

2 **Fundamentos Teóricos**

2.1. **Retrospectiva Energética Brasileira**

A redução do crescimento econômico, como consequência da inércia econômica da década de 70, teve como principal consequência à estagnação do setor de energia elétrica que forçou o governo a pensar em uma interação entre os planejamentos energéticos: petróleo/energia elétrica e oferta/demanda. Era preciso um esforço na redução da dependência externa do Brasil do petróleo, direcionando investimentos para exploração, produção nacional e uso de eletricidade oriunda de hidrelétricas, em maior escala.

Na década de 80, o meio ambiente passou a ser priorizado no planejamento energético nacional, e empreendimentos com menor impacto ambiental foram incentivados, mas uma queda nos preços do petróleo mudou novamente este cenário, desestimulando o interesse pelas energias renováveis.

Quando o setor energético era dominado por empresas estatais, eventuais prejuízos eram socializados. Com a privatização, os empresários investiram pesadamente em técnicas para redução de riscos e incertezas.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cujo objetivo é atrair investimentos, passou a fazer estudos e pesquisas para subsidiar o planejamento do setor elétrico, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras [3].

Quanto às fontes de energia, projeções mostram que o petróleo ainda será por um bom período a principal, mas perdendo lentamente espaço para outras formas energias alternativas, especialmente o gás natural e o carvão mineral e, em menor escala, para a energia nuclear.

Embora haja limitações no uso de energias alternativas, temos, hoje, uma dependência muito menor do petróleo. Há alternativas como o gás natural, que vêm se intensificando de maneira notável nos últimos anos, o álcool combustível, o biodiesel e a energia solar, que permitem ou permitirão a manutenção do

crescimento interno. A Fig. 1 mostra o consumo final por fonte no período de 1973 até 2004.

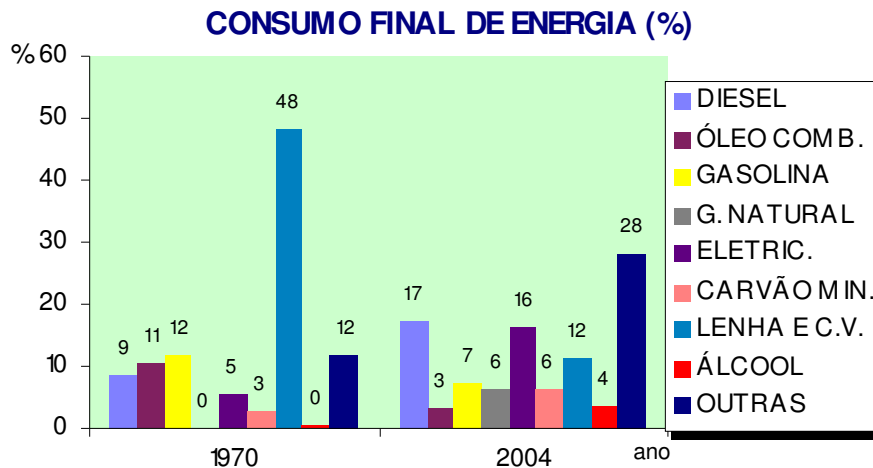


Figura 1-Consumo Final por fonte de Energia (%) [4].

Milhões de brasileiros não têm acesso à energia elétrica, a maioria vivendo no meio rural. No Brasil, a exclusão elétrica predomina em áreas com menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e entre famílias de baixa renda.

O objetivo é levar energia elétrica para estas comunidades, aproveitando os recursos energéticos locais e renováveis, proporcionando benefícios tais como: iluminação, educação e conforto.

O Brasil é um dos países do mundo de maior potencial de utilização de energia solar, mas, apesar disto, a geração desta energia é ainda muito inexpressiva. O grande desafio é desenvolver equipamentos de conversão de energia solar em elétrica, a baixo custo e com grande eficiência. A eficiência do atual sistema de energia solar ainda é baixa se comparada a de outras fontes de geração de eletricidade. Se houvesse um aumento da demanda, os preços seriam mais baixos, pois o custo de produção do equipamento seria mais baixo.

Outras iniciativas de estatais e concessionárias de energia elétrica promovem o desenvolvimento de tecnologia de energia solar no Brasil, como os estudos desenvolvidos nos principais centros de pesquisas e universidades públicas do país.

As pesquisas são avanços fundamentais na busca de materiais alternativos e mais eficientes para o processo de conversão da radiação solar em energia elétrica.

O apagão (crise de abastecimento energético) dos anos 2001/2002 acelerou a aprovação da lei conhecida como “Lei de Eficiência Energética”, cujo objetivo é estabelecer índices de consumo máximo de equipamentos comercializados no país. O progresso com a aplicação da lei tem sido lento, mesmo com o chamado Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), criado em consequência do Protocolo firmado em 1984 entre o Ministério da Indústria e do Comércio e a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) com a intervenção do Ministério das Minas e Energia, que promoveu grandes avanços. A adesão a este programa é voluntária.

O PBE utiliza etiquetas informativas que informam o consumidor quanto à eficiência energética de alguns dos principais eletrodomésticos nacionais.

O selo de eficiência, Fig. 2, foi criado por um decreto presidencial em 1993 e “tem por objetivo reconhecer por meio de diploma, os equipamentos elétricos utilizados em grande escala pela população que apresentem os melhores níveis de eficiência energética e/ou menor consumo de energia elétrica” [5]. A periodicidade deste selo é anual para os equipamentos etiquetados pelo PBE com classificação A.

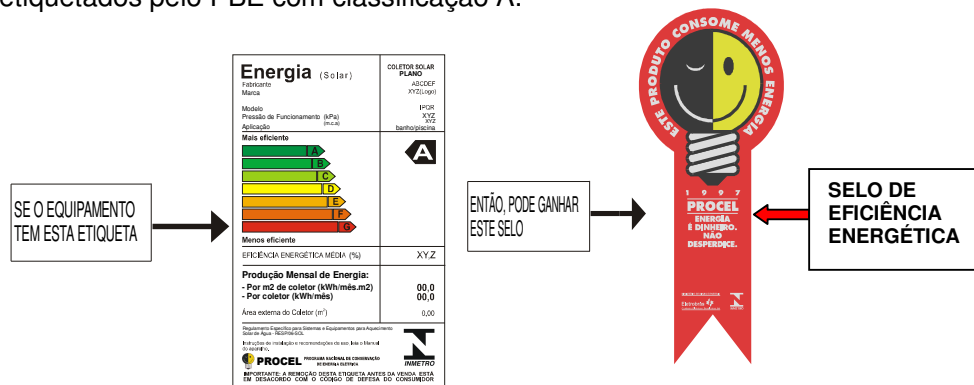


Figura 2-Modelos de aplicação do selo PROCEL de eficiência energética [5].

O selo PROCEL INMETRO de desempenho, Fig. 3, tem a finalidade de certificar o desempenho de produtos e equipamentos energeticamente eficientes, a partir das marcas “ESTE PRODUTO CONSOME MENOS ENERGIA” e “PROCEL” [5].

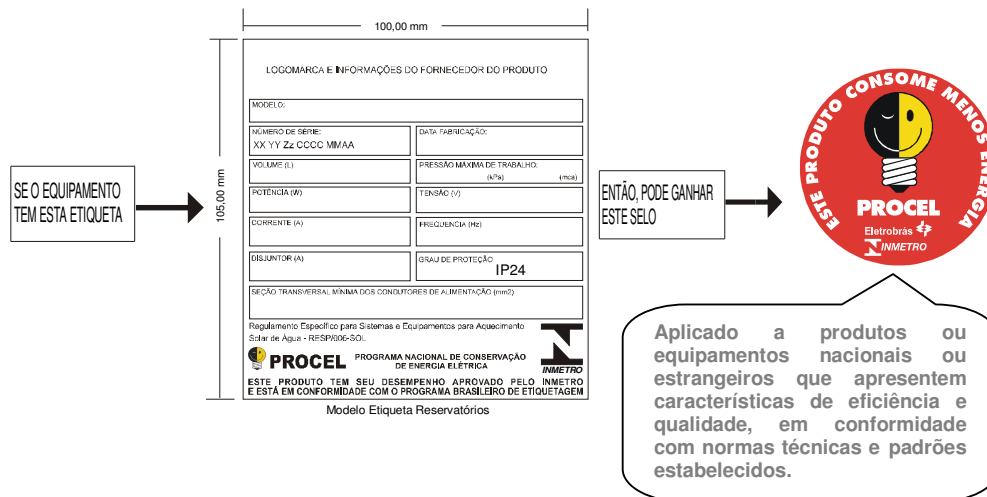


Figura 3-Modelos de aplicação do selo PROCEL INMETRO de desempenho [5].

Atualmente, participam do programa, entre outros produtos, as baterias de acumuladores (Fig. 4), inversores, carregadores e coletores solares para uso em Sistemas fotovoltaicos. As baterias de acumuladores são os objetos desta dissertação.

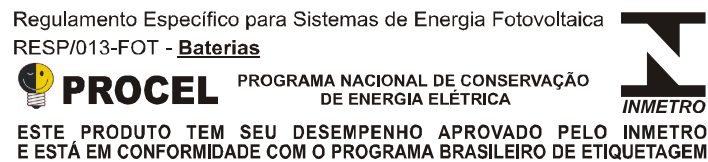


Figura 4-Modelo da etiqueta para Baterias [5].

No ano de 2003 foi instituído O Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - “Luz para Todos”, Fig. 5, criado com o objetivo de levar energia elétrica para milhões de pessoas até 2008, em todo o Brasil.



Figura 5-Comunidade assistida pelo programa luz para todos [6].

Formular políticas públicas na área de energia é atividade governamental, enquanto que o exercício da regulação constitui-se em uma atividade de Estado, apoiada na regulamentação da legislação vigente e exercida sob uma perspectiva de longo prazo.

É hora da política pública energética realmente acontecer.

2.2. Fonte de energia – O Sol

O futuro desenvolvimento econômico-tecnológico mundial está vinculado à fonte de energia que lhe deu origem: o Sol, Fig. 6. Sem o calor proporcionado por ele, a existência humana seria impossível.

À medida que fica mais caro e ambientalmente inviável usar fontes não renováveis de energia, tais como petróleo, carvão e etc., usar energia solar tende a ser mais sensato, prático e ambientalmente mais correto.

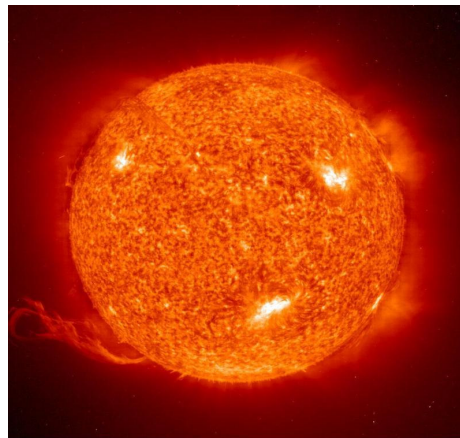


Figura 6-Erupções solares (áreas mais claras) [7].

Quando as superfícies de alguns metais são iluminadas, há a emissão de elétrons, este fenômeno é denominado de efeito fotoelétrico. Esses elétrons são chamados fotoelétrons, tendo-se em vista sua origem. Dois efeitos fotoelétricos importantes são a fotocondução e o efeito fotovoltaico.

Na fotocondução os elétrons liberados agem como portadores de carga adicionais dentro do material diminuindo assim, a resistência elétrica. Isso é particularmente eficaz em semicondutores.

O efeito fotovoltaico ocorre com o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida

pela absorção da luz, e se ele for parte de um circuito elétrico completo, haverá uma corrente. Isso se dá porque a luz gera uma força eletromotriz.

2.3. Sistema Fotovoltaico (FV)

A célula fotovoltaica, unidade fundamental do processo de geração de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor produzida pela absorção da luz, teve seus primeiros estudos realizados em 1839 por Edmond Becquerel. São constituídas basicamente de materiais semicondutores.

O silício é o material mais empregado e está entre os elementos químicos mais abundantes do planeta ao lado do ferro, oxigênio, magnésio, níquel, enxofre, cálcio e alumínio; têm sido explorados para diversas utilizações.

O painel fotovoltaico é um dispositivo constituído por várias células solares, e utilizada para converter energia solar em eletricidade. A conversão direta da energia solar em corrente elétrica é realizada nas células solares através do efeito fotovoltaico, que consiste na geração de uma diferença de potencial elétrico através de radiação, sendo seu uso particularmente vantajoso economicamente em regiões remotas ou zonas de difícil acesso.

Com a progressiva disseminação dos sistemas fotovoltaicos nos últimos anos tornou-se cada vez mais importante a correta caracterização dos módulos fotovoltaicos.

Os custos dos sistemas fotovoltaicos dependem obviamente do tipo de sistema, dos componentes do sistema e da quantidade de componentes que os compõem.

A eficiência de um sistema fotovoltaico depende: da eficiência, da forma de interligação e da coordenação dos vários componentes do sistema e do tipo de carga que irá alimentar.

2.3.1. Tipos de arranjos fotovoltaicos

Existem três tipos básicos de arranjos fotovoltaicos: isolado, híbrido e conectado à rede.

2.3.1.1. Isolado

A constituição básica dos sistemas isolados é: um conjunto de painéis, um regulador de carga, uma ou mais baterias e um inversor (se existirem cargas AC), Fig. 7.

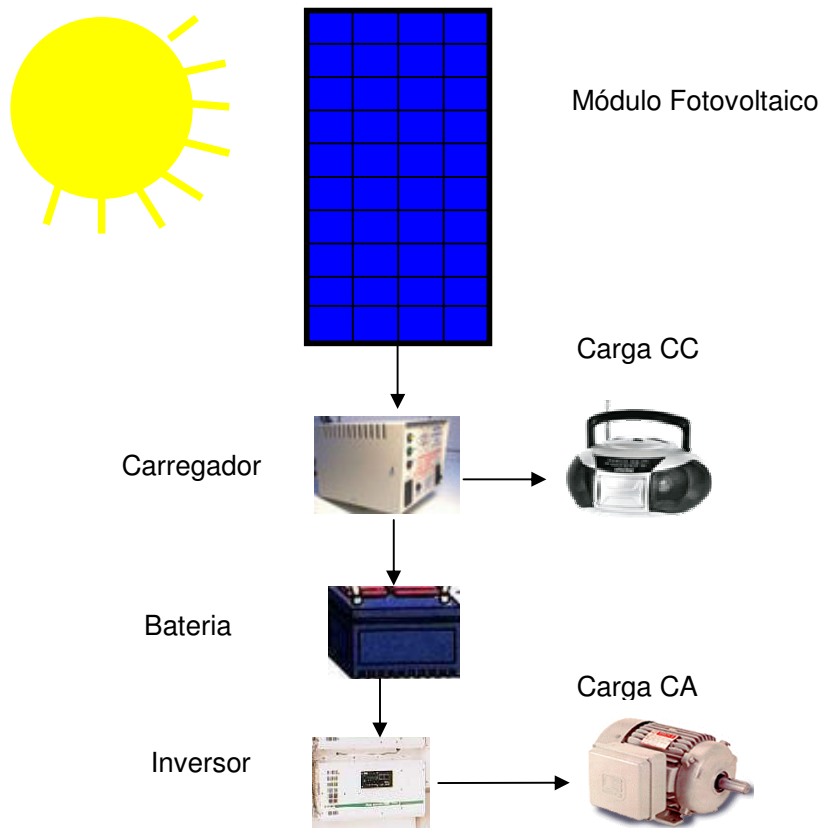


Figura 7-Sistema fotovoltaico isolado.

2.3.1.2. Híbrido

Os sistemas híbridos combinam sistema fotovoltaico (FV) com outras fontes de energia tais como: diesel, gás ou geradores eólicos. Esta configuração assegura a carga das baterias na ausência de sol, Fig. 8.

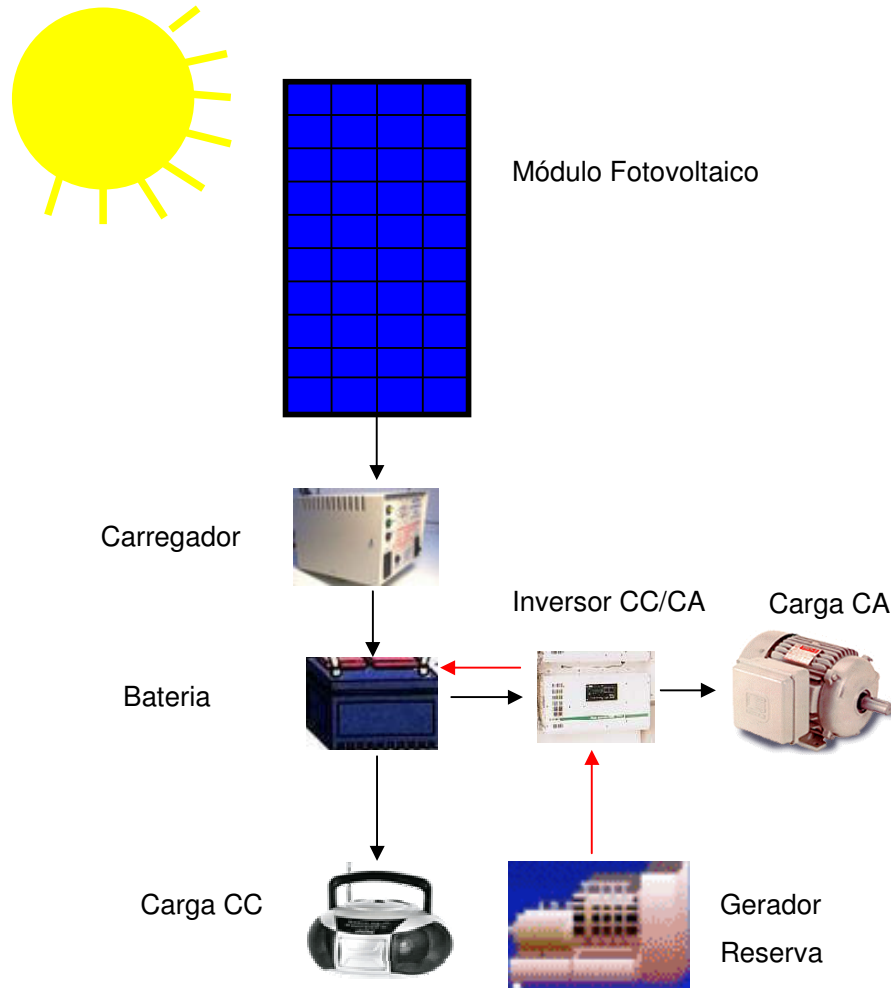


Figura 8-Sistema fotovoltaico híbrido.

2.3.1.3. Conectado à rede

Nos sistemas ligados à rede as baterias não são necessárias. Sua constituição básica é: um painel fotovoltaico, um inversor e um excelente sistema de controle. Este sistema tem a vantagem de eliminar perdas por transmissão, Fig. 9.

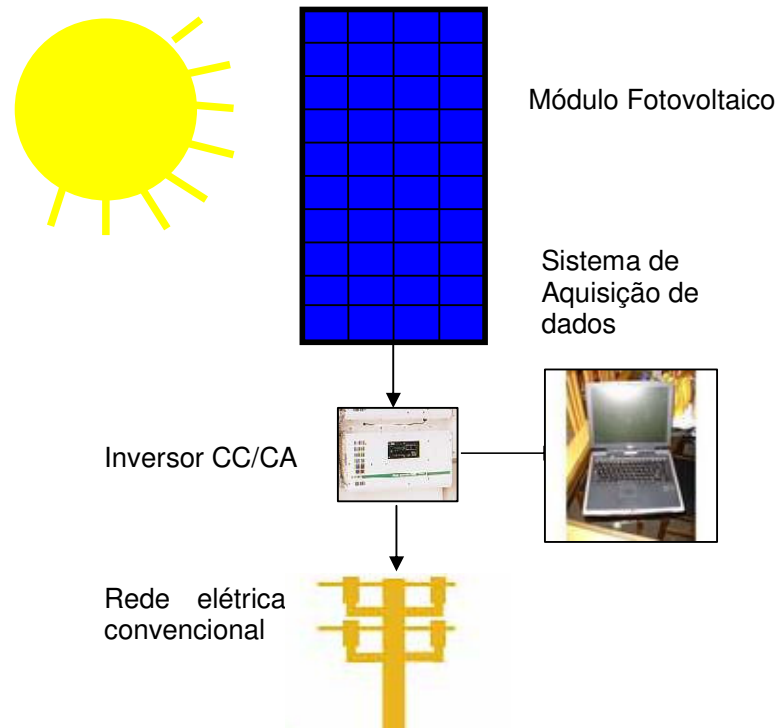


Figura 9-Sistema fotovoltaico conectado à rede.

2.4. Acumuladores Eletroquímicos

2.4.1. Estrutura física

A eletroquímica abrange todos os processos químicos que envolvem transferência de elétrons. Atualmente, em quase tudo que nos cerca, a eletroquímica se faz presente.

Um acumulador elétrico, segundo NBR 7039/87, é um dispositivo eletroquímico constituído de um elemento, eletrólito e caixa que armazena sob forma de energia química a energia elétrica que lhe seja fornecida e que a restitui quando ligado a um circuito consumidor. Segundo esta mesma norma, pilha é um gerador eletroquímico de energia elétrica, mediante conversão geralmente irreversível de energia química e bateria é um conjunto de pilhas ou acumuladores recarregáveis interligados convenientemente.

Elemento é o conjunto de duas placas ou de dois grupos (conjunto de placas de mesma polaridade, interligadas, destinado a um mesmo elemento), de

polaridades opostas, isolados entre si e banhados pelo mesmo eletrólito, mais o recipiente que os contém.

Os acumuladores podem ser classificados por vários critérios:

- São considerados acumuladores secundários se puderem ser recarregáveis, caso contrário, são denominados de acumuladores primários;
- De acordo com o material ativo empregado na constituição do eletrodo: chumbo, níquel, Lítio, etc.;
- De acordo com seu tamanho e;
- De acordo com suas características elétricas:
 - ✓ Acumuladores de resistência interna normal;
 - ✓ Acumuladores de resistência interna baixa;
 - ✓ Acumuladores de resistência interna alta;
- De acordo com sua aplicação, entre outros.

Os acumuladores eletroquímicos possuem a seguinte estrutura, Fig. 10:

- Placas;
- Separadores;
- Eletrólitos;
- Recipientes;
- Conexões;
- Suportes.

Placa é o conjunto constituído pela grade e materiais ativos, e são designadas pelo sinal (+) ou (-), ou seja, placas positivas e placas negativas. Para que as placas de polaridade oposta não tenham contato entre si, se introduzem separadores, cujo objetivo é proteger as placas de polaridade oposta contra os curtos-circuitos, e ao mesmo tempo, permitir manter certa reserva de eletrólito no espaço entre as placas, permitindo alta condutância eletrolítica.

Recipiente é a caixa que contém as placas e o eletrólito. Os eletrodos, normalmente na forma de placas, são dispostos no recipiente em posições alternadas positivas e negativas. Existe um espaço vazio entre o fundo do recipiente e as placas que evita um curto-circuito entre as mesmas, devido ao acúmulo de matéria ativa depositada pouco a pouco no fundo do recipiente.

As placas devem estar o mais próximas possível para minimizar a resistência interna da célula, que é geralmente da ordem de alguns miliohms ($m\Omega$), e também diminuir as dimensões dos elementos.

Os materiais ativos servem para os processos de oxidação e redução, criando a circulação da corrente elétrica no acumulador.

A função da grade ou estrutura metálica é de permitir a passagem da corrente elétrica e de suportar os materiais ativos. Para ambas, é desejável que a grade permaneça durante toda a sua vida com a mesma forma e dimensões originais.

A maioria dos eletrólitos de bateria é uma solução aquosa concentrada de ácidos, álcalis ou sais. Um eletrólito de densidade baixa tem menos ação local nas placas negativas, bem como solicita menos carga nas placas positivas, e ataca menos a solução nos separadores. O eletrólito de densidade maior aumenta a capacidade do acumulador e amplia a característica da tensão de descarga, especialmente em descargas mais rápidas. Uma densidade maior do eletrólito permite uma utilização com menor volume do eletrólito reduzindo peso, volume e custo por elemento.

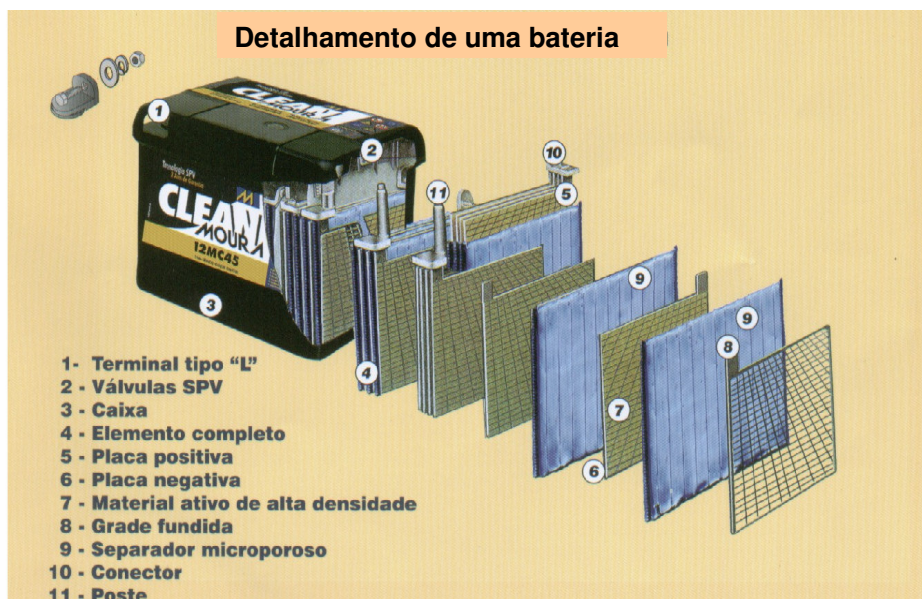


Figura 10-Detalhamento da bateria (Catálogo Moura) [8].

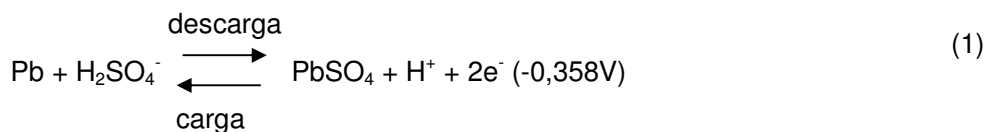
2.5. Baterias de Chumbo-Ácido

Como visto anteriormente, uma das classificações das baterias é quanto ao material ativo empregado na constituição dos eletrodos. A bateria denominada chumbo-ácido possui como eletrólito uma solução de ácido sulfúrico; dióxido de chumbo (PbO_2) como material ativo positivo, que tende a receber elétrons e chumbo (Pb) como material ativo negativo, que tende a doar

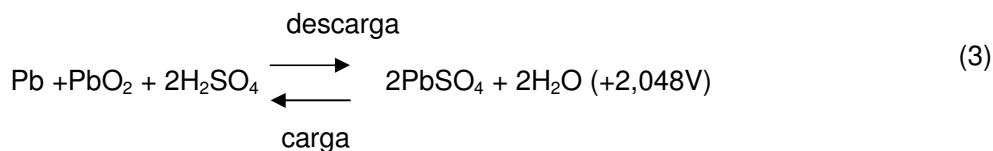
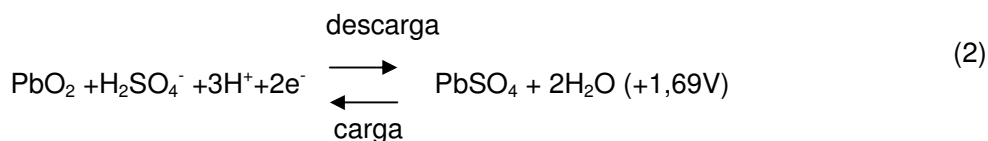
elétrons. Esta transferência de elétrons, que utiliza como meio de transferência a solução de ácido sulfúrico, é o que gera a diferença de potencial.

A doação de elétrons é feita através da oxidação e o recebimento por redução.

Na oxidação (eletrodo negativo):



Na redução (eletrodo positivo):



A descarga é um processo espontâneo, portanto, o sinal da reação é positivo. Na recarga o sinal negativo indica um processo forçado.

O sulfato de chumbo (PbSO_4) é formado como produto da descarga nos dois eletrodos, diminuindo a quantidade de ácido sulfúrico que é consumido durante a descarga e regenerado durante a carga.

O ácido sulfúrico diluído em água dissocia-se em íons de hidrogênio (H^+) e íons de sulfato SO_4^{-2} . A reação dos íons de sulfato com os eletrodos provoca em um deles o aparecimento de um excesso de elétrons e falta de elétrons no outro.

O eletrodo de chumbo (negativo) reage com os íons de sulfato, liberando 2 elétrons e ao combinar-se com aquele produz o sulfato de chumbo PbSO_4 . Desta forma, o eletrodo negativo fica com uma camada externa constituída por sulfato de chumbo e elétrons.

A reação entre o chumbo e o íon sulfato continua até que a quantidade de elétrons pelo chumbo seja suficiente para repelir os íons negativos de sulfato.

No eletrodo positivo (PbO_2), uma camada de chumbo (Pb^{+4}) é formada como resultado da reação com o ácido sulfúrico. Então, cada molécula de

dióxido de chumbo dissocia-se em dois íons negativos de oxigênio (O^{2-}) e um íon de chumbo (Pb^{+4}).

O íon de hidrogênio atrai os íons de oxigênio e forma na solução eletrolítica, água, deixando os íons de chumbo (Pb^{+4}) que sobram no eletrodo. Quando os íons de chumbo são suficientes para repelir os íons de hidrogênio, cessa a reação.

Quando a bateria está carregada, o eletrodo negativo (Pb) é coberto por uma camada externa de sulfato de chumbo, além de elétrons, e o eletrodo positivo (PbO_2) por uma camada externa de íons positivos de chumbo (Fig. 11). Estas concentrações de cargas criam um campo elétrico entre os terminais da bateria.

Quando se estabelece um campo elétrico em qualquer condutor, as cargas livres ali presentes entram em movimento sob ação deste campo. Este movimento constitui a corrente elétrica.

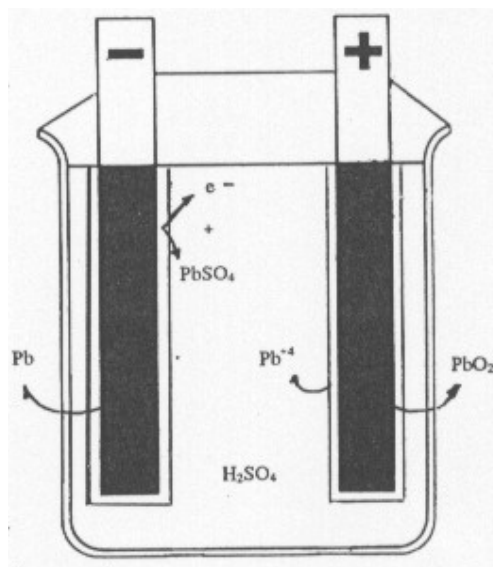


Figura 11-Bateria carregada [9].

2.5.1. Carga da bateria chumbo-ácido

As cargas elétricas que circulam no interior da bateria deslocam-se do pólo positivo para o negativo, durante a carga.

A oposição que a bateria oferece à passagem da corrente é a resistência elétrica interna (r). Devido a esta resistência, parte da potência recebida pelas cargas, em virtude da força eletromotriz (ϵ) da bateria, é dissipada na forma de calor (efeito joule) no interior da mesma.

Em uma bateria, além da resistência elétrica oferecida pelas placas, pelos separadores e pelos condutores, tem-se o efeito da polarização.

O valor da f.e.m. (força eletromotriz) é uma característica da bateria e depende apenas dos elementos químicos que entram em sua composição, sendo denominada de tensão interna da bateria.

A tensão nos terminais da bateria é dada por:

$$U_{AB} = \varepsilon + ri \quad (4)$$

De acordo com a eq. (4) deduz-se que a tensão nos terminais da bateria é maior do que sua f.e.m. em virtude da potência dissipada em seu interior.

Durante a carga (Fig. 12), o sulfato de chumbo transforma-se em dióxido de chumbo e chumbo puro, liberando ácido sulfúrico para a solução. Com o aumento do ácido na solução, aumenta também a concentração de íons e a tensão interna, diminuindo a resistência interna da bateria.

Como o aumento da tensão interna é maior que a diminuição da resistência interna, a tensão nos terminais da bateria cresce, até o momento em que a corrente, não encontrando mais matéria ativa, começa a estratificar o eletrólito decompondo-o em hidrogênio e oxigênio. Ocorre, então, a eletrólise.

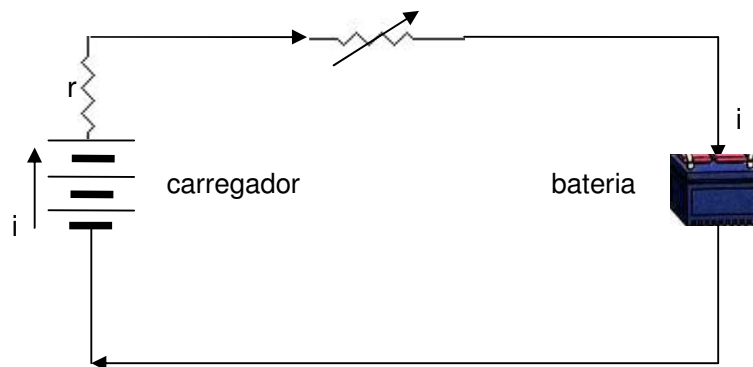


Figura 12-Circuito elétrico da bateria recebendo carga

2.5.2.

Descarga da bateria chumbo-ácido

Na descarga (Fig.13) há absorção de ácido sulfúrico, diminuindo a quantidade de íons na solução e, conseqüentemente, diminuindo a tensão e aumentando a resistência interna. A eq. (5) representa a tensão nos terminais da bateria:

$$U_{AB} = \varepsilon - r_{i_{desc}} \quad (5)$$

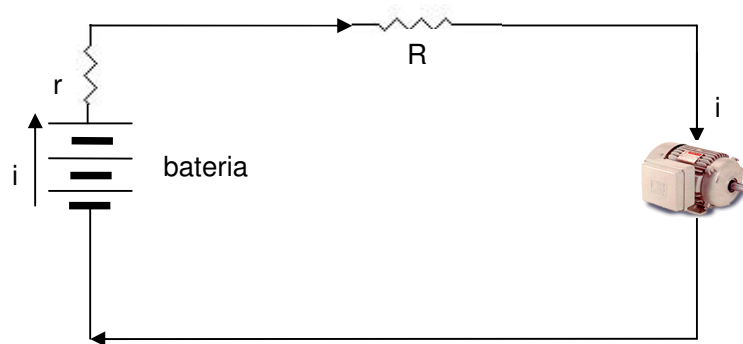


Figura 13-Circuito elétrico da bateria gerando carga

Quanto maior a corrente de descarga, menor a tensão nos terminais da bateria. Este processo continua até que os poros dos eletrodos comecem a se obstruir com o sulfato de chumbo, impedindo a circulação de corrente no interior dos mesmos. A descarga deve ser interrompida neste momento para evitar danos irreversíveis à bateria.

2.6. Incerteza de medição

2.6.1. Determinação numérica da incerteza

Em um processo de medição de fenômenos físicos tem-se a transferência de informação entre um sistema fonte e um operador que utilizará essas informações, através de sistema de medições. O intercâmbio entre o sistema fonte e o sistema de medição modifica as propriedades de ambos, e isto será usado como condutor de transferência da informação desejada [10].

O sistema de medição foi integrado a um processo de controle. É importante salientar que um sistema de medição sem funções de controle apenas realiza a monitoração do processo.

Com o método experimental são obtidas grandezas físicas que sempre são uma aproximação do valor verdadeiro da mesma grandeza. O melhor valor possível para uma grandeza e sua diferenciação do valor verdadeiro é determinado pela teoria da incerteza.

Segundo o VIM (3.9) [11] o termo “incerteza de medição” é:

“O parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.”

Deve-se especificar o mensurando, as fontes de incertezas, quantificar as componentes da incerteza, calcular a incerteza combinada, calcular a incerteza expandida e apresentar resultados da medição.

2.6.2. O mensurando

O atual procedimento de etiquetagem de baterias do PBE [anexo D] é dividido em:

- Ensaio de Capacidade.
 - ✓ Tratamento prévio;
 - ✓ Capacidade obtida.
- Ensaio de durabilidade.
 - ✓ Preparação;
 - ✓ Fase A – ciclagem pouco profunda em baixo estado de carga;
 - ✓ Fase B – ciclagem pouco profunda em elevado estado de carga.

O resultado esperado é que, no ensaio de capacidade, a bateria chegue, ao fim do ensaio, com o mínimo de 95% da capacidade especificada pelo fabricante, e que, após o ensaio de durabilidade, a capacidade obtida seja igual ou superior a 80% da capacidade nominal.

O mensurando neste caso é a capacidade da bateria ao fim do processo, que traz em si várias componentes de incertezas, tais como: corrente de descarga, tempo de descarga e outras.

O mensurando será utilizado para etiquetar diferentes tipos de baterias para utilização no sistema fotovoltaico.

A capacidade pode ser definida por uma integral [12]:

$$C = \int_t i_{desc} dt \quad (6)$$

É comum determinar a capacidade da bateria utilizando a média da corrente de descarga (i_{desc}), que nos testes permaneceu constante, durante um intervalo de tempo de descarga Δt_{desc} , até o limite estipulado pela tensão de corte nos terminais da bateria, logo [12]:

$$C = i_{desc} \times \Delta t_{desc} \quad (7)$$

2.6.3.

As fontes de incertezas do mensurando, diagrama de ISHIKAWA.

O diagrama de Ishikawa (Fig. 14), também denominado de Diagrama Espinha de Peixe (por seu formato) ou Diagrama de Causa e Efeito, originalmente proposto por Kaoru Ishikawa na década de 60 [13], será utilizado para a localização de causas de incertezas no procedimento de etiquetagem de baterias. Ele é uma ferramenta gráfica utilizada para explorar e representar fontes de incertezas do mensurando “capacidade da bateria”, objeto deste trabalho. É, também, uma ferramenta analítica que possibilita organizar as idéias, normalmente surgidas em uma sessão de Brainstorming, para facilitar a análise e seleção das melhores sugestões, assim como registrar todos os fatores influentes no assunto.

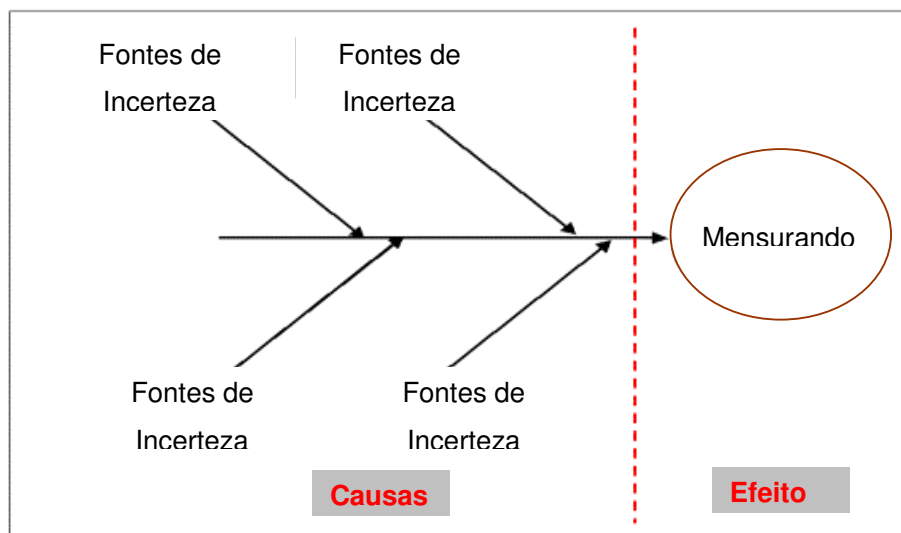


Figura 14-Diagrama Espinha de Peixe.

2.6.4.

Quantificação das fontes de incerteza

A incerteza pode ser de dois tipos, segundo O Guia para Expressão da Incerteza de Medição (INMETRO, 1998) [14]:

- Incerteza do tipo A – as fontes são avaliadas por uma série de medições repetidas, utilizando métodos estatísticos;

- Incerteza do tipo B - as fontes são avaliadas através de outros meios que não análise estatística de observações.

2.6.4.1. Quantificação das fontes de incerteza tipo A

Na simulação de um experimento, em computador, longas seqüências de números aleatórios são geradas. Esses números aleatórios satisfazem as propriedades dos processos físicos que estão simulando. Geram-se variáveis aleatórias que possuem distribuições pré-definidas.

A distribuição normal ou gaussiana é típica de distribuições experimentais. A distribuição normal é uma família de curvas definidas unicamente por dois parâmetros:

- Média aritmética - a média é calculada da seguinte forma, para n observações e x_i valores:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

- Desvio padrão experimental - o desvio padrão experimental, para n observações e x_i valores, é dado por:

$$\sigma(x) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

O desvio padrão em uma distribuição gaussiana representa a probabilidade de que o resultado esteja com 68,67 % de nível de confiabilidade, na faixa de $\pm \sigma$ em torno na média. Para uma probabilidade maior de acerto, a faixa de incerteza deve ser aumentada, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1-Nível de confiança e desvio padrão.

INCERTEZA CONFIANÇA	
σ	68,67%
2σ	95,45%
3σ	99,73%
$1,645\sigma$	90,00%
$2,576\sigma$	99,00%

Em uma distribuição de frequência acumulada, este mesmo resultado pode ser visto, sendo que v é o número de graus de liberdade, ou simplesmente o número de observações.

2.6.4.2.

Quantificação das fontes de incerteza tipo B

O método de avaliação é considerado Tipo B quando essa avaliação é realizada através de um julgamento científico baseado em todas as informações possíveis sobre a variabilidade da grandeza medida. Torna-se, portanto, necessário quantificar cada fonte potencial de incerteza através de sua medição direta, de sua avaliação a partir de dados experimentais obtidos previamente ou, então, através de sua dedução a partir de análises teóricas, através de manuais e catálogos dos instrumentos, ou, então, certificados incompletos de calibração.

Quando se usa a distribuição normal em um levantamento estatístico, a incerteza padronizada é igual ao desvio padrão,

$$u = \sigma \quad (10)$$

Caso a incerteza de uma distribuição normal seja dada na forma de um intervalo de confiança $x \pm c$, tem-se:

- Para um percentual de 95,45% de confiança, $u = \frac{c}{2}$; (11)

- Para um percentual de 99,73% de confiança, $u = \frac{c}{3}$; (12)

Usa-se uma distribuição retangular na grande maioria dos casos, principalmente quando não se dispõe do nível de confiança e da forma de distribuição. Assim,

$$u = \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

Uma distribuição triangular é usada quando se tem o conhecimento que os valores próximos de x são mais prováveis do que os próximos dos limites, neste caso,

$$u = \frac{c}{\sqrt{6}} \quad (14)$$

2.6.5. Incerteza combinada

Cada fonte de incerteza deve ter suas componentes sistemáticas combinadas por uma simples soma algébrica. Os valores das correções associadas a cada fonte de incerteza devem estar expressos na mesma unidade do mensurando. Por exemplo, se a temperatura afeta o valor medido da capacidade de uma bateria, o efeito da temperatura média sobre a capacidade deve ser expresso em ampère-hora (Ah) e não em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

2.6.6. Quantificação da Incerteza Combinada

Os efeitos aleatórios de cada fonte de incerteza devem ser considerados para compor a chamada incerteza combinada. Para que a estimativa da incerteza padrão combinada seja efetuada de forma correta, algumas propriedades das variáveis aleatórias devem ser consideradas.

Incerteza padrão combinada ou Propagação da Incerteza de Medição é o procedimento de avaliação da propagação do desvio padrão de um mensurando a partir do desvio padrão de suas fontes de incertezas.

Para se calcular a incerteza combinada, pode-se usar:

1. Método por cálculo de derivadas – matematicamente requintado, é usado de forma geral quando as grandezas de entrada se relacionam através de uma expressão matemática qualquer, porém, apresenta dificuldades em expressões matemáticas complexas.
2. Método experimental.

2.6.7. Método por combinação de incertezas absolutas e relativas

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente independentes se suas variações se comportam de forma totalmente desvinculada. Ao contrário das variáveis aleatórias estatisticamente dependentes, onde suas variações se dão de forma vinculadas, isto é, há uma relação nitidamente definida entre o crescimento de uma e o crescimento da outra de forma direta ou inversamente proporcional à primeira. Neste caso as variáveis são denominadas de variáveis correlacionadas.

2.6.8. Medição direta e indireta

Na medição direta o valor associado ao mensurando resulta naturalmente da aplicação do sistema de medição sobre este.

Na medição indireta, a determinação do valor associado ao mensurando parte da combinação de duas ou mais grandezas por meio de expressões matemáticas.

Neste trabalho a medição indireta é utilizada devido à impossibilidade de se fazer medições diretas de capacidade no ensaio.

Os parâmetros da medição indireta da capacidade são tratados como estatisticamente independentes.

2.6.9. Combinação das incertezas das fontes de incertezas

A incerteza padrão combinada (u_c) das várias fontes de incertezas pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de incertezas por [14]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{x_i}^2} \quad (15)$$

Sendo que u_{x_i} representam as incertezas padrão de cada uma das “n” fontes de incertezas e u_c representa a incerteza combinada cujo modelo inclui apenas adição ou subtração de grandezas estatisticamente independentes.

Para a incerteza combinada cujo modelo inclui apenas multiplicação ou divisão de grandezas estatisticamente independentes a incerteza padrão combinada é dada por [14]:

$$u_{c(y)} = y \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{u_{x_i}}{x_i} \right)^2} \quad (16)$$

2.6.10. Número de graus de liberdade efetivo

Quando se estima a incerteza padrão combinada, deve-se estimar o número de graus de liberdade efetivo ($v_{ef.}$) [14].

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_n^4}{v_n}$$

logo,

$$v_{ef} = \frac{(u_c)^4}{\sum_{i=1}^n \frac{(u_i)^4}{v_i}} \quad (17)$$

onde, v_i = graus de liberdade individual.

2.6.10. Quantificação da incerteza expandida

A Incerteza expandida U é definida como a grandeza que define um intervalo em torno do resultado de medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

Em aplicações na área industrial é comum trabalhar com níveis de confiança. Normalmente o nível de confiabilidade adotado é de 95,45 %, ou seja, dois desvios padrões quando a distribuição é normal. Para atingir este nível de confiança, a incerteza padrão combinada (u_c), que corresponde a apenas um desvio padrão, deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente t de Student.

Assim, a incerteza padrão u é multiplicada por um fator de abrangência k conveniente, conforme Tabela 2.

$$U = k \cdot u \quad (18)$$

Tabela 2-Fator de abrangência em função do grau de liberdade efetivo.

v_{eff}	1	2	3	5	10	20	30	40	60	120	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,65	2,28	2,13	2,09	2,06	2,04	2,02	2,00

Deve-se observar que, com este procedimento, ao se estimar a incerteza de medição, na realidade o que se faz é estimar o desvio padrão da população a partir do desvio padrão da amostra, que subestima o primeiro. O valor estimado, portanto, é o que se deve usar em futuras medições, com um número infinito de graus de liberdade.