

Análise de viabilidade de um sistema de aproveitamento hidroelétrico por bombagem eólica na Ilha da Brava

Marco A. R. S. Cruz
Electrical Engineering Department
Federal University of Espírito Santo, UFES Vitória,
Brazil
madrsc@yahoo.com

Aquele Yahyaoui
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidad Carlos III
Madrid, Espanha
imene.yahyaoui@uc3m.es

Helder R.O. Rocha
Electrical Engineering Department
Federal University of Espírito Santo, UFES Vitória,
Brazil

Marcelo E. V. Segatto
Electrical Engineering Department
Federal University of Espírito Santo, UFES Vitória,
Brazil

Ahmad Atieh
Departamento de Engenharia Elétrica
University of Jordan,
Amman, Jordan
akatieh@hotmail.com

Resumo— Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre o uso do sistema de armazenamento hidrelétrico de bomba eólica para maximizar a penetração da energia eólica na rede elétrica de uma ilha. O sistema proposto reduz a dependência de combustíveis fósseis e mitiga os efeitos do aumento dos preços dos combustíveis na eletricidade. O sistema pode ser conectado a um sistema de geração de energia baseado em diesel existente que fornece eletricidade para a ilha. As simulações são realizadas em vários cenários que são definidos por equipamentos de diferentes tamanhos de acordo com a infraestrutura local da ilha e a demanda de energia. Os resultados mostram que a seleção adequada de turbinas eólicas tem grande impacto na geração de energia eólica, no preço da eletricidade e no retorno do investimento. Nota-se também que ultrapassar uma determinada parcela de energia eólica na rede elétrica pode acarretar altos custos de energia e inviabilizar economicamente o investimento.

Palavras-chave—energia renovável; força do vento; hidro bombeado armazenar; sistemas híbridos de energia;

I. INTRODUÇÃO

A maioria das ilhas do mundo depende de combustível fóssil para a maior parte de suas necessidades de geração de energia, bem como para transporte. Devido às suas localizações isoladas, os custos de infraestrutura, incluindo energia, são muito altos. Para as pequenas ilhas, os custos dos combustíveis fósseis são bastante elevados, atingindo mais de 15% de todas as suas importações [1]. As importações de combustível são, portanto, uma importante fonte de gastos de capital e um grande obstáculo ao desenvolvimento; reduzindo assim o investimento social. Para atenuar estes efeitos na economia, as ilhas de todo o mundo têm procurado de uma forma geral aumentar a penetração das energias renováveis (ER), especialmente na rede elétrica. Embora as fontes de energia renováveis sejam abundantes e as tecnologias de conversão de eletricidade estejam maduras,

ainda existem barreiras e desafios que limitam a ampla implementação de energias renováveis nas ilhas. Vários projetos de pesquisa foram publicados ao longo dos anos com o objetivo de aumentar a penetração de fontes de ER na rede geral de energia para níveis que cheguem a 100% [2]-[4]. No entanto, o maior desafio para conseguir isso é reduzir ou eliminar a instabilidade da rede elétrica causada pela injeção de fontes de energia renováveis [5]-[7]. Dependendo do tipo de energia renovável utilizada em uma ilha, esta questão pode ser mais ou menos difícil de alcançar. Algumas ilhas têm menor consumo de energia e adquirem abundantes reservatórios de água e recursos geotérmicos, que impõem menos problemas à estabilidade da rede geral [4]. Este trabalho apresenta um estudo de caso de utilização de fontes de energia renováveis para a Ilha da Brava no Arquipélago de Cabo Verde. A planta de armazenamento hidrelétrico bombeado pelo vento (WPHS) é proposta para ser usada para a ilha, a fim de maximizar a penetração de energias renováveis na rede. Além de reduzir o impacto do uso de combustível nas tarifas de eletricidade e também melhorar a segurança energética da ilha.

O artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção II descreve os recursos energéticos naturais da ilha e as potencialidades da sua utilização como fontes de energia. A Seção III propõe um sistema de armazenamento de energia eólica para complementar a central a diesel existente na ilha. A Seção IV descreve os componentes, o funcionamento do sistema proposto, bem como o algoritmo de simulação utilizado. As Seções IV e V apresentam a análise dos resultados obtidos e as conclusões do trabalho.

978-1-5386-0998-9/18/\$31,00

II. ARMAZENAMENTO HIDROBOMBEADO NOS SISTEMAS DE ENERGIA DA ILHA

A instabilidade da produção de energia de fontes de energia renováveis, especialmente solar e eólica, limita sua penetração na rede elétrica geral devido a questões de estabilidade de frequência e tensão [5], [6]. Várias estratégias têm sido estudadas e implementadas para aumentar a quota de energias renováveis na rede elétrica, tais como gestão da procura, sistemas renováveis híbridos e armazenamento de energia [7]. No entanto, empregar a estratégia de armazenamento de energia é a melhor maneira de aumentar significativamente a penetração de ER na rede de energia [1]. **Ao comparar diferentes tecnologias de armazenamento de energia em parâmetros como nível de potência, capacidade de armazenamento, custo, eficiência e resposta à taxa de descarga**, pode-se dizer que nenhuma das tecnologias atuais possui todas as características necessárias para uma integração ideal de ER na rede elétrica. No entanto, a técnica de armazenamento hidrelétrico bombeado é uma das opções mais atraentes para integração de ER, pois é madura, está disponível comercialmente e pode ser usada para sistemas de armazenamento em grande escala. **Este sistema pode armazenar energia sempre que houver excesso de eletricidade produzida e pode ser usado como produtor de energia nos períodos de falta de energia** [8]. Há, no entanto, um interesse crescente em sistemas hidrelétricos de bombeamento reversível. Em [9] foi proposta a instalação de um sistema de armazenamento hidroelétrico para a ilha de Gran Canaria, que mostrou que a penetração da energia eólica poderia aumentar em 1,93% (52,55 GWh/ano) a um custo competitivo de energia fornecida (0,084 \$/kWh). Em [10] foi apresentado um estudo numérico para otimizar o projeto de uma usina eólica, no qual se concluiu que o uso de bombas de velocidade variável é a solução mais eficiente e econômica para aumentar a quantidade de energia eólica armazenada nas hidrelétricas. energia. Para a ilha de Ikaria, foi apresentada em [11] uma proposta de aproveitamento de um reservatório de água existente no dimensionamento de um novo sistema eólico hidroelétrico com bombagem reversível. Na ilha de El Hierro, um sistema híbrido de energia hídrica e eólica com dessalinização combinada de água do mar foi recentemente implantado para atingir mais de 80% de ER na rede elétrica [12]. A água do mar como fluido hidráulico foi introduzida como sistemas de armazenamento de energia em um projeto pioneiro na ilha japonesa de Okinawa [13]. Em [14] o mesmo fluido é proposto em simulações de um sistema eólico-hidrelétrico, que resultou em penetração anual de energia eólica superior a 50%.

III. SISTEMA DE ENERGIA NA ILHA BRAVA

A ilha da Brava situa-se no sudoeste do Arquipélago de Cabo Verde (Costa da África Ocidental) e é a mais pequena das dez ilhas do país, com uma área de 67 Km². Uma única usina, baseada em gerador a diesel, tem 1056 kW de potência nominal total [15]. Existe na ilha uma rede de média tensão com dois níveis de tensão: uma linha de 6 KV que liga o Porto da Furna à vila principal de Nova Sintra e outra linha de 20 KV que serve o resto da ilha conforme ilustrado na Fig. 1.

Dois transformadores de 250 KVA ligam a linha de 6 KV à linha de 20 KV, na subestação de Nova Sintra. As estações MT/BT distribuem eletricidade nas principais aldeias e nas estações de bombeamento EB3 e EB4. Em 2016, a demanda máxima atingiu 580 kW e a energia entregue à rede foi de 2,7 GWh [15]. O consumo deverá chegar a 4,9 GWh até 2037,

considerando um crescimento de três por cento ao ano para o perfil de demanda da ilha. O custo do combustível fóssil usado na produção elétrica é de cerca de US\$ 290/MWh [15], o que representa um grande impacto nas tarifas. Para mitigar o custo da eletricidade, a Brava utilizou a energia eólica por três anos (1996-1998) em que uma turbina eólica de 150 kW contribuiu com até 17,14% da energia eólica no balanço anual da rede elétrica [16]. Esta experiência recente comprovou o grande potencial eólico disponível na ilha, que regista uma velocidade média anual do vento superior a 7,630 m/s (assumindo distribuição Weibull com: $k=2,71$, $C=8,63\text{m/s}$) e baixo desvio padrão de 0,19 m/s s) entre as médias anuais. A ilha está localizada em uma região de densidade de energia eólica que varia de 300 a 370 W/m².

As principais vantagens da utilização de ER são a redução da importação de combustíveis fósseis e o aumento da segurança energética na ilha.

4. MODELO PROPOSTO E OPERAÇÃO

Um sistema de armazenamento hidrelétrico bombeado pelo vento (WPHS) é proposto com o objetivo de aumentar os níveis de penetração da energia eólica na rede elétrica. O sistema proposto, ilustrado na Figura 2, considera os limites de recursos e infraestruturas existentes na ilha.

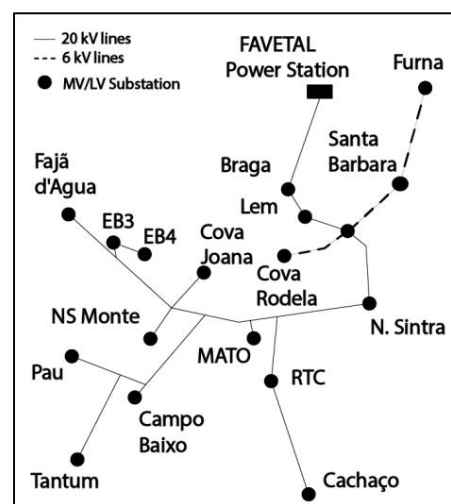


Fig. 1. Rede elétrica na Ilha Brava

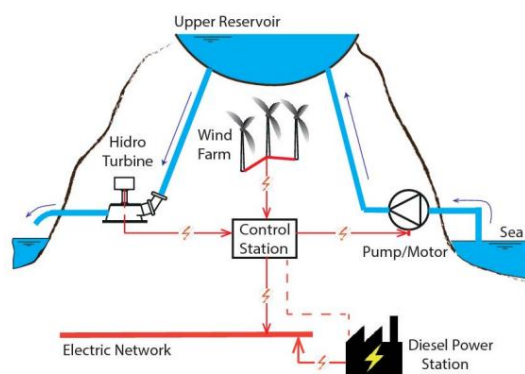


Fig. 2. Sistema de armazenamento hidrelétrico bombeado pelo vento proposto

Este sistema tem duas condutas forçadas separadas, uma para a bombagem de água e outra para a geração de eletricidade. O sistema de conduto forçado duplo tem mais capacidade de estabilizar a tensão e a frequência da energia. A água do mar é utilizada como fluido hidráulico devido à escassez de água na ilha [16]. A vantagem de usar água do mar é evitar a construção de um segundo reservatório (mais baixo).

No entanto, acarreta maiores custos de manutenção, operação e riscos ao meio ambiente [13]. A usina hidrelétrica bombeada pelo vento (WPHS) proposta consiste em: (1) um parque eólico (WF) localizado no local atual com turbina eólica desativada com um bom histórico de energia eólica [17]; (2) um conjunto de bomba de frequência e tensão variável (PU); (3) unidade de turbina hidrelétrica (HT); (4) um reservatório superior de água do mar (UR) localizado próximo ao atual parque eólico e 110 m acima do nível do mar; e (5) uma estação de controle (CS), que gerencia o fluxo de energia e recebe comandos remotos do operador de rede. O sistema WPHS está conectado à rede elétrica que também é alimentada por uma usina a diesel.

O principal objetivo do sistema proposto é aumentar a penetração da energia eólica na rede elétrica pública superando dois inconvenientes da energia eólica: (1) flutuações e oscilações dinâmicas de potência e (2) intermitência. O primeiro problema pode ser mitigado com o uso de bombas de velocidade variável, que bombeiam a água do mar para o reservatório superior. Enquanto a segunda desvantagem pode ser superada usando turbina hidráulica para a água no reservatório. Bombas de velocidade variável são uma estratégia eficaz no controle de frequência primária do sistema de potência e também podem ser muito importantes em redes isoladas [17]. Em situações de baixa demanda de eletricidade com produção eólica dominante e flutuante, a controlabilidade da bomba é uma maneira importante de melhorar a resposta aos distúrbios do sistema de energia. A controlabilidade da bomba pode ser alcançada usando várias estratégias: (a) equilibrar as flutuações de energia seguindo a carga; (b) controle de queda de frequência; e (c) uma combinação dos dois primeiros esquemas. Portanto, a estabilidade do sistema de energia é alcançada pela resposta rápida dos modos de bombeamento e geração. A operação do sistema WPHS é a seguinte: 1)

O operador da concessionária define o valor máximo para geração de turbinas hidrelétricas (EH) e geração eólica (EWig) na rede. Se a energia eólica atingir 35% do limite de demanda total, o excesso de energia é desviado para alimentar a bomba que direciona a água do mar para o reservatório superior. Em caso de reservatório cheio, resistências elétricas são acionadas para dissipar o excesso de potência. Ao mesmo tempo, se houver água do mar disponível na UR, o HT gera energia elétrica e alimenta a rede para fechar o balanço de energia demandada da usina a diesel. Os motores a diesel podem ser desligados se o HT tiver potência suficiente para substituí-lo. O balanceamento e compensação de energia é feito pela turbina hidráulica e geradores a diesel, e ambos garantem o controle de frequência e tensão do sistema de potência. O limite de 35% é justificado pelo projeto eólico anterior da Brava [16].

V. MODELO MATEMÁTICO

Simulações de balanço de energia por hora são apresentadas nesta seção. As simulações são realizadas para diversos cenários incorporando uma análise econômica ao longo de um período de 20 anos. Alguns parâmetros e variáveis são explicados agora:

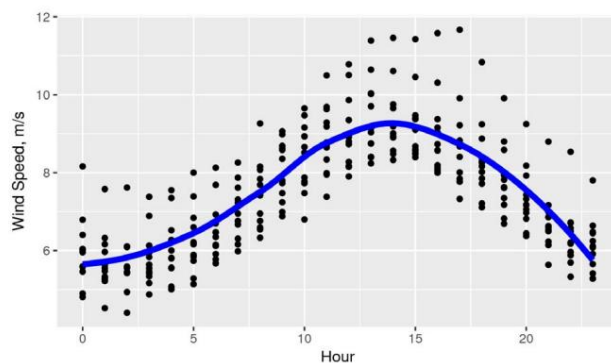


Fig. 3. Perfil horário da velocidade do vento (m/s) ao longo de 12 meses

A. Velocidade do

vento Os valores horários da velocidade do vento são usados na simulação. Esses valores são gerados usando velocidades de vento médias mensais registradas localmente e parâmetros Weibull usando técnicas de correlação de dados de estações meteorológicas em ilhas próximas. A velocidade horária do vento anual está resumida na Fig. 3.

B. Aerogeradores e produção de eletricidade

O parque eólico existente (dimensionado para um máximo de três aerogeradores) destina-se à instalação dos aerogeradores. As infraestruturas portuárias da ilha e os atuais caminhos de acesso ao parque eólico limitam o peso e as dimensões dos aerogeradores a utilizar, ou seja, até 300 kW/unidade [16]. Assim, na composição de vários cenários para posterior simulação são considerados três aerogeradores comerciais que se enquadram na realidade da ilha: a)

Turbina Eólica Nord Tank 150kW; b) Turbina Eólica Nord Tank 300kW; c) Aerogerador ACSA 27/225 kW. A energia eólica produzida em cada hora (kWh) é calculada a partir dos dados de velocidade do vento e da curva de potência dos aerogeradores:

$$E_{wf} = \sum_{i=1}^N P_{wi} \quad (1)$$

onde, E_{wf} é a energia total produzida por hora do parque eólico; P_w é a potência horária de uma única turbina eólica; w é a eficiência global do parque eólico (97%); e N unidades de turbinas eólicas;

C. Demanda de carga

A Brava tem um perfil típico de demanda de carga rural e baixo crescimento anual. A demanda de carga para 20 anos à frente foi estimada com base no diagrama de carga atual e assumindo um crescimento anual de 2,0%, conforme mostrado na Fig. 4.

D. Sistema de armazenamento bombeado

O sistema de armazenamento bombeado com dois condutos forçados separados permite o bombeamento simultâneo de água do mar para o reservatório superior e a geração de eletricidade usando água do mar no reservatório superior. O reservatório hidráulico absorve a potência das bombas em caso de excesso de energia eólica e descarrega a energia nas turbinas hidrelétricas para completar o balanço energético. Os custos operacionais e de investimento por kW e kWh são especificados na Tabela I.

As simulações determinam a potência horária necessária das bombas para atender o sistema. A potência nominal da turbina hidrelétrica é calculada como a potência média anual do parque eólico. Tecnologias práticas de bombas e turbinas podem

alcançar uma eficiência de ida e volta de carga/descarga acima de 80% [18]. Neste estudo assume-se um valor conservador de 75%.

A albufera superior localiza-se junto ao parque eólico existente, aproveitando a proximidade do desnível litoral de 110 metros de altitude acima do nível do mar. A energia hidrelétrica produzida é dada por:

$$= \frac{E_{\text{h}}}{E_{\text{d}} + E_{\text{r}}} \quad \frac{h \cdot \eta \cdot g \cdot V \cdot d}{\times 103,6^6} \quad (2)$$

onde, ER é a energia do reservatório (kWh); haut são as horas de autonomia; Ed é o consumo médio por hora; h é a eficiência da turbina hidrelétrica; V é o volume do reservatório (m³); d é a densidade da água (1000 kg/m³); g é a aceleração da gravidade e h é a altura do reservatório acima do nível do mar (110 m).

E. Modelo de Balanço

Energético A cada hora, a energia eólica produzida é dividida em parcelas injetadas diretamente na rede (Ewig), entregues nas bombas (Ep) e dissipadas pelas resistências (Edis) caso o reservatório não suporte mais água do mar:

$$E_{\text{wf}} = E_{\text{wig}} + E_{\text{p}} + E_{\text{ds}} \quad (3)$$

As fontes de energia fornecidas à rede são a energia eólica (Ewig), as turbinas hidráulicas (Eh) e pelos geradores a diesel (Edg) se necessário.

$$E_{\text{d}} = E_{\text{eterno}} + E_{\text{dg}} + E_{\text{h}} \quad (4)$$

A potência operacional mínima dos geradores a diesel, quando necessária para fechar o balanço de energia, não deve ser inferior a 128 kW devido às exigências dos fabricantes dos grupos geradores. Geradores a diesel e turbinas hidrelétricas asseguram o máximo controle de tensão e frequência do sistema de energia.

F. Descrição do algoritmo

O algoritmo implementado utiliza o modelo matemático explicado acima e realiza a análise técnica/econômica do sistema como um todo, com base nos custos empíricos de todos os seus principais componentes (bombas, turbinas hidráulicas, turbinas eólicas, reservatório e dutos). O fluxograma da operação do sistema proposto é explicado na Fig. 5.

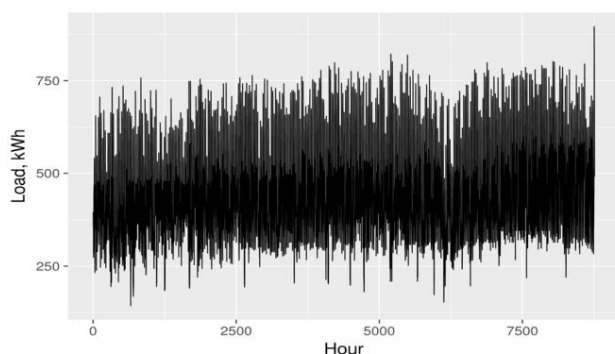


Figura 4. Demanda de carga estimada em 20 anos

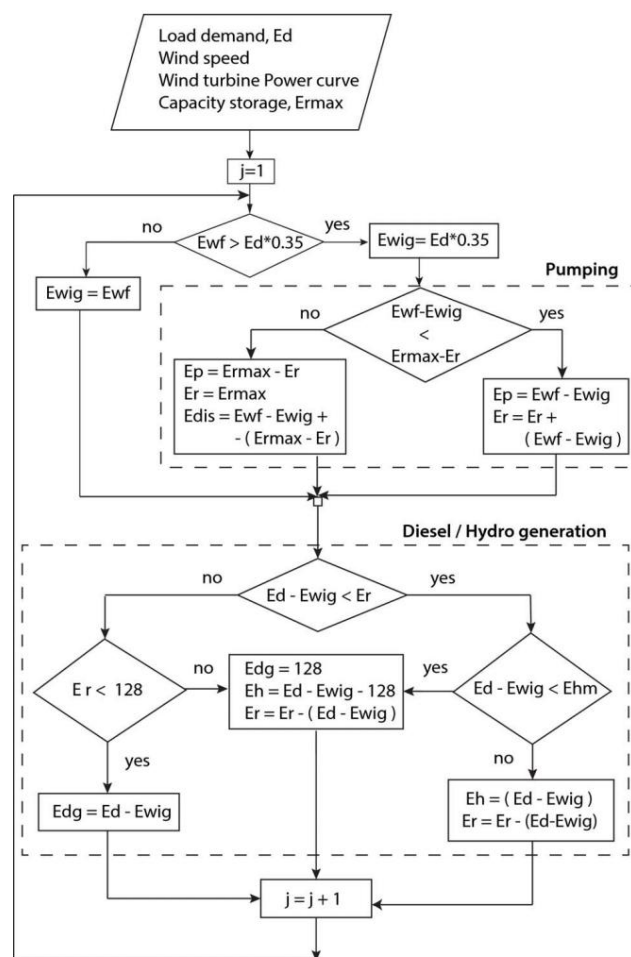


Figura 5. Fluxograma do algoritmo

Se a energia eólica for inferior a 35% da carga elétrica, ela é injetada diretamente na rede elétrica. Caso contrário, uma quantidade de energia eólica equivalente a 35% da carga é injetada na rede elétrica e o restante é desviado para bombeamento ou dissipado se o reservatório estiver cheio. Após a injeção de energia eólica, o balanço energético é assegurado com diesel e/ou hidrelétrica. Se não houver água suficiente para atender a carga restante ($E_d - E_{\text{wig}} > E_r$) o gerador a diesel deve ser ligado. Neste caso, se a energia armazenada no reservatório estiver abaixo da potência mínima do gerador (128 kW), apenas o gerador a diesel é acionado ($E_{\text{dg}} = E_d - E_{\text{wig}}$). Caso contrário, a turbina hidráulica também é acionada junto com a produção mínima de diesel de 128 kW. Por outro lado, se houver água suficiente no tanque para atender a carga e a potência nominal da turbina hidráulica for grande o suficiente ($E_d - E_{\text{wig}} < E_{\text{hm}}$) somente a turbina hidráulica é acionada. Se a turbina hidráulica não tiver potência suficiente, o gerador a diesel também é acionado em seu valor mínimo (128 kW). Quando a água é descarregada, a energia armazenada (E_r) é atualizada.

G. Avaliação Econômica

A avaliação econômica do projeto baseia-se na eliminação do custo do óleo diesel pela injeção de

energia renovável. Parâmetros financeiros, investimento e custo específico de O&M são apresentados a seguir:

- *Empréstimos: 70% ;*
- Pagamentos de empréstimo *de 20 anos* com taxa de juros de 4,0%;
- Taxa de desconto: 14% ;
- Impostos estaduais: 20% sobre o lucro.
- Preço do diesel: \$ 1,17/L (fixo) [19].

TABELA I. CUSTOS DE ARMAZENAMENTO HIDROBOMBEADO

Item	Custo de investimento	Custo de O&M
Turbina eólica (ref. 500 kW)	2.114,14 (\$/kW)	0,024 (\$/kWh)
Estação de bombeamento (ref. 350 kW)	1.057,95 (\$/kW)	0,082 (\$/kWh)
Estação Hidrelétrica (ref. 350 kW)	1.469,38 (\$/kW)	Contabilizado na estação de bombeamento
Reservatório Superior (ref. 2000 m3)	88,25 (\$/m3)	Contabilizado na estação de bombeamento
Conduto forçado (500 m)	5.7362,50	Contabilizado na bomba estação

Os estudos de viabilidade e licitações custam \$ 56.554,48 e para custos diversos/imprevisíveis é contabilizado um adicional de 15% sobre os custos totais.

VI. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Sete configurações diferentes (ver Tabela II) estão considerando o crescimento estimado da demanda de carga e as restrições impostas pela infraestrutura na ilha. Todas as configurações têm uma capacidade de armazenamento resultante de 1,50 kWh por kW de energia eólica instalada.

TABELA II. CUSTOS DE ARMAZENAMENTO HIDROBOMBEADO

Cena.	Turbina de vento			UR (m3)
	Tipo	Qtd.	Potência (kW)	
1	designer 150	2	300	1500
2	Designers 300	1	300	1500
3	Designers 150	3	450	2250
4	A27/225	2	450	2250
5	A27/225	3	675	3400
6	A27/300	2	600	3000
7	A27/300	3	900	4500

Simulações ao longo de 20 anos foram realizadas para cada configuração e todos os valores técnicos e econômicos foram calculados. A Tabela III mostra a potência da bomba e da turbina hidrelétrica para os sete cenários.

TABELA III. POTÊNCIA DE BOMBA E HIDROTURBINA, KW

Cenário	1	2	3	4	5	6	7
Bomba 251		230	425	382	601	569	895
Hidro 125		95	188	155	233	191	286

As simulações computam vários parâmetros e estão resumidas na Tabela III: RE share é a quantidade de energia eólica e hídrica injetada na rede sobre a carga total demandada; perda de energia é o excesso de energia eólica que o reservatório não conseguiu armazenar. Também são derivados parâmetros econômicos: Valor Presente Líquido (VPL), retorno em anos, Taxa Interna de Retorno (IRR) e Custo Nivelado de Energia (LCOE).

TABELA IV. RESULTADOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES WPHS

Não.	Plano de Custos (M\$)	RE compartilhado (%)	Energia Perda,%	VPL (\$ 103)	Retorno	TIR	LCOE, \$/ MWh
1	1,48	26.3	5.3	426,5	5.8	0,241	176,5
2	1,40	20.4	4.0	207.3	9,0	0,189	197,5
3	2.21	36,8	11.8	381,5	8.3	0,198	202.8
4	2.10	31.1	9.4	221,2 11,0	0,172		212.3
5	3.12	43,6	16.1	15.6	19,3 0,133		236,7
6	2,80	35,5	16.7	-155,0	-	0,109	251,8
7	4.19	49.2	24,0	-615,7	-	0,071	283.1

Pode-se observar pelos resultados que a penetração máxima de energia renovável alcançada foi de 49,2% para o cenário 7, mas desperdiçou mais energia renovável (24%) devido ao reservatório cheio de água. Embora os dois últimos casos tenham mais investimentos renováveis, eles não apresentam dados econômicos favoráveis com NPV negativo e sem retorno (avaliação em 20 anos), embora apresentem um LCOE (\$251,8-

\$ 283,1/MWh) abaixo do custo operacional baseado em diesel (\$ 290/MWh). No entanto, os cenários 3, 4 e 5 têm a maior penetração de RE com VPL positivo, boa TIR e LCOE mais favorável. Pode-se notar que uma boa combinação do tipo de turbina eólica e quantidade relacionada é importante para se ter uma boa parcela de ER e taxa de retorno econômico.

A Fig. 6 mostra a contribuição de cada fonte de energia no sistema de potência. Verifica-se que a energia eólica injetada diretamente na rede elétrica tem em média uma contribuição maior que a energia hidráulica, mas esta última tem mais contribuições quando a energia eólica instalada é maior (três últimas configurações). A contribuição dos combustíveis fósseis para o custo da eletricidade é na verdade \$ 290/MWh, segue-se que qualquer um dos cenários, que tem um LCOE abaixo desse valor, resulta em um Custo Médio Ponderado menor que o custo atual. O Cenário 3 (LCOE= \$ 202,8/Mwh e 37% de parcela de RE) fornece um WAC de \$ 269/MWh, o que representa uma redução de 11% nos custos de eletricidade. A Fig. 7 apresenta essas porcentagens de redução de custos para os demais cenários. Pode-se observar que o cenário 7 tem o menor impacto na redução do custo da eletricidade para um WAC de \$ 286,6/MWh (1,1% menor do que o custo real).

VII. CONCLUSÃO

Um sistema de energia de armazenamento hidrelétrico de bomba é usado para maximizar a penetração de energia renovável no sistema de energia elétrica da Ilha Brava. A viabilidade técnica e a sustentabilidade econômica do sistema são investigadas. Vento

energy foi adotada como fonte de energia renovável integrada a uma usina hidrelétrica reversível para possibilitar um sistema de energia sustentável para a ilha. Os resultados mostraram que uma alta participação de fontes renováveis na rede elétrica pode ser economicamente inviável, embora tecnicamente possível com tecnologias de armazenamento de energia. Vários cenários foram investigados variando a turbina eólica e as capacidades dos reservatórios de armazenamento de água. Restrições técnicas e operacionais do sistema de energia proposto na localização geográfica do local foram respeitadas. A penetração máxima de renováveis alcançada dos diferentes cenários na ilha com retorno econômico foi de 44% com impacto positivo nos custos de produção de eletricidade (até 11% de redução). As simulações também mostraram que diferentes turbinas eólicas influenciam a eficiência geral do sistema de energia e o resultado econômico do investimento.

Finalmente, pode-se dizer que a energia renovável pode desempenhar um papel importante para reduzir a dependência da Brava de combustíveis fósseis, aumentar a segurança energética e mitigar os preços crescentes da produção de eletricidade com maior sustentabilidade econômica.

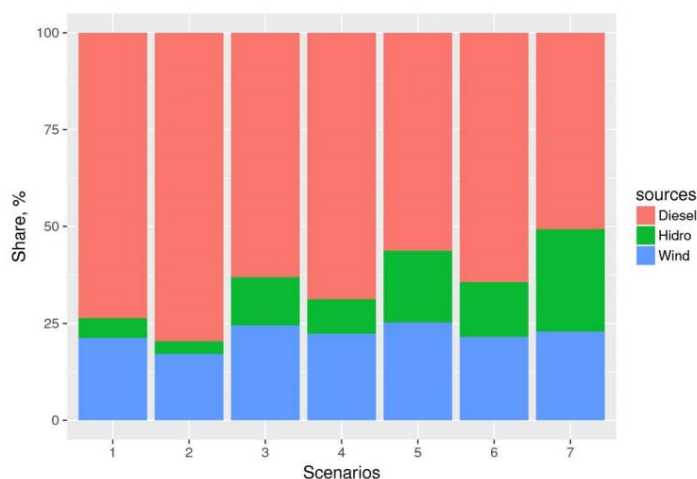


Fig. 6. Contribuição de cada fonte de energia no sistema de potência.

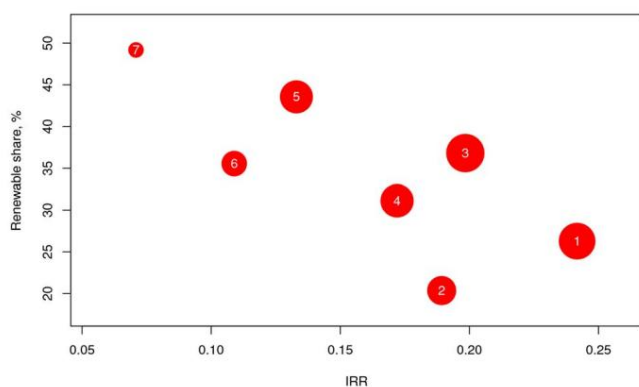


Fig. 7. Redução do custo final de produção de eletricidade em diferentes cenários.

VIII. RECONHECIMENTOS

This study is supported by NIDA (Núcleo de Inovação Desenvolvimento e Pesquisa Pró-África) and UNICV (University of Cabo Verde).

IX. REFERÊNCIAS

- [1] N. Duic, JP Fonseca, MG Carvalho, *Aumentar a penetração das energias renováveis através da fusão dos sistemas de abastecimento de energia e água: estudo de caso Ilha do Corvo, Açores*, CD Actas da 3ª conferência de Dubrovnik sobre o desenvolvimento sustentável da energia, água e ambiente systems, Dubrovnik, 2005. osi, Boris, Krajai, Goran,
- [2] et Dui, Neven. Um sistema de energia 100% renovável no ano de 2050: o caso da Macedônia. *Energia*, 2012, vol. 48, nº 1, p. 80-87.
- [3] Mason, Ian George, Page, SC, et Williamson, AG Um sistema de geração de eletricidade 100% renovável para a Nova Zelândia utilizando recursos hídricos, eólicos, geotérmicos e de biomassa. *Política Energética*, 2010, vol. 38, nº 8, p. 3973-3984.
- [4] Dui, Neven et Da Graça Carvalho, Maria. Aumento das fontes de energia renováveis na oferta energética insular: estudo de caso Porto Santo. *Revisões de Energia Renovável e Sustentável*, 2004, vol. 8, nº 4, p. 383-399.
- [5] Mukrimin Sevkettuney, Yalcin Tepe, Classificação e avaliação de sistemas de armazenamento de energia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 75, 2017, Páginas 1187-1197, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>.
- [6] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, Royal Institute of Tecnologia Estocolmo, Suécia, 2005.
- [7] N. Duic, G. Krajacic, M. G Carvalho, *Metodologia Renew Islands para energia sustentável e planejamento de recursos para ilhas*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 12, pp. 1032–1062, 2008.
- [8] CONNOLLY, David. *Uma revisão das tecnologias de armazenamento de energia: para a integração de energia renovável flutuante*. 2010.
- [9] C. Bueno, JA Carta, *Sistemas de armazenamento hidrelétrico bombeado movidos a energia eólica, um meio de aumentar a penetração de energia renovável nas Ilhas Canárias*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, pp. 312-340, 2006.
- [10] JS Anagnostopoulos e DE Papantonis, *Projeto de estação de bombeamento para um plano hidrelétrico eólico de armazenamento reversível*, *Conversão e Gerenciamento de Energia*, 19ª Conferência Internacional sobre Eficiência, Custo, Otimização, Simulação e Impacto Ambiental de Sistemas de Energia, vol. 48, pp. 3009-3017, 2007.
- [11] MP Papadopoulos et al., *Uma estação de armazenamento bombeada por energia eólica levando a uma alta penetração de RES no sistema autônomo da ilha de Ikaria*, *transações IEEE sobre energia sustentável*, vol. 1, não. 3, 2010.
- [12] R. Godina, E. Rodrigues, J. Matias, e J. Catalao, "Sistema energético sustentável da ilha El Hierro", na Conferência Internacional sobre Energias Renováveis e Qualidade de Energia (ICREPQ'15). *Revista Energia Renovável e Qualidade de Energia (RE&PQJ)*, vol. 13, 2015, pp. 46–51.
- [13] A. Hiratsuka, T. Arai e T. Yoshimura, "Usina de armazenamento de água do mar na ilha de Okinawa, Japão", *Geologia de Engenharia*, vol. 35, não. 3, pp. 237–246, 1993, ISSN: 0013-7952.
- [14] Katsaprakakis, Dimitris AI e Dimitris G. Christakis. "Sistemas de bombeamento de água do mar e parques eólicos offshore em ilhas com baixo potencial eólico onshore. Um estudo de caso fundamental." *Energia* 66 (2014): 470-486.
- [15] Electra SA. *"Relatório e Contas. Cabo Verde 2016"*. Available at: <<http://electra.cv/index.php/2014-05-20-16-30-16/relatorios-norte>>.
- [16] GTZ, "Aproveitamento da Energia Eólica para o Abastecimento de Água, Brava (Cabo Verde) – Relatório Final", GmbH, Tech. Rep., 1999.
- [17] JA Suul, K. Uhlen, T. Undeland Potência hidrelétrica reversível para integração de energia eólica em redes isoladas – descrição de caso e estratégias de controle). [18] <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/pumped-hydroelectric-storage>. Acesso: 2017-10-18. [19] http://www.are.cv/images/stories/combustiveis/historico_011217.pdf.

Acesso: 2017-12-27.