

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**O USO COMBINADO DE PEQUENAS CENTRAIS
HIDRELÉTRICAS E PARQUES EÓLICOS**

Marcelo Daige Prado Leite

Itajubá, julho de 2015

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Marcelo Daige Prado Leite

**O USO COMBINADO DE PEQUENAS CENTRAIS
HIDRELÉTRICAS E PARQUES EÓLICOS**

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Exploração do uso racional de recursos naturais e energia.

Orientadora: Profa. Dra. Regina Mambeli Barros.

Co-Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho.

**Julho de 2015
Itajubá-MG**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Marcelo Daige Prado Leite

**O USO COMBINADO DE PEQUENAS CENTRAIS
HIDRELÉTRICAS E PARQUES EÓLICOS**

**Dissertação aprovada por banca examinadora em
14 de maio de 2015, conferindo ao autor o título de
*Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.***

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Regina Mambeli Barros.

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho.

Profa. Dra. Michelle Simões Reboita.

Prof. Dr. Sérgio Valdir Bajay.

Itajubá 2015

RESUMO

O uso combinado de fontes energéticas, tanto renováveis quanto não renováveis, vem se tornando realidade no Brasil e no mundo. O embrião dessa mudança foram os sistemas híbridos, compostos por geradores eólicos e placas fotovoltaicas. Esta dissertação apresenta um estudo a respeito de uma usina conceitual formada pela combinação das energias hídrica e eólica (hidroeólica), o que resulta em um novo tipo de sistema híbrido composto pela associação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Parques Eólicos. Os principais motivos que levaram a essa escolha foram: o fato das duas fontes se complementarem ao longo do ano, a ausência das flutuações intermitentes que existem em ambas quando isoladas e a capacidade que o sistema apresenta em armazenar energia quando há pouca demanda. O trabalho foi fundamentado teoricamente nos conceitos de sistemas híbridos, que começam a ser disseminados pelo mundo e cujo estado da arte é a combinação hidroeólica. A teoria permitiu embasar o cálculo da potência instalada, da energia gerada e do fator de capacidade do sistema. A metodologia utilizada contou com uma prospecção no território nacional, que teve o objetivo de encontrar uma região ideal para a instalação do parque híbrido, e que contempla imagens de satélite e inventários hídricos e eólicos. Foi realizado um estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Itaguari, sub-bacia 45 do rio São Francisco no estado da Bahia, no qual as turbinas eólicas, assim como a disposição delas no terreno, foram definidas. Um fluxo de caixa foi simulado e através do método de análise do valor presente líquido o empreendimento se mostrou viável. De fato, o sistema híbrido hidroeólico é uma opção futura para a matriz energética brasileira, visto que, além da matéria prima ser proveniente de duas fontes renováveis, as tecnologias necessárias para implantação desse tipo de usina já estão difundidas no país.

Palavras chave: Sistemas Híbridos, Pequenas Centrais Hidrelétricas e Parques Eólicos.

ABSTRACT

The combined use of energy sources, both renewable and non-renewable, is now being implemented in Brazil and worldwide. The catalyst for this shift was the introduction of hybrid systems that included either wind generators or photovoltaic panels. Here we presents a conceptual plant formed by the combination of water and wind energy (hydro/wind), which results in a novel type of hybrid system characterized by the association of small hydropower and wind farm station. The principal reasons that led to this choice were: the fact that the two sources complement each other throughout the year (i.e., the absence of intermittent fluctuations that exist when either system is used in isolation) and the ability of the system to store energy when there is little demand. The study was theoretically based on the concepts of hybrid systems, which is gaining increased attention prominent worldwide. The hydro-wind combination represents the vanguard of this field of research. Initially, we were able to conceive the system and calculate the installed power, generated energy, and capacity factor of the system. Second, we conducted a survey with in Brazil, aimed to identifying an ideal location for the installation of the hybrid power station which included satellite images and hydro and wind inventories. A case study was carried out in the catchment area of the river Itaguari, sub-basin 45, of the São Francisco River in the state of Bahia, in which the wind turbines, as well as their disposal on the ground, have been defined. A cash flow was simulated and the Net Present Value (NPV) proved viable. Given that the raw materials are renewable sources and that the technologies required for implementation of this type of the plant are already widespread in the country, the hybrid hydro-wind system should now be considered an advantageous option for the addition to the Brazilian energy matrix.

Keywords: Hybrid Systems, Small Hydro Powers and Wind Farms.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Justificativas.....	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1. Considerações iniciais.....	11
2.2. Formulação para o sistema híbrido.....	11
2.3. Formulação para a análise econômica.....	17
3. METODOLOGIA	20
3.1. Considerações iniciais.....	20
3.2. Obtenção de dados hídricos.....	20
3.3. Obtenção de dados eólicos.....	21
3.4. Obtenção de imagens.....	23
4. ESTUDO DE CASO	26
4.1. Considerações iniciais.....	26
4.2. Sistema híbrido.....	26
4.3. Energia e fator de capacidade.....	32
5. ANÁLISE ECONÔMICA	34
5.1. Valores de referência.....	34
5.2. Índices econômicos.....	36
6. CONCLUSÕES	38
APÊNDICE A	39
APÊNDICE B	40
APÊNDICE C	44
APÊNDICE D	45
REFERÊNCIAS	46
ANEXO A	51
ANEXO B	52
ANEXO C	53

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A evolução humana sempre foi acompanhada de transformações. Por meio do descobrimento de fontes e maneiras alternativas de adaptação ao ambiente em que vive, o homem buscou o atendimento às suas necessidades. A energia, nas suas mais diversas formas, possui a capacidade de transformar, e isso faz com que ela seja necessária à sobrevivência da espécie humana. Quando um recurso energético é exaurido, ou se torna inconveniente, logo é substituído por outro. A eletricidade, por exemplo, devido à sua versatilidade, passou a ser um recurso estratégico para o desenvolvimento no mundo.

A radiação solar e a energia potencial gravitacional que originam o ciclo hidrológico (evapotranspiração, condensação, precipitação, infiltração etc.), são responsáveis pela energia hidráulica, passível de ser aproveitada para geração de energia hidrelétrica. No presente cenário, a energia hidráulica consiste na principal fonte de geração de energia elétrica em diversos países e representa aproximadamente 57% de toda a eletricidade gerada no mundo, WORLD ENERGY COUNCIL (2013). Isso, em razão de haver tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas, ao contrário de outras fontes de energia renovável.

As massas de ar em movimento na atmosfera terrestre (ventos) possuem energia cinética embutida, denominada energia eólica. O seu aproveitamento se dá pela rotação das turbinas eólicas, conhecidas por aerogeradores. Além da geração de eletricidade, a energia dos ventos também pode ser aproveitada por cata-ventos e moinhos para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água por exemplo, ANEEL (2005).

Atualmente, o consumo global de energia, em todos os segmentos da sociedade, tem aumentado consideravelmente. Esse avanço na demanda pode ser atribuído à necessidade de industrialização de países em desenvolvimento. Além disso, a atividade econômica rural, como a produção agrícola em pequena escala, tem que estar alinhada às novas tendências energéticas, MOHAMMED (2014).

O fornecimento de energia elétrica baseado no consumo de óleo diesel é oneroso e poluidor, por isso, sistemas simples de geração de energia tais como solar, eólico, hídrico e de biomassa estão sendo pesquisados. A combinação deles é chamada de sistema híbrido, os resultados mostram que aplicações em redes elétricas isoladas são economicamente viáveis, principalmente em regiões remotas.

Até o presente momento não existe uma definição simples para sistema elétrico híbrido. Muitos pesquisadores tentaram descrevê-lo conforme seu entendimento próprio. Segundo Bekele (2012), sistema híbrido é um dispositivo de geração de energia, isolado ou não, que compreende mais de uma fonte e o produto final é basicamente eletricidade.

O objetivo de diversos países, em diferentes regiões do mundo, especialmente os emergentes, é fornecer energia econômica e ambientalmente viável aos seus cidadãos. Essa busca é geralmente uma das maiores prioridades do governo, principalmente para as pessoas que vivem nas áreas mais remotas. Por esse motivo, pesquisadores e especialistas em energia têm buscado métodos alternativos na geração, com foco nas fontes renováveis. Países desenvolvidos já estão usando sistemas híbridos, AMARANTE (2001).

Um número crescente de nações está estabelecendo políticas para o uso de energias renováveis, porém, tais políticas não estão limitadas a um país apenas. Há uma tendência semelhante nos desafios enfrentados, o que difere é a perspectiva econômica e a orientação tecnológica de cada sociedade. O fato é que, trabalhos que envolvem a expansão de energias renováveis, tanto isoladas quanto híbridas, alteram a matriz energética e causam mudanças econômicas e políticas.

Ao longo das últimas décadas, centenas de usinas hidrelétricas de todos os portes foram construídas no Brasil. As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) foram os embriões desse desenvolvimento. Recentemente, perderam o papel de destaque devido às mudanças ocorridas na matriz energética nacional, iniciadas em meados da década de 1990. Hoje o mercado de PCH encontra-se desaquecido, FARIA (2011).

Da mesma forma, o primeiro aerogerador do Brasil foi instalado em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha. Em 2012 o país contava com 147 aerogeradores em operação em 16 usinas eólicas, totalizando uma potência instalada de 247 MW, BRASIL (2005). Nos dias de hoje, o governo vem incentivando o uso dessa energia através do Programa Emergencial de Energia Eólica (Proeólica).

Em outubro de 2014, o Ministério de Minas e Energia divulgou que na matriz de capacidade instalada fiscalizada pela ANEEL, de geração de energia elétrica do Brasil, a fonte eólica era de 4.228MW, ou 3,2% da capacidade total instalada; no entanto, representando uma evolução da capacidade instalada dessa fonte entre out/13 e out/14, de 100,4%.

Em um cenário otimista, vários sistemas de geração de eletricidade usando energia renovável surgirão no futuro. Esse aumento está diretamente ligado à escassez de energia a partir de fontes convencionais e a intenção mundial de diminuir as emissões de carbono na atmosfera, MEDEIROS (2011).

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2023, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no horizonte decenal prevê-se crescimento significativo da participação da fonte eólica. Essa deverá corresponder a 11,5% da matriz energética nacional. Estima-se uma capacidade instalada de 22,4 GW em 2023, sendo que, a previsão para 2022 apresentou um valor mais conservador, atingindo a marca de 17,5 MW.

No Brasil, algumas localidades já utilizam sistemas com miniredes de distribuição para fornecimento de energia elétrica. A fonte mais utilizada é o grupo gerador diesel. No entanto, esse sistema possui desvantagens, tais como: alto custo operacional, transporte de óleo diesel, ruído e emissão de gases poluentes. Todos esses aspectos negativos podem ser eliminados com a utilização de recursos energéticos locais.

Os sistemas híbridos estão sendo sugeridos como um método de integração entre fontes renováveis. Já existem localidades isoladas das redes de distribuição de eletricidade que são assistidas pela energia solar e eólica. Por isso, planos de ação foram criados para garantir uma combinação eficaz e combater a crise energética no país, BRASIL (2012).

Nesse contexto é que surgem os sistemas híbridos de geração elétrica isolados. Esses sistemas podem fornecer energia de forma confiável e ao mesmo tempo diminuir a dependência de recursos externos. São formados por duas ou mais fontes, sendo as mais comumente utilizadas a eólica e a solar. A literatura atual, embora escassa, já aborda a utilização de sistemas híbridos construídos a partir de PCH e parque eólico.

A interligação de usinas hidroelétricas também minimiza o problema da intermitência dos ventos, por meio do chamado efeito portfólio; onde, como ocorre numa carteira de ações da bolsa de valores, a produção conjunta dos parques híbridos varia menos que as produções individuais, CARVALHO (2011).

O Brasil dispõe de potenciais hidroelétricos que lhe abrem a possibilidade de produzir, de forma renovável e sustentável, toda energia elétrica que consome, e consumirá quando a população estiver estabilizada em 215.000.000 de habitantes, o que, segundo o IBGE, deverá acontecer por volta de 2050.

Com o desenvolvimento da indústria eólica no Brasil, nas últimas décadas, e a redução no preço dos equipamentos, os sistemas híbridos hidroelétricos se tornaram uma alternativa atrativa, tanto no ponto de vista técnico como econômico. Esses sistemas, estruturados nas condições brasileiras, seriam inteiramente sustentáveis e teriam capacidade de cobrir por um longo tempo a demanda por energia, SAUER (2015).

Levando em conta esse cenário, surge a necessidade de aprofundarem-se os estudos relacionados à operação e manutenção desses sistemas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Gerais

Contribuir com o aumento de energias renováveis na matriz energética nacional por meio de estudo de caso da viabilidade técnica e econômica da combinação de duas fontes que se complementam: energia hídrica e eólica. Demonstrar no mesmo estudo de caso, que a capacidade energética de um sistema híbrido hidroeólico é maior quando comparado aos sistemas isolados.

1.2.2. Específicos

Escolher uma região, dentro do território nacional, propícia ao emprego de sistemas híbridos de geração elétrica, combinando o uso de PCH e parque eólico: sub-bacia 45, integrante da bacia hidrográfica do rio São Francisco no estado da Bahia, rio Itaguari e seu afluente riacho do Meio. Analisar a viabilidade econômica da instalação de um parque híbrido neste estudo de caso.

Para tanto, torna-se necessário:

- Levantar e analisar os dados da série histórica eólica, com a velocidade média do vento a dada altura por um período de tempo de 2 anos;
- Determinar a carta de declividade dos rios da bacia hidrográfica por meio do uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG);
- Elaborar diagramas que correlacionem a energia produzida por ambas fontes, hídrica e eólica, de acordo com o estudo de caso;
- Confrontar dados de aproveitamentos hidrelétricos inventariados com o fluxo de potência eólica das áreas próximas, preferencialmente planas, dentro da área de drenagem da bacia em estudo;
- Efetuar análise econômica para os sistemas de produção de energia, isolados e combinados.

1.3. Justificativas

Atualmente, observa-se a crescente busca por fontes de energia renovável. A geração de energia hidrelétrica possui um caráter sazonal, cuja disponibilidade é refletida no Fator de Capacidade (FC). Os estudos de vazão disponível para um aproveitamento são baseados em séries hidrológicas históricas. As distribuições de probabilidade de ocorrência de dadas vazões são baseadas em funções estatísticas, uma vez que são variáveis aleatórias, RENEWABLE ENERGY RESERCH LABORATORY (2012).

A potência de uma central hídrica é proporcional à queda e à vazão. Dessa forma haverá maior disponibilidade de vazão em épocas de cheia e menor, por conseguinte, em épocas de estiagem. Nesse sentido, estudos de complementaridade de energia por meio da geração elétrica por turbinas eólicas têm despertado o interesse, sobretudo, em locais em que a PCH já disponibiliza o acesso à rede e à subestação.

A energia eólica apresenta como maior barreira à sua expansão o fato de não ser estocável na origem, o que lhe confere disponibilidade previsível por séries estatísticas, uma vez que é uma variável aleatória com séries históricas menores que as hidrológicas. Quando utilizada em conjunto com outras formas de geração de eletricidade, a hídrica como exemplo (estocável na origem), torna-se economicamente viável.

A utilização combinada de parque eólico, figura 1a, com PCH, figura 1b, apresenta como ponto central de conveniência em relação à utilização individual de cada uma das formas de geração, o fato do reservatório da PCH (caso ela não opere a fio d'água) servir de regularização e armazenamento de energia para o sistema híbrido, TIAGO FILHO (2010).



Figura 1 - Energias renováveis: a) Parque Eólico; b) Pequena Central Hidrelétrica.

Fonte: CERPCH (2010); ANDRITZ (2010).

Aplicando-se ao modelo brasileiro, essencialmente hidrelétrico, a energia eólica pode ser usada como um fator de economia de água (nos momentos nos quais não há demanda), isto é, a integração de energia eólica ao sistema pode proporcionar o fechamento de comportas e reter mais água nos reservatórios para a utilização posterior.

Outra aplicação para a integração da energia eólica ao sistema consiste no uso de tecnologias de armazenamento tais como centrais hídricas reversíveis. Esse esquema de central, figura 2, é capaz de transformar energia elétrica, proveniente dos geradores eólicos nesse caso, em energia potencial por meio do bombeamento da água de um reservatório inferior para um superior, possibilitando, assim, a utilização futura da energia, TEIXEIRA (2012).

Segundo Jaramillo, Borja e Huacuz (2004), a literatura sobre estudos que abordam a construção de usinas hidro-eólicas combinadas é escassa. Entre o que há disponível, alguns têm analisado sistemas de energia destinados à produção de eletricidade a baixo custo. Dois tipos de sistema híbrido são descritos: no primeiro, uma estação de bombeamento é usada para armazenar água em um reservatório superior, caso haja excesso de energia. No segundo, a robustez do sistema hidrelétrico compensa as flutuações da energia eólica.

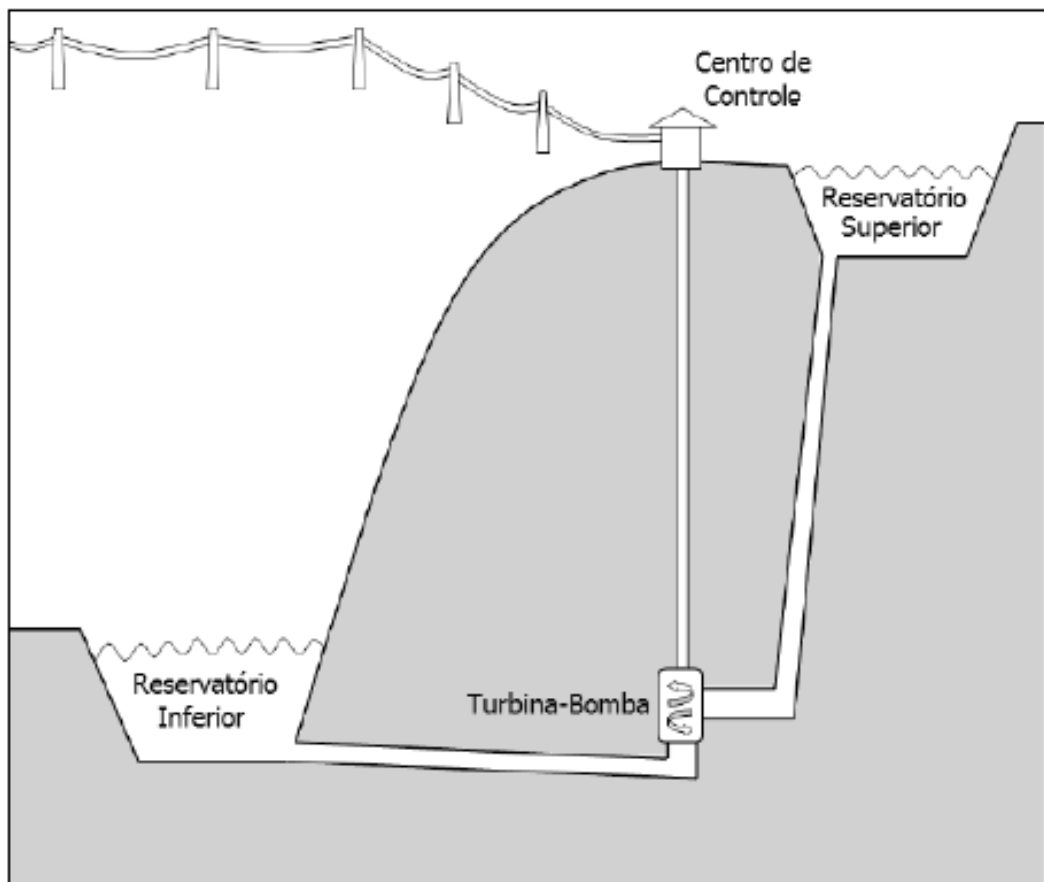


Figura 2 - Esquema de uma central hídrica reversível. Turbina operando como bomba.

Fonte: TEIXEIRA (2012).

Segundo Borba e Szklo (2012), assim como ocorre com outras fontes de energia renovável, a variabilidade da energia eólica pode afetar o equilíbrio entre a geração e a demanda de energia elétrica, causando um possível excedente. Portanto, compreender e analisar os impactos associados à introdução dessas novas opções tecnológicas é importante para orientar a política energética de um país. No Brasil, esse tipo de análise merece atenção especial devido às perspectivas de instalação de parques eólicos.

A busca por novas fontes de energia e os impactos causados pelas formas tradicionais de geração elétrica têm levado a uma procura por fontes de energia mais limpa que complementem suas matrizes energéticas. O aumento do consumo e a crescente pressão econômica e ambiental têm justificado um planejamento mais rigoroso quanto ao uso de fontes alternativas de energia como a eólica, LOBOSCO (1987).

Incentivos vigentes para o setor elétrico brasileiro devem despertar o interesse dos empreendedores. Outro fator importante, é a possibilidade de complementaridade entre a geração hidrelétrica e a geração eólica, figura 3, visto que o maior potencial eólico ocorre durante o período de menor disponibilidade hídrica. Um bom exemplo é a região nordeste, TIAGO FILHO (2010).

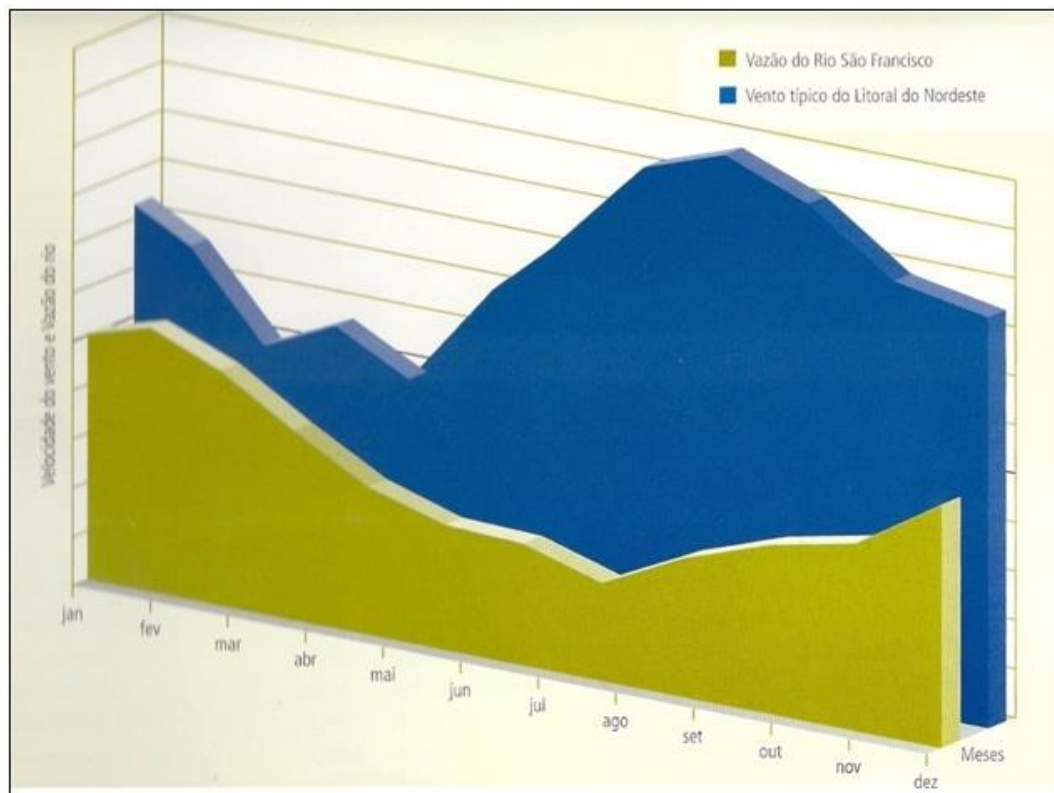


Figura 3 - Vazão disponível na região nordeste e vento típico no litoral da mesma.

Fonte: ADAPTADO DE ANEEL (2005).

Atualmente, a PCH representa um meio rápido e eficiente de propiciar a expansão da oferta de energia elétrica, constituindo-se importante alternativa de produção de energia renovável, e dessa forma, ampliando a oferta no sistema elétrico brasileiro, sobretudo nas áreas isoladas e em pequenos centros agrícolas e industriais, HOMRICH (2006). Segundo Bekele (2012), as fontes renováveis de energia, mais confiáveis e com eficiente custo-benefício, isoladas do sistema elétrico, podem ser usadas como uma alternativa à energia fornecida por geradores a diesel na eletrificação rural.

Devido à natureza intermitente dos recursos renováveis, o aproveitamento de uma fonte pode levar ao superdimensionamento com custos operacionais desnecessários. Tais limitações podem ser superadas por meio da combinação de uma ou mais fontes de energia renovável em forma de sistema híbrido. Os sistemas híbridos melhoram os fatores de capacidade e dão flexibilidade no despacho da energia, já que, os recursos renováveis complementam-se mutuamente, BRASIL (2014).

No Brasil, o Fator de Capacidade (FC) médio da geração eólica da região Sul, no mês de setembro de 2014, aumentou 5,8 pontos percentuais (p.p.) em relação ao mês de agosto de 2014, alcançando 37,6%. No entanto, o FC das usinas do Nordeste brasileiro diminuiu 4,7 p.p. em comparação a agosto de 2014 e alcançou 47,7%. Ao se considerar o acumulado dos últimos 12 meses, em relação ao mesmo período anterior, houve avanço de 2,5 p.p. no FC na região sul e de 3,9 p.p. na região nordeste, EPE (2015).

Uma das maiores desvantagens da tecnologia renovável não despachável é o fato de a potência de geração, também conhecida como capacidade instalada, ter que igualar, a cada momento, a chamada demanda, isto é, a potência requerida pelos consumidores. A falta de equilíbrio leva à instabilidade do sistema elétrico, problema agravado em períodos nos quais o consumo é baixo e a energia eólica disponível é elevada, acarretando em excesso de oferta, FERREIRA (2007).

Para esses períodos, já existem as tecnologias de armazenamento. O sistema híbrido hidro-eólico armazena energia quando a PCH deixa de gerar em função da geração eólica. Outras formas de armazenamento de energia em sistemas híbridos são: tanques de ar comprimido, células combustíveis e banco de baterias, figura 4.

Sistemas urbanos de armazenamento de energia em ar comprimido são usados desde o século XIX. Essa tecnologia evoluiu para o fornecimento de energia residencial e industrial. Já está em construção o primeiro projeto de usina CAES (Estação de Armazenamento de Ar Comprimido) adiabática, de 200 MW, na Alemanha.

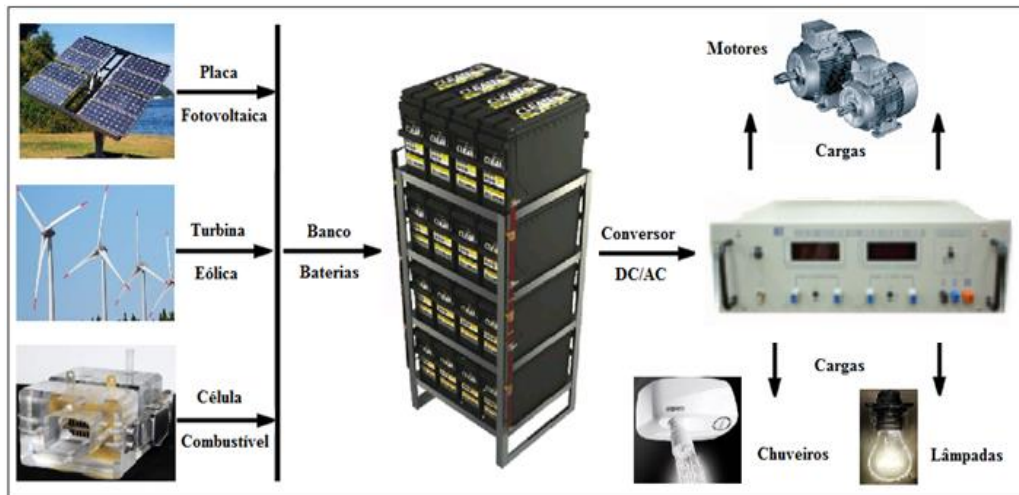


Figura 4 - Exemplo de aplicações do armazenamento de energia em banco de baterias.

Fonte: ADAPTADO DE KRONIGER (2014).

A célula combustível, apesar do alto custo, é uma opção interessante. Além de não poluir o meio ambiente, produz um gás nobre que pode ser armazenado por um longo período de tempo, o hidrogênio. Ele tem valor comercial, pode ser negociado como produto ou aproveitado para gerar energia por intermédio de turbinas a gás.

A cadeia de produção e distribuição, figura 5, contempla a eletrólise, cuja capacidade é igual à do parque eólico, a compressão, a estocagem do gás e o emprego na geração elétrica, KRONIGER (2014).

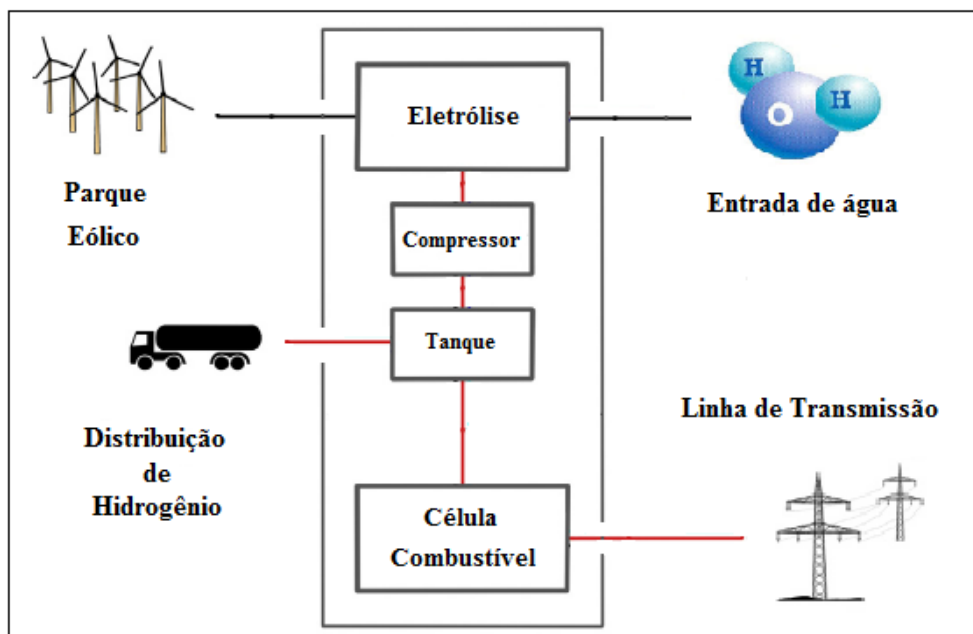


Figura 5 - Esquema de armazenamento de energia por meio de célula combustível.

Fonte: ADAPTADO DE KRONIGER (2014).

A produção de hidrogênio a partir da energia eólica e suas aplicações como tecnologia de armazenamento vêm se tornando um importante tópico de pesquisa. Essa atividade é muito encontrada ao redor do mundo atualmente. Na Alemanha, por exemplo, as centrais de armazenamento de energia são consideradas como uma chave tecnológica para o aumento da integração de energias renováveis na matriz do país. Ela possibilita uma melhor compensação nas flutuações do fornecimento de energia eólica, na variação da demanda e evita sobrecargas na rede, LIMA, (2009).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Considerações iniciais

Os estudos de Jaramillo (2004), apresentam uma PCH em Presidente Benito Juarez, Oaxaca, México e um parque eólico, localizado em La Venta, na mesma cidade. O objetivo é desenvolver uma estrutura conceitual, que mantenha uma potência de saída constante. Além disso, por meio de uma análise técnica econômica, obter o custo anual de produção da energia produzida pelo sistema híbrido.

Nem sempre há vento, às vezes um parque eólico fica ocioso. A intermitência do recurso tem um impacto na rede elétrica, quando a concentração de energia eólica em uma região é baixa, o impacto é insignificante. Quando a concentração aumenta, o impacto passa a ter um custo associado. A análise do desempenho do sistema híbrido é feita considerando o FC do parque eólico e da PCH, FARREL (1982).

O quadro conceitual está baseado na atuação do FC, tanto para o parque eólico quanto para a PCH. O FC é definido como a energia proveniente de uma fonte, por um período de tempo efetivamente em uso (E_D), dividido pela energia máxima que poderia ter sido entregue, caso a fonte fosse usada na capacidade máxima durante o período analisado inteiro (E_N), equação 1, JARAMILLO (2004).

$$FC = \frac{E_D}{E_N} = \frac{\int_{t=0}^T P(t)dt}{\int_{t=0}^T Ndt} = \frac{\int_{t=0}^T P(t)dt}{NT} \quad (1)$$

Onde: N = Potência instalada;

T = Período total avaliado;

t = Período de funcionamento efetivo;

P = Média das potências ao longo do período avaliado.

2.2. Formulação para o sistema híbrido

Além disso, a potência assegurada do sistema híbrido pode ser expressa pela soma das quantidades de potência hídrica (P_H) e potência eólica (P_W), equação 2.

$$P_F = P_H + P_W \quad (2)$$

Onde: P_F = Potência instalada do sistema híbrido;

P_H = Potência hídrica instalada;

P_W = Potência eólica instalada.

Levando em conta que (P_F) não depende do tempo e considerando um período de tempo (T), a energia entregue pelo sistema híbrido pode ser estimada pela equação 3.

$$P_F T = \int_{t=0}^T P_H(t) dt + \int_{t=0}^T P_W(t) dt \quad (3)$$

Utilizando a equação 1, pode-se escrever a equação 4.

$$P_F = FC_H \cdot P_H + FC_W \cdot P_W \quad (4)$$

Onde: FC_H = Fator de capacidade do sistema híbrido;

FC_W = Fator de capacidade do sistema eólico;

As medidas de velocidade do vento, fornecidas pelos inventários eólicos, são feitas normalmente com o anemômetro na altura de 50 m a partir do nível do solo, porém, na maioria dos casos, a torre do aerogerador se encontra em alturas diferentes da fornecida. Para corrigir essa diferença, recorre-se a seguinte extrapolação, equação 5.

$$\frac{v(z)}{v(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (5)$$

Onde: z = Altura desejada;

z_r = Altura de referência;

z_0 = Altura da camada limite;

$v(z)$ = Velocidade do vento na altura desejada;

$v(z_r)$ = Velocidade do vento na altura de referência.

Segundo a Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI), a potência das turbinas eólicas é calculada através da equação 6.

$$P_{WT}(v) \begin{cases} 0, v < v_i \\ (W_T)(\mathcal{F}(v)), v_i \leq v < v_0 \\ 0, v_0 \leq v \end{cases} \quad (6)$$

Onde: $P_{WT}(v)$ = Função potência eólica;

W_T = Potência nominal do aerogerador;

$\mathcal{F}(v)$ = Função polinomial;

v = Velocidade média do vento;

v_i = Velocidade de corte inferior;

v_0 = Velocidade de corte superior.

Aerogeradores que utilizam o sistema *pitch control*¹ consideram a função polinomial $\mathcal{F}(v)$ estabelecida da seguinte forma, equação 7.

$$\mathcal{F}(v) = \frac{a_1}{1 + \exp\left(-\frac{v - a_2}{a_3}\right)} \quad (7)$$

Onde: a_1 , a_2 e a_3 = são constantes de regressão da curva.

Por outro lado, a energia eólica medida na saída de um aerogerador pode ser escrita conforme segue, equação 8.

$$\begin{aligned} E_{WT} &= \int_{v_i}^{v_0} \int_0^{t=T} P_{WT}(v) \mathcal{P}(v) dt dv = W_T \int_{v_i}^{v_0} \mathcal{F}(v) \mathcal{P}(v) dv \int_0^{t=T} dt \\ &= TW_T \int_{v_i}^{v_0} \mathcal{F}(v) \mathcal{P}(v) dv \end{aligned} \quad (8)$$

¹ *Pitch Control* é um dispositivo que faz variar o ângulo de incidência entre o vento e as pás com o objetivo de variar a potência de saída, melhorando a eficiência e protegendo o rotor da turbina. Quando a velocidade do vento é baixa, o ângulo fica próximo de 0°, quando é maior que a média, o mecanismo varia o ângulo de incidência mantendo a velocidade nominal do aerogerador.

Onde: E_{WT} = Energia eólica produzida pelo aerogerador;

$\mathcal{P}(v)$ = Função densidade de probabilidade de Weibull.

Dessa forma o FC da turbina eólica pode ser estimado pela expressão abaixo, equação 9.

$$FC_{WT} = \frac{E_{WT}}{E_{WR}} = \int_{v_I}^{v_0} \mathcal{F}(v)P(v)dv \quad (9)$$

Onde: FC_{WT} = Fator de capacidade do aerogerador

No caso dos aproveitamentos hídricos, foram utilizados os métodos de regionalização de vazões, por meio da transposição, método adotado em projetos de PCH baseado na vazão específica, equação 10.

$$q = \frac{Q}{A_d} \quad (10)$$

Onde: q = Vazão específica;

Q = Vazão média de longo termo;

A_d = Área de drenagem.

Em bacias hidrográficas homogêneas, as vazões específicas são iguais, equação 11.

$$Q_{PCH} = \frac{AD_{PCH}}{AD_{EST}} \cdot Q_{EST} \quad (11)$$

Onde: Q_{PCH} = Vazão média estimada no local da PCH;

AD_{PCH} = Área de drenagem relativa à PCH;

AD_{EST} = Área de drenagem relativa à estação;

Q_{EST} = Vazão média registrada na estação.

A área disponível, para a instalação de parques eólicos, é calculada somando-se as áreas disponíveis nas proximidades de cada aproveitamento, equação 12.

$$A_T = \sum_{i=1}^N A_i \quad (12)$$

Onde: A_T = Área disponível total;

A_i = Aproveitamento de índice i ;

N = Número de aproveitamentos.

Segundo o CRESESB, o tratamento estatístico dado à velocidade média sazonal, é resultante das velocidades horárias geradas em todos os dias de simulação, equação 13.

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (13)$$

Onde: \bar{v} = Velocidade média sazonal;

v_i = Velocidade do vento na hora i ;

i = Índice para cada hora simulada;

N = Número total de horas simuladas.

Outro indicador usual em estudos energéticos de potenciais eólicos é a densidade de potência, que representa a potência cinética média do vento que flui através de uma unidade de área sempre perpendicular à sua direção, equação 14.

$$DP = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \rho \cdot v_i^3 \quad (14)$$

Onde: DP = Densidade de potência;

v_i = Velocidade do vento na hora simulada i ;

i = Índice para cada hora simulada;

N = Número total de horas simuladas;

ρ = Densidade do ar.

Além das velocidades médias anuais, o mapa eólico do CRESESB contempla:

Fator de escala (c) dado em m/s;

Fator de forma da distribuição de Weibull (k) adimensional.

Utilizando-se dos fatores de escala e forma, obtém-se a equação 15.

$$\mathcal{F}(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (15)$$

Onde: $\mathcal{F}(v)$ = Função densidade de probabilidade de Weibull;

k = Fator de forma da distribuição de Weibull;

c = Fator de escala da distribuição de Weibull;

v = Velocidade do vento.

Segundo o COPEL (2007), estudos aerodinâmicos comprovam que os aerogeradores devem estar distribuídos pelo terreno de forma que o funcionamento de uma turbina não afete o da vizinha. Para que isso aconteça, a distância mínima entre eles deve ser de 5 vezes o diâmetro das pás na lateral e de 10 vezes no comprimento, conforme figura 6.

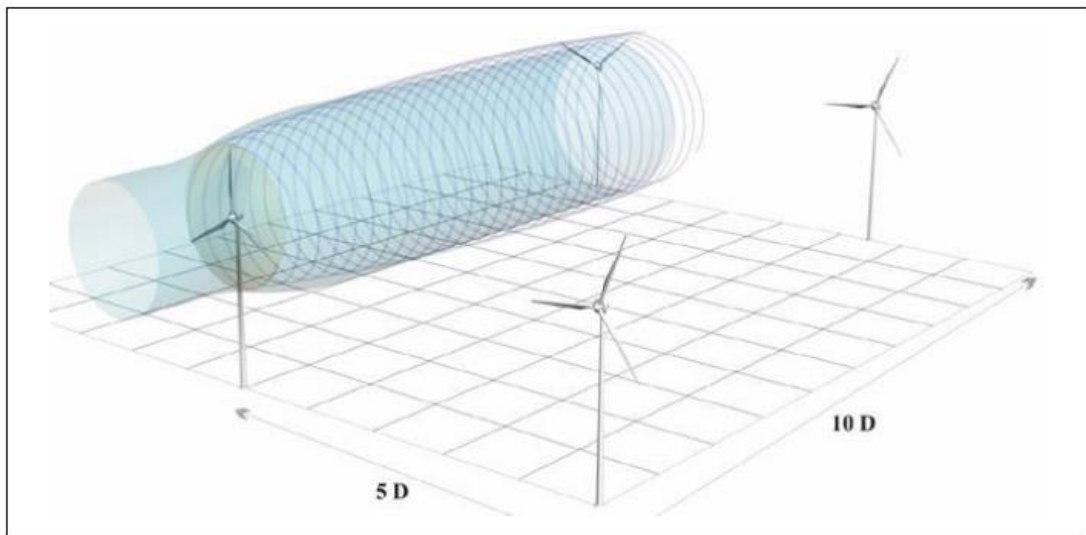


Figura 6 - Distância considerada segura para a instalação de aerogeradores.

Fonte: COPEL (2007).

O cálculo do número de aerogeradores, possíveis de serem instalados em um determinado terreno, é realizado a partir da densidade de aerogeradores (d_{ag}). Essa variável é obtida levando em conta as distâncias mínimas, equação 16.

Para 4 aerogeradores: $A_4 = 50 \cdot D^2$

$$d_{ag} = \frac{n}{A_4} = \frac{4}{50 \cdot D^2} \quad (16)$$

Onde: d_{ag} = Densidade de aerogeradores;

D = Diâmetro da turbina do aerogerador;

n = Quantidade mínima de aerogeradores em um parque;

A_4 = Área ocupada pela quantidade mínima de aerogeradores em um parque.

De posse da densidade de aerogeradores, calculada segundo parâmetros mínimos de distância, a quantidade total de máquinas em um parque eólico, é dada pela equação 17.

$$N_{ag} = \frac{A_d}{d_{ag}} = \frac{A_d}{\frac{4}{50 \cdot D^2}} = A_d \cdot \frac{50}{4} \cdot D^2 = A_d \cdot 12,5 \cdot D^2 \quad (17)$$

Onde: N_{ag} = Quantidade total de aerogeradores;

A_d = Área disponível para instalação do parque eólico.

2.3. Formulação para análise econômica

O custo total de implantação de uma PCH (Ct_{hid}) inclui: projeto, obras, equipamentos, estudos ambientais, obtenção de licença e registro do empreendimento. Com o objetivo de parametrizar o cálculo, foi criado o custo unitário (Cu_{hid}), que atende a diferentes tipos de centrais, mercados e empresas prestadoras de serviços, equação 18.

$$Ct_{hid} = Cu_{hid} \cdot P \cdot F_{dr} \quad (18)$$

Onde: Ct_{hid} = Custo total de implantação de uma PCH;

Cu_{hid} = Custo unitário de implantação de uma PCH;

P = Potência nominal da PCH;

F_{dr} = Fator de correção monetária de dólares para reais.

O custo unitário é baseado em um parâmetro denominado fator de aspecto (F_a), deduzido a partir da rotação específica das turbinas, potência instalada e custo do investimento de várias PCH já existentes, equação 19. O método é robusto o suficiente para ser aplicado e apresenta uma precisão adequada à prospecção de potenciais hídricos, TIAGO FILHO (2013).

$$Cu_{hid} = k \cdot F_a^n \quad (19)$$

Onde: Cu_{hid} = Custo unitário hídrico;

k = Coeficiente de aspecto;

F_a = Fator de aspecto;

n = Expoente de aspecto.

De acordo com Tiago (2013), a equação do fator de aspecto foi baseada na rotação específica (n_{qa}), tendo em vista que esse é o parâmetro mais indicado para classificar PCH de acordo com instalações de baixa, média e alta queda, equação 20.

$$F_a = 1821,43 \cdot \frac{\sqrt{P}}{H^{1,25}} \quad (20)$$

Onde: F_a = Fator de aspecto;

P = Potência nominal;

H = Altura de queda bruta.

Para encontrar uma linha que guardasse boa relação entre os custos unitários e o fator de aspecto, traçou-se um gráfico onde a base é formada por dados de 16 projetos de PCH em vias de implantação. Dessa forma foi possível obter valores para o coeficiente e o expoente de aspecto, equação 21.

$$Cu_{hid} = 1654 \cdot F_a^{0,085} \quad (21)$$

Uma análise dos cenários globais mostra que uma série de resultados é possível para o mercado de energia eólica, que varia de acordo com a demanda e a taxa de crescimento da matriz energética. Assim como foi feito para a PCH, calculou-se também o custo total eólico (Ct_{eol}) em função do custo unitário (Cu_{eol}) do parque, equação 22.

$$Ct_{eol} = Cu_{eol} \cdot P \cdot F_{er} \quad (22)$$

Onde: Ct_{eol} = Custo total de implantação de um parque eólico;

Cu_{eol} = Custo unitário de implantação de um parque eólico;

P = Potência nominal do parque eólico;

F_{er} = Fator de correção monetária de euros para reais.

Além do custo de implantação dos empreendimentos, a análise econômica demanda receitas, tanto hídricas quanto eólicas, essas foram calculadas conforme equações 23 e 24.

$$Rec_{hid} = Tx_{hid} \cdot EAG_{hid} - COM_{hid} \cdot Ct_{hid} \quad (23)$$

Onde: Rec_{hid} = Receita anual hídrica;

Tx_{hid} = Taxa de venda da energia hídrica;

EAG_{hid} = Energia hídrica anual gerada;

COM_{hid} = Custo de operação e manutenção hídrica.

$$Rec_{eol} = Tx_{eol} \cdot EAG_{eol} - COM_{eol} \cdot Ct_{eol} \quad (24)$$

Onde: Rec_{eol} = Receita anual eólica;

Tx_{eol} = Taxa de venda da energia eólica;

EAG_{eol} = Energia eólica anual gerada;

COM_{eol} = Custo de operação e manutenção eólica.

A análise econômica contou com um fluxo de caixa de 15 anos que levou em conta o Valor Presente Líquido (VPL), as equações 25 e 26 mostram o valor a cada ano.

$$VPL_{hid} = \frac{Rec_{hid}}{(1 + Tx_{hid})^n} \quad (25)$$

$$VPL_{eol} = \frac{Rec_{eol}}{(1 + Tx_{eol})^n} \quad (26)$$

3. METODOLOGIA

3.1. Considerações iniciais

No Brasil, a ausência de levantamentos topográficos sempre foi um obstáculo para o desenvolvimento de estudos e projetos. Deve haver regiões excelentes para o uso combinado de PCH e parque eólico ainda não mapeadas ou inventariadas.

A metodologia para a prospecção de locais para a instalação do sistema híbrido, consiste em um instrumento de avaliação expedita e preliminar que permite com que bacias sejam avaliadas quanto à viabilidade técnica, econômica e socioambiental. É uma ferramenta importante para a estimativa do potencial energético hidroeólico.

Esse método de pesquisa pode ser utilizado no auxílio à tomada de decisão para o empreendedor investir ou não no desenvolvimento do projeto, além de servir de planejamento energético na busca de melhores locais para a implantação, CRUZ (2009).

O valor de venda de energia elétrica, usado como referência na análise econômica, levou em conta os resultados dos últimos certames, tabela 1, nos leilões de fontes alternativas renováveis. Especificamente para PCH e empreendimentos de geração eólica e de biomassa, em Ambiente de Contratação Regulada (ACR), EPE (2015).

Tabela 1: Preço médio de venda da energia elétrica de fontes alternativas.

Fonte	Potência [MW]	Energia [MW _{méd}]	Preço [R\$/MWh]
Eólica	2.050	900	200
PCH	132	70	220

3.2. Obtenção de dados hídricos

Um dos maiores desafios em hidrologia é o de conhecer adequadamente os dados, geralmente eles são colhidos por postos ou estações fluviométricas, tabela 2, que são posicionadas estrategicamente nas seções transversais dos rios. Dificilmente esses postos cobrem todos os locais de interesse, PUNYS (2011).

O método utilizado para simular os comportamentos hídricos de áreas não cobertas, ou distantes das estações, é a regionalização de vazões. Lembrando que, nenhuma metodologia hidrológica aumenta os dados disponíveis, na realidade ela não gera informação, apenas utiliza séries históricas com probabilidade igual à da região em estudo.

A forma mais comum de regionalização é o mapeamento por meio de isoietas, que caracterizam a distribuição e a duração das chuvas. Outra forma é a transposição de vazões, ANEXO B, que só pode ser aplicada quando a relação entre as áreas de drenagem da PCH e da estação, da qual está transpondo-se os dados, é menor que 4, SOUZA (1999).

Tabela 2: Ficha técnica de estações fluviométricas de uma mesma bacia.

Característica	Fazenda Porto Alegre	Ponte Rio Itaguari
Código	45170001	45156000
Legenda	CTFG	CTFD
Bacia	São Francisco	São Francisco
Sub-bacia	Carinhanha	Carinhanha
Rio	Itaguari	Riacho do Meio
Estado	Bahia	Bahia
Município	Cocos	Cocos
Responsável	ANA	INEMA
Operadora	CPRM	INEMA
Latitude	-14:15:51	-14:14:4
Longitude	-44:31:21	-44:37:18
Altitude [m]	520	515
Área de Drenagem [km ²]	5850	4517

3.3. Obtenção de dados eólicos

Os dados de vento disponíveis são provenientes do projeto *Solar and Wind Energy Resources Assessment (SWERA)* que tem como objetivo mapear, usando imagens de satélite, recursos renováveis ao redor do mundo, dados que são validados através das informações de Estações Meteorológicas Automáticas (EMA), APÊNDICE D. Versões desses mapas podem ser visualizadas com a aplicação de softwares tais como *Windnavigator*, SWERA (2014).

A velocidade média sazonal do vento foi obtida a partir do mapa eólico do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), porém os dados são consolidados a uma altura de 50 m, além de serem fornecidos em períodos trimestrais. Os registros são guardados por pelo menos 1 ano para que se possa calcular uma distribuição de frequência que represente a velocidade do vento anualmente.

O modelo de aerogerador estudado foi o IV82, figura 7, do fabricante IMPSA. A máquina possui 1,5 MW de potência nominal, o diâmetro do rotor tem 82 m, a torre tem alturas que variam entre 85 e 100 m, os parâmetros operacionais atendem à classe de ventosidade III da IEC e é patenteado pela Vensys, APÊNDICE A.



Figura 7 - a) Aerogerador mod. IV82; b) Parque eólico com 6 unidades.

Fonte: IMPSA (2014).

A curva do aerogerador, figura 8, é traçada em laboratório a partir da exposição da turbina a um fluxo de ar gerado em um túnel de vento. As medições são feitas com instrumentação apropriada, que monitora as seguintes variáveis: velocidade do vento, potência da máquina, temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade relativa, IMPSA (2014).

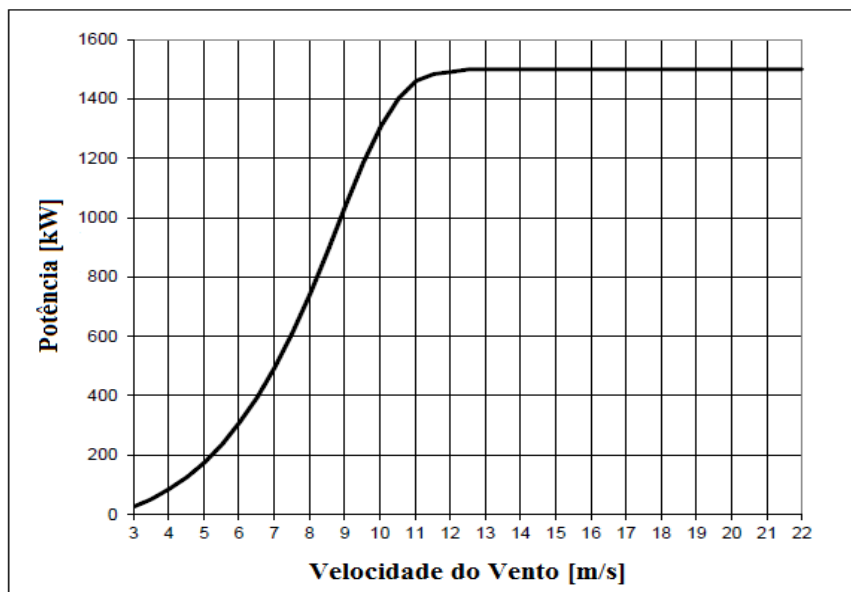


Figura 8 - Curva característica do aerogerador mod. IV82.

Fonte: IMPSA (2014).

3.4. Obtenção de imagens

Foi usado o Sistema de Informações Geográficas (SIG) para determinação do Modelo Digital do Terreno (MDT), obtido a partir de imagens do satélite CBERS, utilizando as bandas 3, 4 e 5. A ferramenta escolhida foi o *software* Spring, que permite o cruzamento de diferentes tipos de informações no espaço.

Ferramentas SIG permitem realizar análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e criar um banco de dados georreferenciado, organizados através de camadas, o que facilita a gestão de informações, CONNOLLY (2010).

A figura 9 mostra a localização exata do aproveitamento na cota 515 m, além da área destacada, onde é possível a instalação de um parque eólico.

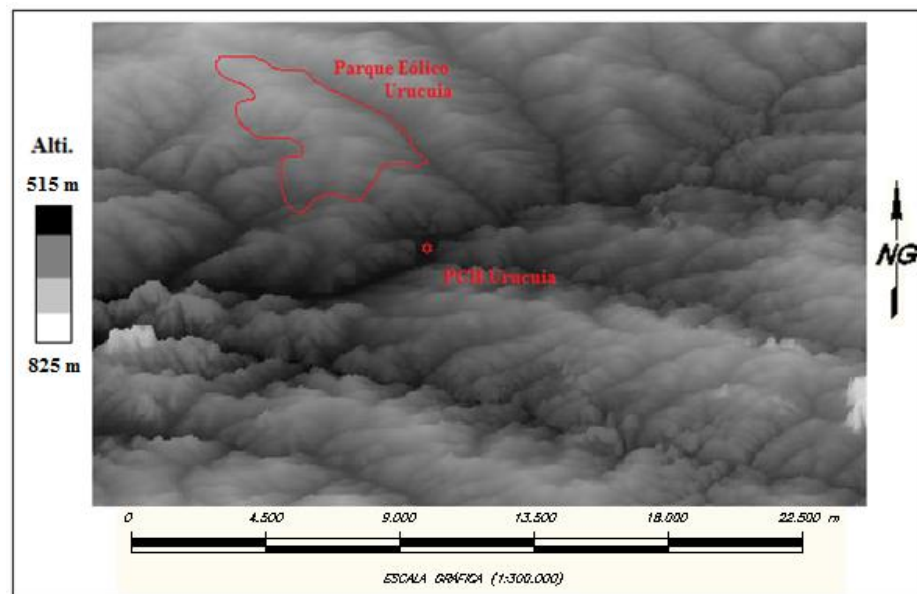


Figura 9 - Modelo digital do terreno do parque híbrido de Urucua.

Fonte: ELABORAÇÃO PRÓPRIA (2014).

Chama-se de MDT uma representação matemática contínua da distribuição espacial das variações de altitude numa área. Construídos a partir das curvas de nível e pontos altimétricos, esses mapas têm gradações topográficas do relevo que são perceptíveis através de tons de cinza. O preto corresponde à menor altitude e as tonalidades mais claras indicam, progressivamente, as áreas mais elevadas, PRADO (2009).

A representação cartográfica da declividade é feita através de mapas temáticos, expressos em classes que variam de acordo com os objetivos do trabalho. Nesse caso foram usadas as mesmas dos mapas da Embrapa para terrenos do tipo:

- plano (0 a 3%);
- suave ondulado (3 a 8%);
- ondulado (8 a 20%);
- forte ondulado (20 a 45%);
- montanhoso (45 a 75%);
- escarpado (acima de 75%).

O *software* usado para gerar os mapas temáticos de declividade foi o Quantum GIS (QGIS). Segundo Cardoso (2014), QGIS é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) que pode ser usado tanto com dados vetoriais quanto matriciais e apresenta diversas funcionalidades, entre elas, processar imagens do Topodata.

A representação gráfica da superfície da bacia em estudo, figura 10, quando ilustrada de acordo com critérios de declividade pré-estabelecidos pelo Embrapa, mostra locais ideais para a instalação dos parques eólicos de Aliança e Galheiro.

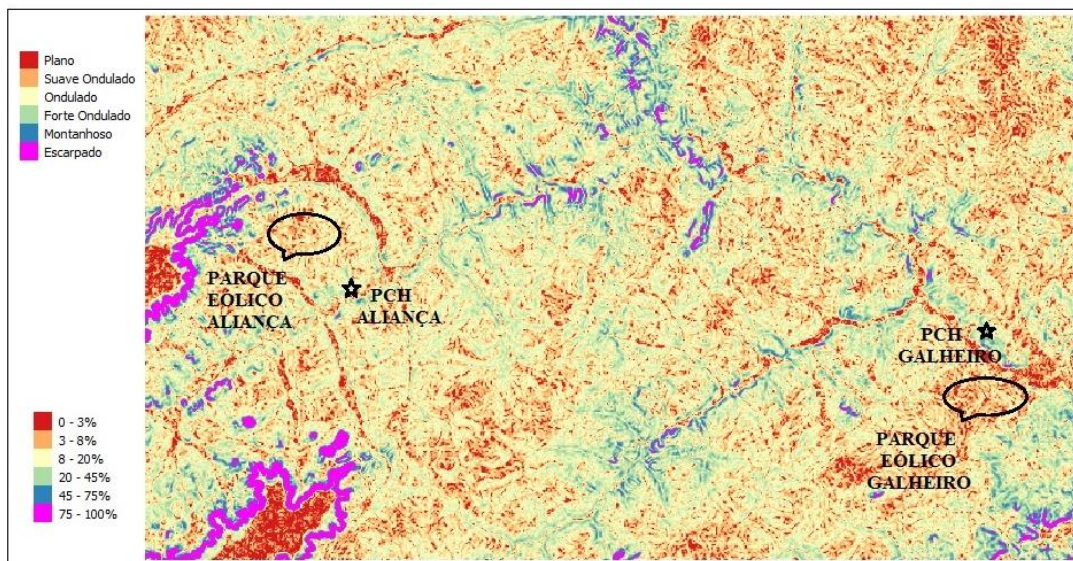


Figura 10 - Mapa temático da declividade na região da bacia em estudo.

Fonte: ELABORAÇÃO PRÓPRIA (2014).

O projeto Topodata, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais, elaborados a partir de dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), tem cobertura nacional. Essa iniciativa representa uma oferta, até então inédita, em áreas desprovidas de mapeamentos topográficos. As imagens geram derivações como: declividade, orientação de vertentes e curvaturas.

Os MDE podem ser descritos como uma imagem cujos valores representam a altitude. Sua construção a partir de curvas de nível é feita por interpolações *pixel a pixel* repetidas, conforme a figura 11. As malhas, traçadas pelo método de elementos finitos, podem ser de três tipos: linear, quadrática e cúbica, VALERIANO (2011).

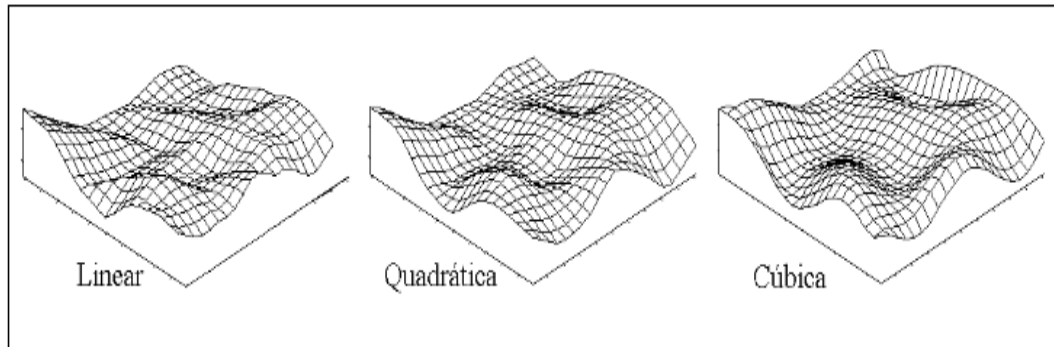


Figura 11 - Processos de interpolação: linear, quadrática e cúbica.

Fonte: ADAPTADO DE VALERIANO (2011).

Os modelos utilizados na composição dos gráficos potência, figura 12a, e frequência, figura 12b, ambos em função da velocidade do vento, foram ferramentas essenciais na obtenção da energia eólica gerada ao longo do ano.

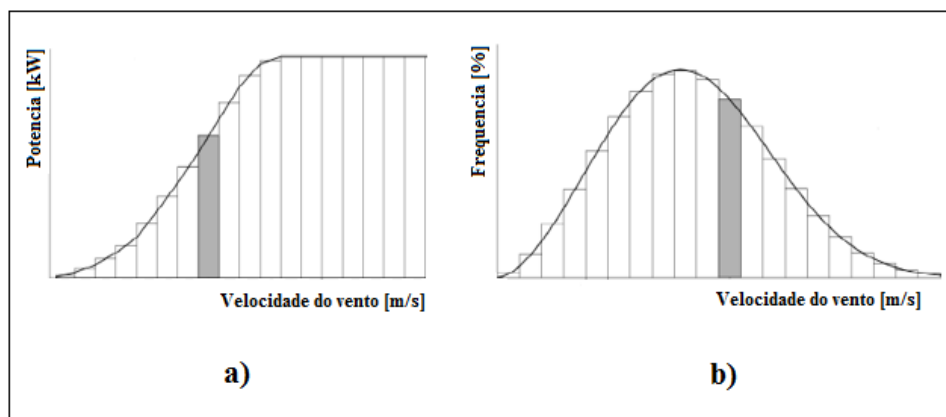


Figura 12 - Modelos utilizados: a) Curva de potência; b) Distribuição de Weibull.

Fonte: ADAPTADO DE JARAMILLO (2004).

4. ESTUDO DE CASO

4.1. Considerações iniciais

Foi realizado um estudo de caso para a implantação do sistema híbrido hidro-eólico, a prospecção, APÊNDICE C, partiu de locais próximos à potenciais hídricas, as informações do inventário tal como o par de coordenadas geográficas de cada aproveitamento, foi de fundamental importância para avaliação da capacidade eólica nas redondezas.

Coincidentemente, existe uma bacia, com dados de aproveitamentos hidrelétricos inventariados, em uma região onde a velocidade do vento é alta o bastante para que a geração eólica seja possível. Além disso, a região prospectada possui áreas planas e com pouca vegetação, condições essenciais para a instalação dos aerogeradores, APÊNDICE A.

4.2. Sistema híbrido

Trata-se da sub bacia 45, integrante da bacia hidrográfica do rio São Francisco no estado da Bahia, figura 13, o rio Itaguari e seu afluente Riacho do Meio contemplam em seu inventário 19 aproveitamentos, ANEXO A, com um potencial total de 144,7 MW, ANEEL (2012).

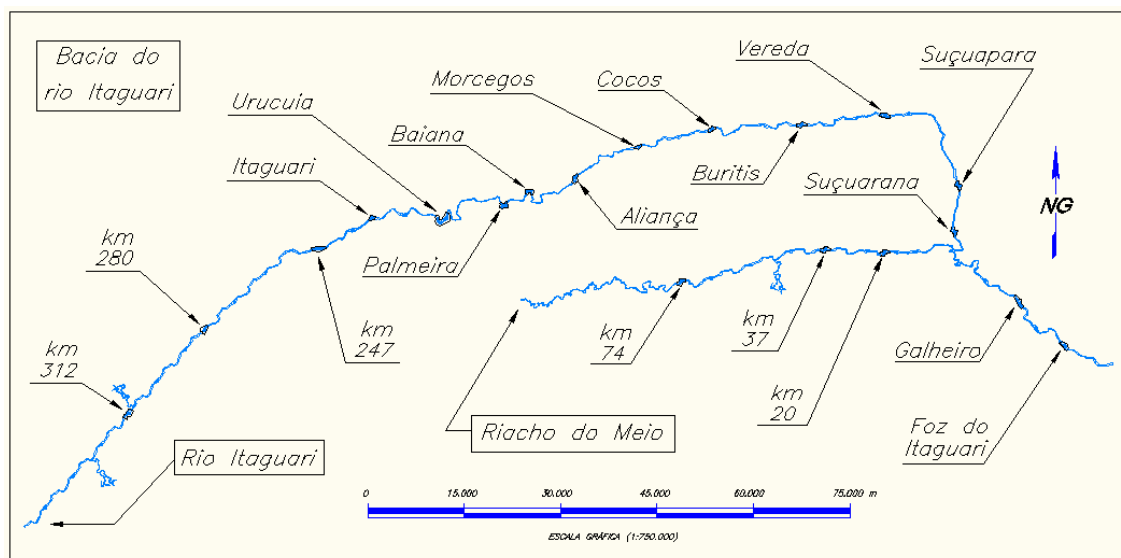


Figura 13 - Croqui com todos os aproveitamentos inventariados da bacia do rio Itaguari.

Fonte: ADAPTADO DE ANEEL (2012).

Os mapas temáticos de declividade identificaram 2 locais ótimos, Aliança e Galheiro:

Quanto mais plana for a região, mais indicada para instalação de parques eólicos ela é. Por isso, optou-se pela declividade de 0 a 8% que engloba os tipos de terreno: plano e suave ondulado, figura 14. Tanto em Aliança, quanto em Galheiro, existem locais apropriados, porém nesse último, a porcentagem de áreas planas é maior.

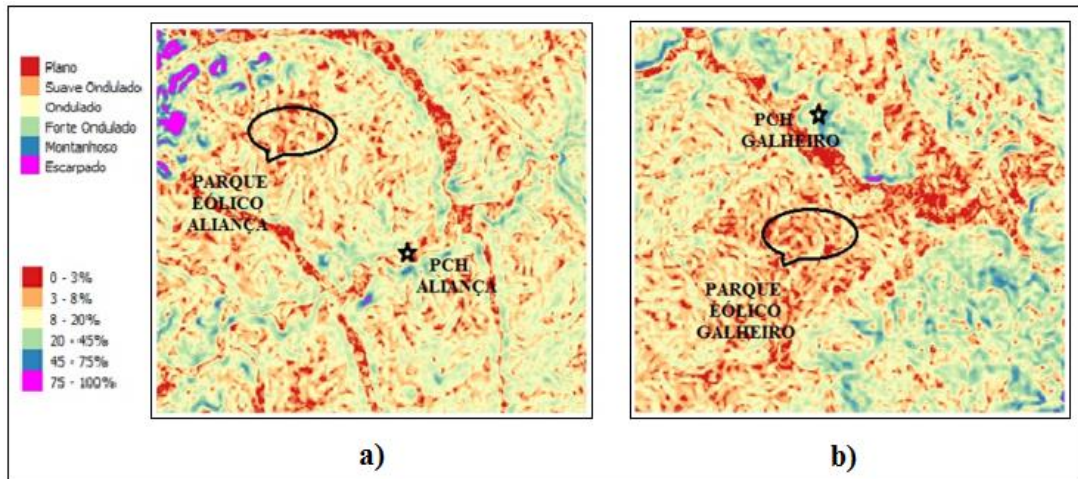


Figura 14 - Mapa temático da declividade nas redondezas: a) Aliança e b) Galheiro.

Fonte: ELABORAÇÃO PRÓPRIA (2014).

Diante do cenário favorável ao uso combinado, criou-se um modelo de sistema híbrido aproveitando as áreas disponíveis na redondeza dos aproveitamentos de maior densidade de potência eólica. Levando em consideração que ambas as usinas devem estar no mesmo local, esboçou-se um croqui preliminar de dois sistemas híbridos possíveis, figura 15.

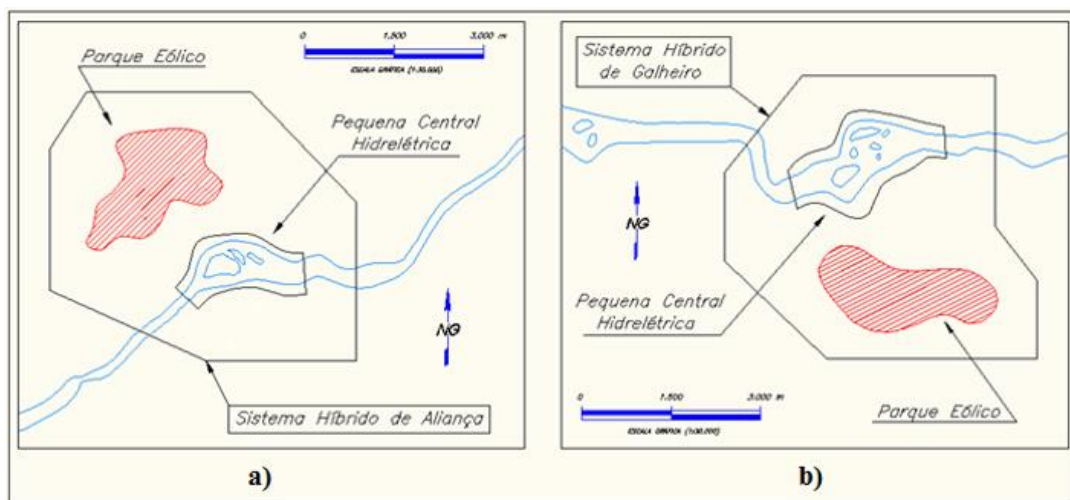


Figura 15 - Croqui de dois parques híbridos: a) Aliança e b) Galheiro.

Fonte: ADAPTADO DE ANEEL (2012).

O parque híbrido de Galheiro foi escolhido para ser estudado detalhadamente, já que existe uma estação fluviométrica, Fazenda Porto Alegre, nas imediações. A transposição de vazões, ANEXO B, foi realizada a partir da seguinte relação entre as áreas de drenagem.

$$\lambda = \frac{AD_{GAL}}{AD_{FPA}} = \frac{6210 [km^2]}{5850 [km^2]} = 1,06154$$

Onde: λ = Relação entre áreas de drenagem;

AD_{GAL} = Área de drenagem no parque de Galheiro;

AD_{FPA} = Área de drenagem na Fazenda Porto Alegre.

Dessa forma, a vazão em Galheiro é a da estação vezes 1,06. As vazões transpostas para o mesmo, ANEXO B, foram agrupadas em períodos trimestrais para que as médias fiquem ajustadas aos dados de velocidade média do vento, que são fornecidos pelo CRESESB em períodos de 3 meses, figura 16.

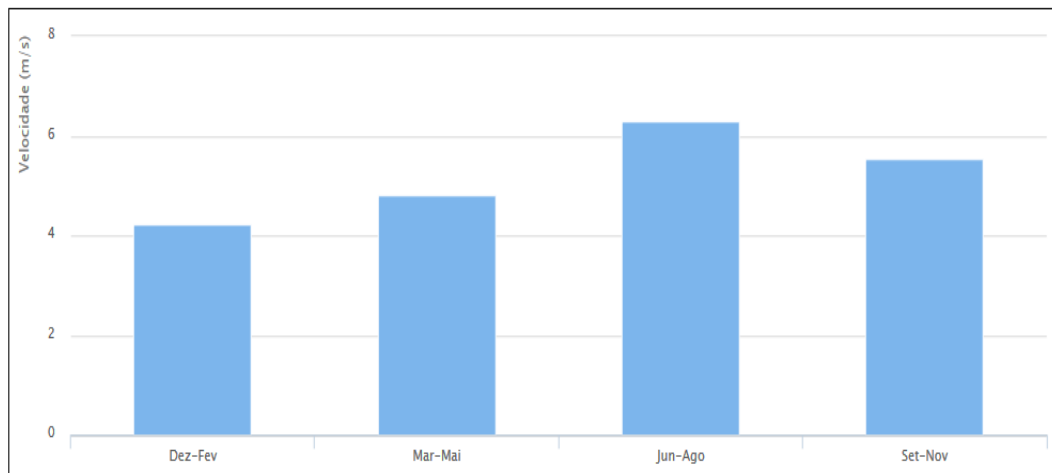


Figura 16 - Gráfico de barras da velocidade média do vento em Galheiro.

Fonte: CRESESB (2012).

A velocidade média sazonal é o indicador mais simples do potencial eólico e o mais usual em estimativas de geração, porém os valores são fornecidos na altura de referência de 50 m, ANEXO C, a extrapolação se dá pelo uso da equação 5 e é representada na tabela 5.

$$v(z) = v(z_r) \cdot \frac{\ln\left(\frac{100}{10}\right)}{\ln\left(\frac{50}{10}\right)} \Rightarrow v(z) = 5,22 \cdot 1,4307 \Rightarrow v(z) = 7,47 \text{ m/s}$$

Tabela 5: Extrapolação da velocidade do vento da altura de referência para a altura desejada.

Local	Média Anual [m/s]		1º Período [m/s]		2º Período [m/s]		3º Período [m/s]		4º Período [m/s]	
	$v(z_r)$	$v(z)$	$v(z_r)$	$v(z)$	$v(z_r)$	$v(z)$	$v(z_r)$	$v(z)$	$v(z_r)$	$v(z)$
Galheiro	5,22	7,47	4,21	6,02	4,82	6,90	6,30	9,50	5,54	7,93

Confrontando-se a vazão hídrica com a velocidade do vento, foi possível esboçar no mesmo gráfico, figura 17, a complementaridade entre as fontes no local em estudo.

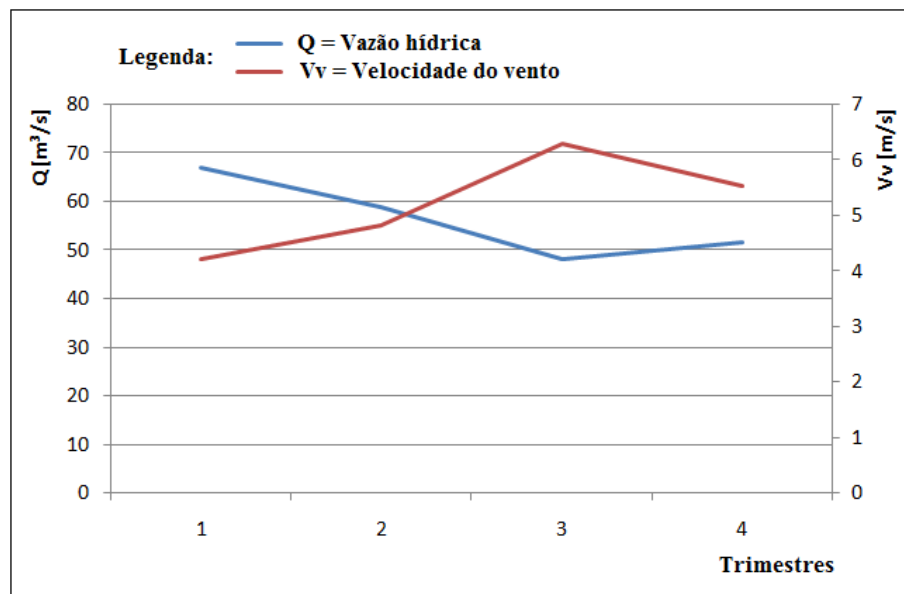


Figura 17 - Comparação entre as variações hídrica e eólica em 1 ano.

Fonte: ELABORAÇÃO PRÓPRIA (2014).

Além das velocidades médias anuais, o mapa eólico brasileiro do CRESESB contempla também os fatores de forma (c) e de escala (k), ambos usados na equação 15. No caso de Galheiro, os valores são os seguintes:

$$(c) = 5,89$$

$$(k) = 2,18$$

$$\mathcal{F}(v) = \left(\frac{2,18}{5,89}\right) \cdot \left(\frac{v}{5,89}\right)^{2,18-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{5,89}\right)^{2,18}\right]$$

Com as velocidades médias redefinidas para uma torre de altura 100 m, a distribuição de Weibull e a curva de potência do aerogerador, calculou-se a distribuição de potência, cujo somatório resulta na Energia Anual Gerada (EAG), tabela 6.

Tabela 6: Cálculo da Energia Anual Gerada de 1 aerogerador, usando a distribuição de Weibull.

Velocidade do vento [m/s]	Potência da Turbina $\mathcal{P}(v)$ [kW]	Distribuição de Weibull $\mathcal{F}(v)$ [%]	Frequência de Weibull $\mathcal{F}(v)$ [h]	Energia Gerada $\mathcal{P}(v) \times \mathcal{F}(v)$ [kWh]
0	0	0,00	0,00	0,00
1	0	3,22	282,07	0,00
2	0,01	6,91	605,32	6,05
3	25,90	10,13	887,39	22.983,85
4	85,80	12,32	1079,23	92.598,11
5	175,10	13,23	1158,95	202.931,79
6	311,00	12,85	1125,66	350.080,26
7	496,80	11,45	1003,02	498.300,34
8	746,80	9,42	825,19	616.253,39
9	1040,60	7,20	630,72	656.327,23
10	1309,40	5,12	448,51	587.281,61
11	1461,60	3,40	297,84	435.322,94
12	1491,20	2,10	183,96	274.321,15
13	1500,00	1,20	105,12	157.680,00
14	1500,00	0,65	56,94	85.410,00
15	1500,00	0,33	28,91	43.362,00
16	1500,00	0,16	14,02	21.024,00
17	1500,00	0,07	6,13	9.198,00
18	1500,00	0,03	2,63	3.942,00
19	1500,00	0,01	0,88	1.314,00
20	1500,00	0,00	0,00	0,00
Energia Anual Gerada (EAG)				4.058 [MWh/ano]

A frequência de Weibull é a distribuição das 8760 horas do ano de acordo com a velocidade do vento, ou seja, mostra o número de horas que a turbina trabalha em cada uma delas. Dessa maneira, é possível calcular a energia gerada total em 1 ano através do somatório das parciais. A figura 18a representa a potência e a 18b a energia gerada, ambas em função das velocidades do vento.

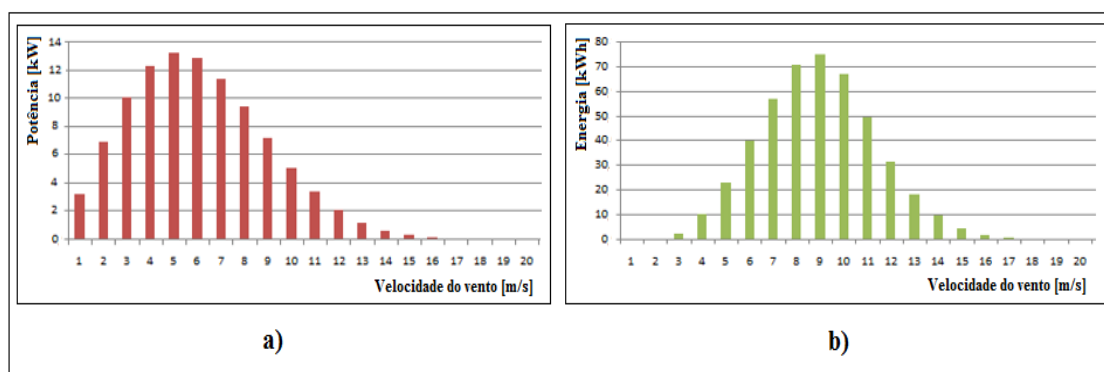


Figura 18 - Gráficos em função da velocidade do vento: a) Potência [kW] e b) Energia [kWh].

Fonte: ELABORAÇÃO PRÓPRIA (2014).

Tendo a potência e a energia gerada por 1 aerogerador, é possível calcular essas variáveis para o parque eólico inteiro. Antes é preciso estimar a quantidade de máquinas que podem ser instaladas no local, cuja área disponível é de cerca de 675.000 m², figura 14b.

Considerando o diâmetro das pás do aerogerador de 82 m e respeitando a distância mínima entre as turbinas, chega-se a um parque de 820 x 820 m, com 2 linhas e 3 colunas num total de 6 máquinas e uma potência instalada de 9 MW.

Segundo o inventário da ANEEL, a potência do aproveitamento de Galheiro é de 14 MW. Utilizando-se a equação 2, calculou-se a potência instalada híbrida:

$$P_F = P_H + P_W = 14,0 + 9,0 = 23 \text{ MW}$$

Já as potências efetivas, ao longo do ano, foram calculadas levando-se em consideração a vazão média de longo termo, do histórico de vazões, ANEXO B, dividido em períodos de três meses, tabela 7 e figura 19.

Tabela 7: Potências hídrica, eólica e híbrida efetivas em períodos trimestrais.

Período do Ano (3 meses)	1º Período (dez a fev)	2º Período (mar a mai)	3º Período (jun a ago)	4º Período (set a nov)
Potência Hídrica [MW]	8,74	7,69	6,64	6,74
Potência Eólica [MW]	1,80	3,00	6,90	4,50
Potência Híbrida [MW]	10,54	10,69	13,54	11,24

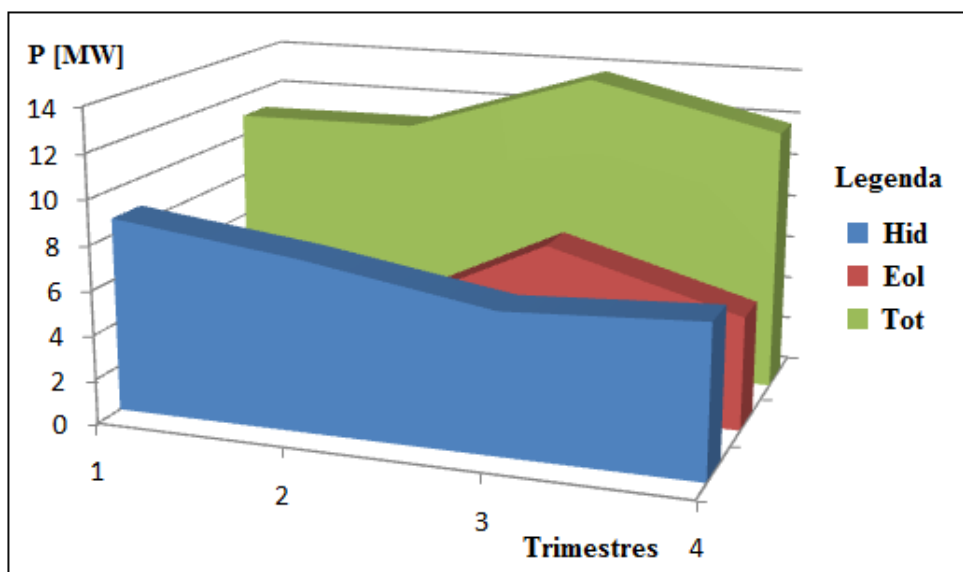


Figura 19 - Comparação entre as potências hídrica, eólica e híbrida.

Fonte: ELABORAÇÃO PRÓPRIA (2014).

4.3. Energia e fator de capacidade

A energia máxima, possível de ser gerada no parque eólico (E_{WM}), é igual a potência nominal dos 6 aerogeradores atuando o ano inteiro (8.760 h).

$$E_{WM} = T \cdot P_W = 8.760 \times 1,5 \times 6 = 78.840 \text{ MWh}$$

No entanto, uma única turbina eólica é capaz de gerar 4.058 MWh em 1 ano, resultado da tabela 5, o que resulta na energia anual gerada no parque (EAG_{Parque}).

$$EAG_{Parque} = 4.058 \times 6 = 24.348 \text{ MWh}$$

O fator de capacidade eólico (FC_W) é dado por:

$$FC_W = \frac{24.348}{78.840} = 0,31 \text{ ou } 31\%$$

Analogamente, a energia hídrica máxima (E_{HM}) gerada na PCH é de:

$$E_{HM} = T \cdot P_H = 8.760 \times 14 = 122.640 \text{ MWh}$$

Devido às alterações na potência, provenientes de variações na vazão ao longo do ano, a energia anual gerada na PCH (EAG_{PCH}) é a soma das energias de cada trimestre (2.190 h).

$$(dez - fev) = 2.190 \times 8,74 = 19.141 \text{ MWh}$$

$$(mar - mai) = 2.190 \times 7,69 = 16.841 \text{ MWh}$$

$$(jun - ago) = 2.190 \times 6,64 = 14.542 \text{ MWh}$$

$$(set - nov) = 2.190 \times 6,74 = 14.761 \text{ MWh}$$

$$EAG_{PCH} = 65.284 \text{ MWh}$$

O fator de capacidade hídrico (FC_H) é dado por:

$$FC_H = \frac{65.284}{122.640} = 0,53 \text{ ou } 53 \%$$

E finalmente, o fator de capacidade do sistema híbrido (FC_{SIS}) é dado por:

$$FC_{SIS} = \frac{EAG_{Parque} + EAG_{PCH}}{E_{WM} + E_{HM}} = \frac{24.348 + 65.284}{78.840 + 122.640} = \frac{89.632}{201.480} = 0,45 \text{ ou } 45 \%$$

Considerando que o sistema híbrido de Galheiro tem uma potência instalada de 20 MW, o fator de capacidade passa a ser:

$$EAG_{híbrida} = 8.760 \times 20 = 175.200 \text{ MWh}$$

$$FC_{Galheiro} = \frac{89.632}{175.200} = 0,51 \text{ ou } 51 \%$$

5. ANÁLISE ECONÔMICA

5.1. Valores de referência

O cálculo do custo total de implantação da PCH começou pela obtenção do fator de aspecto, substituindo-se os dados do inventário hídrico, ANEXO 1, na equação 20:

$$(P) = 14,00 \text{ MW} \qquad (H) = 21,00 \text{ m}$$

$$Fa = 1821,43 \times \frac{\sqrt{14}}{21^{1,25}} = 151,60$$

De posse do fator de aspecto (Fa), foi possível calcular o custo unitário em dólares americanos (Cu_{hid}). Substituindo-se na equação 21, tem-se:

$$Cu_{hid} = 1654 \times (151,60)^{0,085} = 2.534,52 \frac{US\$}{kW}$$

Finalmente, entrando com os valores de (Cu_{hid}) e (P) na equação 18, obtém-se:

$$(Cu_{hid}) = 2.534,52 \frac{US\$}{kW} \qquad (F_{dr}) = 2,48 \frac{R\$}{US\$} \qquad (P) = 14.000,00 \text{ kW}$$

$$Ct_{hid} = 2.534,52 \times 2,48 \times 14.000,00 = R\$ 87.998.375,28$$

Assim como foi feito para a PCH, calculou-se, equação 22, também o custo total de implantação do parque eólico (Ct_{eol}) em função do custo unitário (Cu_{eol}). Segundo a *Global Wind Energy Outlook*, o capital investido por kW de capacidade instalada, em média, passou de €\$ 1.450,00 para €\$ 1.240,00 a partir de 2010.

$$(Cu_{eol}) = 1.240,00 \frac{€\$}{kW} \qquad (F_{er}) = 3,14 \frac{R\$}{€\$} \qquad (P) = 9.000,00 \text{ kW}$$

$$Ct_{eol} = 1.240,00 \times 3,14 \times 9.000,00 = R\$ 35.042.400,00$$

Para compor as receitas anuais do fluxo de caixa foi usada a taxa de referência de venda de energia de origem hídrica e eólica e o custo de operação e manutenção, que é obtido através de uma porcentagem pré-definida do custo total do empreendimento, MASON (2010).

Assim, a receita anual gerada pelo sistema hídrico, equação 23, é dada por.

$$(Tx_{hid}) = 210,00 \frac{R\$}{MWh} \quad (EAG_{hid}) = 65.284,00 \text{ MWh} \quad (COM_{hid}) = 5,00 \%$$

$$Rec_{hid} = 210,00 \times 65.284,00 - 0,05 \times 87.998.375,28 = R\$ 9.309.721,24$$

Da mesma forma, a receita eólica é calculada usando-se a equação 24. Já que o sistema híbrido tem a finalidade de vender energia elétrica gerada, independente da fonte, o valor da taxa eólica (Tx_{eol}) praticada é a mesma da hídrica (Tx_{hid}).

$$(Tx_{eol}) = 210,00 \frac{R\$}{MWh} \quad (EAG_{eol}) = 24.348,00 \text{ MWh} \quad (COM_{eol}) = 2,00 \%$$

$$Rec_{eol} = 210,00 \times 24.348,00 - 0,02 \times 35.042.400,00 = R\$ 4.412.232,00$$

O cálculo do VPL para 15 anos, tanto hídrico quanto eólico, utilizou as equações 25 e 26. A taxa anual de juros praticada foi de 10% a.a. O 2º e o 3º anos são demonstrados, como exemplo e finalmente o somatório para verificar a viabilidade do empreendimento.

$$VPL (hid)_2 = \frac{9.309.721,24}{(1 + 0,1)^2} = R\$ 7.693.984,50$$

Hídrico:

$$VPL (hid)_3 = \frac{9.309.721,24}{(1 + 0,1)^3} = R\$ 6.994.531,36$$

$$VPL (eol)_2 = \frac{4.412.232,00}{(1 + 0,1)^2} = R\$ 8.114.242,00$$

Eólico:

$$VPL (eol)_3 = \frac{4.412.232,00}{(1 + 0,1)^3} = R\$ 8.114.242,00$$

$$VPL (hid)_{Final} = \sum_{i=1}^{16} VPL (hid)_i \qquad VPL (eol)_{Final} = \sum_{i=1}^{16} VPL (eol)_i$$

5.2. Índices econômicos

A expansão da capacidade instalada dos parques eólicos na última década se deve principalmente ao aumento nos custos dos combustíveis fósseis, APÊNDICE B. Com isso, o governo vem diminuindo o valor dos investimentos em projetos ligados à energia renovável através de subsídios, BAKOS (2002).

Para identificar fatores-chave e melhor entender economicamente projetos híbridos, é necessário confrontar áreas como: engenharia, aerodinâmica, geografia e ciências do clima. Todas juntas dão ideia de como minimizar custos e planejar políticas que auxiliem os investidores a tomarem a decisão correta, MALAKAR (2014).

Segundo a Associação Brasileira de Fomento às Pequenas Centrais Hidrelétricas (ABFPCH), o aumento no preço da energia produzida por PCH e parque eólico deve estimular investimentos nesse segmento. Avanços na tecnologia criaram uma tendência onde o custo reduziu, de 280 para US\$ 70/MWh, nos últimos 30 anos, VALENTINE (2011).

Índices econômicos, tais como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Tempo de *Payback* (TPB), entre outros, podem ser usados como indicadores na análise de viabilidade financeira de projetos de geração elétrica, BARROS (2014). Funcionam da seguinte forma:

- O VPL permite comparar investimentos iniciais com retornos financeiros futuros, descontados a uma taxa de juros apropriada;
- A TIR calcula uma taxa de juros hipotética do projeto, para que se possa fazer uma comparação com outros tipos de investimento;
- O TPB é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor investido.

Uma ferramenta importante na análise econômica do empreendimento, é o fluxo de caixa, que auxilia o administrador nas tomadas de decisão. É através dele que as receitas anuais do projeto ficam evidentes, assim como o custo do investimento, DIAS (2011).

No presente estudo, calcularam-se o VPL do investimento em uma PCH e em um parque eólico, de acordo com o valor de venda médio nos últimos anos, R\$ 210,00/MWh, elaborou-se o fluxo de caixa do empreendimento, tabela 10.

Tabela 10: Fluxo de caixa do empreendimento considerando o valor de venda de R\$ 210,00/MWh.

Ano	Fluxo de Caixa [R\$]			Valor Presente Líquido [R\$]		
	Parque Eólico	PCH	Sistema Híbrido	Parque Eólico	PCH	Sistema Híbrido
00	-35.042.400	-87.998.375	-123.040.775	-35.042.400	-87.998.375	-123.040.775
01	4.412.232	9.309.721	13.721.953	4.011.120	8.463.383	12.474.503
02	4.412.232	9.309.721	13.721.953	3.646.473	7.693.984	11.340.457
03	4.412.232	9.309.721	13.721.953	3.324.975	6.994.531	10.319.506
04	4.412.232	9.309.721	13.721.953	3.013.614	6.358.665	9.372.279
05	4.412.232	9.309.721	13.721.953	2.739.649	5.780.604	8.520.253
06	4.412.232	9.309.721	13.721.953	2.490.590	5.255.095	7.745.685
07	4.412.232	9.309.721	13.721.953	2.264.173	4.777.359	7.041.532
08	4.412.232	9.309.721	13.721.953	2.058.339	4.343.054	6.401.393
09	4.412.232	9.309.721	13.721.953	1.871.217	3.948.230	5.819.447
10	4.412.232	9.309.721	13.721.953	1.701.106	3.589.301	5.290.407
11	4.412.232	9.309.721	13.721.953	1.546.460	3.263.001	4.809.461
12	4.412.232	9.309.721	13.721.953	1.405.873	2.966.364	4.372.237
13	4.412.232	9.309.721	13.721.953	1.278.066	2.696.695	3.974.761
14	4.412.232	9.309.721	13.721.953	1.161.879	2.451.541	3.613.420
15	4.412.232	9.309.721	13.721.953	1.056.253	2.228.673	3.284.926
			VPL	1.472.613	17.187.895	18.660.508

O investimento inicial de aproximadamente 25 milhões de reais no parque eólico se deve principalmente aos altos valores dos componentes dos aerogeradores, tais como: lâminas, engrenagens, gerador elétrico, torre, transformador e cabos de transmissão.

O gráfico de barras, figura 20, dá a visão dos investimentos e receitas durante 15 anos.

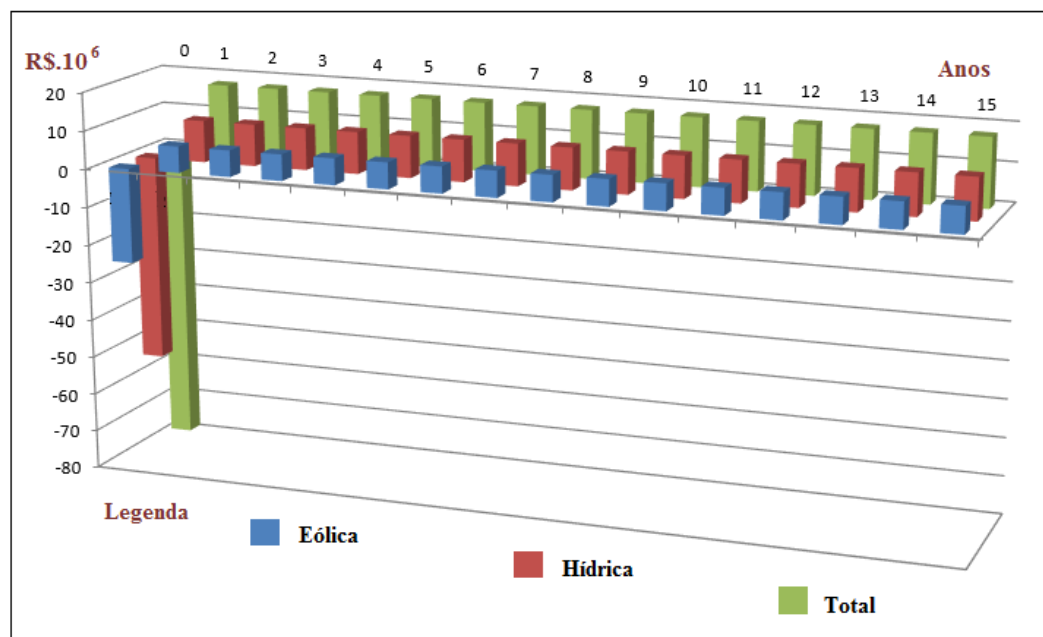


Figura 20 - Gráfico de barras representando o fluxo de caixa.

Fonte: ELABORAÇÃO PRÓPRIA (2015).

6. CONCLUSÕES

Toda fundamentação teórica foi baseada em uma literatura que, embora escassa, representa o estado da arte em matéria de sistemas híbridos. Utilizando artigos e periódicos atuais, formulou-se um quadro conceitual baseado no fator de capacidade, tanto hídrico quanto eólico. Foram usadas ferramentas matemáticas, tais como a distribuição de Weibull para a energia eólica e o VPL para a análise econômica.

O cenário positivo em relação ao aumento da participação eólica na matriz energética nacional tem fomentado a iniciativa de inúmeras empresas tipicamente hídricas. Elas buscam investir em projetos eólicos como forma de obter vantagem competitiva em ambiente de mercado. Dessa forma, adotam a estratégia de ampliação da capacidade instalada com base na diversificação hidro eólica.

Como forma de diminuir o problema da energia eólica, que se perde por não ser estocável na origem, o trabalho abordou algumas tecnologias de armazenamento de energia. Com informações de inventários, tanto hídricos quanto eólicos, foi possível avaliar uma região no Nordeste que dá condições ao emprego dessa nova tecnologia.

A análise econômica contou com valores atuais de mercado e estimativas para o ano de 2015, o que tornou a avaliação mais confiável. Além disso, o trabalho incentiva investidores a levarem em conta o efeito da complementaridade entre as fontes hídrica e eólica nas suas estratégias de negócio. Ao considerar-se os ativos em um mesmo portfólio, é possível mitigar os riscos durante a comercialização.

O VPL mostrou que o empreendimento híbrido é viável. Principalmente porque o cenário atual é favorável. Devido ao baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, o preço da energia sofreu um avanço em 2015 e se encontra em patamares bastante elevados. Mesmo na crise da água, o projeto se mostrou viável.

O sistema é de fato uma opção para a matriz energética brasileira, além do insumo usado como matéria prima ser proveniente de fontes renováveis, a tecnologia necessária para implantação da usina já está difundida no país.

Nos últimos anos, o governo brasileiro realizou leilões de energias alternativas. Os preços praticados mostraram que o uso da energia eólica pode ser uma alternativa energética para regiões como o Nordeste. A bacia do rio Itaguari, estrategicamente localizada, apresenta potencial hídrico a ser explorado. Diante de tantos motivos, deixa-se aqui o incitamento para a instalação da primeira usina hidro-eólica elétrica do Brasil.

APÊNDICE A – Aerogeradores

A geração de eletricidade em grande escala, para alimentar de forma suplementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte é tecnologia que existe há diversas décadas. Pode-se dizer que a precursora das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha, já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta. Data dessa época a turbina DEBRA (*Deutsch-Brasileira*) de 100 kW, desenvolvida em conjunto entre os dois países, BRASIL (2011).

Os rotores de eixo horizontal são os mais conhecidos e os mais utilizados por ter uma eficiência maior que a dos rotores de eixo vertical. São os modelos mais utilizados na geração de energia elétrica, a pá é um dispositivo aerodinâmico e funciona através de dois princípios físicos: sustentação (força que atua perpendicularmente ao escoamento) e arrasto (força atuante na direção do escoamento). Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar à jusante do vento, *down wind*, ou à montante, *up wind*.

Os componentes de um aerogerador de eixo horizontal são os seguintes:

- Nacele - Carcaça montada sobre a torre, abriga o gerador, a caixa de engrenagens e o sistema de controle e de rotação do sistema para melhor posicionamento;
- Pás - Responsáveis pelo giro do eixo, são fixadas através de flanges a uma estrutura metálica chamada cubo, peça que transmite torque ao rotor do gerador;
- Transmissão e caixa multiplicadora - Engrenagens necessárias para elevar a rotação do eixo aos níveis nominais dos geradores síncronos, tal como 1800 rpm;
- Torre - Sustenta e posiciona o rotor na altura conveniente;
- Gerador - Transforma energia mecânica em elétrica.

Além dos componentes principais, os aerogeradores contemplam um sensor de direção com a finalidade de girar as hélices no sentido do vento e obter o máximo rendimento. Ainda são compostos de um sistema de freio aerodinâmico junto ao eixo principal com a finalidade de limitar a velocidade no valor nominal. Durante as tempestades de vento o freio é acionado, impedindo que as hélices girem em altas rotações.

Todo sistema eólico só começa a gerar energia a partir de certa velocidade, necessária para começar a girar o rotor. Da mesma forma, o rendimento máximo só é alcançado na velocidade nominal, para manter-se nessa velocidade as turbinas são acopladas às caixas multiplicadoras, SADHU (1987).

APÊNDICE B – Preço da energia elétrica

Outros fatores que influenciam diretamente nos custos de implantação de um parque eólico são listados nos itens que seguem, VALANTINE (2011):

1. Qualidade do vento

Em 2009, a Associação Européia de Energia Eólica produziu uma avaliação econômica dos custos de geração e os valores variaram da seguinte forma:

1.1. US\$ 87 a US\$ 121 em locais com ventos de baixa qualidade, isto é, muita flutuação na velocidade e na direção;

1.2. US\$ 65 a US\$ 87 em locais com ventos de qualidade média, ou seja, variações médias, tanto na velocidade, quanto na direção;

1.3. US\$ 54 a US\$ 75 em locais com ventos de alta qualidade. Típico de região costeira, sem flutuações na velocidade nem na direção.

Portanto, uma avaliação correta da velocidade média do vento tem que contemplar necessariamente as flutuações da direção e a frequência de suas rajadas.

2. Localização do parque eólico

Dada a importância da qualidade do vento, a geração *offshore* de energia eólica é significativamente de maior qualidade. Infelizmente o custo dessas instalações é maior. Segundo a Associação de Energia Eólica Britânica, a diferença nos valores chega a ser, em média, 50% maior em relação à *onshore*.

Com as melhorias tecnológicas marítimas atuais, os custos da geração no mar estão declinando mais rapidamente que os em terra. Por isso, os especialistas estão prevendo uma futura paridade de valores.

3. Características do sistema eólico

Nos últimos 30 anos, um diversificado leque de inovações tecnológicas surgiu no sistema para melhorar o desempenho sob condições variadas. Muitos naceles, hoje em dia, abrigam um motor que ajusta automaticamente a inclinação das pás em resposta a variação da velocidade

do vento, com isso, é possível aumentar o rendimento dos aerogeradores e conseqüentemente os lucros.

Hoje as torres são mais altas que antes, possibilitando às turbinas capturarem escoamentos laminares, afastados da camada de atrito com o solo. Além disso, há linhas de transmissão subterrâneas que, em comparação com as sustentadas por torres, diminuem significativamente os custos de instalação.

4. Conexão com a rede

Geralmente os parques híbridos são construídos em regiões remotas, com o intuito de aproveitar a disponibilidade de terras e evitar a oposição social. A distância do local para a rede elétrica influencia nos custos de conexão de duas maneiras.

4.1. A distância demanda longas linhas de transmissão, além da construção de vias de acesso, o que pode adicionar cerca de U\$ 80 por metro;

4.2. A energia se dissipa ao percorrer as linhas de transmissão. As perdas são proporcionais à distância e dependendo disso, podem chegar a 10% da energia produzida, fenômeno que onera ainda mais o empreendimento;

Outro fator que influencia a conexão com a rede é a tensão da linha. Ela pode restringir a capacidade de geração do parque eólico, ou demandar investimentos em subestações com onerosos transformadores para regular a tensão.

5. Clima

Climas adversos geralmente inflacionam os custos de manutenção dos parques eólicos. Um exemplo são as turbinas que trabalham em ambientes marinhos. Elas estão mais propensas à corrosão e acabam sendo substituídas com mais frequência. Materiais em aço inox, resistentes à umidade são mais caros.

Outro exemplo são as turbinas que operam em regiões com temperaturas muito baixas, o gelo nas pás pode afetar o desempenho aerodinâmico e a conseqüente queda no rendimento. Além de impactar no fator de capacidade, já que os parques permanecem fechados no inverno rigoroso.

O custo de manutenção em ambientes de frio extremo é maior, visto que o óleo lubrificante se torna mais viscoso e um sistema de aquecimento aumenta o custo de operação. Além disso, o aço se torna mais frágil e quebradiço, não resistindo aos impactos causados por aves em suas rotas de reprodução.

6. Créditos de carbono

Um fator que influencia significativamente o custo do empreendimento é a quantidade de créditos de carbono anexada ao projeto. Os investidores podem reivindicar redução certificada de emissões, pois tanto a energia eólica quanto a hídrica compensam a emissão de carbono. Créditos no valor de até US\$ 20 por MWh estão assegurados por 15 anos.

7. Economia da região

Qualquer análise de custo-benefício relacionada à implantação de um parque hidroelétrico deve avaliar o impacto financeiro global que o empreendimento terá na comunidade. Principalmente nos valores de propriedade e nas receitas ligadas ao turismo. A *Berkeley National Laboratory* analisou recentemente a venda de 7.500 casas com localização próxima as instalações eólicas e encontrou evidências de que os preços dos imóveis foram influenciados negativamente.

8. Demanda do consumidor

Mesmo na mais flexível das circunstâncias de abastecimento, o gerenciamento da carga é complicado devido às variações na demanda. Essa varia conforme a estação do ano, a semana do mês, por hora do dia e até mesmo a cada segundo. Um sistema de fornecimento deve ser capaz de responder prontamente a todas essas variações. A natureza aleatória do vento complica ainda mais a gestão da carga, devido às flutuações da oferta. Tecnicamente, a literatura traz duas abordagens para se estabilizar o fornecimento de energia.

8.1. Armazenar energia por meio do uso de baterias, bombeamento hídrico ou ar comprimido. Essa última é considerada a mais versátil tecnologia de armazenamento nos dias atuais;

8.2. Adicionar capacidade de geração como energia hídrica ou solar, sistemas híbridos, nos momentos de pico de carga. Até mesmo o uso de turbinas a gás e grupo geradores diesel, solução pouco vantajosa que encareceria de US\$ 10 a 20 por MWh.

9. Juros do financiamento

Os custos para a obtenção do capital podem impedir o investimento em energia eólica. Empréstimos baseados em fluxos de receitas futuras são ferramentas políticas viáveis para investidores levantarem verba necessária para acelerar o ritmo da geração híbrida. Existem diversas modalidades de financiamento. A mais utilizada é a *Project Finance*, referência para

a concessão do crédito. Diversas instituições financeiras trabalham nessa modalidade, sendo que o BNDES apresenta as melhores condições.

10. Influência de tecnologias competitivas

A evolução dos custos de geração de energia eólica e hídrica nos últimos tempos não pode ser considerada isoladamente. O que tem acontecido nos mercados mundiais de carvão tem sido de fundamental importância.

O carvão é a principal fonte de geração elétrica no mundo, portanto, representa o padrão do mercado econômico. Qualquer avaliação das perspectivas econômicas dentro da qual a energia híbrida compete sem levar em consideração o mercado de carvão não estará completa.

Em dezembro de 2004, por exemplo, o preço do carvão subiu quase US\$ 60, o dobro da faixa de negociação tradicional. Isso enviou ondas de choque no mercado energético e aumentou o interesse por tecnologias alternativas. Dessa forma, o ano de 2006 foi marcado pelos 15.098 MW de potência eólica instalada, figura 21, quase o dobro da taxa de crescimento dos três anos anteriores.

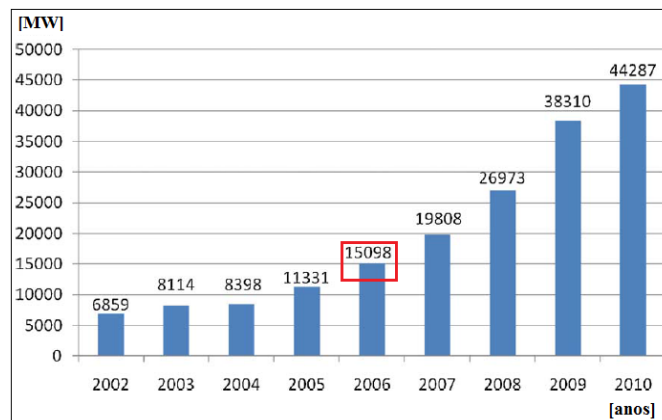


Figura 21 - Crescimento da potência eólica no mundo.

Fonte: VALANTINE (2011).

A instabilidade em torno do futuro do carvão reduziu a diferença entre o custo da energia térmica e da eólica. Alguns pesquisadores têm afirmado que, desde o início da escalada dos preços do carvão ou da propulsão nuclear, a energia eólica tem sido cada vez mais barata.

Estas observações sugerem que nas próximas décadas a matriz energética mude a favor da energia eólica e hídrica, conseqüentemente a favor da energia híbrida, em ambos os casos, a necessidade de gerir os elementos que influenciam os custos de geração de energia serão de fundamental importância.

APÊNDICE C - Vazão no rio São Francisco

O território brasileiro é reconhecido pelo elevado potencial de aproveitamento das fontes renováveis de energia. A disponibilidade desses recursos primários, presentes em abundância nas reservas nacionais, revela-se complementar entre si. O conhecimento qualitativo disso não é novidade no setor, porém os reais benefícios não são mensurados no planejamento do sistema, tanto pelas concessionárias quanto pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE).

Marinho (2012), sugere que a regularização da vazão do rio São Francisco, em Pernambuco, pode receber uma colaboração de aproveitamentos eólicos, principalmente no segundo semestre, figura 22, quando o potencial aumenta em função dos ventos alísios.

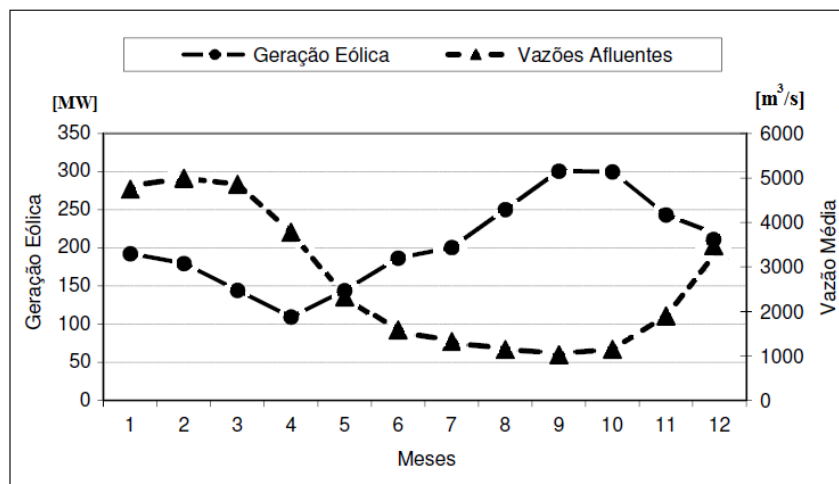


Figura 22 - Relação anual entre geração eólica e vazões no São Francisco.

Fonte: MARINHO, (2012).

O estudo demonstrou que a operação integrada de usinas eólicas e hidrelétricas pode adicionar uma estabilidade sazonal ao sistema. A água poupada com o fechamento das comportas recebe outros destinos como a irrigação de lavouras, já que a região Nordeste sofre frequentes períodos de seca e a água gera conflitos políticos.

Quanto à sazonalidade dos ventos, dados obtidos em estações anemométricas convencionais locais como Cabrobó, Arcoverde e Garanhuns confirmam a característica dos chamados *trade winds*, ou ventos comerciais: com pouca variação na direção, velocidades médias acima de 7 m/s e turbulência mínima.

Finalmente, a região apresenta condições de vento extremamente favoráveis ao desenvolvimento de parques eólicos. No estado de Pernambuco particularmente, a complementaridade hidro-eólica sazonal constitui-se uma vantagem sistêmica a ser explorada.

APÊNDICE D - Estação Meteorológica Automática, EMA

Como os dados de velocidade do vento, que estão disponíveis, foram medidos na EMA e não exatamente no local do parque, algumas considerações em relação ao terreno devem ser tomadas, já que as características topográficas de uma região também influenciam no comportamento dos ventos, os principais fatores são: altitude do local, presença de obstáculos nas redondezas, relevo e corpos d'água que podem desacelerar o escoamento, rugosidade do terreno caracterizada pela vegetação e utilização da terra.

A Companhia de Eletricidade do estado da Bahia (COELBA) conduziu desde 1994 um programa de medições anemométricas específicas visando avaliar o potencial eólico estadual. No mesmo ano esse projeto teve um incentivo adicional ao ser incluído no Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, BRASIL (2010).

Uma EMA coleta dados de temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, radiação solar, direção e velocidade dos ventos. As estações mais modernas são providas de sensores como o *Wind Log*, que contemplam o anemômetro e o cata-vento no mesmo instrumento. Nas mais antigas eles vêm separados, INMET (2014).

O anemômetro, figura 23a, é o principal instrumento de medição do vento nas estações eólicas. Eles medem a velocidade da componente horizontal, são robustos e resistentes a rajadas oblíquas causadas por variações de pressão. A quantidade pode variar entre 2 e 6. Já os cata-ventos, figura 23b, servem para determinar a direção dos ventos. Isso é bom para melhorar a orientação do parque eólico. O grau de resolução desses instrumentos é pequeno, cerca de 1 grau, e o consumo de energia extremamente reduzido. É importante que o giro abranja um ângulo de 360°, AMMONIT (2014).

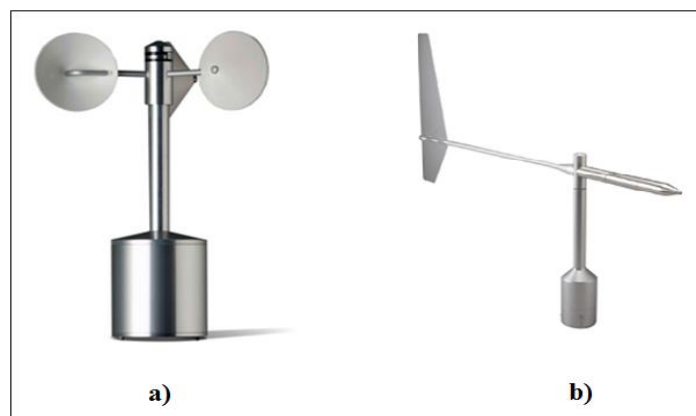


Figura 23 - Instrumentos: a) Anemômetro; b) Cata-vento.

Fonte: AMMONIT (2014).

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.
- AMARANTE, O. A. C. *et al.* **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 200, p. 45.
- AMMONIT, *Measuring Wind and Solar Power: Sistemas de medição de vento para avaliação do potencial eólico*. Disponível em <<http://www.ammonit.com>>, acesso em 04 de maio de 2014.
- BAKOS, G. C.; *Feasibility study of a hybrid wind/hydro power-system for low-cost electricity production*. *Applied Energy*, Vol. 72, 2002, p. 599-608.
- BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SILVA, T. R.; *The electric energy potential of landfill biogas in Brazil*, *Energy Policy*, Vol. 65, 2014, p. 150-164.
- BEKELE, G.; TADESSE, G.; *Feasibility study of small Hydro/PV/Wind hybrid system for off-grid rural electrification in Ethiopia.*, *Applied Energy*, Vol. 97, 2012, p. 5-15.
- BÉLANGER, C.; GAGNON, L.; *Adding wind energy to hydropower.*, *Energy Policy*, Vol. 30, 2002, 1279-1284.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. / MME; Colaboração EPE. Brasília: MME: EPE, 2007.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2011 - ano 2010**. / Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE 2011, 266 p.
- BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética - EPE,. **Análise Periódica do Setor Energético**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>> Acesso em 04 de julho de 2012.
- CAMARGO, L. A. S.; GUARNIER, E.; RAMOS, D. S.; XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. **Análise da Atratividade na Participação de Empresas Geradoras Hidráulicas em “SPE” para Desenvolvimento de Projetos Eólicos**. De 18 a 21 de maio de 2014 em Foz do Iguaçu/PR.

- CARDOSO, M. R.; Geografia, Tecnologia e Ensino. **Guia do Usuário Quantum GIS versão 1.4.0**. Disponível em <http://portal.mda.gov.br/terralegal/manual_qgis.pdf> Acesso em 26 de dezembro de 2014.
- CARVALHO, J. F.; *Measurement economic performance, social progress and sustainability using an index*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, p. 1073-9, 2011.
- CONNOLLY, D.; LUND, H.; MATHIESEN B. V.; LEAHY, M.; *A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems*. Applied Energy, Vol. 87, 2010, p. 1059-1082.
- COPEL, Companhia Paranaense de Energia. **Manual de avaliação técnico econômica de empreendimentos eólicos**. Curitiba, 2007. 104 p.
- CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Potencial Energético - Potencial Eólico: **Base de dados de vento, busca por coordenadas 2014**. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>> Acesso em 04 de janeiro de 2014.
- CRUZ, T. B.; SILVA, B. C.; **Identificação de potenciais hidrelétricos de PCH's com base no modelo numérico de Terreno SRTM**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. - ABRH, Campo Grande-MT. Nov 2009.
- DIAS, F.; **Planilha para análise financeira de projeto de PCH**. Mensagem pessoal recebida <remambeli2001@yahoo.com.br> em 10 de dezembro de 2011.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Crise hídrica expõe necessidade de diversificação da matriz energética do país**. Disponível em <<http://www.odia.ig.com.br>>, 2015.
- EWEA, European Wind Energy Association. Supported by: European commission in the framework of the intelligent energy europe programme. *Wind energy - The Facts*. Disponível em <<http://www.windfacts.eu>>, 2005.
- FARIA, M. A.; **Metodologia de prospecção de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Dissertação de Mestrado - Programa inter unidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo. 2011, 212p.
- FARREL, C.; **Aproveitamentos hidroelétricos de pequeno porte, estudos de viabilidade**. São Carlos: Escola de Engenharia, 1982, 99p.

- FERREIRA, H. T.; **Energia eólica: barreiras a sua participação no mercado brasileiro.** 2007. 117p. Dissertação de Mestrado - Programa inter unidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.
- IEA, International Energy Agency, **Energy Technology Perspectives 2014 (ETP 2014) - Harnessing Electricity's Potential.** Disponível em <<http://www.iea.org/itp>> Acesso em 04 de outubro de 2014.
- IMPSA, Soluções Integradas para a Geração de Energia Elétrica, Produtos - IMPSA Wind: **Catálogo Virtual de Turbinas Eólicas IMPSA-UNIPOWER.** Disponível em <<http://www.impsa.com/produtos>> Acesso em 04 de junho de 2014.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia, Climatologia: **Dados meteorológicos, estações convencionais 1961-1990.** Disponível em <<http://www.inmet.gov.br>> Acesso em 04 de julho de 2014.
- JARAMILLO, O. A.; BORJA M. A.; HUACUZ, J. M.; **Using hydropower to complement wind energy: a hybrid system to provide firm power.** Renewable Energy, Vol. 29, 2004, p. 1887-1909.
- KRONIGER, D.; MADLENER, R.; **Hydrogen storage for wind parks: A real options evaluation for an optimal investment in more flexibility.** Applied Energy, 2014.
- LIMA, B. W. F.; **O Programa Brasileiro de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2009. 82p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Engenharia Mecânica. Universidade de Campinas (UNICAMP).
- LOBOSCO, O. S.; **Geração de energia em Pequenas Centrais Hidrelétricas.** São Paulo: [s.n.], 1987. 212p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Área: Sistemas de Potência.
- MALAKAR, T.; GOSWAMI, S. K.; SINHA, A. K.; **Impact of load management strategy of a wind-short hydro hybrid system in based frequency pricing.** Energy Conversion and Management, Vol. 79, 2014, p. 200-212.
- MARINHO, M. H. N.; **Oferta de energia através da complementaridade sazonal hidro-eólica no estado de Pernambuco.** Artigo da revista PCH Notícias & SHP News, n. 40, p. 24-28, 2012.

- MASON, I. G.; PAGE, S. C.; WILLIAMSON, A. G.; *A 100% renewable electricity generation system for New Zealand utilising hydro, wind, geothermal and biomass resources*. Renewable Energy, Vol. 38, 2010, p. 3973-3984.
- MEDEIROS, A. M. L.; **um planeta brasileiro sobre geotecnologias livres**. Artigos técnicos. Revista: FossGIS Brasil, ano 1, edição n. 02, Jun 2011. Disponível em <<http://www.fossGISbrasil.com.br>> Acesso em 20 de dezembro de 2014.
- MOHAMMED, Y. S.; MUSTAFA, M. W.; BASHIR, N.; *Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 35, 2014, p. 527-539.
- PIMENTA, F.; KEMPTON, W. & GARVINE, R. W.; *Combine meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore Wind Power resource of Southeastern Brazil*. Renewable Energy, Vol. 25, 2008, p. 912-843.
- PRADO, P. O.; **Projeto de um parque eólico com a utilização de Sistema de Informação Geográfica**. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2009.
- PUNYS, P.; DUMBRAUSKAS, A.; KVARACIEJUS, A.; VYCIENE, G.; *Tools of Small Hydropower Plant Resource Planning and Development*. Energies, 4, p. 1258-1277, 2011, doi: 10.3390/en4091258.
- RENEWABLE ENERGY RESEARCH LABORATORY, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AT AMHERST. *Wind Power: Capacity Factor, Intermittency. What happens when the wind does not blow?* Disponível em: <http://www.umass.edu/windenergy/publications/published/communityWindFactSheets/RERL_Fact_Sheet_2a_Capacity_Factor.pdf> Acesso em 10 de julho de 2012.
- SADHU, D. P.; *Workshop sobre energia eólica, II, Porto Alegre, 08 de julho de 1987*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1987. 93 p.
- SAUER, I. L.; CARVALHO, J. F.; **Um sistema interligado hidro-eólico para o Brasil**. Ecodebate Cidadania & Ambiente. Disponível em <<http://www.ecodebate.com.br>> Acesso em 25 de janeiro de 2015.

- SOUZA, Z.; BORTONI, E. C.; SANTOS, A. H. M.; **Centrais Hidrelétricas: Estudos para implantação**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1999.
- TEIXEIRA, F. E. R.; **O papel da geração hídrica reversível na integração da energia eólica em ambiente de Mercado**. 2012. 126p. Dissertação de Mestrado - Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- TIAGO FILHO, G. L.; BARROS, R. M.; SILVA, F. G. B.; *Trends in the growth of installed capacity of Small Hydro Power (SHP) in Brazil, based on Gross Domestic Product (GDP)*. Renewable Energy, Vol. 37, n. 1, p. 403-411, jan. 2012.
- TIAGO FILHO, G. L.; BARROS, R. M.; SILVA, F. G. B.; **uma abordagem para a prospecção do custo unitário de PCH baseada no seu fator de aspecto**. Hidro & Hydro: PCH notícias & SHP news, Vol. 56 (1), Jan/Mar/2013, p. 50-55.
- TIAGO FILHO, G. L. (2010); **Utilização combinada de pequenas centrais hidrelétricas e centrais elétricas eólicas**. Revista: Hidro & Hydro, n. 47, Out/Nov/Dez 2010.
- VALENTINE, S. V.; *Understanding the variability of wind power costs*. Renewable Energy, Vol. 15, 2011, p. 3632-3639.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; **Topodata: Brazilian full coverage refinement SRTM data**. Applied Geography (Sevenoaks), v.32, p. 300-309, 2011.

ANEXO A - Inventário hídrico da bacia do rio Itaguari

Aproveitamento Hidrelétrico	Distância da Foz [km]	Área de Drenagem [km ²]	N.A. Montante [m]	N.A. Jusante [m]	Potência Instalada [MW]	Área do Reservatório [km ²]
Rio Itaguari						
km 312	312,30	334,00	765,00	743,00	1,50	2,31
km 280	280,90	736,00	743,00	709,00	5,00	1,94
km 247	247,60	1.183,00	709,00	692,50	3,90	0,87
Itaguari	216,80	1.531,00	692,50	671,00	6,50	2,82
Urucuia	192,1	1.700,00	671,00	661,00	3,00	2,22
Palmeira	173,0	1.910,00	661,00	650,00	5,00	4,26
Baiana	165,0	2.133,00	650,00	619,00	13,00	0,53
Aliança	152,00	2.426,00	619,00	593,50	12,00	0,86
Morcegos	133,60	2.709,00	593,50	581,00	8,00	1,65
Cocos	117,10	2.807,00	581,00	565,50	10,00	2,97
Buritis	93,20	3.014,00	565,50	548,00	12,00	6,88
Vereda	73,20	3.258,00	548,00	526,50	16,00	4,47
Suçupara	55,50	4.327,00	526,50	512,50	10,00	4,99
Suçarana	38,70	4.484,00	512,50	499,50	8,50	3,02
Galheiro	14,00	6.210,00	498,00	477,00	14,00	5,18
Foz do Itaguari	1,30	6.262,00	477,00	461,50	12,50	3,75
Riacho do Meio						
km 74	74,50	678,00	649,50	618,00	1,10	3,00
km 37	37,10	898,00	591,00	551,00	1,60	2,94
km 20	20,00	963,00	551,00	525,00	1,10	0,59

ANEXO B - Transposição de vazões

Data	Q estação [m ³ /s]	Q galheiro [m ³ /s]	1º Período (dez a fev) [m ³ /s]	2º Período (mar a mai) [m ³ /s]	3º Período (jun a ago) [m ³ /s]	4º Período (set a nov) [m ³ /s]
01/12/1964	90,9379	85,6661	85,6661			
01/01/1965	77,5533	73,0575	73,0575			
01/02/1965	67,7752	63,8462	63,8462			
01/03/1965	71,8497	67,6845		67,6845		
01/04/1965	73,8477	69,5667		69,5667		
01/05/1965	55,3366	52,1287		52,1287		
01/06/1965	52,2842	49,2532			49,2532	
01/07/1965	48,8827	46,9909			46,9909	
01/08/1965	47,5062	44,7522			44,7522	
01/09/1965	45,1701	42,5515				42,5515
01/10/1965	52,7987	49,7379				49,7379
01/11/1965	68,9406	64,9440				64,9440
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
01/12/2012	49,2701	46,4139	46,4139			
01/01/2013	51,7350	48,7359	48,7359			
01/02/2013	43,7927	41,2540	41,2540			
01/03/2013	46,1259	43,4519		43,4519		
01/04/2013	50,7940	47,8494		47,8494		
01/05/2013	42,3777	39,9210		39,9210		
01/06/2013	41,5909	39,1798			39,1798	
01/07/2013	39,9512	37,6351			37,6351	
01/08/2013	38,8585	36,6058			36,6058	
01/09/2013	37,9494	35,7494				35,7494
01/10/2013	40,6713	38,3135				38,3135
01/11/2013	44,5431	41,9609				41,9609
Q média [m³/s]			67,0885	58,9947	48,2576	51,6774
Potência [MW]			8,7443	7,6894	6,6399	6,7356

ANEXO C - Inventário do potencial eólico

Aproveitamento Hidrelétrico	Velocidade do vento [m/s]					Densidade de Potência [W/m ²]
	1º Período (dez a fev) [m/s]	2º Período (mar a mai) [m/s]	3º Período (jun a ago) [m/s]	4º Período (set a nov) [m/s]	Média Anual	
Rio Itaguari						
km 312	3,93	4,71	6,28	5,42	5,09	139
km 280	3,91	4,62	6,13	5,31	4,99	130
km 247	4,08	4,75	6,27	5,46	5,14	142
Itaguari	4,32	4,97	6,57	5,71	5,39	168
Urucuia	4,20	4,82	6,36	5,51	5,22	154
Palmeira	4,00	4,59	6,07	5,23	4,97	135
Baiana	4,00	4,60	6,07	5,22	4,97	135
Aliança	4,18	4,82	6,36	5,43	5,20	154
Morcegos	4,12	4,51	5,93	5,41	4,99	141
Cocos	4,02	4,64	6,11	5,21	5,00	136
Buritis	3,88	4,49	5,91	5,03	4,83	123
Vereda	3,98	4,61	6,07	5,19	4,96	134
Suçupara	4,03	4,66	6,12	5,28	5,02	138
Suçuarana	4,03	4,65	6,09	5,29	5,02	138
Galheiro	4,21	4,82	6,64	5,54	5,22	155
Foz do Itaguari	4,12	4,69	6,13	5,43	5,09	145
Riacho do Meio						
km 74	4,23	4,87	6,37	5,51	5,25	157
km 37	3,91	4,52	5,90	5,09	4,86	124
km 20	4,05	4,69	6,13	5,29	5,04	139