

## O USO COMBINADO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E PARQUES EÓLICOS.

Marcelo Daige Prado Leite<sup>1</sup>

Ivan Felipe Silva dos Santos<sup>2</sup>

Regina Mambeli Barros<sup>3</sup>

Geraldo Lúcio Tiago Filho<sup>4</sup>

### RESUMO

Ao longo das últimas décadas, o uso combinado de fontes de energia renováveis vem se tornando uma realidade no Brasil e no mundo. Os embriões dessa transformação foram os sistemas híbridos compostos por geradores eólicos e placas fotovoltaicas. O presente artigo propõe um método para avaliar, de maneira preliminar, o potencial energético híbrido de uma bacia hidrográfica apta à utilização combinada de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Parques Eólicos. Utilizando-se de inventários hidrelétricos e dados do regime médio de ventos no local, foi realizada uma simulação na bacia do rio Itaguari. Tal região, localizada na sub-bacia 45 do rio São Francisco no estado da Bahia, mostra-se apta a receber o primeiro Sistema Híbrido “Hídrico-Eólico” do país.

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

### ABSTRACT

Over the last decades, the combined use of energy sources, both renewable as non renewable, are becoming into reality in Brazil and around the world. The embryo of this changing was the Hybrid System composed by wind generators and photovoltaic panels. This paper proposes a method for evaluating, in a preliminary way, the hybrid energy availability in a hydro basin that allows the combined use of Small Hydro Powers and Wind Farms. Making use of a hydropower inventory and the velocity wind average at the local, a simulation was held in the Itaguari river basin. This region is located in the 45 San Francisco micro basin in the Bahia state and shows to be able to support the first Hybrid “Hydro-Wind” system of the country.

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá, engdaige@gmail.com. cel.: (35) 9130-2208.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Itajubá, ivanfelipeice@hotmail.com. tel.: (35) 3621-6935.

<sup>3</sup> Universidade Federal de Itajubá, remanbeli@hotmail.com. tel.: (35) 3629-1224.

<sup>4</sup> Universidade Federal de Itajubá, tiagounifei@hotmail.com. tel.: (35) 3629-1156.

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

## 1. VISÃO GERAL

### 1.1. Introdução

A evolução humana sempre foi acompanhada de transformações, através 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 indispensável 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 socioeconômico no mundo. (ANEEL, 2005).

A irradiação solar e a energia potencial gravitacional, que originam o ciclo hidrológico (evapotranspiração, condensação, precipitação, infiltração, etc.), acarretam na energia hidráulica, passível de ser aproveitada para geração de energia hidrelétrica [figura 1b, catálogo ANDRITZ (2010)]. No presente cenário, a energia hidráulica consiste na principal fonte de geração de energia elétrica em diversos países e representa aproximadamente 17% de toda a eletricidade gerada no mundo. Isto ocorre em razão de possuir tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas, ao contrário de outras fontes de energia renovável. (ANEEL, 2005).

As massas de ar em movimento na atmosfera terrestre possuem energia cinética embutida, e essa é denominada energia eólica. O seu aproveitamento se dá pela rotação das turbinas eólicas, conhecidas por aerogeradores [figura 1a, revista CERPCH (2010)]. Além da geração elétrica, a energia dos ventos também pode ser aproveitada por cata-ventos e moinhos para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água por exemplo.



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

## 1.2. Justificativa

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. Os estudos de vazão disponível para um aproveitamento são baseados em séries hidrológicas históricas, e as distribuições de probabilidade de ocorrência de dadas vazões são baseadas em séries estatísticas, uma vez que são variáveis aleatórias. A potência de uma central 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. [BARROS (2012); TIAGO FILHO (2010)].

Nesse sentido, estudos de complementaridade de energia por meio da geração elétrica por turbinas eólicas têm despertado o interesse, sobretudo, em locais em que as Pequenas Centrais Hidrelétricas já disponibilizam o acesso à rede e à subestação. Um exemplo de complementaridade ocorre no nordeste brasileiro, em especial na bacia do rio São Francisco. [BARROS (2012); TIAGO FILHO (2010)].

O gráfico da figura 2, do Atlas de Energia Elétrica do Brasil, ANEEL (2005), ilustra melhor o comportamento da velocidade do vento e da vazão disponível ao longo do ano.

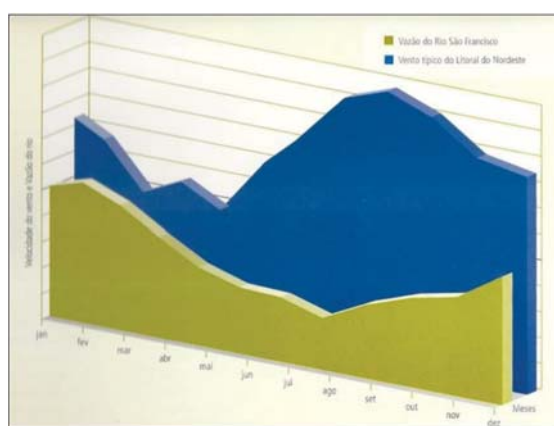


Figura 2 - Vazão disponível na região nordeste e vento típico no litoral da mesma

A energia eólica apresenta como maior barreira à sua expansão o fato de não ser estocável na origem, o que lhe confere disponibilidade imprevisível, tornando sua geração inflexível. Por outro lado, quando utilizada em conjunto com outras formas de geração como a hídrica, que é estocável na origem, torna-se economicamente viável.

A utilização combinada de uma Pequena Central Hidrelétrica com um Parque Eólico apresenta como ponto central de conveniência, em relação à utilização individual, o fato do reservatório servir de regularização e armazenamento de energia para o sistema híbrido. TIAGO FILHO (2010).

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 o possível excedente da mesma, especialmente para usinas eólicas inseridas em sistemas inflexíveis. Portanto, compreender e analisar os impactos associados à introdução destas 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 usinas eólicas. Aplicando-se ao modelo brasileiro, essencialmente hidrelétrico, a energia eólica deve ser usada como fator de economia de água nos momentos onde 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 utilização posterior. FERREIRA (2007).

Outra aplicação para a integração da energia eólica ao sistema é o uso da Central Hidrelétrica Reversível (figura 3), que foi extraída de Teixeira (2012).

Esse tipo de central é capaz de transformar a energia elétrica, proveniente dos geradores eólicos, em energia potencial através do bombeamento da água de um reservatório inferior para um superior, possibilitando assim, a utilização futura da energia. TEIXEIRA (2012).

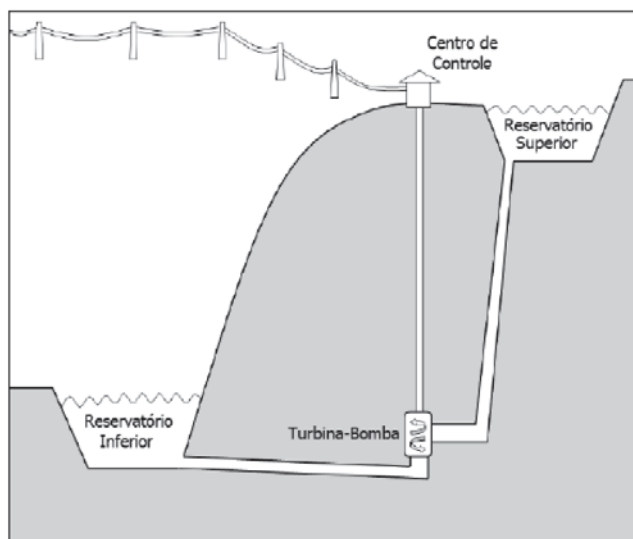


Figura 3 - Esquema de uma central hídrica reversível onde a turbina opera como bomba

O fato da combinação de fontes de energia ser uma realidade no mundo atual, da energia hídrica ser estocável na origem e a eólica não e o fato de existir complementaridade entre as fontes analisadas, motivaram o estudo do uso combinado entre Pequenas Centrais Hidrelétricas e Parques Eólicos.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Prospecção

No Brasil, a ausência de levantamentos topográficos sempre foi um obstáculo para o desenvolvimento de estudos e projetos, portanto deve haver regiões excelentes para o uso combinado de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Parques Eólicos que não foram mapeadas ou inventariadas. O trabalho de prospecção consiste em confrontar dados de aproveitamentos hidrelétricos inventariados (disponíveis em [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)) com o fluxo de potência eólica (figura 4), das regiões planas dentro da área de drenagem da bacia em estudo (disponíveis em [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)).



Figura 4 - Mapa com o fluxo de potência eólica anual em cores.

O planalto central estende-se desde a margem esquerda da bacia do Rio São Francisco até as fronteiras com Bolívia e Paraguai. Essa região é dominada pelo escoamento leste-sudeste em torno do Anticiclone Subtropical Atlântico. A velocidade média anual na região situa-se geralmente entre 4 e 6 [m/s]. BRASIL (2012). **2.2. Estudo de caso**

#### 2.2.1. Potencial Hídrico

A pesquisa identificou um local ótimo para a instalação do sistema híbrido, conforme figura 5. Trata-se da sub-bacia 45, hidrográfica do rio São Francisco no estado da Bahia. No Rio Itaguari e seu afluente Riacho do Meio o inventário contempla 19 aproveitamentos com um potencial total de 144,7 MW. Da mesma forma, constatou-se também que o local é provido de ventos da ordem de 6,5 m/s nos meses de junho a agosto e de 5,5 m/s nos de setembro

a novembro. O que resulta em densidades de potência de aproximadamente 220 e 165 W/m<sup>2</sup> respectivamente.

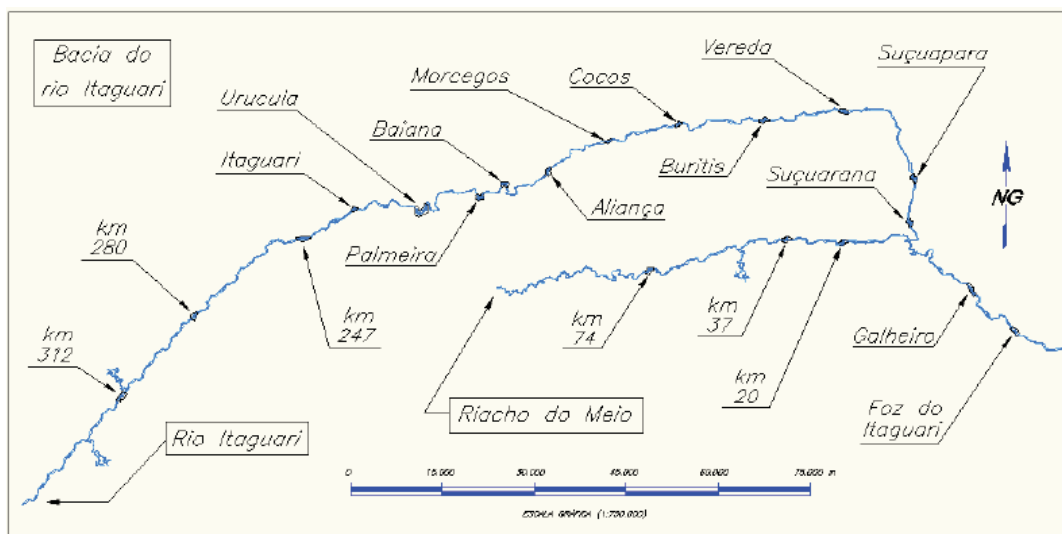


Figura 5 - Mapa georeferenciado e em escala da bacia do rio Itaguari.

A metodologia de prospecção em locais favoráveis à instalação do sistema híbrido consiste em um instrumento de avaliação expedita e preliminar que permite com que bacias sejam avaliadas quanto ao seu potencial energético total. Esse método de pesquisa também pode ser utilizado no auxílio à tomada de decisão, ou seja, ajuda o empreendedor a investir, ou não, no projeto. FARIA (2011).

O estudo do inventário hidrelétrico é a avaliação do potencial de geração de energia de uma unidade hidrográfica. Ele é um instrumento que além de quantificar os aspectos energéticos, observa o uso múltiplo dos recursos hídricos. (ANEEL, 2007). A tabela 1 contempla as informações energéticas inventariadas necessárias.

Tabela 1: Inventário hidrelétrico do rio Itaguari e seu afluente Riacho do Meio.

Aproveitamento Hidrelétrico	Distância da Foz [km]	Área de Drenagem [km <sup>2</sup> ]	N.A. Montante [m]	N.A. Jusante [m]	Potência Instalada [MW]	Área do Reservatório [km <sup>2</sup> ]
<b>Rio Itaguari</b>						
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
Buritís	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
Suçuarana	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
<b>Riacho do Meio</b>						
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

### 2.2.2. Potencial Eólico

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.

Tabela 2: Inventário do potencial eólico na vizinhança dos aproveitamentos hidrelétricos.

Aproveitamento Hidrelétrico	Velocidade do vento [m/s]					Densidade de Potência [W/m <sup>2</sup> ]
	Período (dez a fev)	Período (mar a mai)	Período (jun a ago)	Período (set a nov)	Média Anual	
<b>Rio Itaguari</b>						
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	6,30	5,54	5,22	155
Foz do Itaguari	4,12	4,69	6,13	5,43	5,09	145
<b>Riacho do Meio</b>						
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



O cálculo da energia (anual ou mensal) é realizado pela multiplicação dos valores de potência gerada pelo tempo de duração de ocorrência associado a intervalos de velocidade de vento. Procurou-se por áreas de instalação o mais próximo possível dos aproveitamentos de maior densidade de potência:

- No rio Itaguari, o aproveitamento “Itaguari” tem densidade de 168 [W/m<sup>2</sup>].
- No Riacho do Meio, perto do “km 74” a densidade é igual a 157 [W/m<sup>2</sup>].

A velocidade média sazonal é o indicador mais simples da qualidade do potencial eólico e o mais usual em estimativas de geração eólico-elétrica a partir de dados de desempenho de turbinas eólicas disponíveis. Ela é resultante da média das velocidades horárias de vento, geradas a 50 [m] de altura, para todos os dias de simulação. A figura 6 exemplifica o tratamento estatístico dado à velocidade média sazonal de vento.

$$v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

Onde:  $N$  = número total de horas simuladas e  $v_i$  = velocidade do vento.

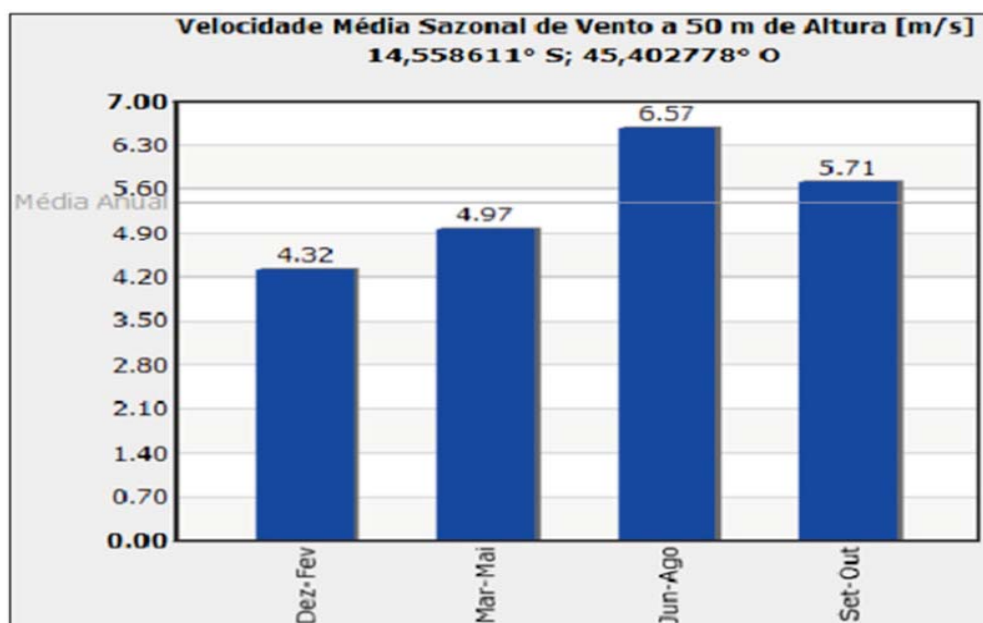


Figura 6 - Gráfico da velocidade dos ventos em Itaguari. Média Anual = 5,39 [m/s].

Outro indicador usual em estudos de potencial energético é a Densidade de Potência ( $P$ ) dada em  $[W/m^2]$ , ela representa a potência cinética média do vento que flui através de uma unidade de área sempre perpendicular à sua direção.

$$P = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \rho_i v_i^3$$

Onde:  $\rho$  = é a densidade do ar, função da temperatura e da pressão atmosférica.

### 3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Aproveitando as áreas disponíveis ao lado dos aproveitamentos de maior densidade de potência eólica (Itaguari e km 74 no Riacho do Meio) e levando em consideração as características de desempenho dos aerogeradores, esboçou-se um croqui preliminar de dois “Sistemas Híbridos” possíveis (figura 7). Existem muitas outras opções dentro da bacia, porém, as escolhidas são as que apresentaram maior eficiência energética.

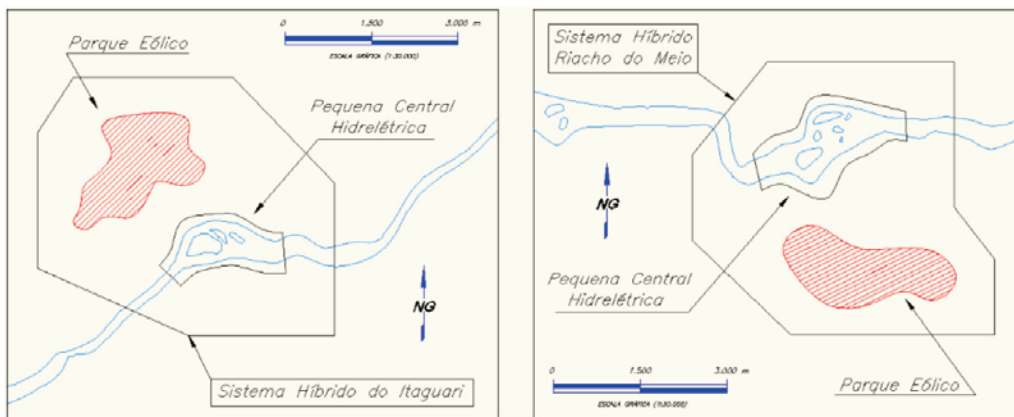


Figura 7 - Sistemas Híbridos, do Itaguari (esq.) e Riacho do Meio (dir.).

Coincidentemente, ao lado dos aproveitamentos escolhidos, o relevo apresenta características favoráveis: altura de operação, espaçamento horizontal e um terreno plano de baixa rugosidade. A cota no sistema Itaguari é de 830 [m], contra os 671 [m] do nível de jusante da Pequena Central Hidrelétrica. Já no Riacho do Meio, o Parque Eólico está localizado a 780 [m], enquanto o nível de jusante é de 680 [m].

As áreas hachuradas, podem receber mais de 5 aerogeradores, o que caracteriza um Parque Eólico. No caso de Itaguari, a área reservada é de 60.000  $[m^2]$ , exposta a uma densidade de potência de 168  $[W/m^2]$ , é capaz de gerar até 10 [MW]. O sistema Riacho do Meio, por sua vez, tem área de 50.000  $[m^2]$ , e densidade 157  $[W/m^2]$ , o que dá uma potência instalada de aproximadamente 7,85 [MW].

Somados, os dois parques tem capacidade de geração de 17,85 [MW]; valor que representa 12% de toda potência hídrica inventariada da bacia, uma porcentagem considerável, visto que, tratam-se de apenas 2 sistemas híbridos.

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. 2ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.

BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; 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.

BORBA, B. S. M. C.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Plug-in hybrid electric vehicles as a way to maximize the integration of variable renewable energy in power systems: The case of wind generation in northeastern Brazil. *Energy*, Vol. 37, 2012, p. 469-481.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Empresa de Pesquisas Energéticas. Análise Periódica do Setor Energético. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acessado em 04 de julho de 2012.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS - Revista Hidro & Hydro, n. 47, Out/Nov/Dez 2010. Itajubá: CERPCH.

FARIA, M. A. F. Metodologia de prospecção de pequenas centrais hidrelétricas. 2011. 212p. Dissertação de Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

FERREIRA, H. T. Energia eólica: barreiras a sua participação no mercado brasileiro. 2007. 117p. Dissertação de Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

TEIXEIRA, F.E.R. O papel da geração hídrica reversível na integração da energia eólica em ambiente de mercado. Out 2012, p. 8-10, Dissertação de Mestrado - Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

TIAGO FILHO, G. L. (2010). Utilização combinada de pequenas centrais hidrelétricas e centrais elétricas eólicas, *Revista Hidro & Hydro*, n. 47, Out/Nov/Dez 2010.