frete do SFV	R\$ 63.406,36
Material Elétrico de integração do SFV	R\$ 5.165,00
Eletrolisador	R\$ 202.566,39
Importação/Frete do eletrolisador	R\$ 22.660,98
Material de integração do eletrolisador	R\$ 1.545,00
Sistema de pressurização do Hidrogênio	R\$ 20.612,48
Célula a Combustível	R\$ 46.260,14
Importação/Frete do CaC	R\$ 21.993,40
Material de integração do CaC	R\$ 3.044,00
Cilindros de Hidrogênio	R\$ 2.486,00
Bancos de Baterias	R\$ 16.000,00
Total	R\$ 732.941,00

Fonte: (SEVERINO, 2008)

Os preços dos materiais apresentado acima não é o total gasto no CPC, sendo mais elevado devido à mão de obra para a montagem. A base do estudo deste trabalho está contida na tabela 7. O gasto total do CPC foi de R\$ 1.075.293,05 (SEVERINO, 2008). Podemos reparar também que não contém o preço dos inversores de frequência, pois o mesmo está dentro do Sistema Fotovoltaico e foi calculado baseado nele.

Para o grupo gerador diesel, foi estimado como base pesquisas feitas informalmente no mercado, e se for considerado a logística deste material até sua instalação têm-se as seguintes características: para cada 1 kW, gastou-se aproximadamente R\$ 1.000,00.

O diesel é o combustível mais utilizado para a alimentação de geradores em regiões eletricamente isoladas, e o preço de mercado atual na região é de R\$ 2,15. Como temos que levar em conta a logística deste combustível, pois comunidades isoladas são de difícil acesso, o preço considerado na pesquisa foi de R\$ 2,30.

Para as baterias, o preço gasto que foi de R\$ 16.000,00 para um total de 16 baterias. Temos para cada bateria um custo de R\$ 1.000,00, e para a simulação foi utilizado a bateria de 220Ah.

Na tabela 8 são mostrados os parâmetros utilizados na simulação, com base dos dados retirados na tabela 7.

Tabela 8 – Custo para simulações	
Item	Característica financeira
Sistema fotovoltaico (SFV)	1kW - R\$ 10.526,30
Eletrolisador	1kW - R\$ 41.230,80
Inversor de frequência	1kW - R\$ 5.000,00
Célula a Combustível	1kW - R\$ 14.259,50
Cilindros de Hidrogênio	1un - R\$ 500,00
Bateria	1un - R\$ 1.000,00
Gerador Diesel	1kW - R\$ 1.000,00
Diesel	1l - R\$ 2,30

3.5. Como o Homer Funciona

O Homer para seu funcionamento perfeito é necessário a entrada de diversas variáveis, como exemplo a radiação solar, preço do diesel, painéis fotovoltaicos entre outros. Neste capítulo explicaremos passo a passo como são realizados os procedimentos para a realização das simulações.

Para inserção dos equipamentos utilizados no sistema deve-se fazer de acordo com a figura 42, onde se seleciona tudo o que será necessário para o estudo do sistema incluindo equipamentos e cargas.

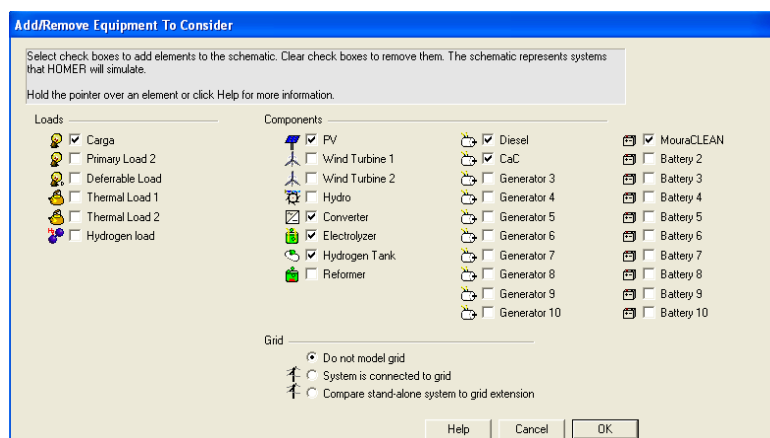


Figura 42 – Inserção de equipamentos

A principal fonte de energia dos sistemas estudados neste trabalho é o sol, e para inserção dos dados climáticos da radiação média no Homer é demonstrado na figura 43.

Os dados utilizados no Homer como característica de incidência de radiação solar foram retirados da tabela 5, também é necessário inserir as posições de latitude e longitude da onde o sistema será utilizado, podemos ver também que é necessária a inserção do fuso horário da região estudada.

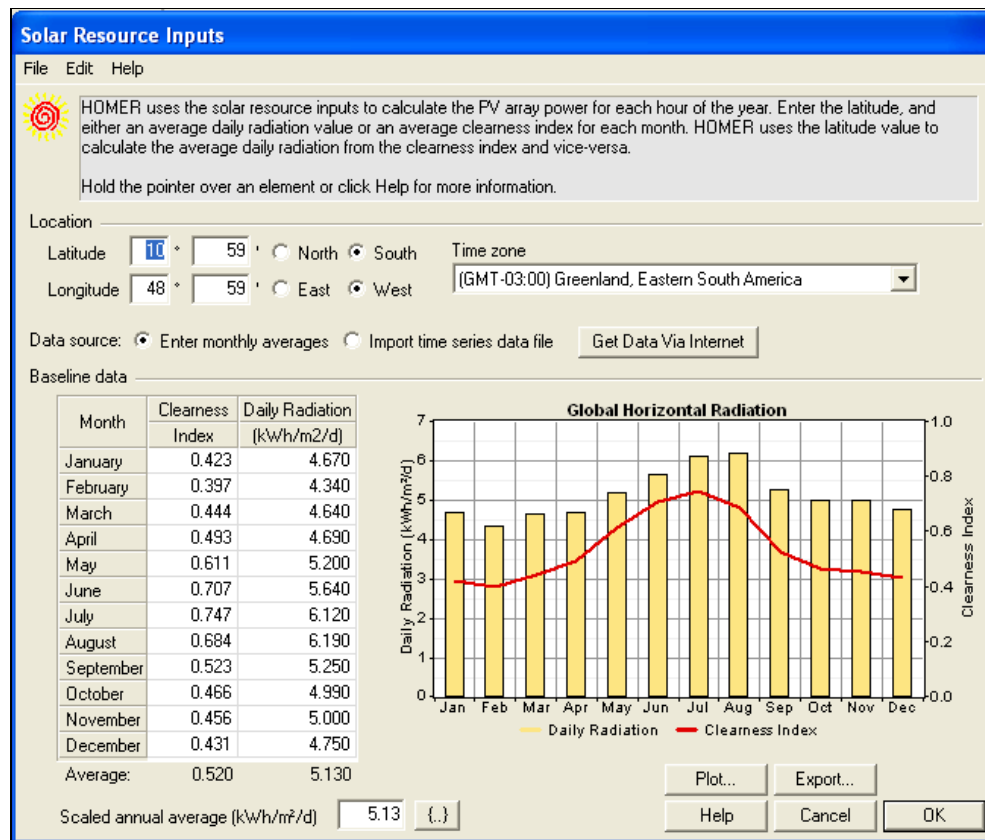


Figura 43 – Inserção da radiação Solar

Outra fonte primaria de energia estudada é o grupo gerador diesel, para inserção de dados da característica do combustível é mostrado na figura 44, onde é necessário o preço do diesel e algumas outras características.

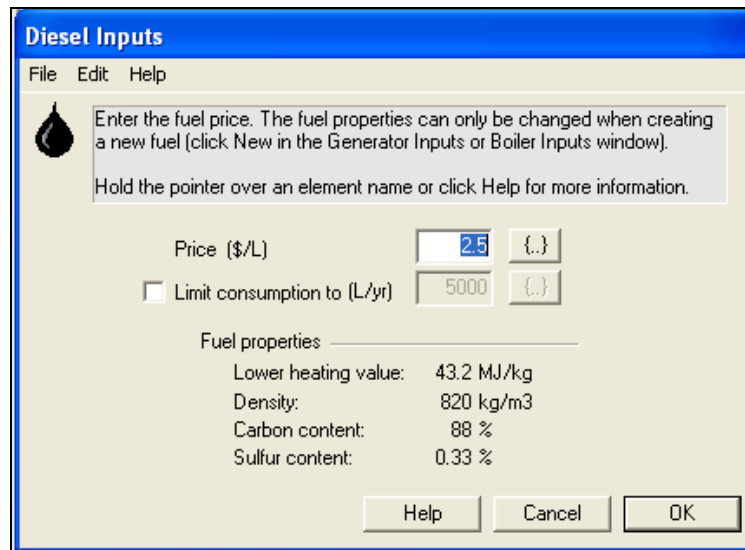


Figura 44 – Inserção do preço do Diesel

As variáveis econômicas utilizadas no trabalho foram incluídas do Homer de acordo com a figura 45.

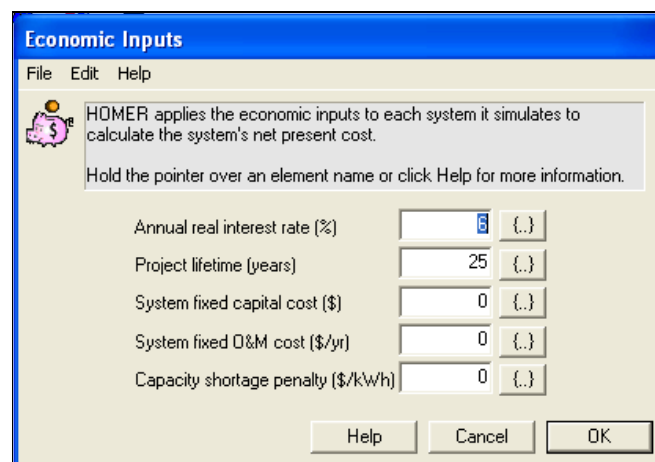


Figura 45 – Inserção de variáveis econômicas

Para a inserção das características dos painéis fotovoltaicos são necessários preços, potências para serem consideradas para o sistema, algumas características técnicas entre outros. Na figura 46 pode-se visualizar como se faz para incluir estes dados no Homer.

PV Inputs
File Edit Help

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1.000	10526	10526	0
{..}	{..}	{..}	{..}

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
21.000
22.000
23.000

Cost Curve

Cost (1000 \$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Properties

Output current ☒ AC ☐ DC

Lifetime (years) {..}

Derating factor (%) {..}

Slope (degrees) {..}

Azimuth (degrees W of S) {..}

Ground reflectance (%) {..}

Advanced

Tracking system {..}

☐ Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C) {..}

Nominal operating cell temp. (°C) {..}

Efficiency at std. test conditions (%) {..}

Help Cancel OK

Figura 46 – Inserção dos painéis fotovoltaicos

As outras opções como o Gerador Diesel, Eletrolisador, Conversor, Tanque de Hidrogênio, Baterias e Célula a Combustível os procedimentos para inclusão de dados é muito similar aos dos painéis fotovoltaicos visto na figura 45, porém com alguns pequenos ajustes dependendo do equipamento, por exemplo, a bateria tem várias características técnicas que devem ser inclusas, como podemos verificar na figura 47.

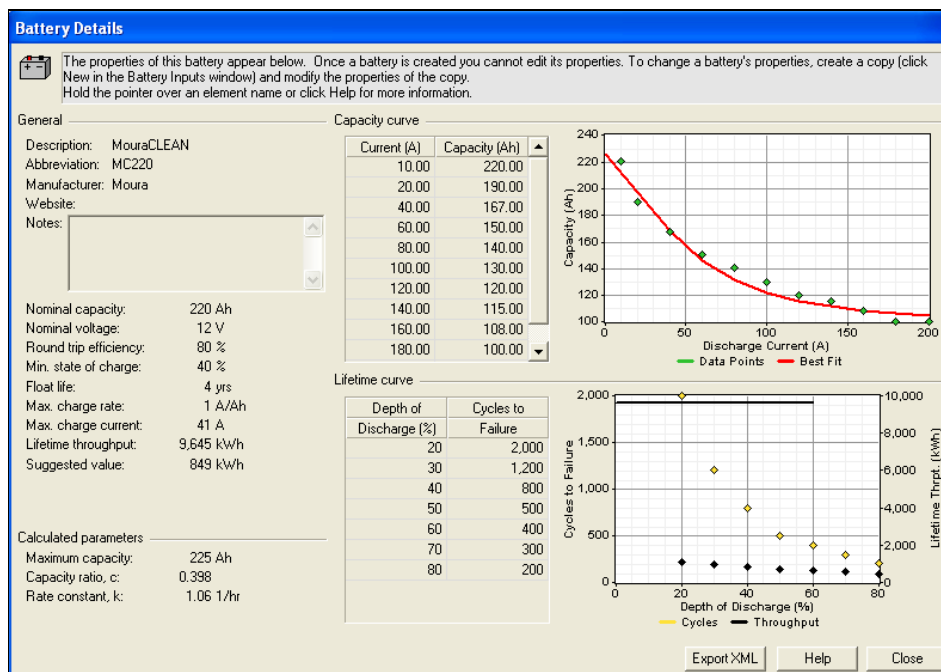


Figura 47 – Inserção dos dados técnicos da Bateria

Uma das principais partes desses tipos de estudo é a característica de carga, pois é ele que define todo sistema e suas características técnicas e econômicas, para inclusão das cargas no Homer deve ser feito de acordo com a figura 48.

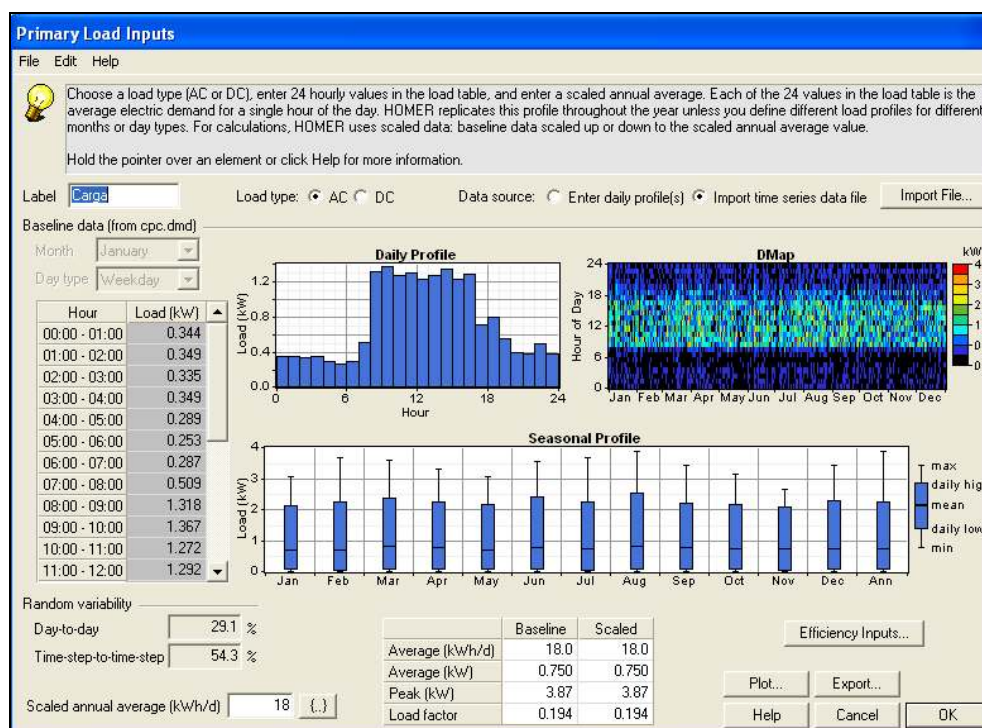


Figura 48 – Inserção das cargas

3.6. Resultados das Simulações

Todos os relatórios obtidos vão estar no apêndice do trabalho. E o tempo de vida útil para todas as simulações foram de 25 anos que é o tempo de vida dos painéis fotovoltaicos.

3.6.1. PV – Bateria

O primeiro resultado obtido foi da simulação PV – Bateria. O Homer obteve os seguintes equipamentos como podemos verificar na tabela 9.

Tabela 9 – Sistema PV - Bateria	
Sistema fotovoltaico (SFV)	13 kW
Bateria	16 de 220Ah
Inversor de frequência Bidirecional	4 kW

O custo inicial para esta simulação foi de R\$ 172.838,00 e custo no final de vida útil foi de R\$ 232.9635,00. Na tabela 10 podemos visualizar o custo de cada componente e suas trocas.

Tabela 10 – Custo do Sistema PV - Bateria				
Componente	Capital	Troca de equipamento	O&M	Total
	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
PV	136.838,00	0	0	136.838,00
Bateria	16.000,00	45.903,00	10.227,00	69.333,00
Conversor	20.000,00	8.345,00	0	26.792,00
Sistema	172.838,00	54.248,00	10.227,00	232.963,00

Com todas essas características podemos visualizar o gasto por equipamento na figura 49, onde é demonstrado o gasto por equipamento.

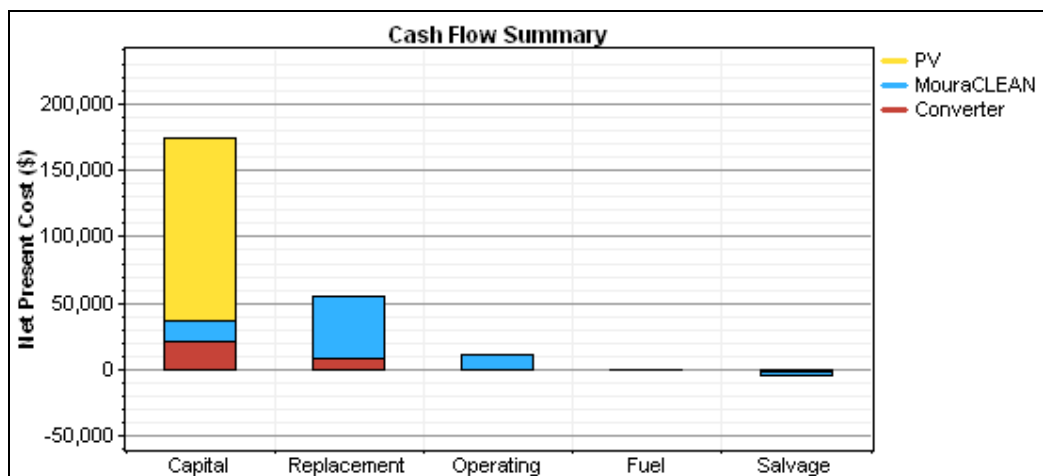


Figura 49 – Custo por material do Sistema PV - Bateria

Com todas as características econômicas citadas o preço do kWh fica em média R\$ 2,77. A energia produzida em um ano por este sistema é de 22.505kWh e a produção mensal média pode ser vista na figura 50.

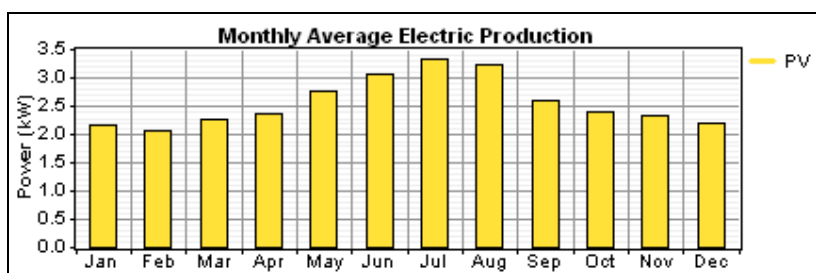


Figura 50 – Produção Mensal Média do Sistema PV - Bateria

A carga anual requerida é de 6.568kWh. Essa defasagem entre produção e consumo é porque têm que se considerarem as variações que podem ocorrer anualmente.

A produção de energia dos painéis fotovoltaicos (PV) foi de 22.505kWh por ano e sua produção mês a mês pode ser visto na figura 51.

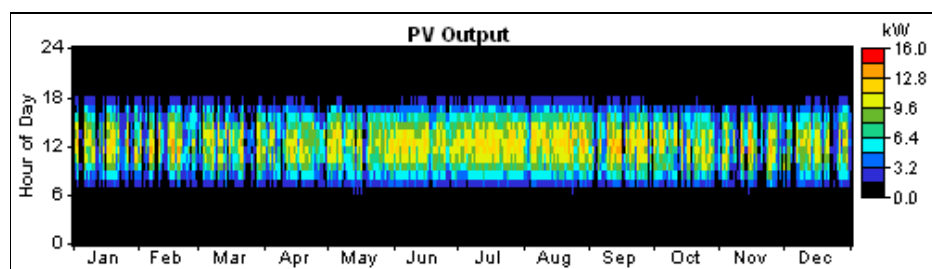


Figura 51 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV - Bateria

Na figura 51 podemos reparar que a produção de eletricidade é totalmente dependente da inserção de sol, pois ao meio dia, onde ocorre a maior incidência solar é onde a capacidade de produção é maior. À noite, onde não há sol a produção é zerada e o fornecimento de energia para este caso fica somente em função das baterias. Podemos ver na figura 52 a profundidade de descarga das baterias ao longo do ano.

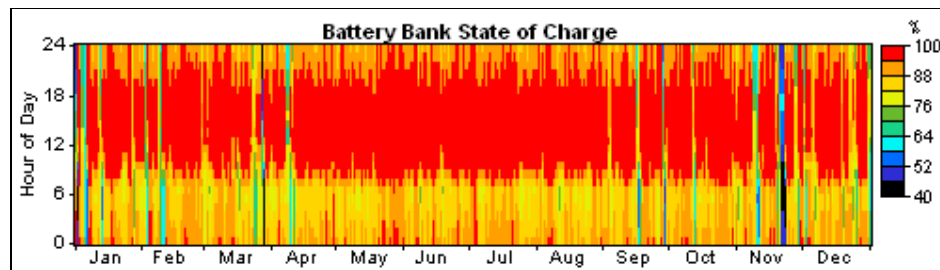


Figura 52 – Descarga das Baterias para o Sistema PV - Bateria

Como podemos reparar na figura 52, no começo do dia o banco de bateria se carrega e depois fica em 100% até a noite onde começa a se descarregar para suprir a demanda energética, e em alguns dias ele se descarrega mais justamente para suprir as cargas em dias nublados onde os painéis fotovoltaicos não dão conta de suprir.

Para esta simulação não houve emissão de gases de efeito estufa. Toda a configuração foi dimensionada para a carga do CPC.

3.6.2. PV – Diesel – Bateria

O segundo resultado obtido foi da simulação PV – Diesel – Bateria. O Homer obteve os seguintes equipamentos como pode ser verificado na tabela 9.

Tabela 11 – Sistema PV – Diesel – Bateria	
Sistema fotovoltaico (SFV)	3 kW
Gerador Diesel	2 kW
Bateria	4 de 220Ah
Inversor de frequência Bidirecional	2 kW

O custo inicial para esta simulação foi de R\$ 47.578,00 e custo no final de vida útil foi de R\$ 105.017,00. Na tabela 12 podemos visualizar o custo de cada componente e suas trocas.

Tabela 12 - Custo do Sistema PV – Diesel – Bateria

Componente	Capital	Troca de Equipamento	O&M	Combustível	Total
	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
PV	31.578,00	0	0	0	31.578,00
Gerador diesel	2.000,00	2.675,00	2.568,00	35.771,00	42.710,00
Bateria	4.000,00	11.476,00	2.557,00	0	17.333,00
Conversor	10.000,00	4.173,00	0	0	13.396,00
Sistema	47.578,00	18.323,00	5.125,00	35.771,00	105.017,00

Com todas essas características podemos visualizar o gasto por equipamento na figura 53.

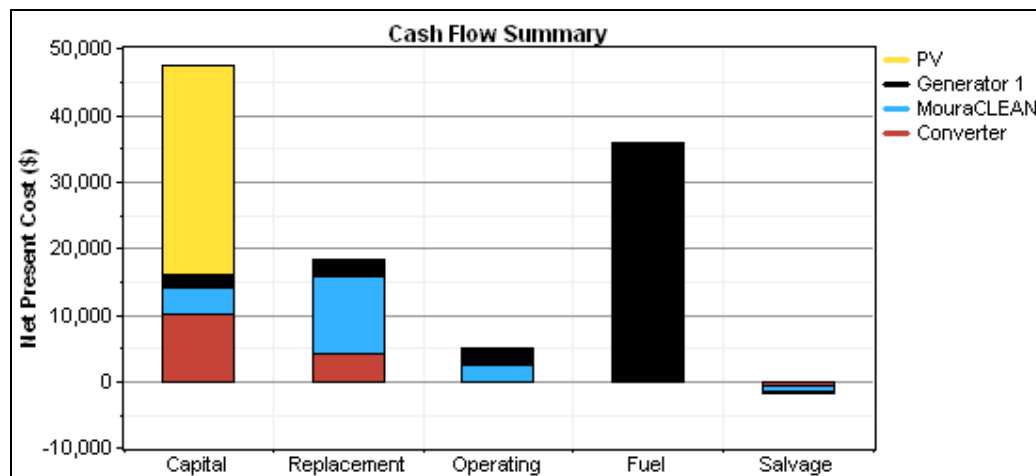


Figura 53 - Custo por material do Sistema PV – Diesel – Bateria

Com todas as características econômicas citadas o preço do kWh fica em média R\$ 1,25. A energia produzida em um ano por este sistema pode chegar até 8.774kWh e a produção mensal média pode ser vista na figura 54.

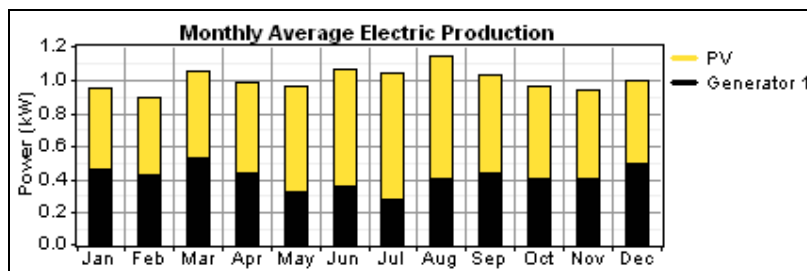


Figura 54 - Produção Mensal Média do Sistema PV – Diesel – Bateria

A carga anual requerida é de 6.570kWh. Essa defasagem entre produção e consumo é porque têm que se considerarem as variações que podem ocorrer anualmente.

A produção de energia dos painéis fotovoltaicos (PV) foi de 5.193kWh por ano e a do Gerador diesel foi de 3.581kWh. Nesta simulação é importante dizer que 59% da fonte de energia é limpas provindas dos painéis fotovoltaicos, já os outros 41% provem do diesel que é uma fonte de energia não renovável. Suas produções mês a mês podem ser vistos nas figuras 55 e 56.

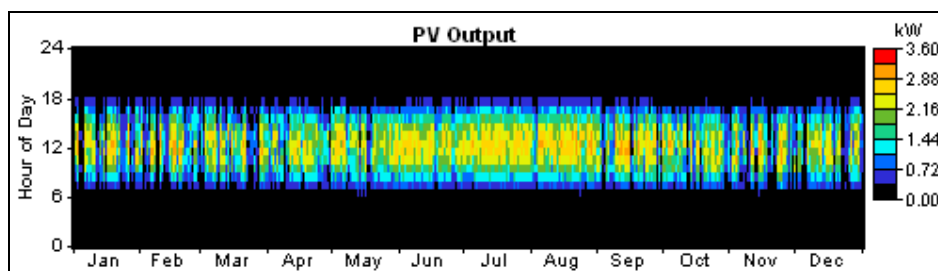


Figura 55 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV – Diesel – Bateria

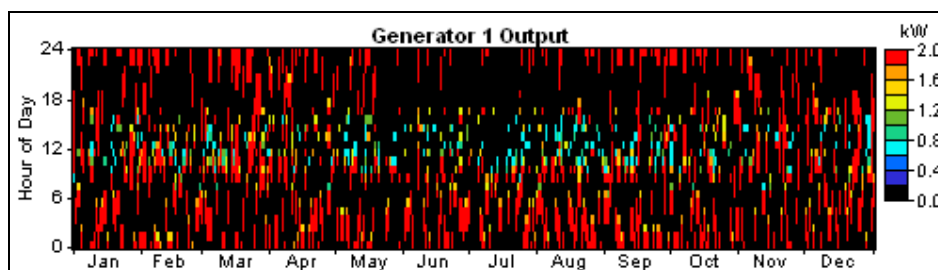


Figura 56 - Produção Mensal do gerador diesel para o Sistema PV – Diesel – Bateria

Podemos ver que na figura 55 é similar ao do caso anterior, porém varia a potência. Neste caso o sol não é única fonte de energia, pois o gerador a diesel funciona como uma fonte de retaguarda, pois à noite e quando há dias nublados o gerador diesel entra em funcionamento como é observado na figura 56.

Um dos grandes problemas desse tipo de configuração é emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente, pois o petróleo é um grande emissor de gases poluentes. Podemos verificar na tabela 13 a quantidade de emissão de gases por ano.

Tabela 13 – Emissão de Poluentes para o Sistema PV – Diesel – Bateria

Poluente	Emissão (kg/ano)
Dióxido de carbono	3.204
Monóxido de carbono	7,91
Partículas	0,596
Dióxido de enxofre	6,43
Óxido de nitrogênio	70,6

3.6.3. Diesel

O resultado obtido nesta simulação foi um gerador diesel de 4kW de potência. O custo inicial para esta simulação foi de R\$ 4.000,00 e custo no final de sua vida útil foi de R\$ 212.950,00. Na tabela 14 podemos visualizar o custo de cada item e suas trocas.

Tabela 14 – Custo do Sistema Diesel

Componente	Capital	Troca de Equipamento	O&M	Combustível	Total
	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
Gerador Diesel	4.000,00	26.965,00	21.366,00	160.686,00	212.950,00
Sistema	4.000,00	26.965,00	21.366,00	160.686,00	212.950,00

Com as características podemos visualizar o gasto por equipamento na figura 57, onde é demonstrado o gasto demonstrativo.

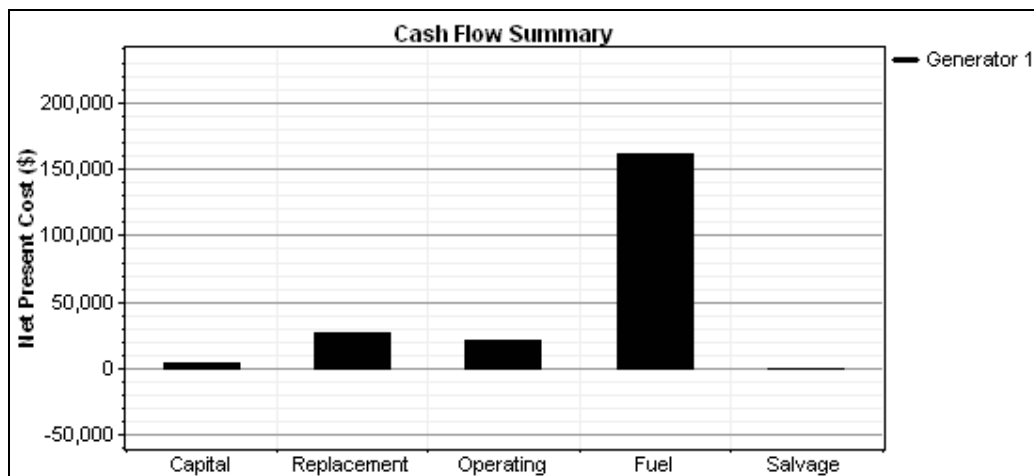


Figura 57 - Custo por material do Sistema Diesel

Com todas as características econômicas citadas o preço do kWh fica em média R\$ 2,53. A energia produzida em um ano por este sistema pode chegar até 11.163kWh e a produção mensal média pode ser vista na figura 58.

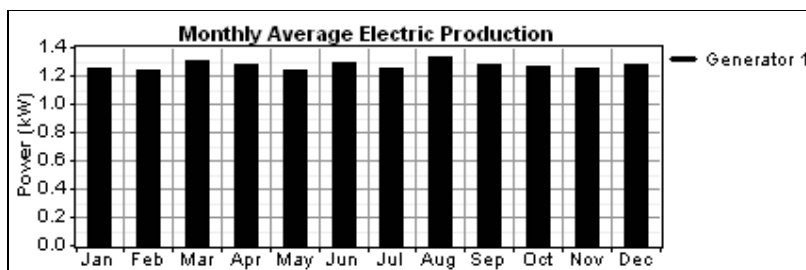


Figura 58 - Produção Mensal Média do Sistema Diesel

A carga anual requerida é de 6.570kWh. Essa defasagem entre produção e consumo é porque têm que se considerarem as variações que podem ocorrer anualmente. Podemos visualizar na figura 59 a produção de energia ao longo de um ano do gerador diesel.

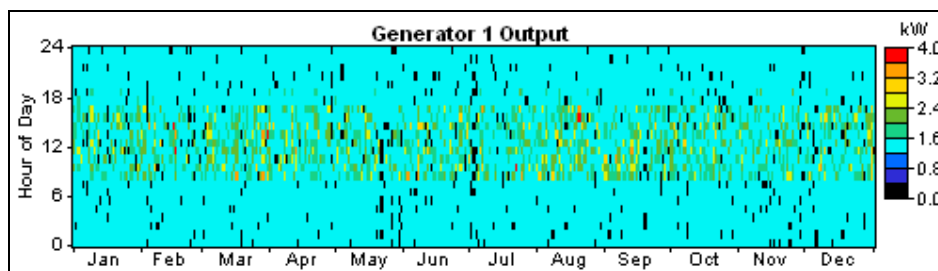


Figura 59 - Produção Mensal do gerador diesel para o Sistema Diesel

Neste tipo de configuração a única fonte de energia é o gerador a diesel e com isso ele deve permanecer sempre ligado para suprir a demanda energética do sistema.

Similarmente a simulação anterior, um dos grandes problemas desse tipo de configuração é emissão de gases que prejudicam o meio ambiente. Neste caso é superior ao anterior, pois a única fonte de energia é o diesel. Podemos verificar na tabela 15 a quantidade de emissão de gases por ano.

Tabela 15 – Emissão de Poluentes para o Sistema Diesel

Poluente	Emissão (kg/ano)
Dióxido de carbono	14.392
Monóxido de carbono	35,5
Partículas	2,68
Dióxido de enxofre	28,9
Óxido de nitrogênio	317

3.6.4. PV – Célula a Combustível do CPC

O resultado obtido nesta simulação PV – CaC aplicado ao CPC, com a utilização do Homer foi o dimensionamento dos seguintes equipamentos como podemos verificar na tabela 16.

Tabela 16 - Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

Sistema fotovoltaico (SFV)	29 kW
CaC	2 kW
Bateria	4 de 220Ah
Inversor de frequência Bidirecional	2 kW
Eletrolisador	1,6 kW
Tanque de Hidrogênio	3,19 kg

O custo inicial para esta simulação foi de R\$ 416.703,00 e custo no final de vida útil foi de R\$ 443.101,00. Na tabela 17 podemos visualizar o custo de cada componente e suas trocas.

Tabela 17 - Custo do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

Componente	Capital	Troca de Equipamento	O&M	Total
	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
PV	305.254,00	0	0	305.254,00
CaC	28.520,00	0	0	28.520,00
Bateria	4.000,00	4.173,00	2.557,00	17.333,00
Inversor	10.000,00	10.432,00	0	13.396,00
Eletrolisador	65.970,00	13.352,00	0	76.837,00
Tanque de Hidrogênio	2.959,00	0	0	2.959,00
Sistema	416.703,00	29.001,00	2.557,00	443.101,00

Com todas essas características podemos visualizar o gasto por equipamento na figura 60.

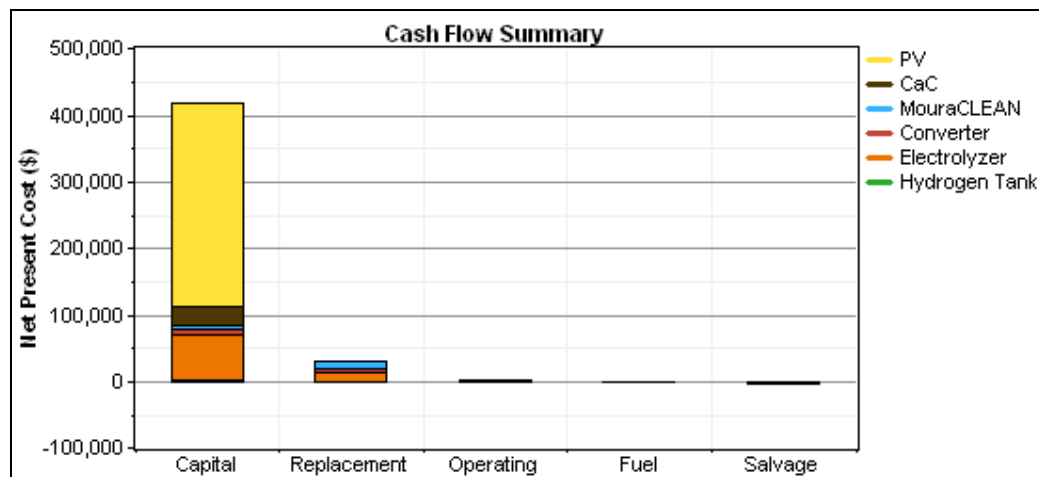


Figura 60 - Custo por material do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

Com todas as características econômicas citadas o preço do kWh fica em média R\$ 5,28. A energia produzida em um ano por este sistema é de 51.069kWh e a produção mensal média pode ser vista na figura 61.

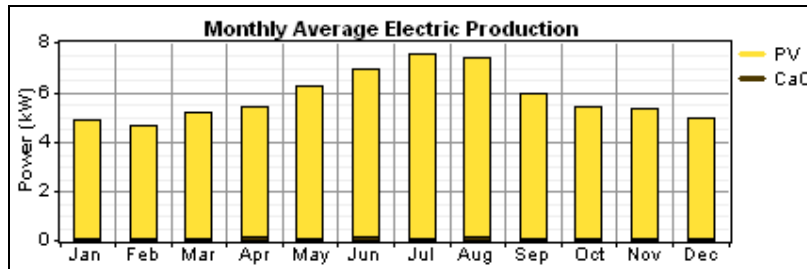


Figura 61 - Produção Mensal Média do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

A carga anual requerida é de 6.564kWh. A carga solicitada pelo eletrolisador foi de 3.718kWh.

A produção de energia elétrica é totalmente dependente dos painéis fotovoltaicos, na figura 62 podemos ver a produção de eletricidade ao longo de um ano dos painéis.

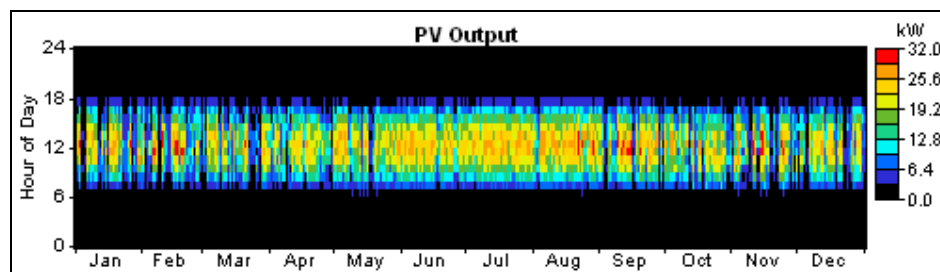


Figura 62 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

E como a célula combustível para este caso funciona similarmente a bateria, pois só ira fornecer energia quando os painéis fotovoltaicos não estiverem em condições de operação, porém para a CaC funcionar depende da bateria como um sinal para seu start inicial, ou seja quando a bateria esta em flutuação e tem uma baixa muito grande em sua capacidade entra em funcionamento a CaC para suprir energia. Na figura 63, podemos visualizar o funcionamento da CaC ao longo de um ano.

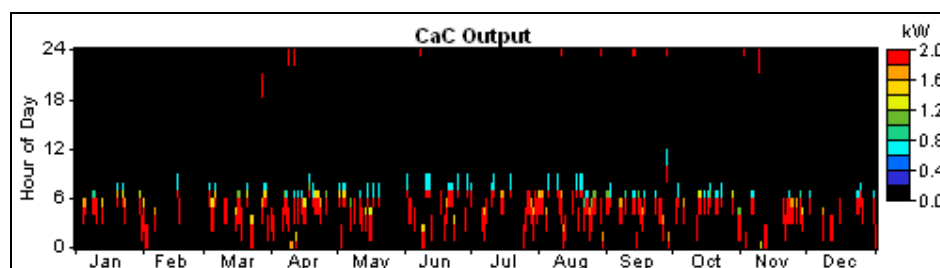


Figura 63 - Produção Mensal da Célula a Combustível do Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

Podemos reparar que a CaC entra em funcionamento depois de um certo tempo em que já anoiteceu, pois nesse período a energia está sendo suprida pelas baterias. Na figura 64 visualizamos o funcionamento das baterias ao longo de um ano.

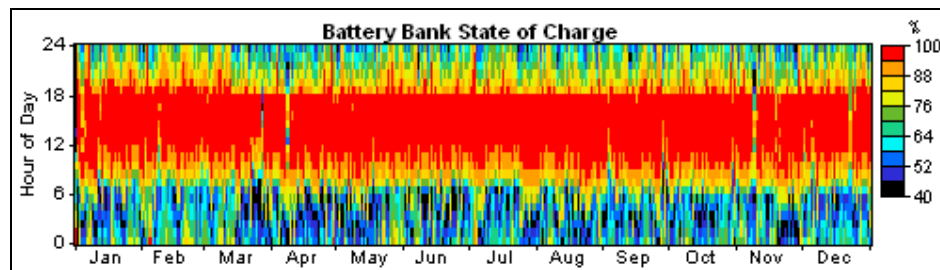


Figura 64 - Descarga das Baterias para o Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

Para este tipo de configuração é necessário que haja armazenagem de hidrogênio para o mesmo ser convertido em energia elétrica. O tanque de hidrogênio tem como característica operacional ao longo do ano de acordo com a figura 65.

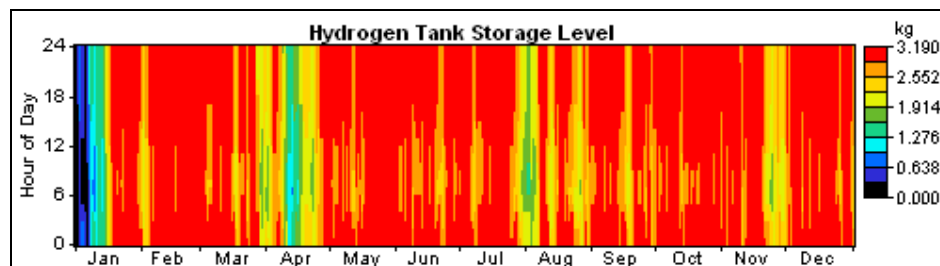


Figura 65 – Nível do Tanque de Hidrogênio para o Sistema PV – Célula a Combustível do CPC

Podemos reparar no gráfico acima que nos períodos de chuva é onde ele mantém o menor nível, pois ele esta constantemente suprindo Hidrogênio para a CaC alimentar as cargas, pois o PV e as baterias não dão conta de suprir. Já no período de seca ele se mantém próximo ao seu nível máximo, pois é onde os painéis estão produzindo muita energia por causa da estiagem.

Este tipo de tecnologia não emite gases que poluem o meio ambiente e não é necessário fazer os descartes das baterias, pois as mesmas funcionam como um gerador de sinal para a CaC.

3.6.5. PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

O resultado obtido nesta simulação PV – CaC aplicado a Vila Campinas, com a utilização do Homer foi, os seguintes equipamentos como podemos verificar na tabela 18.

Tabela 18 - Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

Sistema fotovoltaico (SFV)	22 kW
CaC	3 kW
Bateria	4 de 220Ah
Inversor de frequência Bidirecional	4 kW
Eletrolisador	3,2 kW
Tanque de Hidrogênio	6,37 kg

O custo inicial para esta simulação foi de R\$ 436.200,00 e custo no final de vida útil foi de R\$ 480.509,00. Na tabela 19 podemos visualizar o custo de cada componente e suas trocas.

Tabela 19 - Custo do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

Componente	Capital	Troca de Equipamento	O&M	Total
	(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
PV	231.572,00	0	0	231.572,00
CaC	42.780,00	6.308,00	0	45.229,00
Bateria	4.000,00	11.476,00	2.557,00	17.333,00
Inversor	20.000,00	8.345,00	0	26.792,00
Eletrolisador	131.939,00	26.705,00	0	153.674,00
Tanque de Hidrogênio	5.909,00	0	0	5.909,00
Sistema	436.200,00	52.834,00	2.557,00	480.509,00

Com todas essas características podemos visualizar o gasto por equipamento na figura 66.

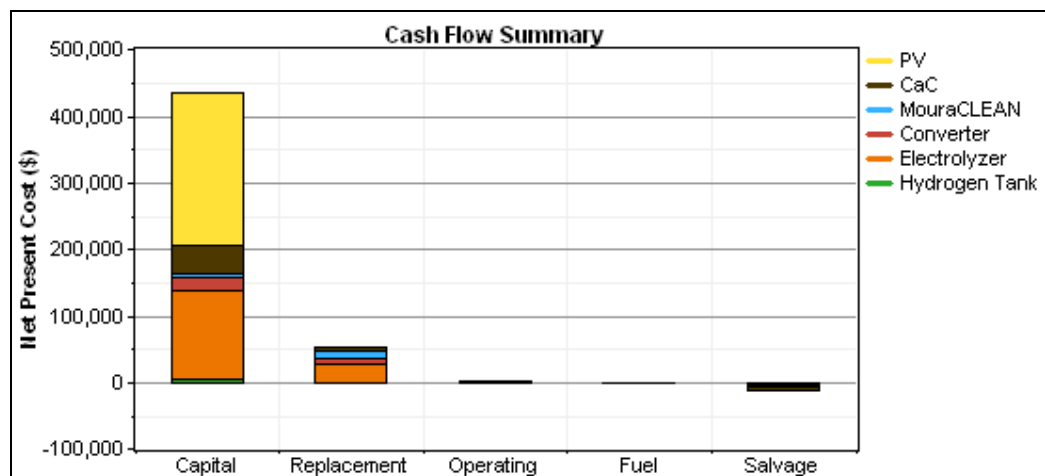


Figura 66 - Custo por material do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

Com todas as características econômicas citadas o preço do kWh fica em média R\$ 8,88. A energia produzida em um ano por este sistema é de 40.215kWh e a produção mensal média pode ser vista na figura 67.

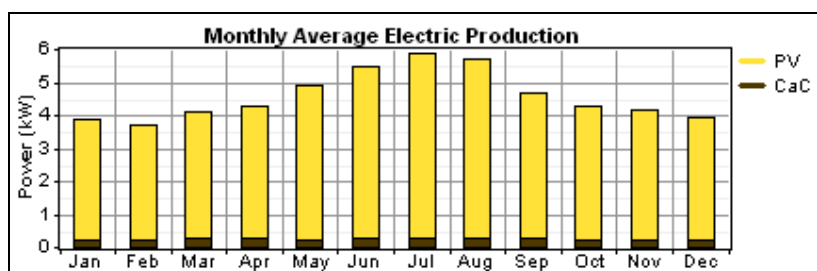


Figura 67 - Produção Mensal Média do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

A carga anual requerida é de 4.230kWh. Mais a carga solicitada pelo eletrolisador que foi de 9.253kWh.

A produção de energia elétrica é totalmente dependente dos painéis fotovoltaicos. Na figura 68 podemos ver a produção de eletricidade ao longo de um ano dos painéis.

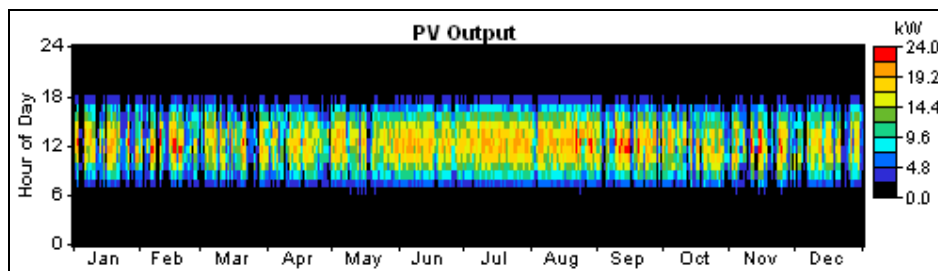


Figura 68 - Produção Mensal dos painéis para o Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

A célula combustível para este caso funciona similarmente a bateria, pois só ira fornecer energia quando os painéis fotovoltaicos não estiverem em condições de operação. Porém, para a CaC funcionar, esta depende da bateria como um sinal para seu start inicial, ou seja quando a bateria está em flutuação e tem uma baixa muito grande em sua capacidade entra em funcionamento a CaC para suprir energia. Na figura 69, podemos visualizar o funcionamento da CaC ao longo de um ano.

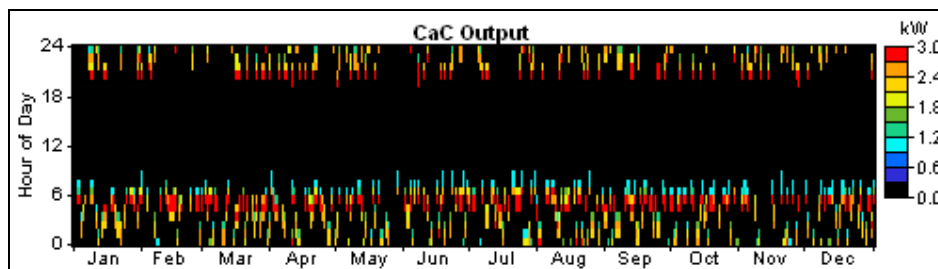


Figura 69 - Produção Mensal da Célula a Combustível do Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

Podemos reparar que a CaC entra em funcionamento depois de um certo tempo em que já anoiteceu, pois nesse período a energia esta sendo suprida pelas baterias. Na figura 70 visualizamos o funcionamento das baterias ao longo de um ano.

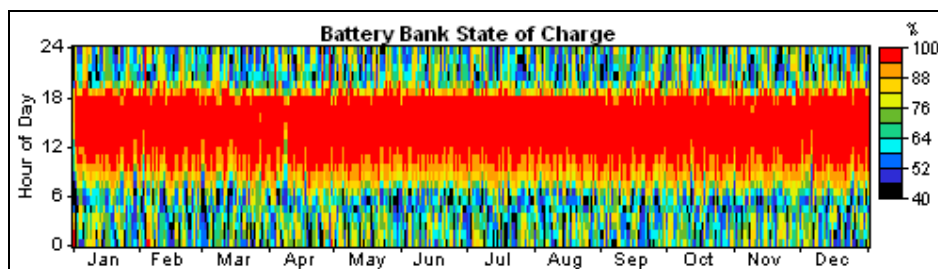


Figura 70 - Descarga das Baterias para o Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

Para este tipo de configuração é necessário que haja armazenagem de hidrogênio para o mesmo ser convertido em energia elétrica. O tanque de hidrogênio tem como característica operacional ao longo do ano de acordo com a figura 71.

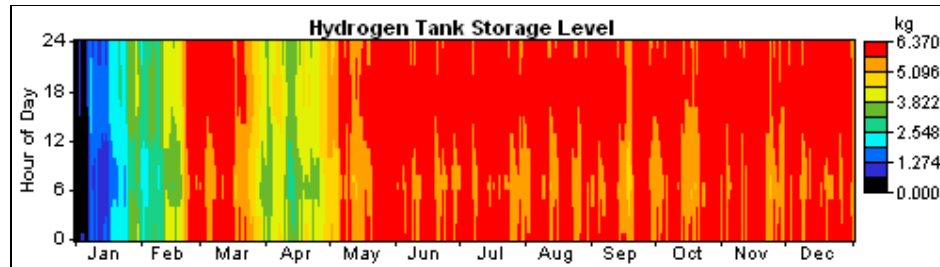


Figura 71 - Nível do Tanque de Hidrogênio para o Sistema PV – Célula a Combustível da Vila Campinas

Podemos observar no gráfico acima que nos períodos de chuva é onde ele mantém o menor nível, pois ele está constantemente suprindo Hidrogênio para a CaC alimentar as cargas, pois o PV e as baterias não estão fornecendo energia elétrica suficiente. Já no período de seca ele se mantém próximo ao seu nível máximo, pois é onde os painéis estão produzindo muita energia devido ao alto índice de insolação.

Este tipo de tecnologia não emite gases que poluem o meio ambiente e não é necessário fazer os descartes das baterias, pois as mesmas funcionam como um gerador de sinal para a CaC.

3.7. Análise de Resultados

Os sistemas considerados envolvem tecnologias diferentes para a produção e armazenagem de energia. Para a produção temos a forma mais utilizada em comunidades isoladas que é o gerador Diesel e também temos o Sistema Fotovoltaico que pode vir a substituir o gerador diesel em futuro próximo por gerar poucos impactos ambientais. Já para a armazenagem de energia temos a maneira convencional através de Baterias e o outro método alternativo que propõe o armazenamento de energia na forma de hidrogênio, que será reconvertido em energia elétrica por meio de uma célula a combustível.

Realizamos duas comparações, a primeira é qual tecnologia estudada é mais viável economicamente e financeiramente. Para a segunda comparamos o CPC com a Vila Campinas na simulação PV – Célula a Combustível para ver as diferenças que pode ocorrer com as mudanças das características de carga.

Na tabela 20 temos os componentes utilizados para cada simulação realizada.

Tabela 20 – Equipamento Utilizado para cada Simulação

Equipamento	PV - Bateria	PV – Diesel – Bateria	Diesel	PV – CaC do CPC	PV – CaC da Vila Campinas
SFV (kW)	13	3	*	29	22
Eletrolisador (kW)	*	*	*	1,6	3,2
CaC (kW)	*	*	*	2	3
Cilin. de H2 (kg)	*	*	*	3,19	6,37
Conversor (kW)	4	2	*	2	4
Qtd. Bateria (220Ah)	16	4	*	4	4
Gerador Diesel (kW)	*	2	4	*	*

Na tabela 21 apresentamos os custos de cada componente por simulação.

Tabela 21 – Custos por Componente

Configuração /Custos	PV - Bateria	PV – Diesel – Bateria	Diesel	PV – CaC do CPC	PV – CaC da Vila Campinas
Inicial	R\$ 172.838,00	R\$ 47.578,00	R\$ 4.000,00	R\$416.703,00	R\$ 436.200,00
Troca de Equipamento	R\$ 54.248,00	R\$ 18.323,00	R\$ 26.965,00	R\$ 29.001,00	R\$ 52.834,00
O&M	R\$ 10.227,00	R\$ 5.125,00	R\$ 21.366,00	R\$ 2.557,00	R\$ 2.557,00
Combustível	R\$ 0,00	R\$ 35.771,00	R\$ 160.686,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
TOTAL	R\$ 232.963,00	R\$ 105.017,00	R\$ 212.950,00	R\$443.101,00	R\$ 480.509,00

Na tabela acima podemos reparar que o custo mais barato ao longo de sua vida útil é a da configuração PV – Diesel – Bateria. Já o que requer menos custo inicial é a configuração Diesel, porém o preço se eleva, pois é necessário um alto custo de O&M e de combustíveis por se tratar de uma máquina rotativa e que necessita de reposição de combustíveis.

O custo por kWh é apresentado na tabela 22.

Tabela 22 – Preço do kWh

Configuração	PV – Bateria	PV – Diesel – Bateria	Diesel	PV – CaC do CPC	PV – CaC da Vila Campinas
Preço do kWh	R\$ 2,77	R\$ 1,25	R\$ 2,53	R\$ 5,28	R\$ 8,88

A configuração que apresenta melhor resultado para o preço do kWh é a PV – Diesel – Bateria. Isso se deve ao fato de ser uma tecnologia de armazenagem e produção no caso do Diesel, são muito conhecida e utilizada pelo mundo. As configurações PV – Bateria e Diesel apresentaram resultados piores que a PV – Diesel – Bateria, pois a configuração Diesel necessita muito de combustível e de manutenção constantemente, já a configuração PV – Bateria é ainda uma tecnologia pouco explorada e os painéis fotovoltaicos ainda possuem preços elevados e como essa configuração requer muito dos painéis faz com que encareça esta tecnologia, elevando assim os custos no final de sua vida útil. Podemos ver que a configuração PV – CaC do CPC teve um valor elevado em comparação as demais tecnologias, isso se deve:

- produto é importado;
- taxa de importação elevada;
- tecnologia nova;
- pouca fabricação;
- falta de linha de produção.

As causas acima são alguns dos principais fatores que elevaram o custo da aplicação desta tecnologia. Com o passar do tempo esta tecnologia deve baixar seu preço, pois as indústrias deverão produzir em maior escala, produção desta tecnologia nacionalmente, redução da taxa de importação deste produto e melhor desenvolvimento tecnológico. Com estas medidas devem tornar esta tecnologia mais competitiva com as demais.

A configuração PV – CaC da Vila Campinas deveria obter um resultado similar ao da configuração PV – CaC do CPC, mas não obteve isso se deve as características de cargas. Podemos reparar na figura 41 que o consumo de energia no horário onde não há inserção de sol é elevado o que faz encarecer os custos com Célula a Combustível e com o Eletrolisador.

Uma das observações que tem de se levar em conta é a quantidade de emissão de poluentes que cada configuração simulada emite e na tabela 23 podemos visualizar este problema.

Tabela 23 – Emissão de Poluentes

Poluente	PV – Bateria (kg/ano)	PV – Diesel (kg/ano)	Diesel (kg/ano)	PV – CaC do CPC (kg/ano)	PV – CaC da Vila Campinas (kg/ano)
Dióxido de carbono	0	3.204	14.392	0	0
Monóxido de carbono	0	7,91	35,5	0,503	1,26
Partículas	0	0,596	2,68	0,037	0,095
Dióxido de enxofre	0	6,43	28,9	0	0
Óxido de nitrogênio	0	70,6	317	4,49	11,2

Podemos ver que as configurações que mais poluem são as que necessitam de combustíveis fósseis, que nos casos estudados é o diesel. Já as configurações que vão PV – CaC tem níveis de emissões desprezíveis.

A configuração PV – Bateria possui nível de emissão igual a zero, porém o descarte das baterias tem que ser feita da maneira adequada. Muitas vezes por se tratar de comunidades isoladas o descarte é feito de maneira inadequada causando assim sérios impactos ao meio ambiente.

4. Conclusão

Os resultados obtidos mostram que Sistemas Híbridos Fotovoltaicos – Célula a Combustível ainda não é competitivo com as outras tecnologias disponíveis no mercado para a energização de comunidades isoladas. Por exemplo, a simulação PV – Célula a Combustível do CPC é 322,4% mais oneroso do que a simulação PV – Diesel – Bateria para a energização da mesma carga. A simulação PV – Diesel – Bateria foi o que obteve melhor resultados das simulações realizadas.

Conseguimos identificar diversos fatores que fez com que se eleva o custo destes sistemas entre eles as altas taxas de importação cobrada pelo governo brasileiro.

Um dos resultados apresentados mostra que a configuração PV – Bateria já é competitiva com a configuração Diesel, porém o seu custo inicial ainda é elevado, mas se dilui com o passar dos anos, pois não são necessárias muitas manutenções e nem de combustíveis de alimentação. E também este tipo de configuração é bem menos poluente ao meio ambiente do que a geração a diesel.

As cargas simuladas interferem no resultado final da simulação como podemos comprovar entre o CPC e a Vila Campinas que mostra uma diferença de custo de 68,1%. Isso se deve à vila campinas ter um consumo maior no horário onde não há inserção de sol encarecendo assim o sistema. Já o CPC tem um consumo baixo neste horário.

Os impactos ambientais causados pelas tecnologias estudadas variam de acordo com a tecnologia estudada. Podemos concluir que todo equipamento que utiliza combustível fóssil gera impacto ambiental já as outras tecnologias estudadas se feito todos os procedimentos de segurança não gera impacto ambiental.

Trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos nesta área são diversos e podemos citar alguns como:

- Análise das tendências de preços para sistemas PV – CaC;
- Utilização de CaC conectado a rede elétrica nos horários de ponta;
- Utilização de Painéis Fotovoltaicos conectados a rede elétrica;
- Estudo dos impactos sociais com a alimentação da rede elétrica em comunidades isoladas.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R.. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

BARBOSA, W. A., BORGES, L. E. P., CORREIA, J. C. Soluções Energéticas para a Amazônia, Eletrificação de Comunidades Isoladas. **Sistemas Híbridos**. MME, 2007

CAVALCANTE, A. W. A., CARVALHO, P. C., LIMA, L. C.. Célula Combustível e Bateria Integrados a Sistema Fotovoltaico. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 26, n. 2, p. 196-206, dez. 2005

COCIAN, L. F. E., SANTOS, J. C. V.; Sistemas Fotovoltaicos: Uma alternativa para a geração de energia elétrica. **Revista Lumière**, julho de 2000.

FONSECA, M. R. M., **Completamente Química**: físico-químico. São Paulo: Editora FTD, 2001.

FURLAN, A. L.. **Análise Comparativa de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaico por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento em Sistemas Energéticos) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008

GTES (Grupo de Trabalho de Energia Solar). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESEB, 1999.

LORA, E. E. S., NASCIMENTO, M. A. R., **Geração Termelétrica**: Planejamento, Projeto e Operação. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

LORENZO, E., **Electricidade Solar**: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos. Madrid: Editora Artes Gráficas Gala, 1994.

KOSOW, I. L., **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 15ª Edição. São Paulo. Editora Globo, 2005.

MESSENGER, R. A., VENTRE, J., **Photovoltaic Systems Engineering** CRC Press, 1999.

NREL – National Renewable Energy Laboratory - Getting Started Guide for HOMER Version 2.1, 2005, disponível em: <https://analysis.nrel.gov/homer/includes/downloads/HOMERGettingStarted210.pdf> acessado em: 15/02/2009.

REIS, L. B., **Geração de Energia Elétrica: Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade**. Barueri: Editora Manole, 2003.

RÜTHER, R.; **Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e O Trabalho do Labsolar nesta Área**. LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar; Departamento de Engenharia Mecânica; Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, 1993.

SCHMIDT, W., **Materiais Elétricos**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1983.

SILVA, S. B., ALBUQUERQUE, F. L., SEVERINO, M. M., OLIVEIRA, M. A. G., SHAYANI, R. A., BARBIERO, A. Sistema Híbrido Fotovoltaico – Célula a Combustível: Estudo de Caso no Centro de Pesquisas Canguçu, Tocantins, Brasil. **XIV Congresso Ibérico e IX Congresso Ibero-americano de Energia Solar**, Madri, p. 811-816, junho de 2008.

SEVERINO, M. M. **Avaliação Técnico-Econômico de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia**. 2008. 335 p. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SPADACIO, D., **Eletrólise Alcalina da Água**. Seminário de Química do Instituto de Química de São Carlos. USP (Universidade de São Paulo), São Carlos, 2006.

UFT – Fundação Universidade Federal do Tocantins, disponível em:
<<http://www.site.uft.edu.br/propesq/pesquisa/centro-de-pesquisa-cangucu.html>>
acessado em: 23/04/2009.

APÊNDICE A – RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – BATERIA

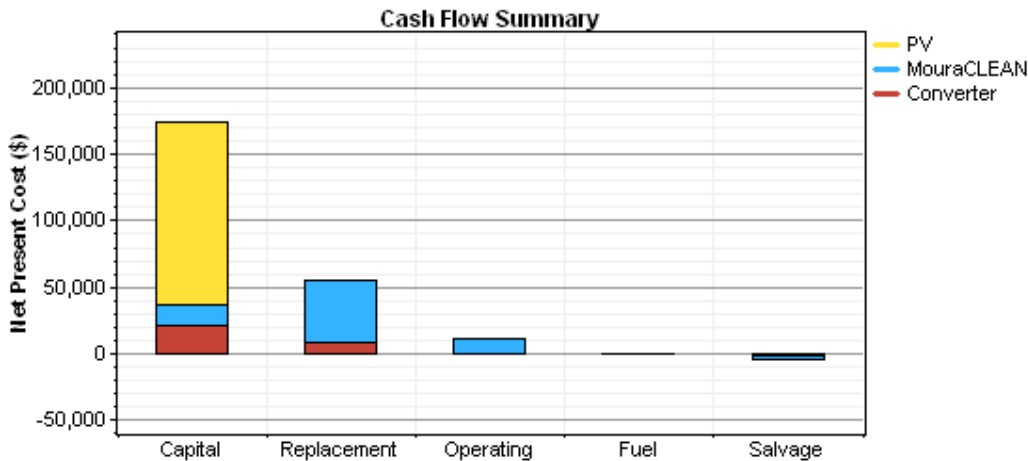
PV bateria

System architecture

PV Array 13 kW
Battery 16 MouraCLEAN
Inverter 4 kW
Rectifier 4 kW

Cost summary

Total net present cost	\$ 232,963
Levelized cost of energy	\$ 2.775/kWh
Operating cost	\$ 4,703/yr

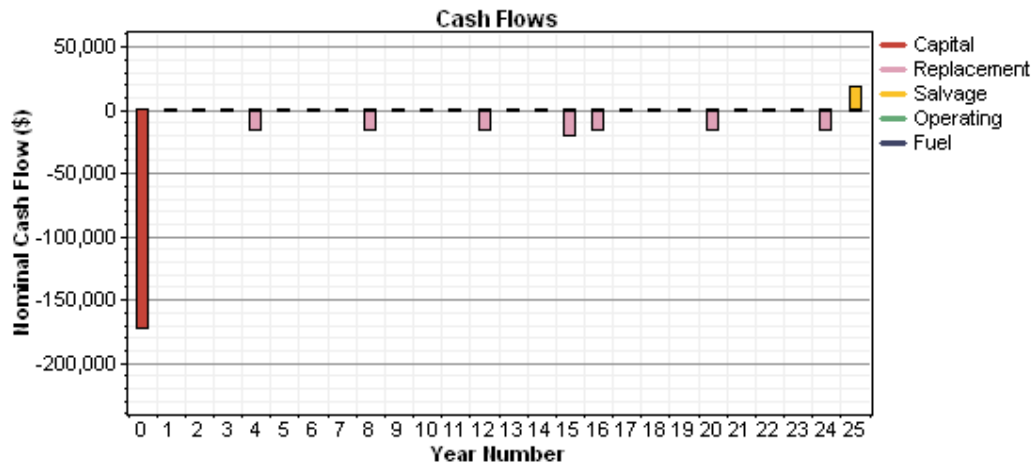


Net Present Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
PV	136,838	0	0	0	0	136,838
MouraCLEAN	16,000	45,903	10,227	0	-2,796	69,333
Converter	20,000	8,345	0	0	-1,553	26,792
System	172,838	54,248	10,227	0	-4,349	232,963

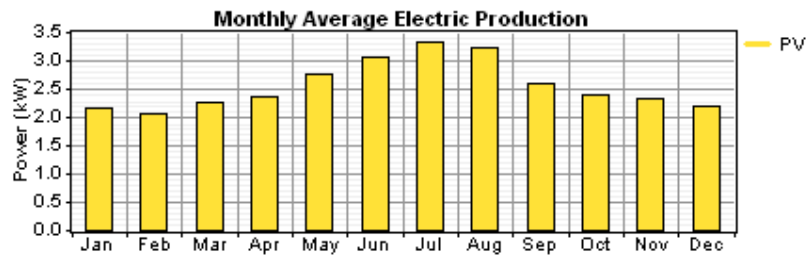
Annualized Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV	10,704	0	0	0	0	10,704
MouraCLEAN	1,252	3,591	800	0	-219	5,424
Converter	1,565	653	0	0	-122	2,096
System	13,521	4,244	800	0	-340	18,224



Electrical

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
PV array	22,505	100%
Total	22,505	100%



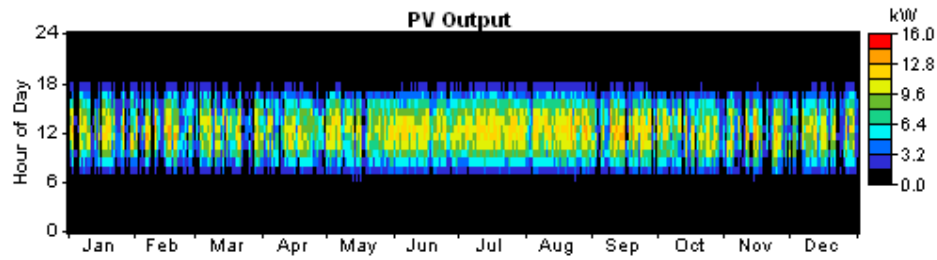
Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
AC primary load	6,568	100%
Total	6,568	100%

Quantity	Value	Units
Excess electricity	14,659	kWh/yr
Unmet load	1.82	kWh/yr
Capacity shortage	1.82	kWh/yr
Renewable fraction	1.000	

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	13.0	kW
Mean output	2.57	kW

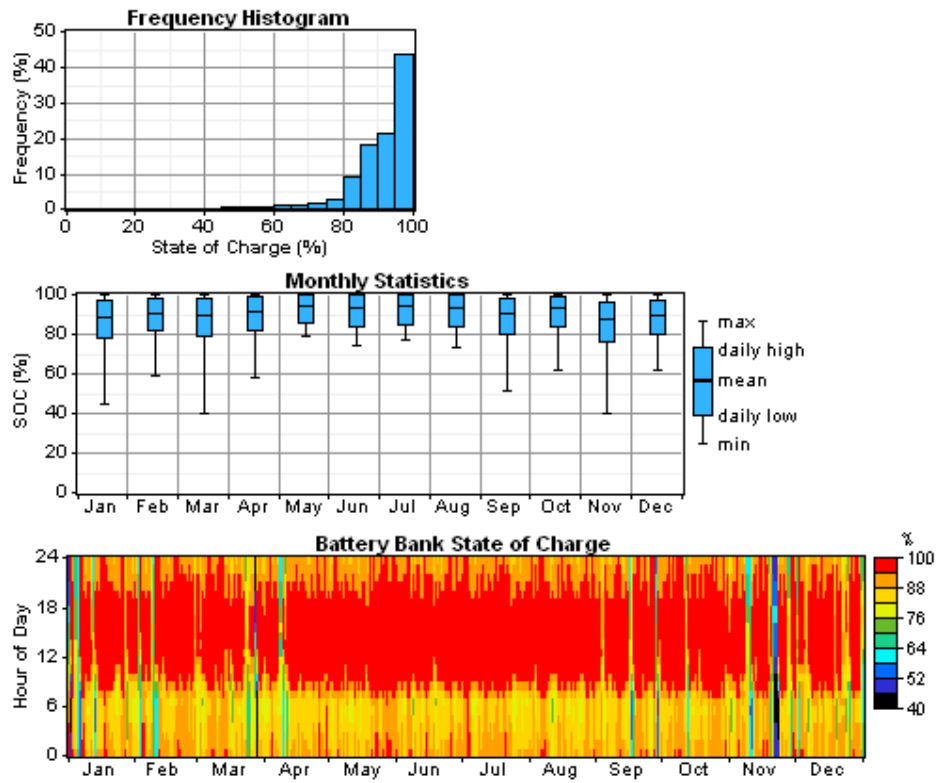
Mean output	61.7	kWh/d
Capacity factor	19.8	%
Total production	22,505	kWh/yr
Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	14.0	kW
PV penetration	343	%
Hours of operation	4,383	hr/yr
Levelized cost	0.476	\$/kWh



Battery

Quantity	Value	
String size	4	
Strings in parallel	4	
Batteries	16	
Bus voltage (V)	48	
Quantity	Value	Units
Nominal capacity	42.2	kWh
Usable nominal capacity	25.3	kWh
Autonomy	33.8	hr
Lifetime throughput	154,320	kWh
Battery wear cost	0.116	\$/kWh
Average energy cost	0.000	\$/kWh
Quantity	Value	Units
Energy in	2,792	kWh/yr
Energy out	2,244	kWh/yr
Storage depletion	11.6	kWh/yr
Losses	536	kWh/yr

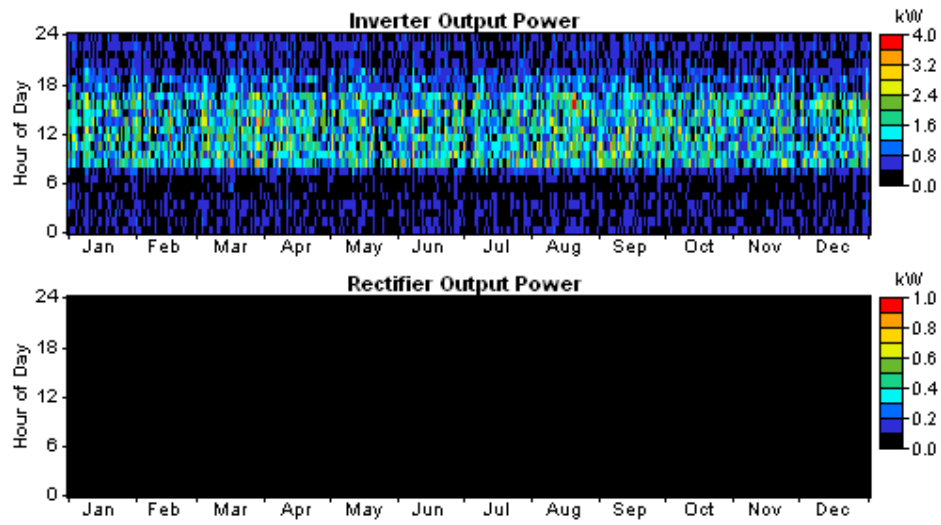
Annual throughput	2,509	kWh/yr
Expected life	4.00	yr



Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	4.00	4.00	kW
Mean output	0.75	0.00	kW
Minimum output	0.00	0.00	kW
Maximum output	3.87	0.00	kW
Capacity factor	18.7	0.0	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	8,353	0	hrs/yr
Energy in	7,298	0	kWh/yr
Energy out	6,568	0	kWh/yr
Losses	730	0	kWh/yr



Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	0
Carbon monoxide	0
Unburned hydrocarbons	0
Particulate matter	0
Sulfur dioxide	0
Nitrogen oxides	0

APÊNDICE B - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – DIESEL – BATERIA

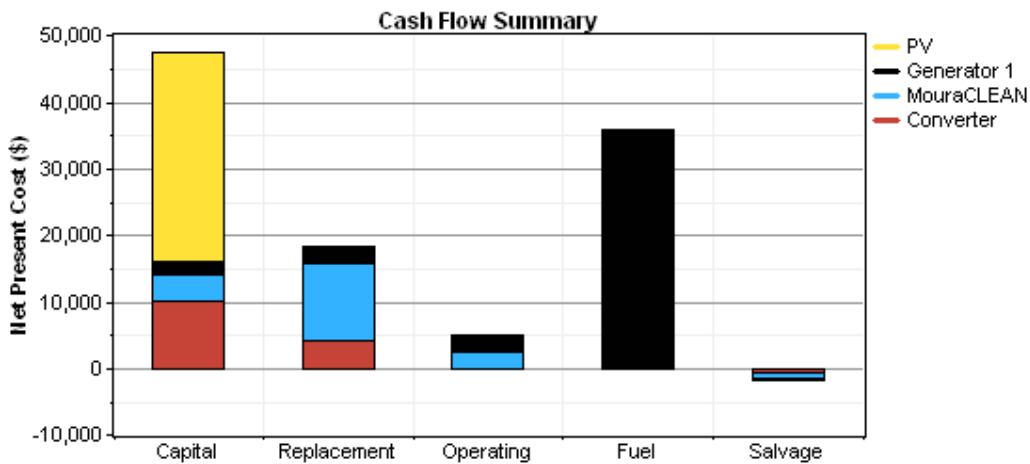
PV – Diesel – Bateria

System architecture

PV Array	3 kW
Generator 1	2 kW
Battery	4 MouraCLEAN
Inverter	2 kW
Rectifier	2 kW
Dispatch strategy	Cycle Charging

Cost summary

Total net present cost	\$ 105,017
Levelized cost of energy	\$ 1.250/kWh
Operating cost	\$ 4,493/yr



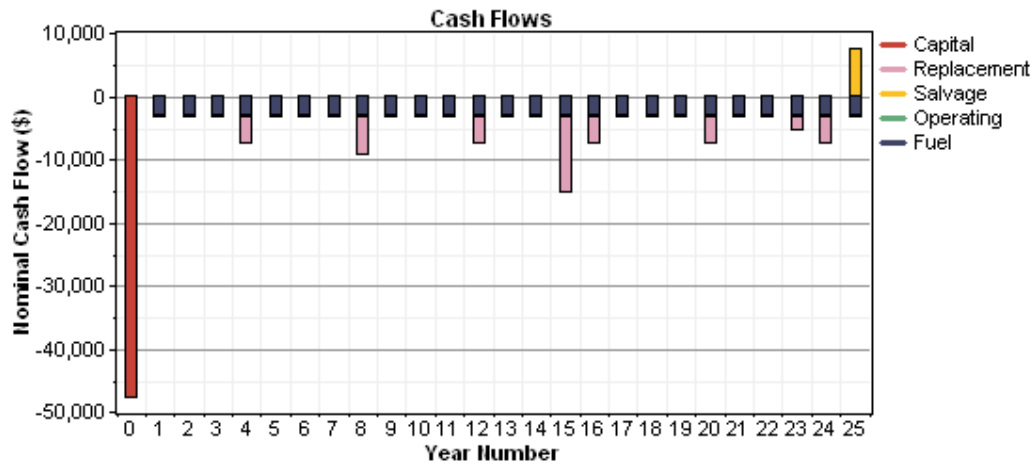
Net Present Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
PV	31,578	0	0	0	0	31,578
Generator 1	2,000	2,675	2,568	35,771	-304	42,710
MouraCLEAN	4,000	11,476	2,557	0	-699	17,333
Converter	10,000	4,173	0	0	-777	13,396
System	47,578	18,323	5,125	35,771	-1,779	105,017

Annualized Costs

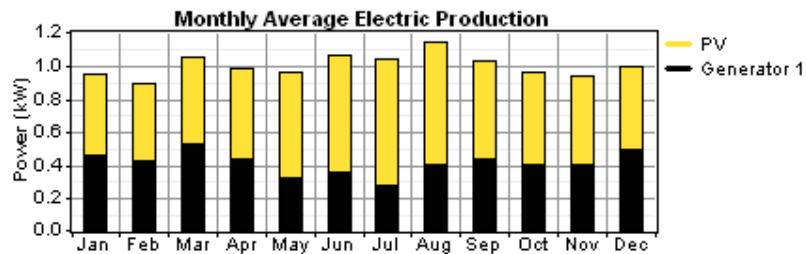
Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV	2,470	0	0	0	0	2,470

Generator 1	156	209	201	2,798	-24	3,341
MouraCLEAN	313	898	200	0	-55	1,356
Converter	782	326	0	0	-61	1,048
System	3,722	1,433	401	2,798	-139	8,215



Electrical

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
PV array	5,193	59%
Generator 1	3,581	41%
Total	8,774	100%



Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
AC primary load	6,570	100%
Total	6,570	100%

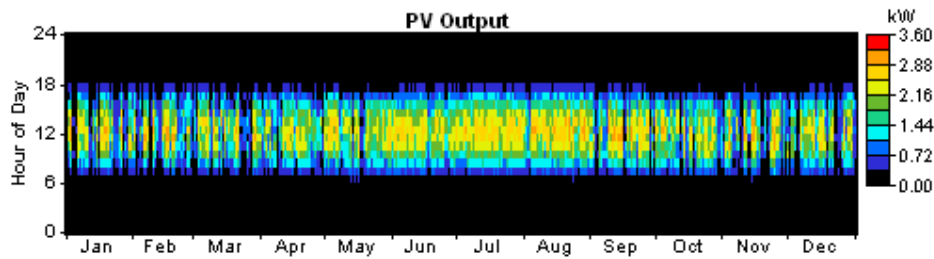
Quantity	Value	Units
Excess electricity	815	kWh/yr
Unmet load	0.0686	kWh/yr
Capacity shortage	0.0686	kWh/yr

Renewable fraction	0.592	
--------------------	-------	--

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	3.00	kW
Mean output	0.593	kW
Mean output	14.2	kWh/d
Capacity factor	19.8	%
Total production	5,193	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	3.23	kW
PV penetration	79.0	%
Hours of operation	4,383	hr/yr
Levelized cost	0.476	\$/kWh

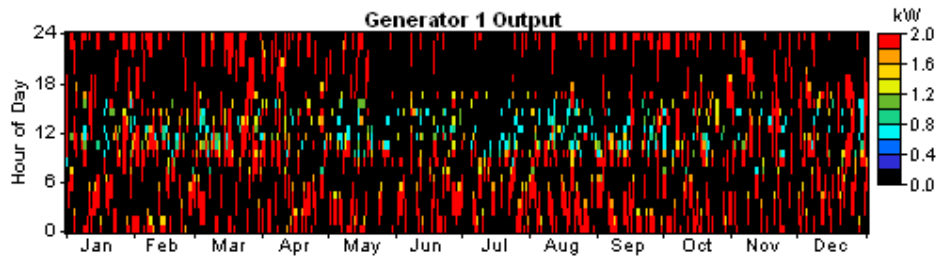


Generator 1

Quantity	Value	Units
Hours of operation	2,009	hr/yr
Number of starts	679	starts/yr
Operational life	7.47	yr
Capacity factor	20.4	%
Fixed generation cost	0.601	\$/hr
Marginal generation cost	0.575	\$/kWhyr

Quantity	Value	Units
Electrical production	3,581	kWh/yr
Mean electrical output	1.78	kW
Min. electrical output	0.600	kW

Max. electrical output	2.00	kW
Quantity	Value	Units
Fuel consumption	1,217	L/yr
Specific fuel consumption	0.340	L/kWh
Fuel energy input	11,972	kWh/yr
Mean electrical efficiency	29.9	%

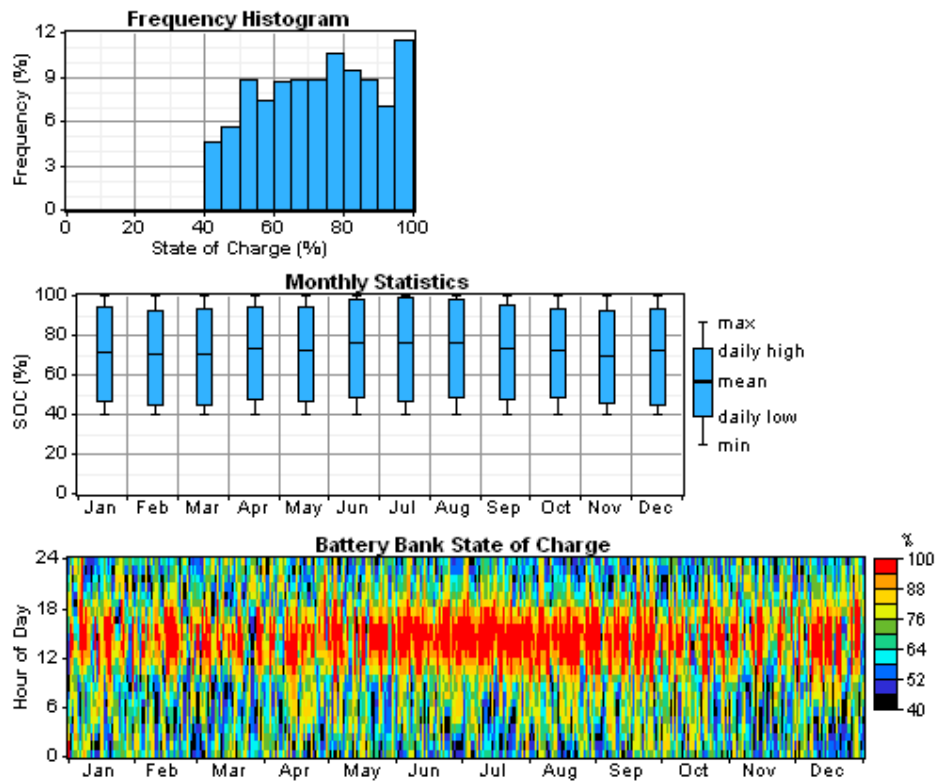


Battery

Quantity	Value
String size	4
Strings in parallel	1
Batteries	4
Bus voltage (V)	48

Quantity	Value	Units
Nominal capacity	10.6	kWh
Usable nominal capacity	6.34	kWh
Autonomy	8.45	hr
Lifetime throughput	38,580	kWh
Battery wear cost	0.116	\$/kWh
Average energy cost	0.497	\$/kWh

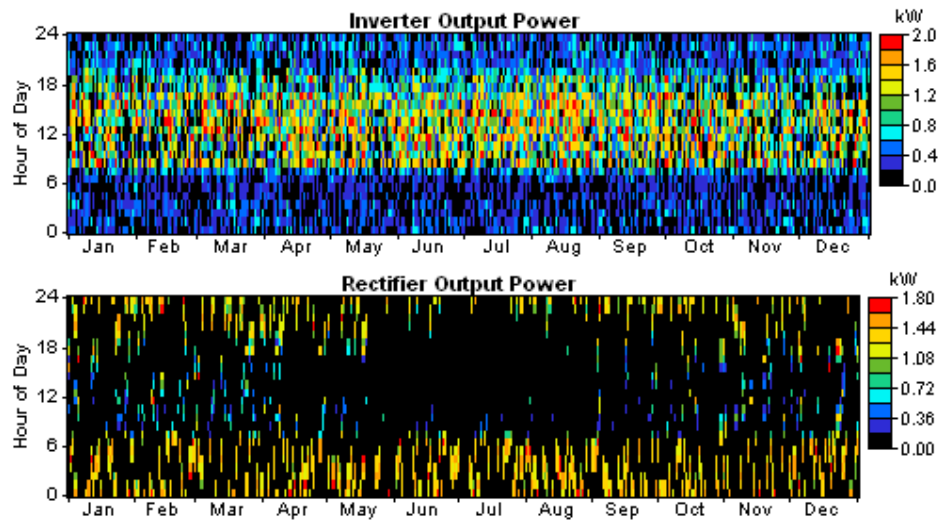
Quantity	Value	Units
Energy in	2,906	kWh/yr
Energy out	2,330	kWh/yr
Storage depletion	5.67	kWh/yr
Losses	570	kWh/yr
Annual throughput	2,605	kWh/yr
Expected life	4.00	yr



Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	2.00	2.00	kW
Mean output	0.55	0.18	kW
Minimum output	0.00	0.00	kW
Maximum output	2.00	1.70	kW
Capacity factor	27.6	8.9	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	6,974	1,412	hrs/yr
Energy in	5,368	1,840	kWh/yr
Energy out	4,832	1,564	kWh/yr
Losses	537	276	kWh/yr



Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	3,204
Carbon monoxide	7.91
Unburned hydrocarbons	0.876
Particulate matter	0.596
Sulfur dioxide	6.43
Nitrogen oxides	70.6

APÊNDICE C - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO DIESEL

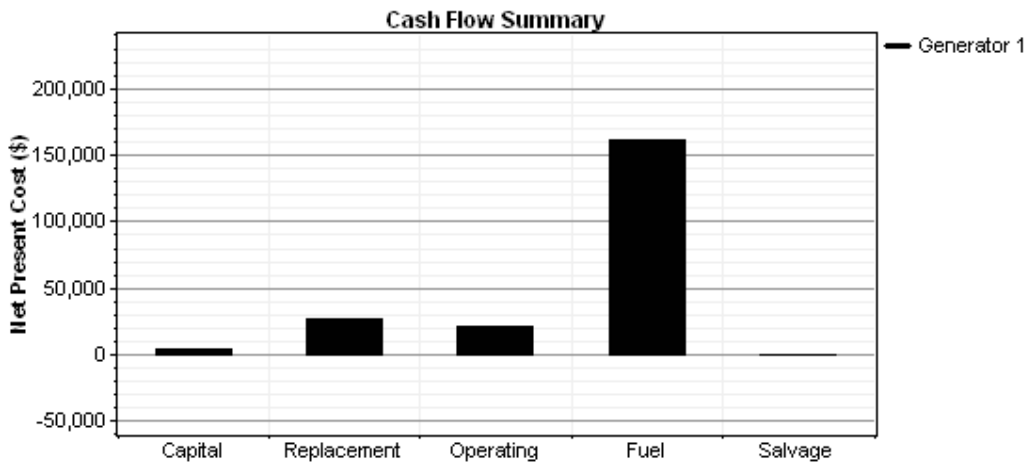
Diesel

System architecture

Generator 14 kW

Cost summary

Total net present cost	\$ 212,950
Levelized cost of energy	\$ 2.536/kWh
Operating cost	\$ 16,345/yr

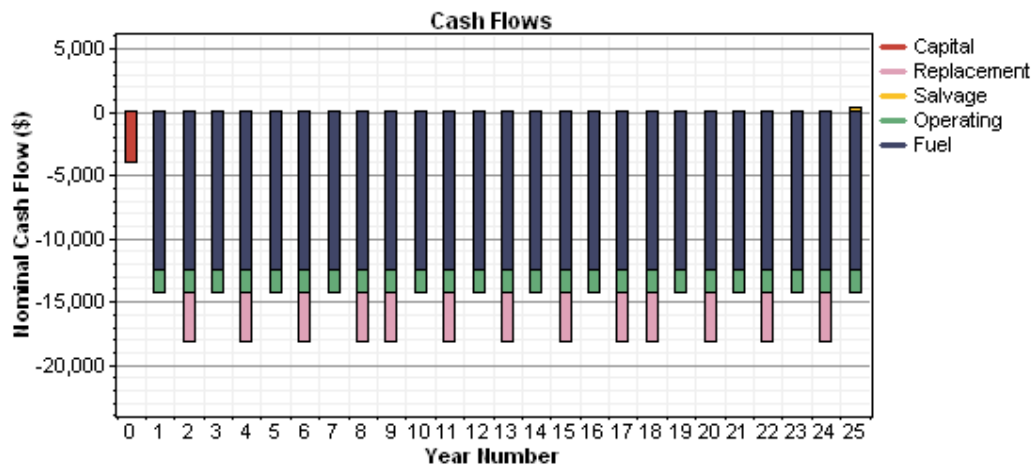


Net Present Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
Generator 1	4,000	26,965	21,366	160,686	-67	212,950
System	4,000	26,965	21,366	160,686	-67	212,950

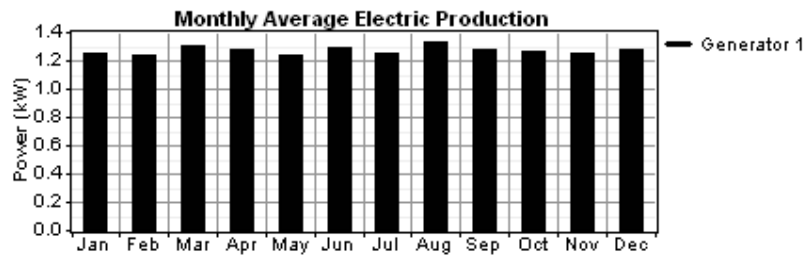
Annualized Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
Generator 1	313	2,109	1,671	12,570	-5	16,658
System	313	2,109	1,671	12,570	-5	16,658



Electrical

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
Generator 1	11,163	100%
Total	11,163	100%



Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	
AC primary load	6,570	100%
Total	6,570	100%

Quantity	Value	Units
Excess electricity	4,592	kWh/yr
Unmet load	0.00	kWh/yr
Capacity shortage	0.00	kWh/yr
Renewable fraction	0.000	

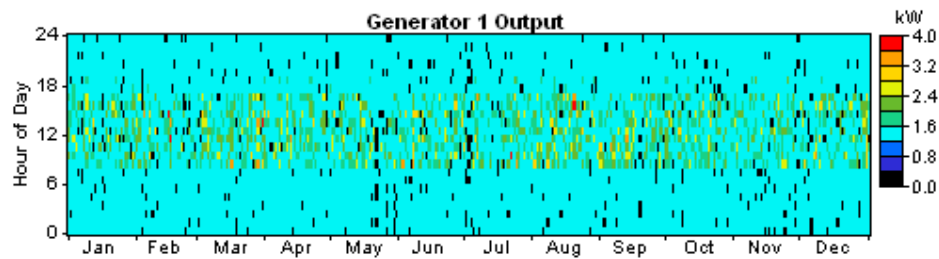
Generator 1

Quantity	Value	Units
Hours of operation	8,357	hr/yr
Number of starts	364	starts/yr

Operational life	1.79	yr
Capacity factor	31.9	%
Fixed generation cost	1.20	\$/hr
Marginal generation cost	0.575	\$/kWh _{yr}

Quantity	Value	Units
Electrical production	11,163	kWh/yr
Mean electrical output	1.34	kW
Min. electrical output	1.20	kW
Max. electrical output	3.87	kW

Quantity	Value	Units
Fuel consumption	5,465	L/yr
Specific fuel consumption	0.490	L/kWh
Fuel energy input	53,777	kWh/yr
Mean electrical efficiency	20.8	%



Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	14,392
Carbon monoxide	35.5
Unburned hydrocarbons	3.93
Particulate matter	2.68
Sulfur dioxide	28.9
Nitrogen oxides	317

APÊNDICE D - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – CAC DO CPC

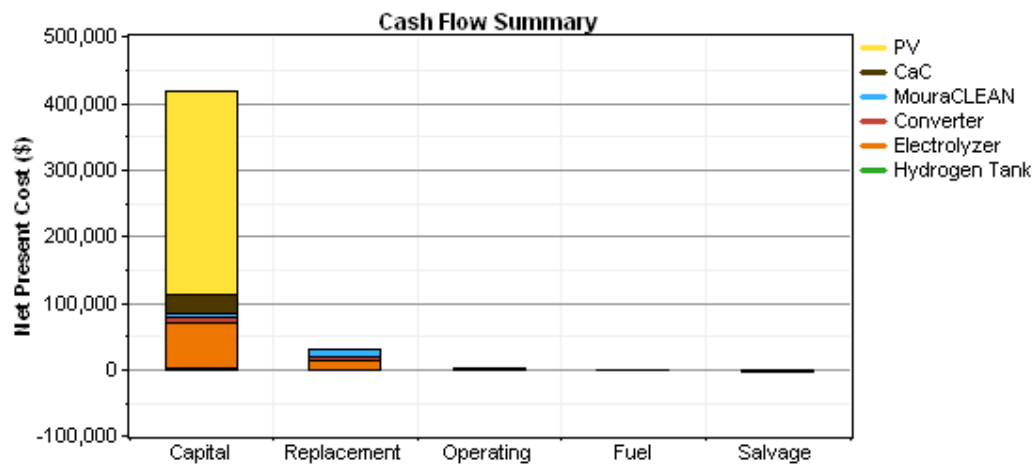
PV – CaC do CPC

System architecture

PV Array	29 kW
CaC	2 kW
Battery	4 MouraCLEAN
Inverter	2 kW
Rectifier	2 kW
Electrolyzer	1.6 kW
Hydrogen Tank	3.19 kg
Dispatch strategy Cycle Charging	

Cost summary

Total net present cost	\$ 443,100
Levelized cost of energy	\$ 5.281/kWh
Operating cost	\$ 2,065/yr

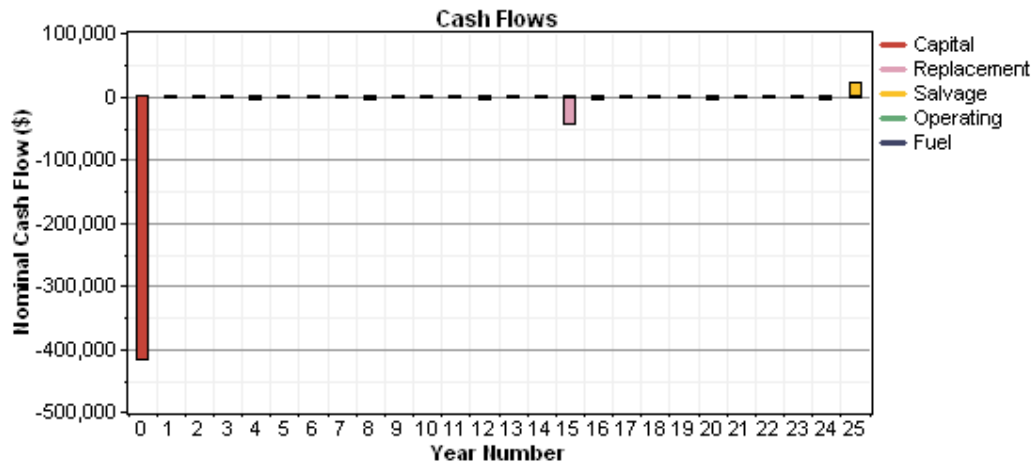


Net Present Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
PV	305,254	0	0	0	0	305,254
CaC	28,520	0	0	0	-1,199	27,321
MouraCLEAN	4,000	11,476	2,557	0	-699	17,333
Converter	10,000	4,173	0	0	-777	13,396
Electrolyzer	65,970	13,352	0	0	-2,485	76,837
Hydrogen Tank	2,959	0	0	0	0	2,959
System	416,703	29,001	2,557	0	-5,160	443,101

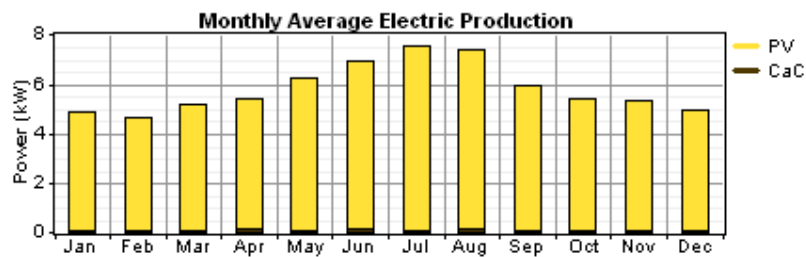
Annualized Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV	23,879	0	0	0	0	23,879
CaC	2,231	0	0	0	-94	2,137
MouraCLEAN	313	898	200	0	-55	1,356
Converter	782	326	0	0	-61	1,048
Electrolyzer	5,161	1,045	0	0	-194	6,011
Hydrogen Tank	231	0	0	0	0	231
System	32,597	2,269	200	0	-404	34,662



Electrical

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
PV array	50,202	98%
CaC	866	2%
Total	51,069	100%



Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	

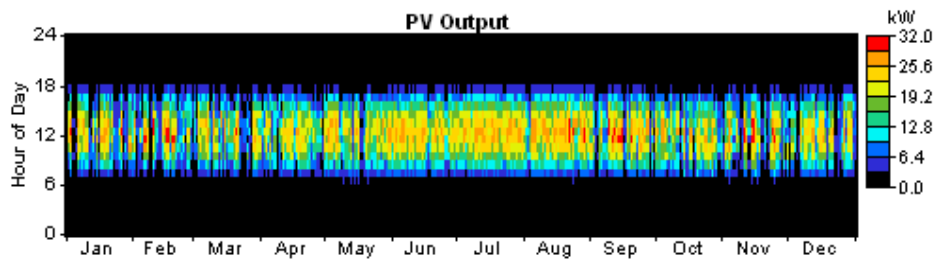
AC primary load	6,564	64%
Electrolyzer load	3,718	36%
Total	10,281	100%

Quantity	Value	Units
Excess electricity	39,836	kWh/yr
Unmet load	6.36	kWh/yr
Capacity shortage	6.36	kWh/yr
Renewable fraction	1.000	

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	29.0	kW
Mean output	5.73	kW
Mean output	138	kWh/d
Capacity factor	19.8	%
Total production	50,202	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	31.2	kW
PV penetration	764	%
Hours of operation	4,383	hr/yr
Levelized cost	0.476	\$/kWh



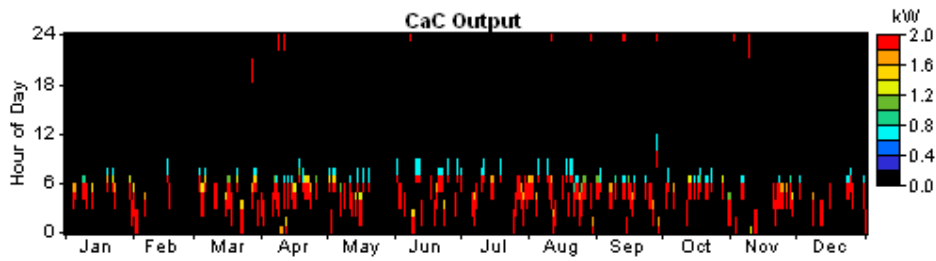
CaC

Quantity	Value	Units
Hours of operation	506	hr/yr
Number of starts	160	starts/yr
Operational life	39.5	yr

Capacity factor	4.94	%
Fixed generation cost	0.700	\$/hr
Marginal generation cost	0.00	\$/kWhyr

Quantity	Value	Units
Electrical production	866	kWh/yr
Mean electrical output	1.71	kW
Min. electrical output	0.600	kW
Max. electrical output	2.00	kW

Quantity	Value	Units
Hydrogen consumption	77.4	kg/yr
Specific fuel consumption	0.089	kg/kWh
Fuel energy input	2,579	kWh/yr
Mean electrical efficiency	33.6	%



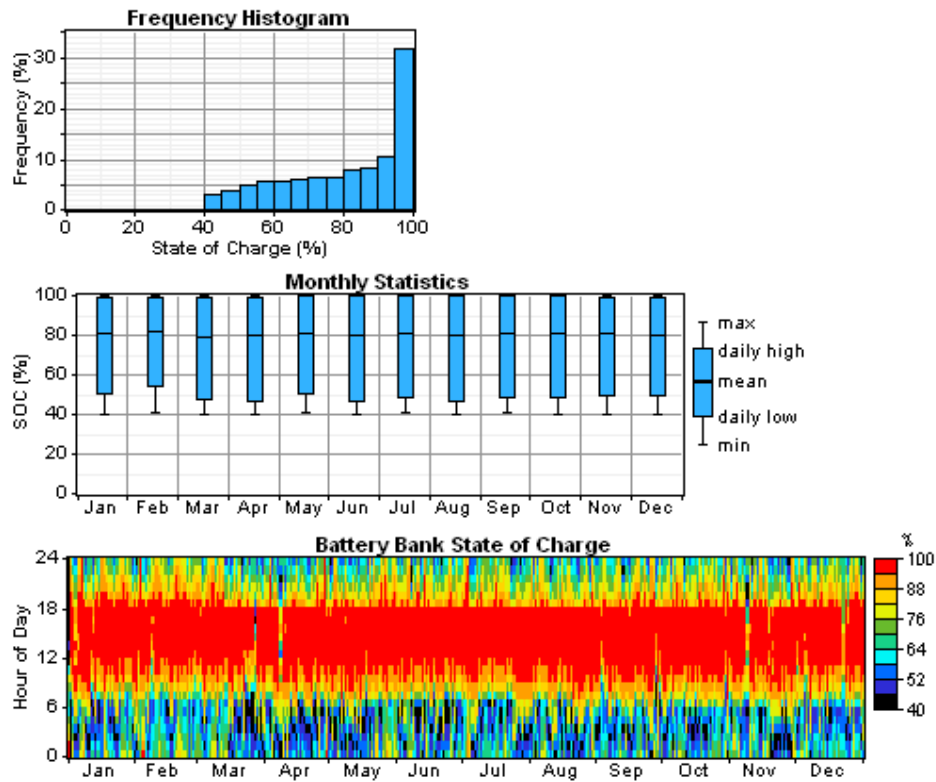
Battery

Quantity	Value
String size	4
Strings in parallel	1
Batteries	4
Bus voltage (V)	48

Quantity	Value	Units
Nominal capacity	10.6	kWh
Usable nominal capacity	6.34	kWh
Autonomy	8.45	hr
Lifetime throughput	38,580	kWh
Battery wear cost	0.116	\$/kWh
Average energy cost	0.000	\$/kWh

Quantity	Value	Units
----------	-------	-------

Energy in	2,323	kWh/yr
Energy out	1,862	kWh/yr
Storage depletion	3.70	kWh/yr
Losses	458	kWh/yr
Annual throughput	2,082	kWh/yr
Expected life	4.00	yr

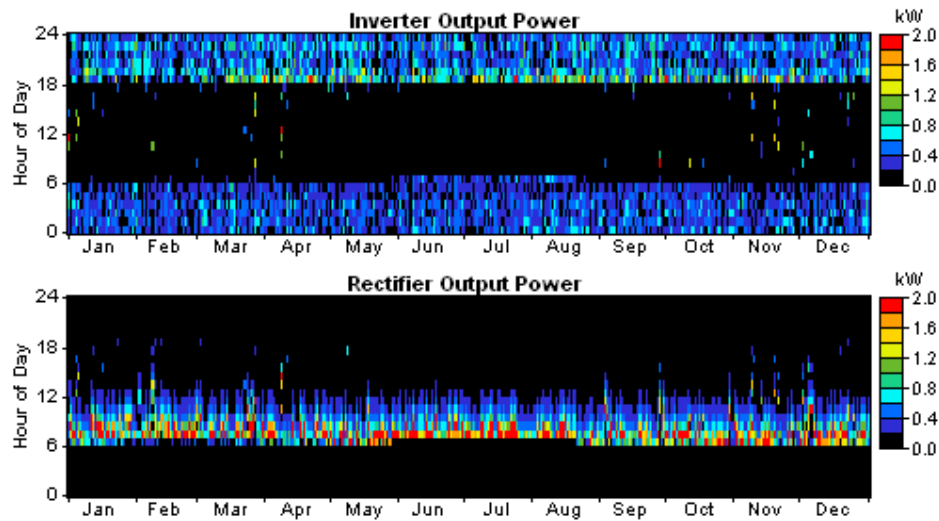


Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	2.00	2.00	kW
Mean output	0.21	0.19	kW
Minimum output	0.00	0.00	kW
Maximum output	2.00	1.97	kW
Capacity factor	10.4	9.3	%

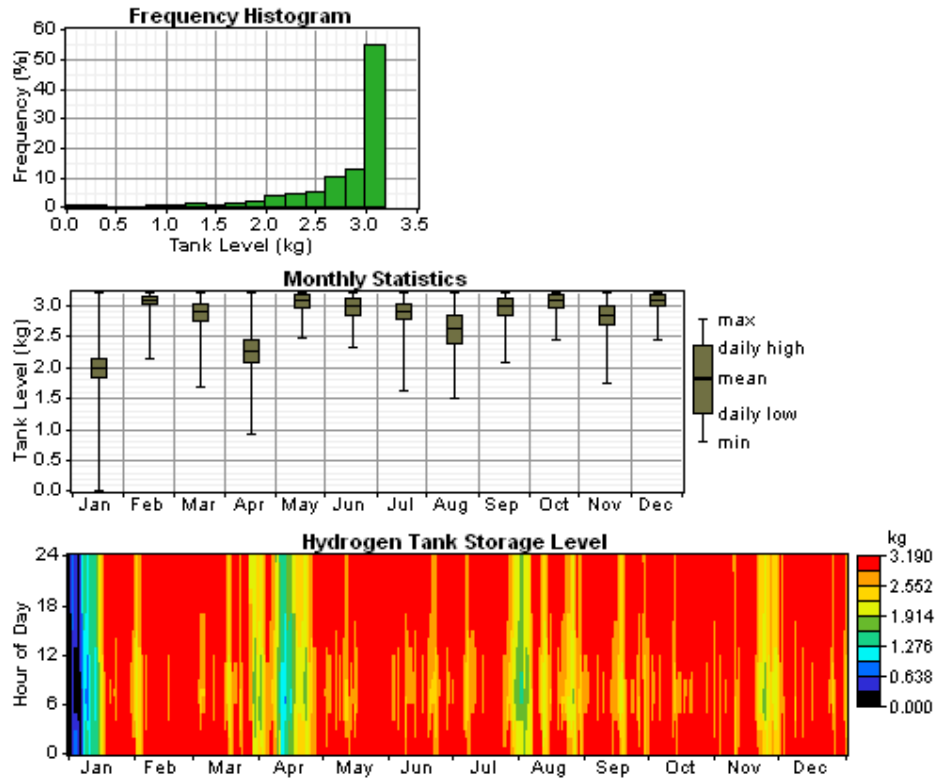
Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	4,346	4,206	hrs/yr
Energy in	2,032	1,914	kWh/yr
Energy out	1,829	1,627	kWh/yr

Losses	203	287	kWh/yr
--------	-----	-----	--------



HydrogenTank

Variable	Value	Units
Hydrogen production	80	kg/yr
Hydrogen consumption	77.4	kg/yr
Hydrogen tank autonomy	142	hours



Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	-0.79
Carbon monoxide	0.503
Unburned hydrocarbons	0.0557
Particulate matter	0.0379
Sulfur dioxide	0
Nitrogen oxides	4.49

APÊNDICE E - RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PV – CAC DA VILA CAMPINAS

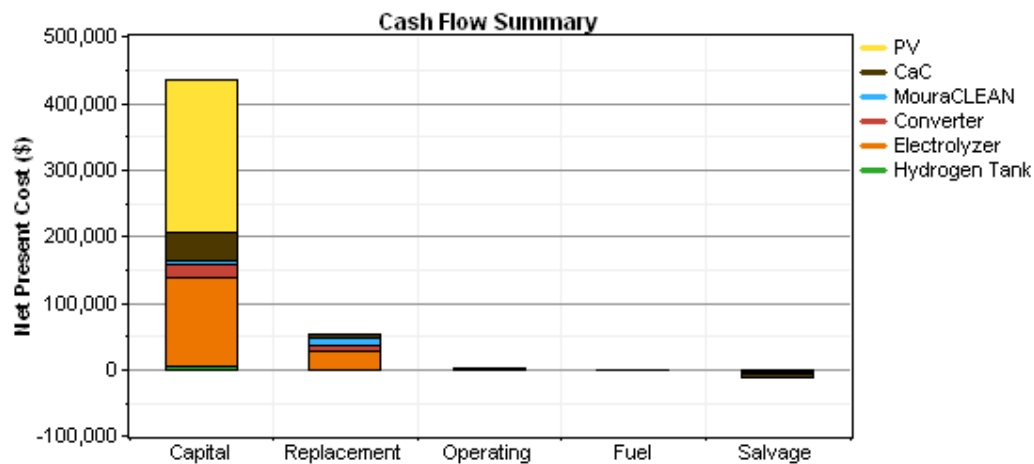
PV – CaC da Vila Campinas

System architecture

PV Array	22 kW
CaC	3 kW
Battery	4 MouraCLEAN
Inverter	4 kW
Rectifier	4 kW
Electrolyzer	3.2 kW
Hydrogen Tank	6.37 kg
Dispatch strategy Cycle Charging	

Cost summary

Total net present cost	\$ 480,509
Levelized cost of energy	\$ 8.886/kWh
Operating cost	\$ 3,466/yr

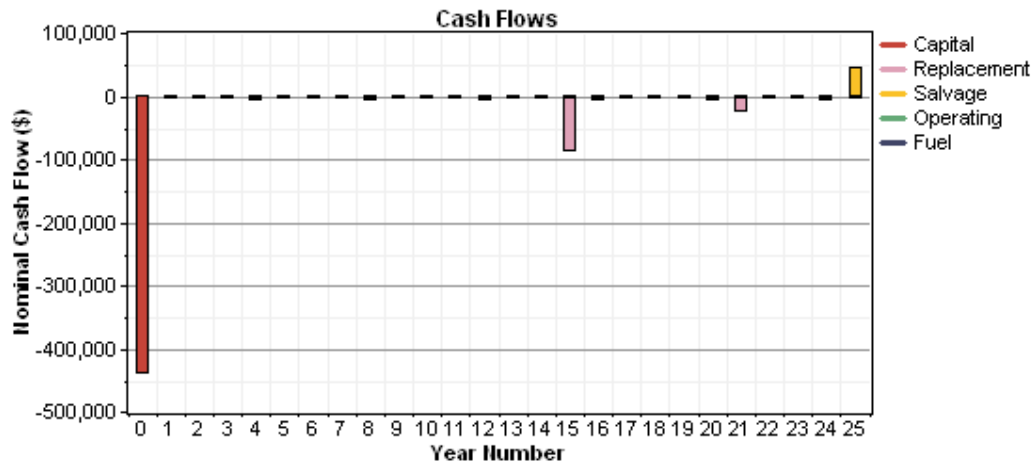


Net Present Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
PV	231,572	0	0	0	0	231,572
CaC	42,780	6,308	0	0	-3,859	45,229
MouraCLEAN	4,000	11,476	2,557	0	-699	17,333
Converter	20,000	8,345	0	0	-1,553	26,792
Electrolyzer	131,939	26,705	0	0	-4,971	153,674
Hydrogen Tank	5,909	0	0	0	0	5,909
System	436,200	52,834	2,557	0	-11,082	480,509

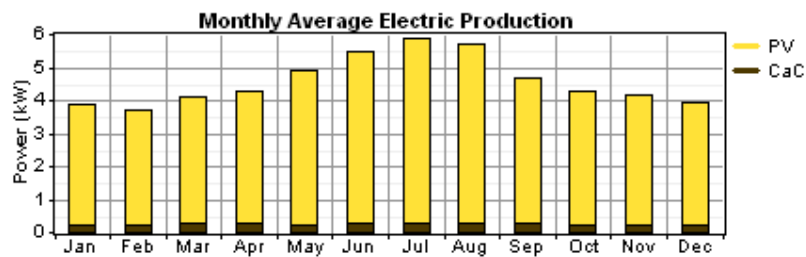
Annualized Costs

Component	Capital	Replacement	O&M	Fuel	Salvage	Total
	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)	(\$/yr)
PV	18,115	0	0	0	0	18,115
CaC	3,347	493	0	0	-302	3,538
MouraCLEAN	313	898	200	0	-55	1,356
Converter	1,565	653	0	0	-122	2,096
Electrolyzer	10,321	2,089	0	0	-389	12,021
Hydrogen Tank	462	0	0	0	0	462
System	34,123	4,133	200	0	-867	37,589



Electrical

Component	Production	Fraction
	(kWh/yr)	
PV array	38,085	95%
CaC	2,131	5%
Total	40,215	100%



Load	Consumption	Fraction
	(kWh/yr)	

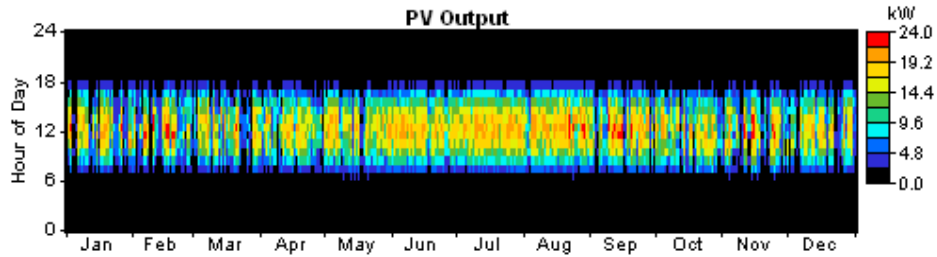
AC primary load	4,230	31%
Electrolyzer load	9,253	69%
Total	13,482	100%

Quantity	Value	Units
Excess electricity	25,585	kWh/yr
Unmet load	4.14	kWh/yr
Capacity shortage	4.14	kWh/yr
Renewable fraction	1.000	

PV

Quantity	Value	Units
Rated capacity	22.0	kW
Mean output	4.35	kW
Mean output	104	kWh/d
Capacity factor	19.8	%
Total production	38,085	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum output	0.00	kW
Maximum output	23.7	kW
PV penetration	899	%
Hours of operation	4,383	hr/yr
Levelized cost	0.476	\$/kWh



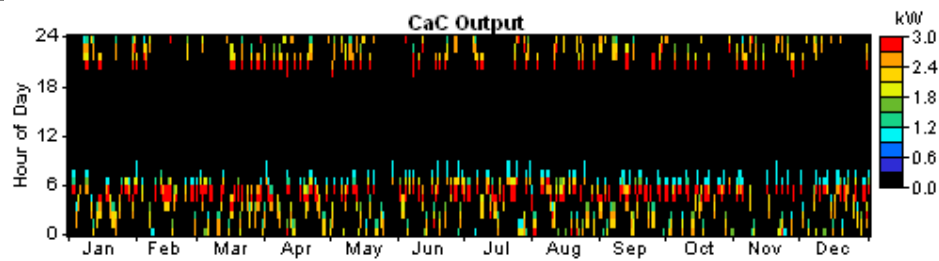
CaC

Quantity	Value	Units
Hours of operation	969	hr/yr
Number of starts	337	starts/yr
Operational life	20.6	yr

Capacity factor	8.11	%
Fixed generation cost	1.05	\$/hr
Marginal generation cost	0.00	\$/kWhyr

Quantity	Value	Units
Electrical production	2,131	kWh/yr
Mean electrical output	2.20	kW
Min. electrical output	0.900	kW
Max. electrical output	3.00	kW

Quantity	Value	Units
Hydrogen consumption	194	kg/yr
Specific fuel consumption	0.091	kg/kWh
Fuel energy input	6,457	kWh/yr
Mean electrical efficiency	33.0	%



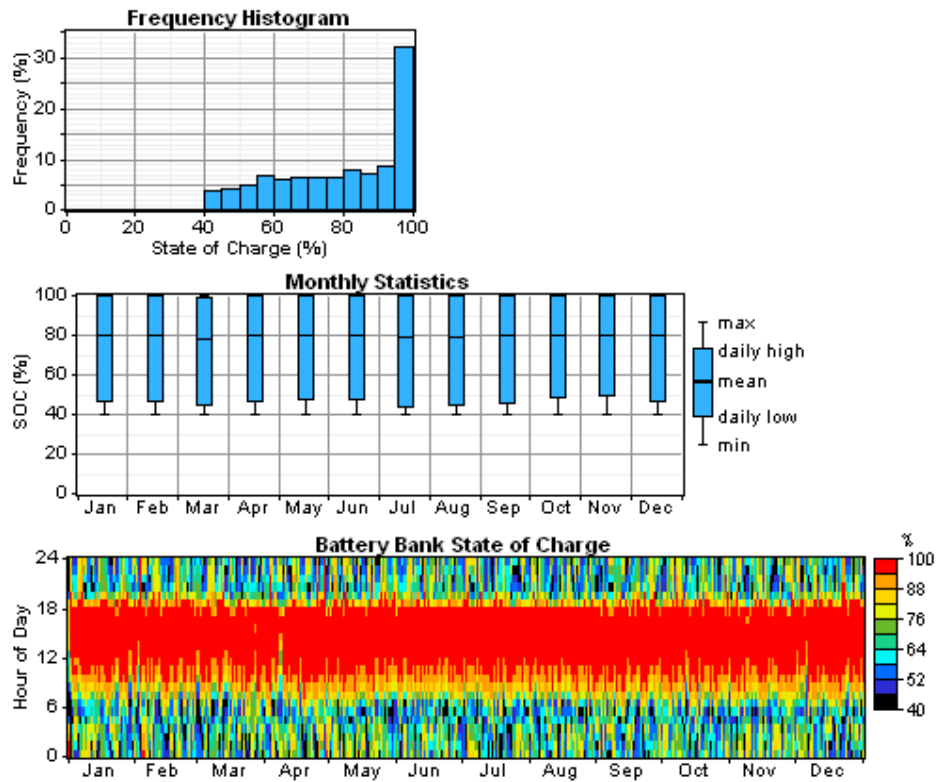
Battery

Quantity	Value
String size	4
Strings in parallel	1
Batteries	4
Bus voltage (V)	48

Quantity	Value	Units
Nominal capacity	10.6	kWh
Usable nominal capacity	6.34	kWh
Autonomy	13.1	hr
Lifetime throughput	38,580	kWh
Battery wear cost	0.116	\$/kWh
Average energy cost	0.000	\$/kWh

Quantity	Value	Units
----------	-------	-------

Energy in	2,945	kWh/yr
Energy out	2,361	kWh/yr
Storage depletion	5.76	kWh/yr
Losses	578	kWh/yr
Annual throughput	2,640	kWh/yr
Expected life	4.00	yr

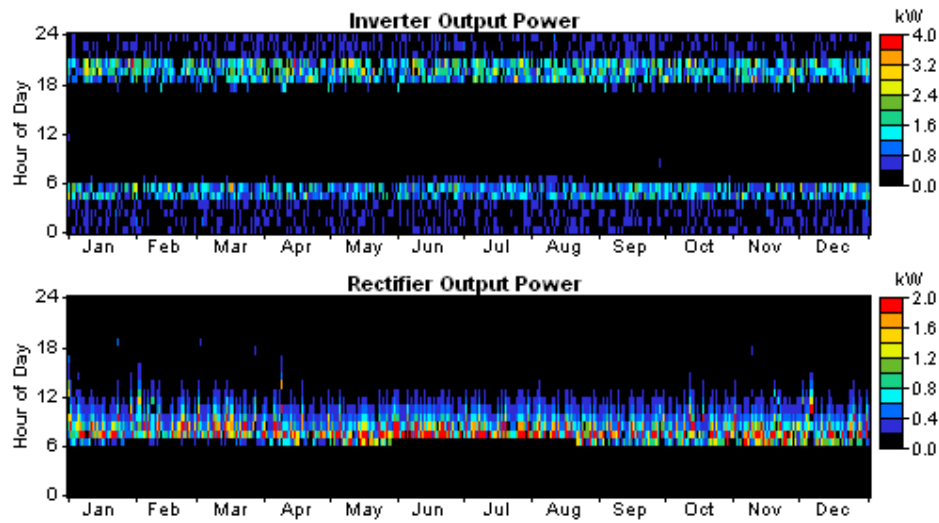


Converter

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Capacity	4.00	4.00	kW
Mean output	0.31	0.17	kW
Minimum output	0.00	0.00	kW
Maximum output	3.82	1.97	kW
Capacity factor	7.8	4.2	%

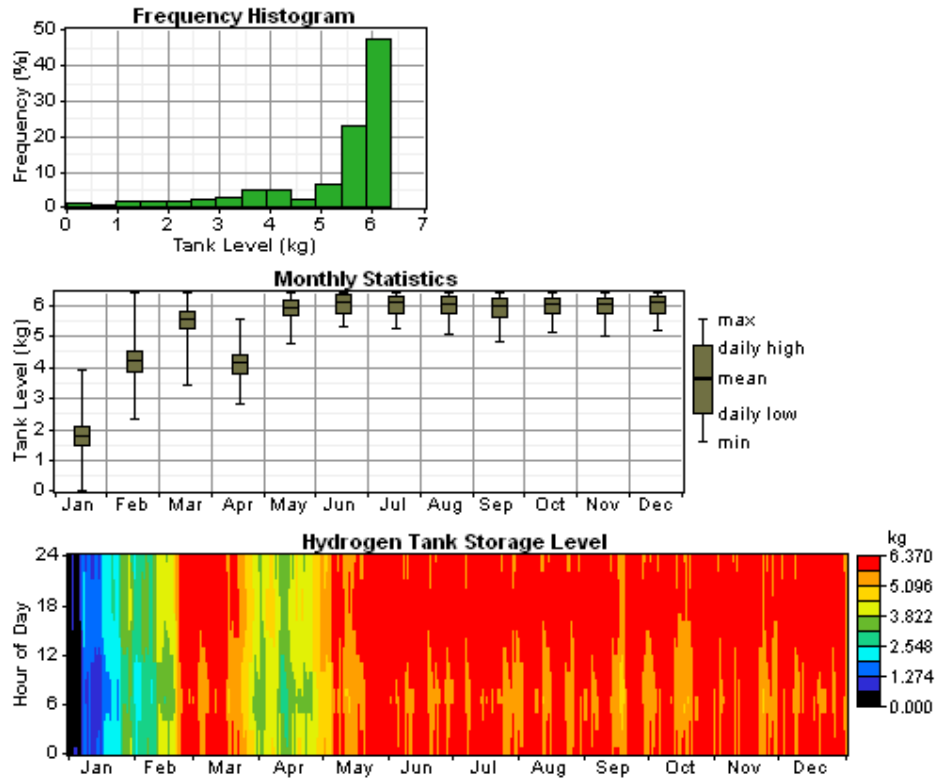
Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of operation	4,219	4,185	hrs/yr
Energy in	3,028	1,742	kWh/yr
Energy out	2,725	1,481	kWh/yr

Losses	303	261	kWh/yr
--------	-----	-----	--------



HydrogenTank

Variable	Value	Units
Hydrogen production	199	kg/yr
Hydrogen consumption	194	kg/yr
Hydrogen tank autonomy	439	hours



Emissions

Pollutant	Emissions (kg/yr)
Carbon dioxide	-1.98
Carbon monoxide	1.26
Unburned hydrocarbons	0.139
Particulate matter	0.0949
Sulfur dioxide	0
Nitrogen oxides	11.2