

Geração Distribuída de Energia Elétrica: Uma Revisão Sistemática da Literatura

Flavio Henrique Alves Agrizzi (Faculdades Integradas Espírito-Santenses) flavioagrizzi@gmail.com

Adan Lucio Pereira (Universidade Federal do Espírito Santo) adanlucio@gmail.com

Luan Diego de Lima Pereira (Universidade Federal do Espírito Santo) luamdiego@hotmail.com

Jussara Farias Fardin (Universidade Federal do Espírito Santo) jussara.fardin@ufes.br

Lucas Frizera Encarnação (Universidade Federal do Espírito Santo) lucas@ele.ufes.br

Resumo:

Para atender a esse aumento de demanda cada vez mais expressivo, as redes de energia elétrica tradicionais têm sido gradualmente modificadas pela instalação de diversos geradores de pequena escala próximos aos consumidores. No atual cenário de geração, distribuição e consumo de energia elétrica, onde a demanda de energia é crescente, assim como as questões ambientais e financeiras, que se apresentam como entraves a grandes empreendimentos, a inserção dessas unidades geradoras nos sistemas de distribuição ou transmissão, denominado geração distribuída – GD, desempenha um importante papel. Este trabalho reúne uma revisão sistemática da literatura, analisando os principais tipos de recursos energéticos utilizados na GD modelando os sistemas frente ao atual sistema regulatório do Brasil e as normas regulamentadoras estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica.

Palavras chave: Fontes Renováveis de Energia, Planejamento Técnico, Planejamento Regulatório.

Distributed Generation of Electric Power: A Systematic Review of Literature

Abstract

To meet this increasingly expressive demand increase, traditional power grids have been gradually modified by the installation of several small-scale generators close to consumers. In the current scenario of generation, distribution and consumption of electricity, where energy demand is increasing, as well as environmental and financial issues, which present as obstacles to large enterprises, the insertion of these generating units in distribution or transmission systems, called distributed generation - DG, plays an important role. This work brings together a systematic review of the literature, analyzing the main types of energy resources used in DG modeling the systems in front of the current Brazilian regulatory system and the regulatory standards established by the National Electric Energy Agency.

Key-words: Renewable Energy Sources, Technical Planning, Regulatory Planning.

1. Introdução

O Brasil possui uma matriz energética diversificada, constituído majoritariamente por hidrelétricas. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2016, com ano base 2015, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as hidrelétricas constituem a principal fonte de energia elétrica do país, constituindo 64% da oferta interna de energia elétrica, porém tal fonte apresentou uma redução de 3,7% comparado ao ano anterior. Com a crise hídrica que o país enfrenta, as usinas hidrelétricas por si só não são mais suficientes para atender a demanda crescente de energia, levando a uma necessidade de fontes não poluentes e de novas tecnologias de geração de pequeno porte, acarretando na descentralização do fornecimento de energia e no surgimento da figura de pequenos produtores, desafogando o sistema elétrico (AZEVEDO, 2016).

A geração distribuída torna-se, portanto, elemento chave para reestruturação do sistema elétrico, oferecendo sustentabilidade e geração de energia limpa, impactando diretamente o sistema de transmissão e distribuição de energia. Ainda de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2016, divulgado pela EPE, em 2015, a geração distribuída atingiu 34,9 GWh, com uma potência instalada de 16,5 MW, sendo a fonte solar fotovoltaica responsável pelo maior percentual, com uma geração de 20 GWh e potência instalada de 13,3 MW.

A presença da geração distribuída nas redes de distribuição de energia elétrica requer recursos e procedimentos operativos adicionais em relação às redes convencionais, bem como padrões de conexão e práticas de planejamento da expansão. Destacam-se os sistemas de despacho, controle de supervisão apoiados em robusta infraestrutura de telecomunicação de TI (MCTI, 2015).

As Distribuidoras exigem instalações específicas para conexão de geração distribuída. Assim, a ANEEL estabeleceu, por meio da Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012), as condições gerais para o acesso da geração distribuída aos sistemas de energia elétrica, além de inserir o sistema de compensação de energia elétrica na rede. Essa Resolução classifica a geração distribuída como: microgeração e minigeração. A microgeração é caracterizada por uma potência instalada menor ou igual a 100kW. Já a minigeração é caracterizada por uma potência instalada superior a 100kW e menor ou igual a 1MW, as duas formas de geração distribuída tem como base fontes de energia elétrica, solar, eólica, hídrica, microturbinas ou cogeração qualificada, conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Neste trabalho é realizado uma pesquisa bibliográfica sobre geração distribuída e são discutidos os princípios de funcionamento das fontes mais utilizados na matriz energética brasileira. Para a realização desses procedimentos, a revisão foi conduzida por pesquisas nas bases de dados pré-selecionados como o *Google scholar*, *SciELO*, *researchgate* e o portal de periódicos CAPES.

O restante deste o artigo foi organizado da seguinte maneira: a seção 2 descreve a geração distribuída e seus recursos, assim como a resolução normativa que a regulamenta, as subseções 2.1 a 2.5 apresentam as características e o funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, centrais geradoras elétricas, microturbinas a gás, hidroeletricidade e célula combustível, respectivamente e a sessão 3 traz as considerações finais do trabalho.

2. Recursos de Geração Distribuída

Quando se trata de geração distribuída, que quase sempre utiliza fontes primárias limpas e intermitentes, como solar e eólicas, se faz presente a questão de armazenagem de energia. Adicionalmente, essas unidades geradoras são denominadas microfuentes, normalmente, possuem interfaces de eletrônica de potência que permitem instalação e conexão com a rede ou com esses sistemas de armazenamento auxiliares. Apesar do avanço tecnológico das baterias e de outras formas de armazenagem de energia para fornecimento em períodos relativamente longos, o custo dessas instalações ainda é muito alto (TOLEDO et al, 2012). O objetivo de gerar energia de modo distribuído é aproveitar as vantagens de fontes renováveis que emitem pouco carbono e a alta eficiência de sistemas que produzem calor e energia com cogeração. Em seguida, serão abordados alguns recursos para geração distribuída.

2.1 Sistemas Fotovoltaicos

Apesar de não serem precisamente definidas na literatura, as aplicações da energia solar são classificadas geralmente como ativas, passivas ou fotovoltaica. As aplicações de energia solar

ativa são geralmente preocupadas com a captação da energia térmica por meio de coletores solares que empregam componentes mecânicos ativos, bombas, para coletar e transportar o calor. Em paralelo, os sistemas passivos, geralmente são associados com o ambiente onde são construídos, ou seja, coletam e transportam o calor por meios não mecânicos. Já os sistemas fotovoltaicos utilizam a energia solar para produzir diretamente a eletricidade (HODGE, 2011).

A energia elétrica, proveniente das centrais geradoras solares, é utilizada nas mais diversas áreas com o objetivo de geração de energia elétrica aliada as seguintes vantagens: simplicidade de instalação, facilidade de expansão, elevado grau de confiabilidade do sistema, redução das perdas por transmissão de energia devido à proximidade entre geração e consumo e pouca necessidade de manutenção das placas de geração. Adicionalmente, os sistemas fotovoltaicos são microfones silenciosas e não poluentes de geração de energia elétrica (PEREIRA et al., 2015).

Relatado por Edmond Becquerel, em 1839, o Efeito Fotovoltaico pode ser explicado sucintamente como o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção de radiação. Essas estruturas de material semicondutor são denominadas de Células Fotovoltaicas (FRAIDENRAICH e LYRA, 1995; ROSEMBACK, 2004).

Independentemente do tipo de sistema fotovoltaico escolhido para compor uma central geradora solar, o elemento fundamental é a célula fotovoltaica. Essas células são montadas em módulos, que por sua vez, são montados em arranjos, os quais são integrados em sistemas com uma ampla gama de componentes, formando uma Central Geradora Solar (CGS) (SILVA et al, 2004; TOLMASQUIM, 2005). A Figura 1 mostra esse processo de confecção de uma CGS através de um conjunto de células fotovoltaicas.

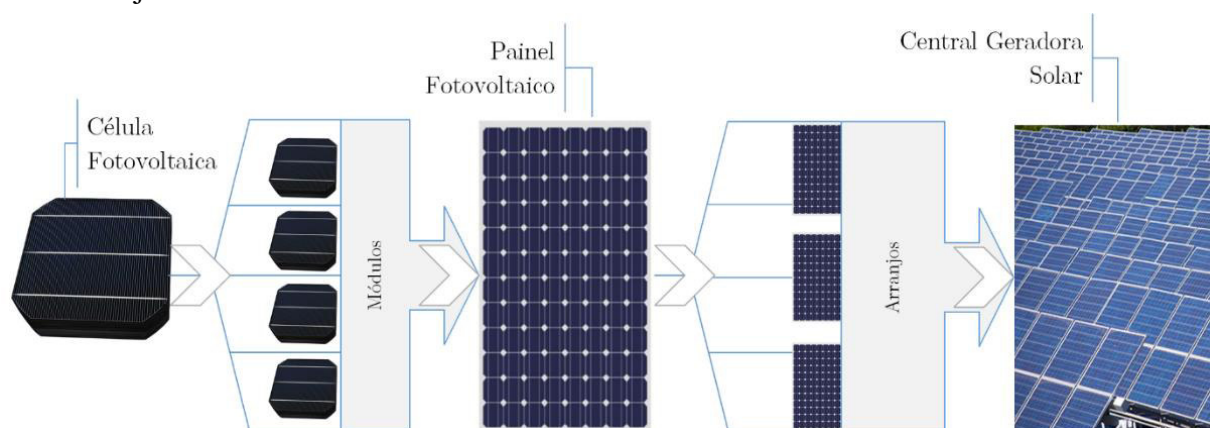


Figura 1 – Central Geradora Solar

Os sistemas fotovoltaicos se dividem entre os que são independentes e os que são integrados à rede elétrica principal. Esses sistemas podem ser classificados como (MARQUES, 2009; HODGE, 2011; PEREIRA, 2015): Sistemas diretamente acoplados; Sistemas com armazenamento em baterias; Sistemas com energia de reserva (gerador); Sistemas de energia híbrida; Sistemas conectados à rede elétrica; e os Sistemas para produção de energia elétrica.

Os quatro primeiros itens da lista geralmente são sistemas independentes. Um sistema diretamente acoplado fornece potência em Corrente Contínua, do inglês *Direct Current* (DC), diretamente para a carga. Consequentemente, esses sistemas são utilizados para equipamentos que necessitam de baixa potência para funcionalmente, ou seja, aplicações para as quais não há disponibilidade da rede elétrica. Entretanto, sem conexão à rede elétrica, geração de reserva por outra fonte ou capacidade de armazenamento, esses sistemas dependem completamente da

irradiação solar para a geração de energia e para a garantia de abastecimento da carga (MCTI, 2015).

Uma das desvantagens dos sistemas diretamente acoplados consiste na sua incapacidade de abastecer a carga, quando não estão expostos a irradiação solar. Para suprir essa deficiência, os sistemas com armazenamentos em baterias permitem abastecimento das cargas durante a noite quando a irradiação é insuficiente para satisfazer a demanda de energia da carga. Esse sistema inclui, ainda, o controlador de carga, que direciona a saída do arranjo fotovoltaico para a carga e para a recarga das baterias quando estiver sendo gerada a eletricidade, assim, quando o arranjo não estiver gerando energia, o controlador extrai energia elétrica da bateria para a carga. O Controlador de carga possui a capacidade de direcionar a energia das baterias para um conversor de cargas em corrente alternada AC, do inglês *Alternate Current* (HODGE, 2011). A Figura 2 mostra um sistema com armazenamento de baterias, é possível observar o papel do controlador de carga ao direcionar o fluxo de corrente da bateria para o inversor ou para a carga DC.

As métricas comuns às baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos incluem a tensão, a capacidade de carga, a capacidade de ciclo e a profundidade de descarga. A tensão, especificada em Volts (V), e a capacidade de carga, classificada em unidades de ampères-horas(Ah), são utilizadas para especificar o potencial de armazenamento e recarga de energia da bateria. A capacidade de ciclo se refere à quantidade de ciclos de carga/recarga mínimos oferecidos pela bateria.

Em paralelo, a profundidade de descarga especifica quanto (percentual) da energia armazenada em estado máximo pode ser extraída sem causar danos à bateria (IMHOFF, 2007; SEGUEL, 2009; PEREIRA, 2015). Outro sistema de grande utilização é o sistema fotovoltaico híbrido. Esse sistema consiste em um sistema independente da rede elétrica, mas que apresenta um gerador secundário que auxilia, junto aos painéis fotovoltaicos, no abastecimento das baterias e/ou cargas DC e/ou AC (MACHADO e MIRANDA, 2015). A Figura 3 mostra a atuação de um gerador, auxiliar e independente da rede, em um sistema fotovoltaico híbrido.

As aplicações, desses sistemas já citados, de pequena potência encontram-se em relógios, calculadoras, sinalização marítima, sinais rodoviários, parquímetros, telefones de emergência, transmissores de TV e de tele móvel ou frigoríficos médicos em locais remotos. Por sua vez, as aplicações de média potência dizem respeito à eletrificação rural, no abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, e como complemento de abastecimento em locais remotos (BOYLE, 2004; BANDEIRA, 2012).

Os sistemas fotovoltaicos podem, também, ser empregados para fornecer eletricidade para a rede elétrica. Em qualquer sistema fotovoltaico conectado a uma rede, a energia, proveniente das estações de geração solar, deve ser compatível com a tensão, frequência e fase da rede. Nesse caso, é adicionado um inversor/condicionador de potência com a finalidade de padronizar as métricas da geração fotovoltaica com o padrão da rede conectada (BERGER e INIEWSKI, 2015). A Figura 4 apresenta o esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

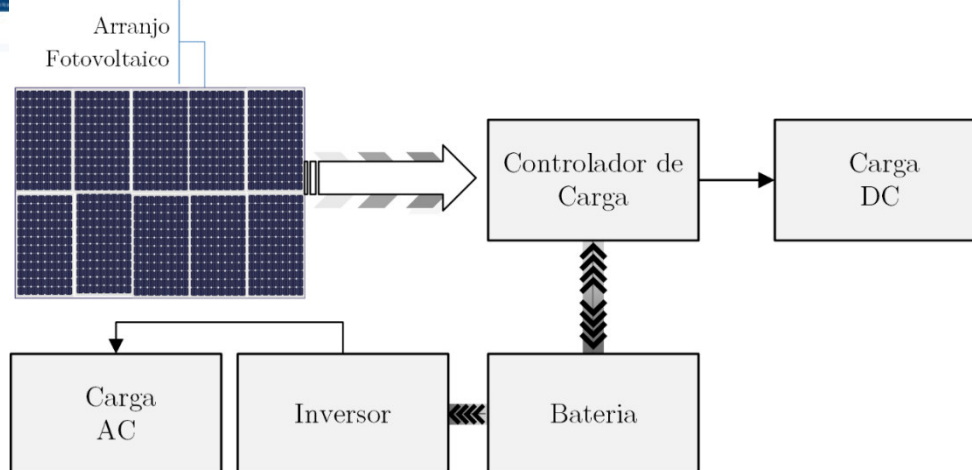


Figura 2 – Sistema Fotovoltaico Independente com Armazenamento em Baterias

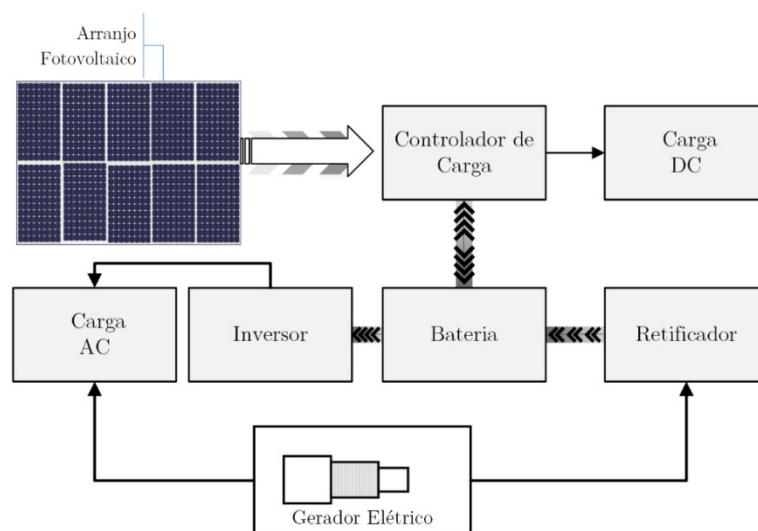


Figura 3 – Sistema Fotovoltaico Híbrido

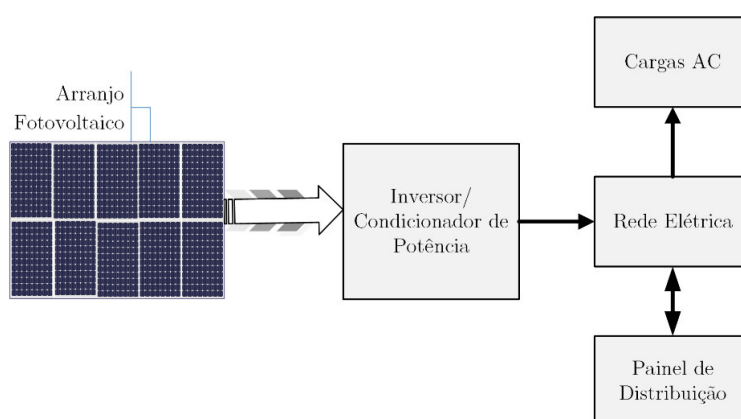


Figura 4 – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica

2.2 Centrais Geradoras Eólicas

Os dispositivos para aproveitar a energia proveniente dos ventos estão disponíveis em diversos tipos de configurações. As designações fundamentais de um equipamento de energia eólica incluem a turbina eólica com eixo horizontal, do inglês *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

e a turbina eólica com eixo vertical, do inglês *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT), ou seja, os dispositivos VAWTs giram no plano vertical, enquanto que, os HAWTs giram no plano horizontal. (ALCÂNTARA, 2010; MELO, 2012).

As turbinas HAWTs são mais comuns do que as VAWTs e podem ser classificadas quanto à direção de coleta dos ventos em duas categorias, *downwind* e *upwind*. Em uma turbina *downwind* o vento incide na parte traseira da área de varredura da turbina, já em uma *upwind*, o vento incide na parte dianteira (PINTO, 2014b).

Um aerogerador é um equipamento destinado a gerar energia elétrica a partir da energia fornecida pelo vento. A energia cinética do vento movimenta a turbina, que produz energia mecânica, transmitindo-a ao gerador, que em seguida faz a conversão da energia mecânica em elétrica. A capacidade destas turbinas começou com apenas 10 kW, atualmente já existem turbinas de 5 MW e projetos em desenvolvimento para turbinas de 10MW e 15MW para aplicações (BERGER e INIEWSKI, 2015).

A Figura 5 indica um diagrama esquemático que ilustra as partes importantes de uma HAWT, no topo da torre está a nacele, com uma caixa de engrenagens, os controles e os subsistemas do aerogerador; o rotor é acoplado à caixa de engrenagens e ao gerador por um eixo; o diâmetro do rotor e a área de varredura das pás são indicados, assim como a altura do cubo.

Basicamente, como indicado na Figura 5, um aerogerador é constituído dos seguintes componentes (MELO, 2012; PINTO, 2014b; PEREIRA, 2015):

- a) Nacele - Componente que abriga diversos dispositivos, tais como, o gerador, o sistema de transmissão de potência (eixos e sistemas hidráulicos) e outros. A nacele pode ter ou não uma caixa de engrenagens (Caixa multiplicadora);
- b) Gerador elétrico: Gerador que usa a energia rotacional do eixo para produzir eletricidade via eletromagnetismo (Lei de *Faraday*), podendo ser convencional (com caixa multiplicadora) ou multipólos (sem caixa multiplicadora);
- c) Pás - Dispositivos que capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo. Tradicionalmente, as pás, são fabricadas a partir de compostos sintéticos, plásticos reforçados com fibras de vidro ou fibras de carbono;
- d) Eixo - Componente da turbina responsável por transferir a energia rotacional para uma caixa multiplicadora, no caso de geradores convencionais, ou então diretamente para o gerador, no caso de geradores multipólos;
- e) Torre - Elemento que sustenta o rotor e a nacele. A torre de uma turbina é responsável por erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo;
- f) Cubo - Componente responsável pela transmissão de energia capturada pelas pás para o eixo, juntos, o cubo e as pás, forma o rotor do aerogerador;
- g) Caixa de engrenagens - Componente que aumenta a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador;

Como forma de incentivo a geração distribuída de energia, existem ainda, as microturbinas eólicas. Com saída inferior a 1 kW, essas turbinas estão disponíveis comercialmente e são bem eficientes. Algumas dessas microturbinas estão sendo produzidas para realizar várias tarefas simultaneamente, quais sejam, carregar baterias de veículos elétricos, fornecer energia elétrica para iluminação pública e/ou casas situadas em locais remotos, onde não há fornecimento de eletricidade por uma concessionária (PINTO, 2014b).

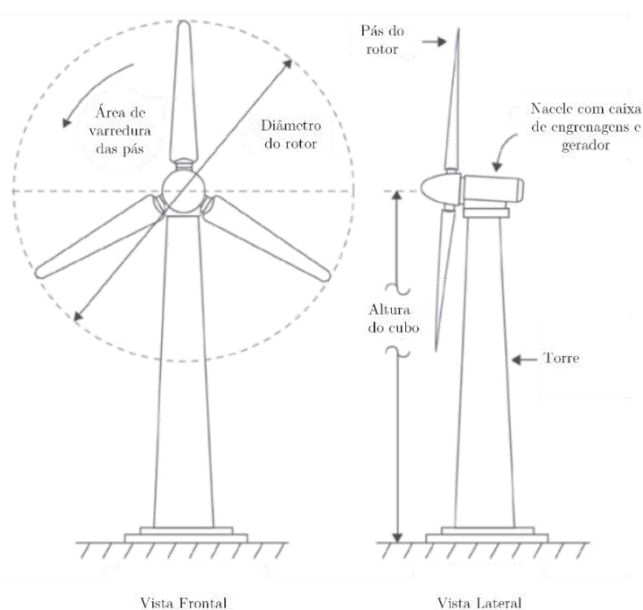


Figura 5 – Diagrama esquemático de uma HAWT
Fonte: Adaptado de Hodge (2011)

2.3 Microturbinas a Gás

As turbinas a gás foram desenvolvidas com o objetivo de auxiliarem em aplicações aeronáuticas durante a Segunda Guerra Mundial, ganharam destaque e em seguida foram adaptadas para serem utilizadas como propulsores de aeronaves, turbinas de combustão ou microturbinas a gás para geração de energia elétrica e até mesmo propulsores marítimos (HODGE, 2011).

As Microturbinas a gás são equipamentos modulares movidos principalmente a gás, de pequeno porte, com potências de até 500kW. Aplicações desses dispositivos estão ligadas ao aumento de confiabilidade do sistema e fornecer energia com reduzidos índices de perdas. Podem ser de dois tipos: um denominado “simples estágio”, pois seu eixo está diretamente conectado entre o gerador e a turbina, produzindo de 1.500 a 4.000Hz; e, outro com “eixo dividido” onde o gerador se conecta a turbina por meio de uma caixa de transmissão. (FELIACHI, 2003; COLANTONI et al, 2009). Uma microturbina operar de duas formas, conectada à rede ou no modo ilhado, onde o sistema permanece conectado apenas à carga. Operando em conectado a microturbina funciona como uma fonte de corrente, conectada à rede principal, o sistema produz potência ativa de acordo com a determinação do operador da máquina.

Uma das características mais desejadas em uma microturbina, que diminuiria bruscamente a taxa de interrupção de energia elétrica num consumidor abastecido por ela e pela rede de energia principal, é a capacidade de transição direta e automática do modo conectado para o modo desconectado da rede. Consequentemente, no caso da interrupção do fornecimento de energia pela rede principal, a microturbina se desconecta da rede e continua a fornecer energia para o consumidor. Entretanto, nem todas as microturbinas realizam essa transição diretamente, sendo necessário primeiro desligá-las para só depois reiniciá-las em um outro modo de operação, tal processo demora pelo menos 3 minutos (SANTOS, 2012). Entre as principais vantagens da utilização das microturbinas como forma de geração distribuída em uma rede de energia pode-se citar (BONA e RUPPERT FILHO, 2004; DA SILVA, 2011):

- a) Alta durabilidade e projeto simples, que permite redução considerável de custos e grandes volumes de fabricação de componentes associados as microturbinas de geração

das centrais eólicas;

- b) Trabalham com baixas pressões, são compactas, fáceis de instalar e de reparar, e possuem eficiência razoável (30-33%), podendo chegar uma eficiência total de 80% com o uso da cogeração, com emissões atmosféricas baixas devido à combustão contínua;
- c) Dimensões reduzidas: uma microturbina de 30 kW tem aproximadamente a dimensão de um refrigerador doméstico e flexibilidade de combustível: pode ser utilizado gás natural, diesel, biogás e propano.

Os componentes básicos de uma microturbina são: o compressor, a câmara de combustão, a turbina e o gerador elétrico. Durante o seu funcionamento, o ar é aspirado da atmosfera e comprimido, passando para a câmara de combustão, onde é aquecido pela combustão. Nesta câmara ocorre a reação de combustão, produzindo gases quentes, que escoam através da turbina, onde se expandem, produzindo potência mecânica para acionar o eixo do compressor e da carga, que pode ser um gerador elétrico (MALDONADO, 2010; HODGE, 2011).

Com o objetivo de aumentar o rendimento da microturbina é comum a integração de um recuperador de calor (regenerador) que permite aproveitar o calor disponível nos gases de escape para pré-aquecer o ar comprimido que chega ao combustor. Esse componente aumenta em muito a eficiência da microturbina (de 16% para 33% aproximadamente) e é utilizado em quase todas as microturbinas comerciais encontradas (BONA e RUPPERT FILHO, 2004; COLANTONI et al, 2009; HERRERA, 2015). O modelo de uma microturbina a gás com um recuperador de calor é apresentado na Figura 6, nesse modelo é apresentado um estado 5, uma unidade para utilização de calor que pode servir para o aproveitamento da energia térmica em uma

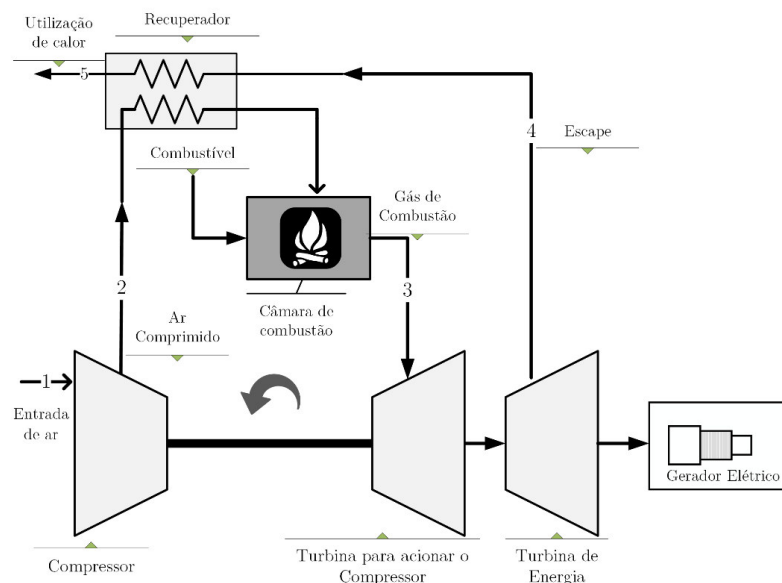


Figura 6 – Sistema de uma microturbina a gás com recuperador de calor

2.4 Hidroeletricidade

A hidroeletricidade é uma das melhores, mais baratas e limpas fontes de geração de energia elétrica. O conceito de hidroeletricidade nasceu para definir a geração de eletricidade por meio da conversão da energia cinética da água em energia potencial mecânica, que acionará um conjunto turbina-gerador e, conseqüentemente, produzirá energia elétrica. Ao contrário das demais fontes renováveis, representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas (ANEEL, 2005).

A usina hidrelétrica é composta, basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada. A construção de uma usina em um rio exige a construção de uma barragem para represa-lo, formando, na área, um reservatório. Além de estocar a água, esses reservatórios têm outras funções: permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica, a captação da água em volume adequado em períodos de chuva ou estiagem, onde poderiam ocorrer decréscimos na vazão do rio (ROSA, 2007; PINTO, 2014a). Os sistemas de captação e adução são formados por estruturas de túneis, canais ou condutos metálicos que levam a água até a casa de força. É nesta instalação que estão as turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador. Durante o seu movimento giratório, as turbinas convertem a energia cinética, movimento da água, em eletricidade por meio dos geradores. Em seguida, a água é conduzida ao leito natural do rio pelo canal de fuga do sistema. Por último, há o vertedouro, que permite a saída da água quando os níveis do reservatório ultrapassam os limites máximos (ANEEL, 2009).

Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de queda e vazão. A turbina tipo Bulbo é usada nas usinas fio d'água por ser indicada para baixas quedas e altas vazões, não exigindo grandes reservatórios (ANEEL, 2009).

As usinas hidrelétricas são classificadas em algumas categorias de acordo com a sua capacidade de geração de energia. Essas faixas de definição variam de país para país, sendo assim, não existe um consenso mundial. No Brasil, a ANEEL classifica como uma Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) as instalações com capacidade acima de 30 MW; define ainda, uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH) como instalações com potencial de até 3MW; e por fim, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), as quais correspondem a geração superior a 3MW e inferior a 30MW (ANNEEL, 2015).

Instaladas em rios de pequeno e médio porte, as PCH são, geralmente são usinas a fio d'água, ou seja, seus reservatórios não permitem um escoamento regular de água. Dessa forma em momentos de seca as turbinas podem ficar ociosas. De fato, a maioria das vezes, não ocorre a formação de um reservatório típico de uma usina hidrelétrica (GOLDEMBERG, 2010; PINTO, 2014a)

De acordo com a Resolução nº 673 de 4 de Agosto de 2015 da ANEEL, no caso de uma PCH, a área do reservatório deve ser inferior a 13km², excluindo a calha do leito regular do rio, valores superiores poderão ser validados após deliberação técnica da ANNEEL. Dados do Banco de Informações de Geração (BIG) mostram 456 PCHs com uma potência total outorgada de 4.805 MW e 548 CGHs com uma potência total outorgada de 407 MW (ANEEL, 2016).

O custo da energia elétrica de uma PCH é menor do que uma UHE, como também é menor o seu impacto ambiental. Outro ponto positivo de uma PCH é o seu tempo de instalação, cerca de 18 meses, além de não exigir o deslocamento da população local e nem a emissão de CO₂. Adicionalmente, a manutenção desses sistemas é simples e de custo relativamente baixo. Dessa forma, esse tipo de empreendedorismo possibilita um melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais (PERIUS e BONFIM, 2012).

2.5 Células Combustíveis

Tradicionalmente, em qualquer sistema de combustão convencional, um combustível reage com um oxidante, oxigênio, para liberar a energia química armazenada no combustível na forma de calor. Em uma estrutura de célula combustível, a energia química armazenada no combustível é convertida em eletricidade, sem passar pelo processo de combustão, produzindo individualmente entre 0,5 e 0,9 V de eletricidade DC (WENDT et al, 2000; HODGE, 2011).

As células combustíveis e as baterias produzem corrente contínua, através de um processo eletroquímico na ausência da combustão direta de uma fonte de combustível. Contudo, uma bateria só pode fornecer energia armazenada, fonte finita, mas uma célula combustível pode funcionar ininterruptamente contanto que esteja disponível uma fonte de combustível adequada. Geralmente, essas células são combinadas em pilhas, com a finalidade de produzir tensão e potência de saída utilizáveis (PERLES, 2008).

Um sistema de células de combustível é composto por três componentes: um reformador de combustível (processador) que gera gás rico em hidrogênio a partir do combustível; uma seção de energia onde ocorre o processo eletroquímico; e um condicionar/inversor de energia que realiza a conversão da eletricidade em corrente contínua para corrente alternada, realizando a configuração padrão da rede elétrica (TOLEDO et al, 2012). Um diagrama de blocos do sistema de uma célula combustível é apresentado na Figura 7 e ilustra esse procedimento de geração de energia elétrica, é possível observar que quando o hidrogênio é utilizado como combustível e oxigênio como oxidante, ocorre além da geração de eletricidade, a formação de água e produção de calor.

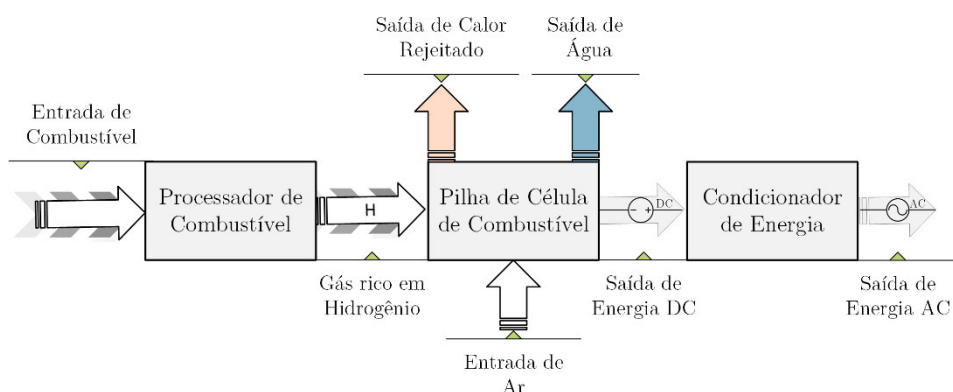


Figura 7 – Diagrama de blocos da célula combustível

Os sistemas baseados em células combustíveis para geração distribuída produzem eletricidade com eficiência entre 40% e 60%, com emissões reduzidas e de forma tão silenciosa que podem facilmente ser utilizadas em ambiente urbano. Sua interface com a microrrede se dá muitas vezes por meio de inversores e possuem um potencial entre 1 kW a 10 MW (ALCÂNTARA, 2013).

3. Considerações Finais

O princípio básico da GD consiste em acrescentar geração de pequeno ou médio porte, a partir da utilização de fontes alternativas de energia, baseada em diferentes tecnologias, em sistemas de distribuição e subtransmissão. O uso de GD oferece inúmeras vantagens, uma vez que, a disposição da unidade de geração próxima à carga permite a redução das perdas associadas ao transporte de energia elétrica.

Dessa forma, já é uma realidade tratar as novas formas de geração de energia elétrica como elementos primordiais como garantia do abastecimento do consumo cada vez mais elevado. Entretanto, ainda existem dificuldades técnicas e regulatórias para a inserção desses novos sistemas nas redes de energia.

Diante do exposto torna-se evidente, que garantir a continuidade do serviço e a conformidade da corrente elétrica são questões que estão sendo promovidas pela utilização de novas tecnologias de geração de energia elétrica. No Brasil, ainda carece de um enfoque no planejamento e de marcos regulatórios que permitam sua expansão desses novos sistemas por

meio de mecanismos que resolvam os problemas dos custos mais elevados e de financiamento. Inserindo-se neste contexto, o presente trabalho indicou um estudo dos elementos de geração distribuída de energia elétrica utilizados como referência para os sistemas energéticos. Este estudo evidencia que existe uma grande diversidade desses mecanismos de geração e que de fato, investimentos no setor podem indicar um salto gigantesco em relação aos desafios de geração de energia nos horários de picos e a amenização dos problemas relativos impactos ambientais de fontes poluentes.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA *Resolução Normativa nº 664, de 16 de junho de 2015. Aprova alteração dos Módulos 1, 6 e 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.* Disponível em < http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/052/resultado/ren_2015_664.pdf>. Acesso em Dez, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil.* 3ª Ed. – Brasília : ANEEL, 236 f., 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Informações de Geração Capacidade de Geração do Brasil.* Atualizado em: 10/02/2016. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em Fev. de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução ANEEL nº 345, de 16 de dezembro de 2008. Aprova os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, e dá outras providências.* Brasília (DF), 2008. Disponível em: < http://www.abricem2.com.br/web3/index.php?option=com_content&view=article&id=79%3Aeh...>. Acesso em Setembro de 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resolução Normativa nº 482, De 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída e dá outras providências.* Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> > Acesso em setembro 2015, 2012

ALCÂNTARA, M. V. P. *Microrredes inteligentes: um novo modelo de negocio para a distribuição de energia elétrica,* 2010. Acesso em 02 de janeiro de 2016. Disponível em <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/>.

ALCÂNTARA, M. V. P.; SILVA, LUIZ C. P. DA ; GERALDI, D. *Energy Efficiency in Smart Grids.* In: II Conference on Innovative Smart Grid Technologies - IEEE ISGT Latin America 2013, 2013, São Paulo. Anais ISGT-LA 2013, 2013.

AZEVEDO, G.A. *Geração Distribuída: Uso da Energia Solar em Condomínios de Edifícios.* ISSN 2179-5568 – Revista Especialize On-line IPOG - Goiânia - Edição nº11 Vol./2016 julho/2016.

BANDEIRA, F. P. M. *Redes de energia elétrica inteligentes (smart grids).* Nota técnica. Consultoria Legislativa, 2012. Disponível em: < http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema16/2012_7872.pdf>. Acesso em: nov. 2015.

BERGER, L. T. e INIEWSKI, K. *Smart Grid: aplicações, comunicação e segurança.* 1 ed - Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BONA, F. S.; RUPPERT FILHO, E. *As microturbinas e a geração distribuída.* In Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas (SP), 2004.

BOYLE, G. *Renewable energy: Power for a sustainable future.* 2nd edition. Oxford Press University, ISBN: 0-19-926178-4, 2004.

COLANTONI, S.; DELLA GATTA, S.; DE PROSPERIS, R.; RUSSO, A.; FANTOZZI, F.; DESIDERI, U. *Gas Turbines Fired With Biomass Pyrolysis Syngas: Analysis of the Overheating of Hot Gas Path Components,* In: ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Florida, USA; pp. 389 – 398, 2009

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional (BEN)* 2016: Ano base 20 Balanço Energético Nacional (BEN) 2016: Ano base 2015, 2016 15, 2016. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br>

- FELIACHI, F.** *Control of grid-connected split-shaft microturbine distribute generator.* IEEE Southeastern Symposium On System Theory, v. 53, 2003.
- FRAIDENRAICH, N., LYRA, F.,** *Energia Solar: Fundamentos e Tecnologia de Conversão Heliotérmica e Fotovoltaica.*, Editora Universitária da UFPE, 1995
- GOLDEMBERG, J.** *Energia e desenvolvimento sustentável.* São Paulo: Blucher, 2010.
- HERRERA, R. P.** *Nebulização de Etanol na Entrada do Compressor de uma Microturbina a Gás de 30kW: Análise Termodinâmica e Experimental.* 2015. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- HODGE, B. K.** *Sistemas e aplicações de energia alternativa.* Rio de Janeiro: LTC, 2011
- IMHOFF, J.** *Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos.* 2007. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, 2007.
- MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S.** *Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão.* Rev. Virtual Quim., ISSN 1984-6835, 7 (1), 126-143, 2015.
- MELO, M. S. M.** *Energia eólica: aspectos técnicos e econômicos.* 2012. 154f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós graduação e Pesquisa de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE-UFRJ, 2012.
- PEREIRA, A. L.; COURA, D. J. C.; CELESTE, W. C. -** *Utilização da Metaheurística GRASP como Solução para o Problema de Reconfiguração de Redes Inteligentes de Energia.* In: Congresso Sul Brasileiro de Computação, 2014, Criciúma. VII Sulcomp, 2014.
- PERIUS, M, R.; BONFIM, J.** *Pequenas centrais hidrelétricas como forma de redução de impactos ambientais e crises energéticas.* Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde, vol. 16, núm. 2, 2012, pp. 135-150 Universidade Anhanguera Campo Grande, Brasil
- PERLES, C. E.** *Propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de Nafion para aplicações em células a combustível do tipo PEMFC.* Polímeros, vol.18, no.4, p.281-288. ISSN 0104-1428, 2008.
- PINTO, M. O.** *Energia Elétrica : Geração, Transmissão e Sistemas Interligados.* 1 Edição - Rio de Janeiro: LTC, pg. 22, 2014a.
- PINTO, M. O.** *Fundamentos de energia eólica.* 1 Edição - Rio de Janeiro: LTC, pg. 165, 2014b.
- ROSA, L. P.** *Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear.* Estud. av, vol.21, n.59 pp. 39-58, ISSN 1806-9592, 2007.
- ROSEMBACK, R. H.** *Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico.* 2004. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.
- SANTOS, A. P. P.** *Thermodynamic analysis of gás turbine cycle using inlet air cooling methods.* 2012. 104f. Dissertação (Mestrado em Aerodinâmica, Propulsão e Energia) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2012.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO.** *Redes Elétricas Inteligentes Diálogo Setorial Brasil-União Europeia em 2014.* Projeto Apoio Aos Diálogos Setoriais União Europeia - Brasil. 2015. Disponível em < <http://www.mcti.gov.br/>
- SEGUEL, J. I. L.** *Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital.* 2009. 222f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- TOLEDO, F. et al.,** *Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes: Smart Grid Handbook,* Rio de Janeiro, 2012.
- TOLMASQUIM, T. M.** *Geração de energia elétrica.* Rio de Janeiro: Interciência: CINERGIA, 2005
- WENDT, H.; GOTZ, M.; LINARDI, M.** *Tecnologia de células a combustível.* Quím. Nova, vol.23, n.4, pp. 538-546, ISSN 1678-7064, 2000.