

CONCEITOS SOBRE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

Claudiofiro Fábio de Oliveira Barbosa – cfob@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

Edinaldo José da Silva Pereira – edinaldojsp@ufpa.br

Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas, Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará

Resumo. Este artigo apresenta alguns conceitos básicos dos sistemas híbridos para produção de energia elétrica, explanando-se os aspectos conceituais e práticos desses sistemas. Com base em uma configuração genérica de um sistema híbrido, abordam-se os principais componentes e tecnologias usualmente empregados. Ademais, apresentam-se algumas vantagens e desvantagens na utilização dos sistemas híbridos de energia, como também os desafios a serem superados para se conseguir uma maior disseminação e aplicação desses sistemas para o suprimento de eletricidade.

Palavras-chave: Sistemas Híbridos de Energia, Energias Renováveis, Fontes Não Renováveis

1. INTRODUÇÃO

Uma das aplicações mais promissoras do aproveitamento das energias renováveis são os sistemas híbridos de energia, frente à crescente demanda por eletricidade nos setores residencial, comercial e industrial, e à escassez desse bem, principalmente em áreas remotas típicas do meio rural. Tais sistemas utilizam mais de uma fonte de energia para produzir eletricidade. A combinação das fontes de energia possibilita que os pontos fracos de uma fonte sejam mitigados ou complementados pelos pontos fortes de outra e vice-versa. Ademais, em alguns casos, os sistemas de geração com mais de uma fonte são menos onerosos do que aqueles com apenas uma fonte.

Buscando reunir e sintetizar informações que caracterizam os sistemas híbridos de energia, o presente trabalho apresenta uma breve revisão sobre a sua teoria. Para tanto, são destacadas as diversas expressões utilizadas para denominar e definir tais sistemas. Além disso, no trabalho são enfatizadas também as tecnologias de geração e condicionamento de potência mais empregadas nesses sistemas. As tecnologias de armazenamento usualmente associadas aos sistemas híbridos de energia e as que despertam bastante interesse de utilização, devido ao seu potencial, são também tratadas aqui. Abordam-se ainda aspectos de gerenciamento e controle, aplicações, vantagens e desvantagens de tais sistemas. Por fim, são comentados os principais desafios para a consolidação dos sistemas híbridos de energia.

2. SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA

2.1 Expressões e definições

Na literatura são verificadas várias expressões para denominar os sistemas híbridos de geração de energia elétrica, foco do presente trabalho. No âmbito internacional, existem três expressões largamente utilizadas pelos autores e organizações de pesquisa, públicas e privadas, para apresentar a essência de tais sistemas. São elas: *Hybrid Power System* (HPS), *Hybrid Energy System* (HES) e *Hybrid Renewable Energy System* (HRES). A primeira é a mais difundida e aceita na área, enquanto que a segunda vem logo em seguida. A terceira expressão está atualmente sendo bastante utilizada, devido aos sistemas em questão serem baseados nas fontes renováveis, principalmente, as fontes de energia solar fotovoltaica e eólica. Essas expressões são comumente simplificadas pela omissão das palavras *power*, *energy* e *renewable*, ficando simplesmente reduzidas a *hybrid system*. Tal expressão é facilmente observada tanto na literatura internacional especializada da área como na do Brasil, traduzida literalmente como sistema híbrido.

No que se refere à definição de Sistema Híbrido de Energia (SHE), esta também tem sido feita de diversas formas, pois cada um (autores e organizações) atribui o significado que julga mais adequado ao assunto do seu trabalho, tal como: “[...] um sistema de energia autônomo, que combina as fontes de energias renováveis e convencionais com as baterias chumbo-ácido para armazenamento.” (WICHERT, 1997); “[...] combinações de dois ou mais dispositivos de conversão de energia (por exemplo, geradores de eletricidade ou dispositivos de armazenamento), ou dois ou mais combustíveis para o mesmo dispositivo, os quais quando integrados, superam as limitações que podem ser inerentes a qualquer um.” (MANWELL, 2004); “[...] é um sistema de energia, usando uma fonte de energia renovável e uma fonte de energia convencional, ou mais do que uma fonte de energia renovável com ou sem as fontes de energia convencionais, o qual trabalha de forma autônoma ou conectada à rede.” (LAZAROV et al, 2005); “[...] pequeno conjunto de unidades operando em conjunto para geração de eletricidade ou eletricidade e calor, com diversas fontes de energia primária (renovável e

não renovável), enquanto a coordenação de sua operação se dá por utilização de avançados sistemas eletrônicos de potência.” (PASKA et al, 2009); “[...] incluem mais do que uma fonte de energia, a fim de suprir uma determinada carga elétrica, comumente uma carga c.a.; no entanto, pode também suprir uma carga c.c. ou ambas ao mesmo tempo.” (LUNA-RUBIO et al, 2012).

Embora a definição mais simples de sistema híbrido possa ser: “Sistema que utiliza mais de uma fonte de energia”, com base nas definições citadas anteriormente, pode-se propor uma definição mais completa, tendo o enfoque exclusivo para produção de eletricidade, como: SHE é aquele que, dependendo da disponibilidade dos recursos locais, utiliza mais de uma fonte primária de energia, renovável ou não, para produzir e fornecer energia elétrica a um determinado consumidor, obedecendo aos padrões de qualidade exigidos. O hibridismo das fontes primárias, com ou sem sistema de armazenamento, possibilita, de forma natural ou controlada, que os pontos fracos de uma fonte sejam mitigados ou complementados pelos pontos fortes de outra, permitindo que o sistema seja projetado com a produção de energia maximizada e custos e riscos de interrupções de fornecimento mínimos.

2.2 Conversores de energia

Conversores de energia são dispositivos utilizados para transformar a energia de uma determinada fonte (eólica, solar, hídrica, biomassa, combustíveis fósseis, etc.) em eletricidade. Os principais tipos de conversores de energia utilizadas nos SHE são:

- **Aerogerador** - converte a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica e, em seguida, em eletricidade. Um aerogerador típico utilizado para produção de energia elétrica é constituído pelo rotor eólico (pás, cubo e eixo), nascele (abriga o gerador e demais componentes), caixa de multiplicação, gerador elétrico, torre de sustentação e mecanismos de controle (orientação do rotor, controle de velocidade, controle de carga, etc.).

- **Gerador fotovoltaico** - converte diretamente a energia proveniente do Sol (irradiação solar) em energia elétrica em c.c. O gerador fotovoltaico (FV) é constituído pela interligação de um determinado número de células. Atualmente a tecnologia de célula fotovoltaica comercialmente mais difundida é a de silício cristalino.

- **Grupo gerador a combustível fóssil** - baseia-se na conversão da energia térmica em mecânica e esta em energia elétrica. Para tanto, fazem uso dos motores de combustão interna (ciclo otto ou ciclo diesel) para produção de energia mecânica de rotação em um eixo acoplado ao de um gerador elétrico, para produzir eletricidade.

- **Hidrogerador** - efetua a transformação da energia cinética/potencial contida em um fluxo de água em energia mecânica e, posteriormente, em eletricidade. O seu funcionamento é bastante simples: a turbina hidráulica (tipos Francis, Kaplan, Propeller, Pelton, Turgo, e suas variantes), quando movimentada pela água, faz girar um eixo mecânico, o qual está diretamente acoplado ao rotor de um gerador elétrico (síncrono – grande capacidade, e indução pequena capacidade).

- **Célula a combustível (CaC)** - dispositivo eletroquímico que converte a energia química em energia elétrica c.c. e calor, tendo como combustível o hidrogênio e o agente oxidante, o oxigênio.

- **Gerador a biomassa** - unidade de geração termelétrica, com o princípio de funcionamento bastante semelhante aos geradores convencionais a carvão, gás natural e derivados de petróleo, onde essencialmente a queima de um combustível impulsiona uma máquina motriz de forma direta ou indireta, produzindo assim a energia mecânica necessária para o acionamento de um gerador elétrico. Como aplicações da biomassa para fins de produção de eletricidade, podem-se destacar os seguintes métodos: queima direta, gaseificação, biodigestão e biocombustíveis.

2.3 Condicionadores de potência

Os condicionadores de potência são sistemas utilizados para otimizar a produção/consumo, visando ao melhor aproveitamento dos recursos e ao fornecimento de energia elétrica de qualidade ao consumidor. Os principais dispositivos que compõem os condicionadores de potência utilizados nos sistemas híbridos são:

- **Retificador** - responsável pela conversão de uma tensão c.a., proveniente de determinados geradores (por exemplo, o grupo gerador a diesel), para uma tensão c.c. Nos sistemas híbridos, são muito utilizados em conjunto com aerogeradores de pequeno porte.

- **Inversor de tensão** - responsável pela conversão de uma tensão c.c., proveniente de determinados geradores (por exemplo, geradores FV), ou dispositivos armazenadores de energia (por exemplo, baterias), para uma tensão c.a., com amplitude e frequência determinadas. Segundo SALAS et al (2015), nas aplicações em SHE, os inversores podem ser divididos em: *stand-alone* (operação isolada); *grid-tie* (operação interligada à rede elétrica); *grid-interactive* (podem operar no modo conectado à rede, ou no modo isolado, principalmente quando há a indisponibilidade da rede elétrica); bidirecional (reúne em um único dispositivo as características dos inversores e retificadores, podendo, na função retificador, suprir cargas c.c. e/ou carregar baterias, fornecendo a potência necessária no lado c.c., ou atuar como inversor, suprindo as cargas no lado c.a.); híbrido (reúne em um único dispositivo as funcionalidades dos inversores *grid-interactive* e bidirecional, isto é, podem operar interligados à rede, permitindo o fluxo bidirecional de energia, ou podem operar isolados).

- **Controlador de carga** - responsável pelo gerenciamento da potência fornecida pelos geradores às baterias, e destas às cargas. Na primeira situação, o controlador atua desconectando os geradores quando as baterias atingem um nível máximo de tensão pré-estabelecido, evitando a sua sobrecarga. Na outra, o mesmo atua desconectando as cargas quando as baterias atingem um valor mínimo de tensão (descarga excessiva). Ambas as funções colaboram diretamente para o aumento da vida útil das baterias. Em geral, há duas topologias de controladores de carga: sendo os mais conhecidos os que possuem

seus dispositivos de controle em série com os geradores e as baterias, podendo desconectar tanto a geração quanto a carga, e os que possuem um dispositivo de controle em paralelo com os geradores, dissipando a energia proveniente dos mesmos quando as baterias atingem o estado de carga máxima. Dois mecanismos comumente empregados em controladores de carga para regular o fluxo de energia são: o controle PWM (*Pulse Width Modulation*), o qual permite uma corrente de carregamento variável, dada pela potência variável do gerador ou pelo estado de carga da bateria, possuindo um dispositivo em série com elevada frequência de chaveamento; e os controladores MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), para o caso de aplicação em sistemas FV, que adotam a estratégia de seguimento do ponto de máxima potência do gerador FV, visando aumentar a eficiência do processo de carga das baterias (SALAS et al, 2015) e (PINHO et al., 2014).

- **MPPT** - utilizado particularmente entre o gerador fotovoltaico e o inversor de tensão, podendo ser incorporado aos inversores de tensão e controladores de carga. Tem como objetivo otimizar o ponto de operação do gerador para a máxima produção de energia. Para tanto, fornece a tensão de saída desejada ao sistema, ajustando-se o valor da tensão na entrada para a tensão de máxima potência correspondente ao nível de irradiância solar incidente.

- **Dump Load (carga de desvio)** - responsável por dissipar o excedente de energia produzida pelo sistema gerador, a fim de manter a estabilidade do sistema elétrico. Em geral, essa carga é composta por resistores, os quais podem ser controlados por relés ou por um conversor de potência.

2.4 Armazenamento de energia

O sistema de armazenamento guarda o excesso de energia não consumida, para usá-la quando a demanda não puder ser atendida somente pelas fontes primárias de energia. Também é utilizado como um meio para garantir a estabilidade do sistema em situações de variações bruscas de geração e carga. Destacam-se como os principais tipos de armazenamento de energia:

- **Bateria ou acumulador elétrico** - são os dispositivos mais utilizados para armazenamento de energia (COPPEZ et al, 2010). Tais dispositivos convertem a energia elétrica em energia química, e vice-versa, por meio de uma reação de oxidação-redução dos seus materiais. Ressalta-se que a energia elétrica associada a esse processo é do tipo corrente contínua. As baterias podem ser formadas por uma única célula ou por múltiplas células, ligadas em série ou em paralelo, ou ainda em série e paralelo, dependendo da tensão de saída e capacidade desejadas (HADJIPASCHALIS, 2009). Por sua vez, a célula é convencionalmente constituída por placa negativa (anodo), placa positiva (catodo), eletrólito e separador. Nas placas negativas e positivas acontecem a oxidação e redução, respectivamente. Durante esse processo, o meio de transferência dos elétrons entre as placas é fornecido pelo eletrólito, enquanto que o isolamento elétrico é realizado pelo separador. As baterias destacam-se pela pouca necessidade de manutenção e por sua estrutura modular e flexível, o que permite a adaptação aos requisitos de sistema de armazenamento de energia. A maior vantagem dessa tecnologia de armazenamento é o baixo número de ciclos de carga e descarga (algumas centenas a poucos milhares de ciclos). Para aplicações em sistemas híbridos, destacam-se as baterias do tipo chumbo-ácido, devido principalmente à sua disponibilidade no mercado, ao custo acessível e à maturidade tecnológica. Salienta-se que as baterias de níquel-cádmio também são encontradas instaladas nos SHE; no entanto, o alto custo e a toxicidade do níquel e do cádmio tendem a reduzir sua aplicação em grande escala.

- **Hidrogênio** - em SHE a produção de hidrogênio para fins de armazenamento de energia é amplamente realizada pela eletrólise da água (MESQUITA, 2010). Este método de produção de hidrogênio consiste na quebra das moléculas de água em hidrogênio ($2H_2$) e oxigênio (O_2) através da passagem de corrente elétrica contínua (CHAUBEY et al, 2013). Em síntese, a carga elétrica quebra as ligações entre os átomos de H e O, o que origina íons positivos e negativos. Os íons positivos de H são atraídos para o polo negativo (catodo) e os íons negativos do O vão para polo positivo (anodo). Salienta-se que em geral, para realização da eletrólise é necessária uma considerável quantidade de energia. Neste contexto, a fim de melhorar a condutividade da água e, conseqüentemente, a eficiência do processo, é comum a adição de um eletrólito, como por exemplo um sal. O H_2 produzido pode ser armazenado em um reservatório e posteriormente transportado e/ou utilizado nas CaC. Dependendo do tipo de armazenamento do H_2 (técnicas mais desenvolvidas: gás pressurizado em tanques de metal e gás absorvido por hidretos metálicos – técnicas em desenvolvimento: gás absorvido por nanofibras de carbono e liquefação), a autodescarga dessa tecnologia de armazenamento é praticamente nula. Outra vantagem é sua alta densidade de energia (100 a 1.000 Wh/kg). A baixa eficiência (35 a 42 %) dessa tecnologia de armazenamento, decorrente da própria eficiência do eletrolisador e da CaC (70 % e 60 %, respectivamente), representa hoje o principal obstáculo para ampliação de seu emprego, segundo DÍAZ-GONZÁLEZ et al (2012).

Outros tipos de armazenamento que são focos de estudos e aplicações experimentais em SHE são apresentados a seguir:

- **Volante de inércia (flywheel)** - é uma tecnologia cujo armazenamento dá-se na forma de energia cinética (MARTÍN et al, 2012). Para tanto, faz-se girar uma massa com elevada constante de inércia (aço, fibras de carbono especial, etc.) por meio de uma máquina elétrica com eixo acoplado à massa. Assim, a energia é transferida para o volante quando a máquina elétrica opera como motor, provocando a aceleração do volante até sua velocidade máxima (carga). O processo inverso ocorre quando a máquina elétrica opera como gerador, ocorrendo neste caso a redução da aceleração do volante (descarga). Geralmente, o volante de inércia é inserido num sistema de vácuo (ou de baixa atmosfera) a fim de reduzir as perdas por atrito do ar. Ademais, seus rolamentos são baseados em ímãs permanentes, que, além de permitir a operação estável do volante, proporcionam também a diminuição do atrito por contato entre as partes girantes do sistema. A rápida capacidade de resposta (< 1 s), a alta eficiência (cerca de 80 a 90 %) e densidade de energia (5 a 100 Wh/kg), e o altíssimo número de ciclos de carga e descarga (100.000 a 10.000.000) são as principais vantagens dessa tecnologia de

armazenamento. Por outro lado, a rapidez da descarga (cerca de 100 % da capacidade armazenada por dia) e curta duração de operação são suas maiores desvantagens (ZHAO et al, 2014), (DÍAZ-GONZÁLEZ et al, 2012) e (HADJIPASCHALIS et al, 2009).

- **Ar comprimido** - neste tipo de armazenamento, a energia elétrica disponível é utilizada para alimentar um conjunto motor/compressor responsável por comprimir o ar, o qual é bombeado e armazenado, por exemplo, em uma cavidade subterrânea. O armazenamento, em geral, é feito em altas pressões, visando à redução de volume e, conseqüentemente, do tamanho necessário para o reservatório de armazenamento. Quando a energia elétrica é necessária, o ar comprimido é extraído da cavidade subterrânea, aquecido ao passar pelo recuperador, misturado a um combustível (gás natural, óleo combustível ou hidrogênio, por exemplo) e, em seguida, queimado para que a expansão dos gases movimente uma turbina. Esta turbina, por sua vez, tem o seu eixo acoplado a um gerador elétrico para produção de eletricidade. Essa tecnologia de armazenamento tem como principais vantagens o grande número de ciclos de carga e descarga (10.000 a 30.000), o longo tempo de vida útil dos reservatórios (30 a 40 anos) e a baixa descarga própria. Como principal desvantagem tem-se a baixa densidade de energia (3,2 a 5,5 Wh/kg) quando comparada com outras tecnologias de armazenamento (DÍAZ-GONZÁLEZ et al, 2012). Outra importante desvantagem é a dependência de estruturas geológicas adequadas para o armazenamento, o que na prática não são fáceis de se obter (HADJIPASCHALIS et al, 2009). Em sistemas de menor capacidade, busca-se contornar essa limitação com a utilização de tanques e *containers* apropriados para armazenagem do ar comprimido.

- **Bombeamento de água** - baseia-se no bombeamento de água de um reservatório a uma cota inferior a jusante para um reservatório a uma cota superior a montante (armazenamento na forma de energia potencial) (COPPEZ et al, 2010). Para tal, utiliza-se a energia elétrica disponível em período de baixa demanda para alimentar um motor. A água contida no reservatório a montante é posteriormente utilizada para impulsionar uma turbina hidráulica, a qual é acoplada a um gerador elétrico para produzir eletricidade quando necessário. Salienta-se que, comumente, o motor e o gerador são uma única unidade. A alta eficiência (65 a 80 %), o longo tempo de vida útil (30 a 50 anos) e a nula descarga própria destacam-se como as principais vantagens da aplicação dessa tecnologia (DÍAZ-GONZÁLEZ et al, 2012). As principais desvantagens referem-se ao elevado custo inicial (600 a 2.000 US\$/kW, segundo Zhao et al (2014)), e a necessidade da existência de um local adequado para instalação de dois reservatórios grandes, próximos e em diferentes cotas (COPPEZ et al, 2010) e (HADJIPASCHALIS et al, 2009).

- **Supercapacitor** - como as baterias os supercapacitores, ou ultracapacitores, são baseados em células eletroquímicas para o armazenamento de energia. Estas células são constituídas por duas placas de eletrodos, um eletrólito e uma membrana porosa, que permite o trânsito livre dos íons para os eletrodos com cargas opostas (DÍAZ-GONZÁLEZ et al, 2012). Diferentemente das baterias, não há reação química de oxirredução; apenas os íons migram, de modo que o meio de armazenamento é o campo elétrico. Logo, pode-se afirmar que os supercapacitores são elementos híbridos, reunindo tanto a função de bateria quanto a de capacitor, o que permite o aumento substancial do número de ciclos de carga/descarga. Além do elevadíssimo número de ciclos de carga/descarga (500.000 a 1.000.000 ciclos), os supercapacitores têm como grandes vantagens a elevada eficiência (85 a 98 %) e o rápido tempo de resposta (< 1 s) (DÍAZ-GONZÁLEZ et al, 2012) e (ZHAO et al, 2014). As maiores desvantagens são a baixa densidade de energia (6,5 a 12 Wh/kg), o custo de capital elevado (20.000 US\$/kWh) e a exigência de circuitos eletrônicos avançados para armazenar efetivamente e recuperar a energia (PASKA et al, 2009b) e (HADJIPASCHALIS et al, 2009).

- **Supercondutor magnético** - tecnologia onde o armazenamento de energia é realizado em um campo magnético. Tal campo é criado pela circulação de uma corrente elétrica c.c. através de uma grande bobina constituída por cabos supercondutores (resistência próxima de zero), os quais são mantidos a temperatura criogênica, usando nitrogênio ou hélio líquidos (MARTÍN et al, 2012). Como vantagens dessa tecnologia de armazenamento, pode-se destacar o elevado número de ciclos de carga/descarga (10.000 a 100.000 ciclos), a alta eficiência (80 a 95 %) e o pouco ou nenhum impacto ambiental (componentes são atóxicos e não há reações químicas). A sua grande desvantagem é a incondicional necessidade da existência de um sistema de arrefecimento criogênico, o que pode limitar sua operação e torná-la mais complexa, assim como aumentar os custos de capital (1.000 a 10.000 US\$/kW) (BEAUDIN et al, 2010), (MOHD et al, 2010), (MIRANDA, 2011) e (DÍAZ-GONZÁLEZ et al, 2012).

2.5 Sensoriamento, gerenciamento e controle de energia

A maioria dos SHE, em especial os com múltiplas fontes para produção de eletricidade e com armazenamento (ou seja, sistemas mais complexos), possui dispositivos de sensoriamento, gerenciamento e controle de energia. Tais dispositivos, trabalhando em conjunto, buscam essencialmente garantir a adequada operação de todos os equipamentos e o fornecimento ininterrupto de energia à carga, o que, por conseguinte, proporciona a elevação da eficiência e confiabilidade, bem como a redução dos custos operacionais do sistema híbrido de energia (MANWELL, 2004), (NEHRIR et al, 2011) e (BAJPAI e DASH, 2012). Para tal, um sistema de sensoriamento, gerenciamento e controle de energia deve ser capaz de (PINHO et al, 2008) e (HARUNI, 2013):

- Medir grandezas elétricas nos lados c.c. (tensão e corrente) e c.a. (tensão, corrente e frequência) do sistema;
- Medir outras grandezas, como, por exemplo, temperatura dos módulos e das baterias, velocidade e direção do vento, irradiância, vazão de água, quantidade e consumo de combustível, dentre outras;
- Armazenar informações obtidas pelo sensoriamento;
- Realizar o sensoriamento em tempo real, das condições operacionais, bem como a previsão das mesmas com base nas informações obtidas;

- Regular o ciclo de carga e descarga do dispositivo de armazenamento de energia, a fim de evitar a redução de sua vida útil;
- Determinar e realizar o despacho de potência ativa e reativa de saída de cada fonte de energia, enquanto mantém a tensão de saída e a frequência nos níveis adequados;
- Definir estratégias de alerta e proteção, de modo a prevenir e identificar condições de contingências;
- Transmitir sinais de comando via protocolo de comunicação.

A estrutura de gerenciamento e controle dos SHE pode ser classificada em três categorias: centralizada, distribuída, e centralizada e distribuída (híbrida). Em todas estas categorias, cada recurso energético do sistema tem o seu próprio controlador (controlador local), o qual determina a operação ótima do referido recurso, com base nas informações atuais obtidas pelo sensoriamento (UPADHYAY e SHARMA, 2014). Uma breve caracterização de cada categoria é apresentada na Tab. 1.

Tabela 1 – Caracterização da estrutura de gerenciamento e controle de energia.

Características	
Centralizada	<ul style="list-style-type: none"> - Os sinais de medição de todas as unidades de energia em um grupo (ou seja, uma mini/microrrede) são enviados para um controlador central, o qual opera em estreita coordenação com todos os recursos energéticos e controladores locais. - O controlador central atua como um supervisor de energia, tomando as decisões de ação de controle, com base em todos os sinais medidos e em um conjunto de restrições e objetivos pré-determinados. - A otimização global pode ser alcançada pelo sistema multi-objetivo de gerenciamento de energia, com base em todas as informações disponíveis. - A carga computacional de cada controlador é pesada. - Problemas de falhas <i>single-point</i> podem ocorrer.
Distribuída	<ul style="list-style-type: none"> - Os sinais de medição dos recursos energéticos do sistema híbrido são enviados para seu referido controlador local. - Os controladores locais comunicam-se entre si para tomar a decisão adequada, visando à otimização global. - Fácil operação <i>plug-and-play</i>. - A carga computacional de cada controlador é muito reduzida. - Não há problemas de falhas <i>single-point</i>. - O sistema de comunicação é potencialmente complexo.
Híbrida	<ul style="list-style-type: none"> - A otimização local é obtida através de um controle central dentro de cada grupo, enquanto que a otimização global entre os diferentes grupos de fontes de energia é alcançada por meio do controle distribuído. - A carga computacional de cada controlador é reduzida. - Os problemas de falha <i>single-point</i> são mitigados. - O sistema de comunicação é potencialmente complexo.

Fonte: Elaboração própria com base em: (UPADHYAY e SHARMA, 2014) e (CHAUHAN e SAINI, 2014).

2.6 Aplicações dos sistemas

Os SHE para produção de energia elétrica possuem um grande leque de aplicações. Segundo Manwell (2004), as aplicações mais comuns são:

- **Redes elétricas c.a. remotas** – nesta aplicação o SHE deve ser capaz de fornecer a qualquer momento toda a energia necessária à rede remota, bem como promover o ajuste de sua frequência e tensão. Além disso, sabe-se que em certos momentos os sistemas híbridos podem produzir uma quantidade de energia além da necessária. Tal quantidade de energia pode ser armazenada (baterias, por exemplo) para futura utilização quando da redução ou falta da geração, ou em último caso, deve ser dissipada (*dumping loads*, por exemplo), de modo a não introduzir instabilidade no sistema. Cabe salientar que atualmente ampliam-se as pesquisas em redes elétricas c.c. para distribuição de energia, que pode ser uma alternativa promissora para otimização dos sistemas descentralizados de geração/distribuição.

- **Cargas elétricas c.c. ou c.a. isoladas ou especiais** - em tal aplicação o SHE atende de forma individual a(s) carga(s) isolada(s) ou especial(is) (bombeamento de água, dessalinização, iluminação, aquecimento, comunicação, etc.). Em geral, nesta aplicação, o sistema de controle da frequência e tensão, bem como o excesso de produção de energia, não são fatores cruciais.

- **Geração Distribuída (GD) em redes elétricas convencionais** –nesta aplicação o SHE é conectado a uma rede elétrica convencional, uma vez que a frequência e a tensão são ajustadas pelo próprio sistema de distribuição de energia e não pelo SHE. Ademais, quando a demanda de energia é maior do que a produção do sistema híbrido, a própria rede elétrica poderá fornecer a energia necessária. Do mesmo modo, qualquer excesso de energia produzida pelo SHE pode ser absorvido pela rede. Neste caso, a rede elétrica comporta-se como um sistema de armazenamento sem limitação de capacidade.

Com relação às aplicações propriamente ditas dos SHE, estas tiveram seu início na década de 1970, provavelmente decorrentes da crise do petróleo em 1973. Por exemplo, Quinlan (1996), e Hunter e Elliot (1994) sugerem respectivamente como aplicações iniciais de SHE, o sistema instalado em Clayton (1977) e o sistema instalado no Block Islands (1979), ambos nos Estados Unidos da América (EUA). Nesses sistemas, aerogeradores e grupos geradores a diesel operam em conjunto para produção de energia elétrica, com a denominação conhecida como *wind-diesel system* (sistema eólico-diesel). Por sua vez, Nelson et al (2002) destacam como uma das primeiras aplicações, o SHE instalado no ano de 1978 em Papago Indian Reservation/EUA, sendo formado por geradores fotovoltaicos e grupos geradores a diesel, combinação esta comumente conhecida por *photovoltaic-diesel system* (sistema fotovoltaico-diesel).

Os SHE supracitados tiveram nas décadas seguintes um importante papel na construção dos arcabouços de inúmeros outros sistemas, em cuja maioria é verificada a presença dos combustíveis fósseis (propano, gasolina e diesel), o que reforça a tese de que a redução do consumo desses combustíveis foi, e continua sendo, o principal fator para o hibridismo de fontes de energias. Historicamente, a forma mais comum de atender as demandas remotas (vilarejos ou aplicações especiais, como estações de telecomunicações), é através de grupos geradores, cujo principal combustível é o óleo diesel, dada a sua tecnologia consolidada, o seu baixo custo inicial, e a sua fácil manutenção e operação. Contudo, a operação dos sistemas diesel-elétricos nessas áreas não é tão simples. Pode-se destacar como principais dificuldades o custo do combustível, a disponibilidade do mesmo no local, cuidados no seu armazenamento e manuseio, e a necessidade de manutenção constante no conjunto motor-gerador, além da grande emissão de gases de efeito estufa. Atualmente, a aplicação dos SHE, além de buscar a redução do consumo de combustível fóssil e, conseqüentemente, dos custos operacionais, passou a se preocupar com a otimização do investimento de capital e com o desenvolvimento sustentável. O primeiro é devido à existência de casos onde os custos de capital de um sistema de única fonte são bem superiores aos de um híbrido. O segundo é decorrente da necessidade da utilização dos recursos naturais de forma racional, contribuindo sobretudo para a preservação do meio ambiente e para o desenvolvimento socioeconômico da sociedade local, sem comprometer a capacidade das futuras gerações em prover suas próprias demandas.

Neste contexto, os SHE estão sendo considerados no planejamento energético de inúmeros países (Brasil, Índia, Tailândia, África do Sul, Mongólia, etc.), principalmente em áreas não abastecidas ou com abastecimento feito de forma precária (níveis de tensão e frequência não adequados e poucas horas de atendimento).

2.7 Vantagens e desvantagens

As principais vantagens e desvantagens dos sistemas energéticos baseados no hibridismo das fontes de energias renováveis e não renováveis, com ou sem armazenamento de energia, são apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos SHE.

	Descrição
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Faz uso dos recursos energéticos disponíveis localmente. - Amplia a confiabilidade do sistema elétrico, uma vez que se baseia em mais de uma fonte de energia para geração de eletricidade. - Proporciona a redução da capacidade do sistema de armazenamento de energia, especialmente nos casos em que as diferentes fontes de energia utilizadas apresentam comportamento complementar. - Em termos de potência, os sistemas são facilmente expansíveis, seja pela ampliação da capacidade das fontes existentes e/ou pela inserção de outras fontes ao sistema. - Podem operar de forma isolada ou conectada à rede de energia elétrica. - Quando conectados à rede elétrica, além de atuar como unidades geradoras independentes e contínuas, podem servir como unidades auxiliares em casos de pico de demanda, quando o custo do kWh produzido é alto. - Pouca necessidade de manutenção para as tecnologias de geração renovável. - Redução da necessidade de manutenção e dos custos operacionais para os sistemas diesel-elétricos, especialmente os de pequeno e médio porte. - Boa qualidade da energia fornecida, devido à grande maturidade, neste aspecto, dos equipamentos de condicionamento de potência utilizados. - Ambientalmente benigno, com baixo nível de emissão de CO₂ e outros gases, quando comparado à geração exclusivamente a partir de combustíveis fósseis. - Custo mínimo de geração de eletricidade ao longo da vida útil, independentemente da evolução temporal de preços de combustíveis fósseis, se estes não forem usados no SHE, especialmente nos casos em que o sistema híbrido de energia é baseado em técnicas otimizadas de projeto.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidade energética dos recursos precisa ser favorável para a geração de eletricidade. - Investimento inicial elevado, embora o custo no longo prazo seja normalmente baixo. - Necessidade de um sistema de armazenamento, ou reserva, em aplicações não conectadas à rede, em função da intermitência das fontes de energia utilizadas. - Sistemas de controle complexos, devido à utilização de diferentes tecnologias (geração, armazenamento e condicionamento de potência). - A utilização de geradores a combustível fóssil e o descarte inapropriado de baterias são fontes de impactos ao meio ambiente. Além disto, para sistemas de grande porte, tem-se a ocupação de grandes áreas (geradores fotovoltaicos), além de substancial alteração no aspecto visual local (aerogeradores). - Ainda há pouca experiência das concessionárias e usuários com a prestação do serviço de energia elétrica através de SHE.

Fonte: Elaboração própria com base em: (WICHERT, 1997), (KALDELLIS, 2010) e (PANAPAKIDIS et al, 2012).

2.8 Desafios

Já são cerca de 40 anos de diversos estudos, pesquisas e aplicações dos sistemas híbridos de energia ao redor do mundo. Nesse período, o estágio alcançado de maturidade, a divulgação e a confiabilidade desses sistemas, devem-se aos avanços tecnológicos experimentados por muitas áreas, dentre os quais destaca-se o desenvolvimento de programas computacionais (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewable* - Homer, HYBRID2, *Hybrid Optimization by Genetic Algorithms* - iHOGA, etc.) para dimensionamento, simulação e análise de sistemas híbridos; os avanços no

condicionamento de energia, através do desenvolvimento da eletrônica de potência; a elevação da robustez e vida útil dos geradores; e o desenvolvimento de sistemas de comunicação e controle mais confiáveis.

Contudo, esses sistemas ainda são considerados como apenas uma alternativa emergente para produção de eletricidade (MANWELL, 2004), (MOHAMMED et al, 2014). Logo, para a completa consolidação dos SHE alguns obstáculos ainda precisam ser superados. Por exemplo, Bajpai e Dash (2012) sinalizam os principais desafios:

- O avanço das tecnologias de geração renovável quanto à sua eficiência de conversão, caso dos geradores fotovoltaicos;
- A redução significativa dos custos de fabricação das tecnologias de geração renováveis, uma vez que o custo de capital elevado implica no aumento do tempo de retorno do investimento;
- A fixação da quantidade mínima aceitável de perdas dos condicionadores de potência. Atualmente, as perdas dos condicionadores eletrônicos de potência já têm alcançado níveis satisfatórios;
- O aumento do ciclo de vida dos dispositivos de armazenamento, tais como baterias e supercapacitores;
- O desenvolvimento e o emprego de formas baratas e eficientes para obtenção do hidrogênio. Atualmente, a produção e o armazenamento de hidrogênio são muito caros e necessitam de uma grande quantidade de energia;
- A necessidade da instalação de dispositivos de proteção adequados, quando da implementação dos sistemas híbridos, bem como a graduação dos sistemas de proteção existentes, quando da introdução desses sistemas na forma de GD;
- A ampliação da capacidade de adaptação dos SHE isolados, frente às flutuações de carga, uma vez que uma grande variação na carga pode levar ao colapso de todo o sistema;
- O descarte de dispositivos de armazenamento, tais como baterias e tanques de hidrogênio e a segurança com relação à armazenagem do próprio hidrogênio, são grandes desafios para os fabricantes.

Pode-se adicionar ainda aos elementos supracitados, a necessidade da prestação de manutenção adequada e o oferecimento de suporte técnico confiável e rápido, em especial nas áreas mais remotas, onde comumente estão instalados os sistemas híbridos de energia.

Esses desafios podem e devem ser mitigados com a contínua evolução das tecnologias associadas aos sistemas híbridos. Por exemplo, espera-se, em futuro próximo, que sejam utilizados inversores compactos, robustos e baratos, baseados em novos dispositivos semicondutores, como Carboneto de Silício (SiC) e o Nitreto de Gálio (GaN); e que as células fotovoltaicas comerciais operem em uma fração maior do espectro solar (células solares excitônicas), resultando em um maior rendimento.

O aprimoramento dos métodos de previsão de demanda e dos recursos energéticos, bem como a aplicação de técnicas modernas de controle, visando ao gerenciamento ótimo, também tem sua grande parcela de contribuição, tendo como resultados imediatos a redução dos custos de implantação e operação dos sistemas híbridos. Ademais, os governos deverão incluir claramente em suas políticas energéticas o incentivo ao uso de fontes renováveis de energia em sistemas mais eficientes para produção de eletricidade, caso dos sistemas híbridos. Os incentivos, por exemplo, podem ser através de benefícios fiscais, financiamentos públicos subsidiados, ou leilões públicos. Esses tipos de incentivos são os atualmente praticados no Brasil.

3. COMENTÁRIOS FINAIS

Verifica-se que os cerca de 40 anos de atividades teóricas e práticas relacionadas com os SHE não foram suficientes para disseminar o uso desses sistemas no mundo. Apesar das vantagens associadas, como a confiabilidade técnica, a flexibilidade das configurações, a eventual redução na emissão de gases de efeito estufa, e a possibilidade de redução do custo do kWh produzido, a utilização dos SHE ainda necessita vencer algumas barreiras para sua plena aceitação e uso na sociedade. No Brasil, em especial, os elevados custos de aquisição dos equipamentos, em grande parte importados, e a falta de subsídios e mecanismos eficientes para alavancar a disseminação das energias renováveis, contribuem grandemente para esta realidade. Atualmente, com o aumento das tarifas de energia elétrica, e com a redução de custos dos equipamentos relacionados à instalação de sistemas de geração baseados em energias renováveis, o uso dos SHE, se convenientemente incentivados, poderiam, por exemplo, contribuir significativamente para mitigar a necessidade de acionamento de termelétricas, ou atender pequenos consumidores de regiões isoladas e de difícil acesso. Este novo cenário, se alcançado, propiciaria a geração de emprego e renda e a melhoria da qualidade de vida dos usuários beneficiados.

REFERÊNCIAS

- Bajpai, P., Dash, V., 2012. Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation in Stand-Alone Applications: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 2926–2939.
- Beaudin, M., Zareipour, H., Schellenberglobe, A., Rosehart, W., 2010. Energy Storage for Mitigating the Variability of Renewable Electricity Sources: An Updated Review, *Energy for Sustainable Development* 14, pp. 302-314.
- Chaubey, R., Sahu, S., James, O. O., Maity, S., 2013. A Review on Development of Industrial Processes and Emerging Techniques for Production of Hydrogen from Renewable and Sustainable Sources, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23, pp. 443-462.

- Chauhan, A., Saini, R. P., 2014. A Review on Integrated Renewable Energy System Based Power Generation for Stand-Alone Applications: Configurations, Storage Options, Sizing Methodologies and Control, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, pp. 99-120.
- Coppez, G., Chowdhury, S., Chowdhury, S. P., 2010. The Importance of Energy Storage in Renewable Power Generation: A Review, *Universities Power Engineering Conference - UPEC 2010*.
- Díaz-González, F., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Villafáfila-Robles, R., 2012. A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 2154-2171.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., Efthimiou, V., 2009. Overview of Current and Future Energy Storage Technologies for Electric Power Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, pp. 1513-1522.
- Haruni, A. M. O., 2013. A Stand-Alone Hybrid Power System with Energy Storage, Thesis Doctoral Degree, University of Tasmania, Australia.
- Hunter, R., Elliot, G., 1994. *Wind-Diesel Systems – A Guide to the Technology and its Implementation*. Cambridge University Press.
- Kaldellis, J. K., 2010. *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems - Technology, Energy Storage and Applications*. CRC Press.
- Lazarov, V., Notton, G., Zarkov, Z., Bochev, I., 2005. Hybrid Power Systems with Renewable Energy Sources - Types, Structures, Trends for Research and Development, In: *Proc of International Conference ELMA*, pp.515-520.
- Luna-Rubio, R., Trejo-Perea M., Vargas-Vázquez, D., Ríos-Moreno, G. J., 2012. Optimal Sizing of Renewable Hybrids Energy Systems: A Review of Methodologies, *Solar Energy* 86, pp.1077-1088.
- Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014. GTES/CEPEL-DTE-CRESESB. Disponível em http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em 10/07/2015.
- Manwell, J. F., 2004. Hybrid Energy Systems, *Encyclopedia of Energy*, Volume 3. Elsevier.
- Martín, J. I. S., Zamora, I., Martín, J. J. S., 2012. Tecnologias de Armazenamento de Energia para Aplicações Elétricas, *Revista Eletricidade Moderna*, ago. 2012, pp. 70-84.
- Mesquita, F. G. G., 2010. Design Optimization of Stand-Alone Hybrid Energy Systems, Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, Portugal.
- Miranda, A. M. V., 2011. Tecnologias de Armazenamento de Energia – Identificação do Potencial e Aplicações, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Portugal.
- Mohammed, Y. S., Mustafa, M. W., Bashirb, N., 2014. Hybrid Renewable Energy Systems for Off-Grid Electric Power: Review of Substantial Issues, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35, pp. 527-539.
- Mohd, H. A., Wu, B., Dougal, R. A., 2010. An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems, *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2010, 1, pp. 38-47.
- Nehir, M. H., Wang, C., Strunz, K., Aki, H., Ramakumar, R., Bing, J., Miao, Z., Salameh, Z., 2011. A Review of Hybrid Renewable/Alternative Energy Systems for Electric Power Generation: Configurations, Control, and Applications, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 4.
- Nelson, V. C., Foster, R. E., Clark, R. N., Raubenheimer, D., 2002. *Wind Hybrid Systems Technology Characterization*, Technical Report, Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University.
- Panapakidis, I. P., Sarafianos, D. N., Alexiadis, M. C., 2012. Comparative Analysis of Different Grid-Independent Hybrid Power Generation Systems for a Residential Load, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, pp. 551-563.
- Paska, J., Biczal, P. e Klos, M., 2009. Hybrid Power Systems – An Effective Way Of Utilizing Primary Energy Sources, *Renewable Energy* 34, pp. 2414-2421.
- Pinho, J. T., Barbosa, C. F. O., Pereira, E. J. S., Souza, H. M. S., Blasques, L. C. M., Galhardo, M. A. B., e Macêdo, W. N., 2008. *Sistemas Híbridos*, Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Quinlan, P. J. A., 1996. *Times Series of Modeling Hybrid Wind Photovoltaic Diesel Power Systems*, Thesis Master's Degree, University of Wisconsin, EUA.
- Salas, V., Suponthana, W., Salas, R. A., 2015. Overview of the Off-Grid Photovoltaic Diesel Batteries Systems with AC Loads. *Applied Energy* 157, pp. 195-216.
- Upadhyay, S., Sharma, M. P., 2014. A Review on Configurations, Control and Sizing Methodologies of Hybrid Energy Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, pp. 47-63.
- Wichert, B., 1997. PV-Diesel Hybrid Energy Systems for Remote Area Power Generation - A Review of Current Practice and Future Developments, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 1, No. 3, pp. 209-228.
- Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., Rasmussen, C. N., 2014. Review of Energy Storage System for Wind Power Integration Support. *Applied Energy* x, pp. xx.

CONCEPTS OF HYBRID POWER SYSTEMS FOR ELECTRICITY GENERATION

Abstract. *This article presents some basic concepts of hybrid systems for the production of electricity, and explains conceptual and practical aspects of these systems. Based on a general configuration of a hybrid system, it discusses the main components and technologies usually employed. In addition, it presents some advantages and disadvantages of the use of energy hybrid systems, as well as the challenges to be overcome for greater dissemination and application of these systems for electricity supply.*

Key words: *Hybrid Power Systems, Renewable Energy, Non-renewable sources*