

Análise de Viabilidade Técnico-Econômica de Planta Híbrida (Eólica + Fotovoltaica) com BESS

Technical-economic feasibility analysis of a Hybrid plant (Wind + Photovoltaic) with BEES

Bruna Sales^{1,2}

 orcid.org/0009-0006-8715-0803

Eduardo Sodré^{1,3}



¹Escola Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, Brasil. E-mail: bst@poli.br

²Graduanda em Engenharia Elétrica Eletrotécnica, Escola Politécnica de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

³Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Pernambuco, Brasil.

Artigo recebido em:

Artigo aceito em:

DOI: 10.xxxx/s11468-014-9759-3

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

RESUMO

O Brasil tem barreiras ambientais que impactam a expansão da capacidade de geração através de hidroelétricas e as fontes renováveis, mesmo com seu crescimento exponencial dentro da matriz brasileira, ainda apresentam dificuldades do melhor aproveitamento da sua geração em horários de pico. Dessa forma, neste trabalho foi iniciado uma análise de LCOE (Levelized Cost Of Energy) de um projeto de planta híbrida Eólica + Fotovoltaica com baterias BESS, buscando o benefício para se ter um melhor aproveitamento do sistema nos horários de pico dos ventos e do sol. Isso traz benefícios nos contratos de uso do sistema de transmissão, além de trazer possibilidade de uma rentabilidade ao empreendimento, levando em consideração o uso do sistema de transmissão e dentre outros benefícios através do uso de baterias BESS, otimizando assim a planta híbrida eólica e solar, com aproveitamento máximo dos picos de geração.

PALAVRAS-CHAVE: Planta Híbrida; Geração Eólica; Geração Solar; Baterias BESS;

ABSTACT

Brazil has environmental barriers that impact the expansion of generation capacity through hydroelectric plants and renewable sources, even with their exponential growth within the Brazilian matrix, still have difficulties in making the best use of their generation at peak times. Thus, in this work, an analysis of the LCOE (Levelized Cost of Energy) of a hybrid wind + photovoltaic plant project with BESS batteries was initiated, seeking the benefit to have a better use of the system at peak hours of wind and sun. This bring benefits in contracts for the use of the transmission system, in addition to bringing the possibility of profitability to the enterprise. Taking into account the use of the transmission system and among other benefits through the use of BESS batteries, thus optimizing the hybrid wind and solar plant, with maximum use of generation peaks.

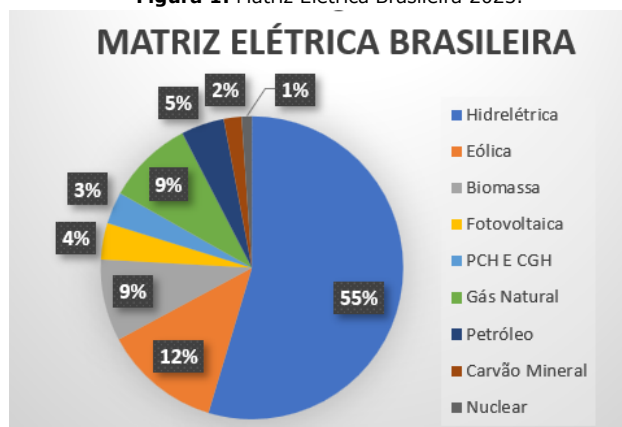
KEY-WORDS: Hybrid Plant; Wind Generation; Solar Generation; BESS batteries.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica teve como sua principal fonte de energia os combustíveis fósseis, mas devido a redução da disponibilidade dessa matéria-prima e o aumento da demanda, outras fontes foram sendo estudadas para substituir fontes não-renováveis. Tal necessidade fez com que ocorresse alta procura por fontes renováveis. De acordo com a ANEEL, as fontes consideradas renováveis são: solar, eólica, biomassa e hídrica [1].

O Brasil, em sua matriz energética, tem como sua principal fonte a hidráulica devido as suas grandes reservas de águas potável. Nos últimos anos, o país vem sendo destacado também por outras fontes renováveis como a solar e eólica.

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira 2023.

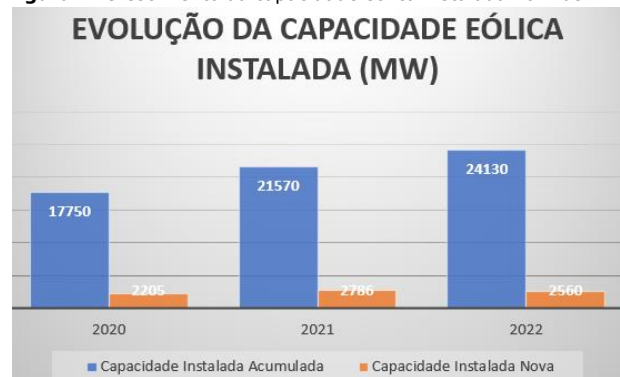


Fonte: Adaptado pela Autora [14].

As fontes eólicas e solar fotovoltaica juntas somam quase 20% da matriz energética brasileira, sendo estas as fontes renováveis que mais crescem por ano. Por um lado, a geração solar fotovoltaica cresce constantemente por causa dos altos investimentos em geração distribuída no país, enquanto a geração eólica também cresce com a construção de grandes parques.

Na última década, os recursos eólicos para geração elétrica brasileira foram destacados por uma geração anual de 663 GWh [2]. Para o ano de 2050, o Greenpeace Internacional e Conselho Europeu de Energia Renovável – EREC (2010) estimou a participação da energia eólica na matriz brasileira como 20,38% e a energia solar em 9,26% [4].

Figura 2: Crescimento da capacidade eólica instalada no Brasil.



Fonte: Adaptado pela autora [16].

O Brasil possui altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade que podem gerar importante vantagem competitiva para produção de silício com alto grau de pureza, células e módulos solares, tornando assim, o país viável para o estudo de uma planta híbrida entre energia solar e eólica. Além disso, o país tem barreiras ambientais, como a biodiversidade do rio, que impactam a expansão da capacidade de geração a partir de usinas hidrelétricas com reservatórios, sendo este um grande desafio, visto que a curva de carga cresce ano a ano [3].

Dessa forma, o cenário da energia muda constantemente em relação a demanda de consumo e as ofertas de diferentes tipos de geração. Diante disso, vários desafios atrelados a estas mudanças vem crescendo. Dentre eles, a dificuldade de estocar energia elétrica gerada, e o preço elevado de novas tecnologias para serem implantadas. A utilização de armazenamento de energia em baterias (BESS) tem sido alvo de estudos e testes para solucionar os desafios de armazenamento. O BESS tem sua funcionalidade semelhante a uma pilha, que pode ser recarregada e descarregada facilmente, porém há um aumento do custo de instalação (CAPEX) do sistema pelo acréscimo de baterias.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de viabilidade técnica-econômica de parque eólico-solar de geração híbrida com baterias BESS.

2 Referencial Teórico

Nesse segmento será desenvolvido a abordagem dos temas de geração solar fotovoltaica e geração eólica, de forma híbrida, com baterias BESS, assim como sua viabilidade econômica.

2.1 Energia Eólica

A Energia eólica é gerada pela força dos ventos, uma fonte limpa que pode ser encontrada em todo o planeta. Ela é obtida através da força do vento ou a conversão da energia cinética dos deslocamentos de ar em energia elétrica. Tal conversão é realizada pelas turbinas eólicas, que captam parte da energia cinética do vento que atravessa o espaço varrido pelo rotor de turbinas. Um sistema eólico possui alguns componentes, são eles: turbina, gerador, caixa multiplicadora, sistemas de controle, torre da turbina. As turbinas são responsáveis por transformar a potência dos ventos em energia mecânica, que por sua vez é transformado em energia elétrica através dos geradores [6].

Os parques eólicos podem ser definidos como Onshore e offshore, a distinção acontece a depender da localização da instalação da turbina. Assim, se a turbina for instalada em alto-mar, o parque eólico se classifica como Offshore, por utilizar dos fortes ventos em alto mar. Por outro lado, as usinas instaladas em terra são classificadas como Onshore. A grande vantagem da instalação em Offshore, é utilização dos fortes ventos e a facilidade em instalar equipamentos de grandes dimensões.

No Brasil existe diversas zonas de climas e regimes de circulação atmosférica para instalação das usinas Onshore. Os estados do Rio Grande do Norte, Bahia, Ceará, Piauí estão entre os maiores geradores de energia eólica em âmbito nacional [7]. Um ponto positivo do aproveitamento de energia eólica é a complementaridade que esta possui com outras fontes renováveis, tais como: solar e hídrica. A energia eólica é a segunda maior fonte em capacidade instalada atualmente no Brasil, a cada ano deve-se tornar mais significativo [14].

2.2 Energia Fotovoltaica

A Energia Solar Fotovoltaica trata-se do efeito fotovoltaico causado em um material semicondutor adaptado para liberar elétrons – partículas que são carregadas negativamente e representam o pilar da eletricidade. Após o semicondutor ser atingido pela luz solar, por meio do campo elétrico, inicia-se um fluxo de energia, e através do inversor, gera-se a corrente contínua [5]. Com o avanço da tecnologia

nos painéis fotovoltaicos e a aplicação de novos materiais em sua composição, tais como as células de silício, a aplicação deste modelo de geração foi se expandindo em casas residenciais, comércios e indústrias.

A energia solar fotovoltaica pode ser utilizada de duas formas quando idealizada para pequenos projetos, podendo ser On-grid ou Off-grid. O caso mais utilizado hoje no Brasil, é o On-grid que é conectado à rede da distribuidora. O Off-grid é um projeto em que se prevê o uso de baterias para o caso de falta de energia, pois neste caso a usina não está conectada a rede da distribuidora. Existe também usinas ou fazenda solares para geração centralizada, em que a conexão é direta no Sistema Interligado Nacional, o SIN. Os projetos de geração centralizada são de grande importância para diversificação da matriz energética nacional.

Porém existem questões que ainda influenciam a aplicação desta forma de geração, como a localização da instalação, se há incidência suficiente de raios solares para que a geração seja viável com o investimento feito para a instalação da usina. Dessa forma, usinas mais afastadas da linha do Equador são prejudicadas por captar menos luminosidade e assim menos energia. Além disso, os dias chuvosos, e nublados, fazem com que a eficiência do sistema reduza consideravelmente por poucos raios solares.

Atualmente, o crescimento da Energia Fotovoltaica encontra-se principalmente em Geração Distribuída, tornando o consumidor autossuficiente em energia. Por ser uma das fontes renováveis com o custo mais baixo de instalação e manutenção, a energia solar fotovoltaica tem sido alvo de estudos de viabilidade associados com outras fontes renováveis. No caso do Brasil, estes estudos acontecem com o objetivo de crescer a porcentagem das fontes renováveis na matriz energética e torna o país independente das fontes hídricas, e não mais vulnerável às crises hídricas.

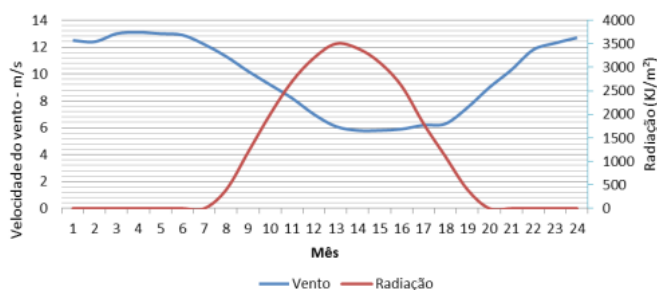
2.3 Parque Híbridos de Geração

O parque de geração híbrida consiste em uma combinação de duas fontes de energia no mesmo território, compartilhando da mesma rede de

transmissão. No caso deste artigo, a planta híbrida estudada combina duas fontes de energia: eólica e a solar fotovoltaica. Esse modelo de planta híbrida se apresenta como importante recurso energético para atender a demanda de energia elétrica nacional, pois existem regiões em que ambas fontes apresentam complementariedade.

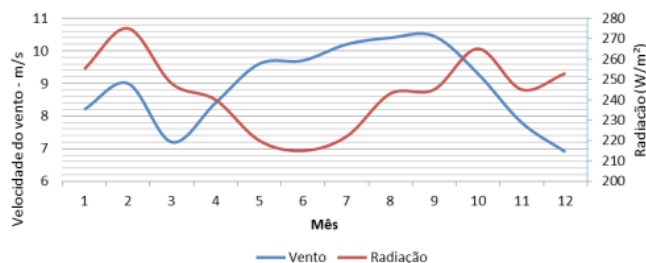
A Empresa de Pesquisa energética (EPE) publicou estudos que avaliam os benefícios da possível complementariedade entre recursos eólicos e solares os quais destacam-se os seguintes: maior uso da capacidade disponível do sistema de transmissão; otimização do uso da área disponível; sinergia de logística e planejamento de implantação; sinergias operativas; compartilhamento de equipamentos do sistema de interesse restrito, que compreende as instalações elétricas compartilhadas pelos geradores até o ponto de conexão da usina ao Sistema Interligado Nacional (SIN); redução dos custos da empresa geradora com as tarifas de uso da rede; compartilhamento de equipamentos de geração.

Figura 3: Complementariedade diária Geração Solar e Eólica.



Fonte: ABEÓLICA [17].

Figura 4: Complementariedade anual Geração Solar e Eólica.



Fonte: ABEÓLICA [17].

A geração solar possui um comportamento durante o dia diferente dos ventos, pois a solar inicia em uma crescente, atingindo seu pico normalmente ao meio dia, e decrescendo até o fim da tarde. Enquanto, a geração eólica, inicia com valores baixos e aumenta ao entardecer. Ambas gerações dependem de condições climáticas de cada região, por isso a complementariedade anual possui maior confiança nos dados apresentados.

2.4 Baterias BESS

Existe uma necessidade de armazenamento de energia, principalmente baterias, devido a um constante aumento de utilização de novas fontes renováveis de energia a serem utilizadas, pois estas são fontes intermitentes de energia e recursos energéticos renováveis que, para fins de conversão em energia elétrica pelo sistema de geração, não podem ser armazenados em sua matéria prima (sol e vento).

O BESS deste artigo tem como item principal do seu sistema as baterias de íons de lítio, que servem como módulo de armazenamento de energia. As baterias tornam-se ponto chave no desenvolvimento para a sustentabilidade energética, pois podem apoiar a integração de altas parcelas de energia fotovoltaica e eólica na matriz de energia [11].

A bateria de lítio é altamente inflamável, facilmente corrompida e tem a probabilidade de até explodir em altas temperaturas, por isso nunca pode ser exposta diretamente ao sol. Sua condição de armazenamento indica 25% de perda em condições de 60°C após um ano. É formada por uma parte com eletrodo negativo ou ânodo de onde saem os elétrons e um eletrodo positivo ou cátodo que os recebe. Quando ligada, os íons lítio se movem do ânodo para o cátodo por um eletrólito, quando carregada os íons lítio retornam ao ânodo. Igualmente a uma "pilha", a bateria de íon-lítio é uma bateria recarregável que é capaz de armazenar o dobro de energia que uma bateria de hidreto metálico de níquel e três vezes mais que uma bateria de níquel cádmio [10].

O uso destas baterias é vantajoso em relação a sua vida útil de 10 anos por possuir carregamento rápido, maior eficiência e densidade energética em

relação a outros modelos de baterias. As Baterias Íon-Lítio se tornam 30% mais eficiente que bateria composta por chumbo, assim, reduz custos por manter tensão constante sem perdas de desempenho.

Um exemplo do êxito na instalação de um banco de baterias está na Austrália, em que a Tesla instalou o maior bando de baterias do planeta, em uma usina de energia eólica. No Brasil, a agenda regulatória deve incluir o armazenamento de energia como serviço ancilar, ou seja, serviços necessários para garantir que o sistema elétrico, da geração ao consumo, funcione de forma adequada [8].

Os preços das baterias de íons lítio sofreram uma redução de quase 89%, custando em 2010, U\$1.200,00 por KWh, mas em 2021 atingiu o preço de U\$132,00 por KWh. Em conjunto com a crescente fabricação de carros elétricos, em que se utiliza alguns materiais que também se é necessário na fabricação das baterias BESS, o custo de mercado da produção e venda bateria está em queda. Dessa forma, torna-se possível analisar a viabilidade da aplicação de BESS em vários cenários de geração [15].

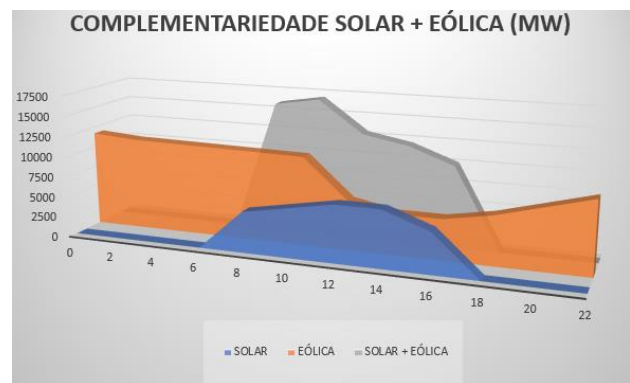
3 Benefícios da planta híbrida de solar e eólica com BESS

A planta híbrida solar e eólica torna-se um investimento válido, porque além da complementariedade na geração de energia, podem ser também vantajosas, pois as usinas eólicas e solar instaladas em conjunto compartilhariam uma mesma Subestação Coletora, com o mesmo contrato de Montante do Uso do Sistema de Transmissão (MUST).

Além disso, com a sua complementariedade, o sistema pode ser dimensionado de forma que não seja ultrapassado o MUST contratado. Mas, com o acréscimo das baterias BESS em uma planta híbrida, é mais vantajoso contratar um Montante menor, economizando em contrato de MUST e na Subestação Coletora, armazenando na bateria o valor de geração que ultrapasse o contrato. Assim, em momentos de baixa geração o valor armazenado poderia ser injetado na rede sem ultrapassagem do contrato.

Considerando que a planta solar tem sua geração maior a partir das 6 horas da manhã até as 18 horas da noite em algumas regiões, pode-se considerar que enquanto a geração solar injeta na rede básica durante a manhã, a geração eólica injeta na rede básica nas noites e madrugadas. Porém, de acordo com plantas híbridas já em funcionamento, nota-se que ao final da tarde as gerações solar e eólica injetam paralelamente no sistema. Assim, é necessário dimensionar o uso do sistema de acordo com a soma das duas gerações, tornando assim o MUST a ser contratado de maior valor em relação ao que é esperado quando trata-se de uma planta que não é híbrida.

Figura 5: Soma da Geração Solar e Eólica.



Fonte: Desenvolvido pela autora a partir dos dados coletados pela ONS.

Com o aquecimento do mercado de veículos elétricos que são fabricados com o mesmo material das baterias de íon-lítio, torna-se válida a análise de casos em que o investimento em uma BESS para uma planta híbrida tornaria a instalação mais viável economicamente. A utilização do BESS, torna o Montante Contratado no Sistema menor pelo benefício do armazenamento da geração residual, e conseqüentemente a subestação coletora seria menor, economizando na instalação também.

A economia nas instalações e nos tramites contratuais trariam inúmeros benefícios econômicos a empresa investidora, pois ao se beneficiar com uma potência instalada maior com o investimento mais baixo por causa das economias em plantas híbridas anteriormente citadas, o investidor tem no final mais MWh em energia para vender por um investimento menor.

Mas, o uso de bateria BESS no Brasil ainda é pouco expressivo pelo seu alto valor. A economia estimada em instalação de Subestação Coletora e Montante Contratual ainda não são equivalentes ao custo acrescentado por utilização das baterias.

4 Teoria de Análise Financeira

4.1 LCOE

O custo nivelado de energia, ou LCOE (Levelized Cost of Energy), é um parâmetro apontado como mais efetivo para a viabilidade de um sistema fotovoltaico em relação ao tradicional custo do sistema por watt (R\$/MWp). O LCOE foi criado e idealizado para comparar o custo relativo da energia produzida por diferentes fontes de geração de energia. O intuito de sua criação era entender qual fonte de energia seria mais competitiva [12].

Para se calcular o LCOE, é necessário ter o CAPEX que é o custo de construção da usina, o OPEX que é o custo de operação da usina. Além disso, é necessário levar em conta a geração ao longo do período de operação da usina, e o valor dos equipamentos instalados ao fim da vida útil [12].

Neste projeto, a aplicação do LCOE para fins de validação para uma pesquisa mais profunda, acontecerá de forma que o LCOE de uma planta atual sem Baterias Bess, seja comparada a outra planta com Baterias Bess. Dessa forma, se os dois casos comparados são iguais, esta função do LCOE indicará que se pode gastar tempo no estudo da viabilidade da planta híbrida com aplicação de Baterias Bess.

4.2 PayBack Simples

O Payback é o tempo necessário para se recuperar o investimento, prazo no qual o retorno acumulado se torna o valor investido. Na lógica do Payback quanto maior o tempo de recuperação do valor investido, maior é o risco do investimento. O Payback Simples não considera a correção monetária ao decorrer do tempo, não inclui ganhos após o período do retorno do valor, tornando-se uma análise rasa [13].

Porém para fins de início de estudo de viabilidade, que é o que se detém este projeto, o Payback Simples em conjunto com o LCOE é um indicativo de valor, para sinalizar que o projeto pode ser considerável viável para uma análise inicial.

5 Estudo de Caso

Os estudos realizados para a análise de viabilidade de uma planta híbrida (geração eólica e solar) com BESS (Battery Energy Storage System), foram os cálculos do LCOE e do Payback simples. Foram utilizadas várias configurações do sistema planta híbrida + BESS.

Sendo assim, foram escolhidos um parque de geração eólica (10 MW) e um parque de geração solar (10 MW) localizados no subsistema Nordeste, especificamente do estado do Rio Grande do Norte. O Rio Grande do Norte está entre os estados que produzem maior quantidade de energia limpa no Brasil. Para o BESS foi escolhida a seguinte configuração: 20 MWh / 5 MW.

As vantagens da hibridização e do equipamento BESS a serem comprovadas neste estudo de caso, se referem ao aumento da rentabilidade do investimento através das métricas LCOE e Payback simples.

É importante ressaltar que a “redução de custos” em uma instalação de geração de energia elétrica que possui um BESS, se dá principalmente de 2 formas, conforme as atuais regras do mercado brasileiro de energia elétrica:

- 1 – Reduzir o MUST contratado; e
- 2 – Arbitragem de energia, ou seja, armazenar energia na hora em que houver energia excedente gerada pela planta híbrida e o preço de venda estiver baixo, para depois injetar no sistema essa energia armazenada para vender na hora em que o preço estiver alto.

Para os cálculos abaixo do LCOE e do Payback simples vamos considerar o valor gasto pelo empreendedor para pagamento da TUST das seguintes 3 formas:

Forma 1: Considerando sem complementaridade horária das gerações, sem BESS e com a TUST no valor de = 14,00 R\$/kW/mês. Isso para uma planta híbrida de 20 MW daria em 20 anos o total de $20,0E3 * 14 * 12 * 20 = 67,20$ MMR\$;

Forma 2: Considerando uma complementaridade horária das gerações em 100%, sem BESS e com a TUST no valor de = 14,00 R\$/kW/mês. Isso para uma planta híbrida de 20 MW daria em 20 anos o total de $10,0E3 * 14 * 12 * 20 = 33,60$ MMR\$. O MUST da Planta Híbrida, passa a ser de 10MW porque essa seria a máxima potência injetada pela planta, dado que a complementaridade horária entre a geração eólica e a fotovoltaica é de 100%; e

Forma 3: Considerando uma complementaridade horária das gerações em 100%, com BESS (20MWh/5MW) e com a TUST no valor de = 14,00 R\$/kW/mês. Isso para uma planta híbrida de 20 MW daria em 20 anos o total de $5,0E3 * 14 * 12 * 20 = 16,80$ MMR\$. O MUST da Planta Híbrida, passa a ser de 5MW porque essa seria a máxima potência injetada pela planta, dado que a complementaridade horária entre a geração eólica e a fotovoltaica é de 100% então toda vez que a planta híbrida chegar a gerar 10 MW o BESS vai consumir 5 MW, para que a potência injetada no sistema nunca ultrapasse 5 MW.

Para a arbitragem de energia com o BESS, vamos considerar o seguinte: uma arbitragem de energia de 4 horas por dia, ou seja, 20 MWh por dia, mas acontecendo somente em média 30 dias por ano (8,22% do tempo); e com o preço da energia para compra de 70 R\$/MWh e com preço de venda de 330 R\$/MWh. Isso dá uma receita em 20 anos igual a $30 * (330 - 70) * 20 * 20 = 3,12$ MMR\$ [X].

5.1 Dados de Entrada

Na Tabela 1 estão apresentados os custos de instalação dos vários equipamentos do nosso estudo de caso de uma planta híbrida com BESS [Y].

Estamos considerando o custo de implantação de um BESS de íon-lítio com 4 horas de operação no valor de 300 US\$/kWh [Y]. Então para um BESS de 20MWh/5MW o custo total do investimento fica = $300 US\$ * 20000 * 5,17$ (cotação do dólar) = 31,02 MMR\$. Isso sem considerar os impostos de importação e outros custos, pelo bem da simplificação da análise.

Tabela 1: Custos de instalação

	POTÊNCIA	VALOR (MM R\$)
EÓLICA	10 MW	50,00
SOLAR	10 MW	37,00
CONEXÃO	20 MW	2,5
BESS	20MWh/5MW	31,02

Fonte: Desenvolvido pela autora a partir de uma pesquisa de mercado.

Vale ressaltar que na Tabela 1 estão apresentados também os custos de conexão da planta híbrida com a Rede Básica. Ou seja, o custo total dos investimentos, para os equipamentos da subestação coletora e para os equipamentos da linha de transmissão que conecta a subestação coletora à Rede Básica com a capacidade de escoar 20 MW.

Na Tabela 2 estão apresentados os custos de O&M totais para os 20 anos da vida útil da planta.

Tabela 2: Custos de O&M para 20 anos

	VALOR (MM R\$)
EÓLICA	2,50
SOLAR	1,90
CONEXÃO	não significativo
BESS	não significativo

Fonte: Desenvolvido pela autora a partir de uma pesquisa de mercado.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de geração de energia, tanto para a parte eólica da planta híbrida quanto para a parte solar.

Tabela 3: Geração de Energia

	GERAÇÃO ANUAL (MWh)	GERAÇÃO EM 20 ANOS (MWh)
EÓLICA	43.800,00 (P50 de 50%)	= 20 * 43.800,00 = 876.000,00
SOLAR	26.280,00 (P50 de 30%)	= 20 * 26.280,00 = 525.600,00
TOTAL		1.401.600,00

5.2 Cálculo do LCOE (Levelized Cost of Energy)

Para cálculo do LCOE da planta híbrida sem aplicação de BESS e sem complementaridade horária, temos:

$$LCOE = \frac{C_{inv} + C_{conexão} + C_{TUST} + C_{O\&M}}{E_{ger}}$$

Em que:

C_{inv} = Custo total dos investimentos, somando os equipamentos de geração (eólica e fotovoltaica) e mais as redes de média tensão das plantas eólica e fotovoltaica (R\$);

$C_{conexão}$ = Custo total dos investimentos, para os equipamentos da subestação coletora e para os equipamentos da linha de transmissão que conecta a subestação coletora à Rede Básica (R\$);

C_{TUST} = Custo em 20 anos suportado pelo empreendedor da planta híbrida para pagamento da TUST (Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão) (R\$);

$C_{O\&M}$ = Custo total da Operação e Manutenção em 20 anos dos equipamentos de geração e da rede de média tensão da planta eólica e da planta fotovoltaica (estamos

considerando o custo de O&M da subestação coletora e dos equipamentos da linha de transmissão como desprezíveis para essa análise simplificada) (R\$); e

E_{ger} = Energia Gerada pela planta híbrida em 20 anos (ver Tabela 3) (MWh).

Observando os dados de entrada e dados de geração do sistema, temos:

$$= \frac{LCOE}{(876000 + 525600)(MWh)} = \frac{(50 + 37) + 2,5 + 67,20 + (2,50 + 1,90) (MMR\$)}{(876000 + 525600)(MWh)}$$

$$LCOE = 114,94 (R\$/MWh)$$

Para cálculo do LCOE na planta híbrida, sem aplicação de BESS e com complementaridade horária de 100%, devemos lembrar que a SE Coletora e a Linha de Transmissão à Rede Básica vão ser construídas com a capacidade de escoar um potência menor. Não vamos mais precisar de uma conexão de 20 MW de capacidade, mas sim de uma conexão de 10 MW de capacidade, ou seja, uma conexão com metade do custo de investimento. Logo o cálculo do LCOE fica:

$$= \frac{LCOE}{(876000 + 525600)(MWh)} = \frac{(50 + 37) + (2,5/2) + (67,20/2) + (2,50 + 1,90) (MMR\$)}{(876000 + 525600)(MWh)}$$

$$LCOE = 90,07 (R\$/MWh)$$

Observamos que a complementaridade horária de geração em 100% resulta num incremento da rentabilidade do investimento, calculado de forma simplificada, em **21,6%** (calculado como a diferença percentual entre 114,94 R\$/MWh e 90,07 R\$/MWh).

Considerando agora o nosso 3º estudo de caso para cálculo do LCOE, vamos fazer um cálculo para uma planta híbrida com aplicação de BESS e com complementaridade horária de geração de 100%. Então a fórmula para o cálculo fica o seguinte:

$$LCOE = \frac{C_{inv} + C_{conexão} + C_{TUST} + C_{O\&M} + C_{BESS} - R_{arb}}{E_{ger}}$$

Em que:

C_{BESS} = Custo total dos investimentos para implantação do BESS (R\$); e

R_{arb} = Receita obtida em 20 anos com as operações de arbitragem de energia com o BESS (R\$);

Logo o cálculo do LCOE fica:

$$= \frac{LCOE}{(876000 + 525600)(MWh)} = \frac{(50 + 37) + (2,5/4) + (67,2/4) + (2,50 + 1,90) + 31,02 - 3,12 (MMR\$)}{(876000 + 525600)(MWh)}$$

$$LCOE = 97,55 (R\$/MWh)$$

A Tabela 4 apresenta um resumo dos 3 casos estudados acima.

Tabela 4: Resumo dos Casos de LCOE

	LCOE (R\$/MWh)
Caso 1 – Planta Híbrida sem complementaridade horária e sem BESS	114,94
Caso 2 – Planta Híbrida com complementaridade horária de 100% e sem BESS	90,07
Caso 3 – Planta Híbrida com complementaridade horária de 100% e com BESS	97,55

A nossa análise indica que pelos custos atuais do BESS e para as regras do mercado brasileiro de energia elétrica a colocação de um BESS não resulta num aumento da rentabilidade do investimento.

Temos no Brasil um exemplo muito famoso de um caso de colocação de um BESS de grande porte com capacidade de 60 MWh / 30 MW, num sistema de transmissão da empresa ISA-CTEEP [Z1]. Nesse caso, o BESS foi autorizado pela ANEEL para entrar em operação no sistema elétrico brasileiro como uma concessão de transmissão com RAP (Receita Anual Permitida) associada. A RAP foi calculada de forma a remunerar o custo do investimento e o O&M do equipamento, como comumente acontece com as concessões das linhas de transmissão [Z2].

Em outros países o BESS pode obter receitas de várias fontes diferentes em função de sua operação em vários mercados de eletricidade e não somente com a arbitragem de energia, notadamente os mercados de serviços ancilares e o mercado de capacidade (capacity market). Os serviços ancilares referem-se a várias funções de suporte que os geradores prestam para que o sistema elétrico possa operar de forma confiável e eficiente, tais como, regulação de frequência, suporte de tensão e reservas. O mercado de capacidade existe para garantir que capacidade de geração suficiente esteja disponível para todas as horas que o sistema elétrico precisar, ou seja, aumentando a confiabilidade do sistema. O mercado de capacidade fornece, para os geradores/BESS que ganham os leilões de capacidade, pagamentos suficientes para incentivar o investimento em nova capacidade de geração ou para que a capacidade existente permaneça operando.

Atuando em vários mercados ao mesmo tempo, o BESS pode realizar o que se conhece como empilhamento de receitas (revenue stacking). O

empilhamento de receitas é a capacidade que o BESS possui de obter receita simultaneamente de várias fontes usando a mesma capacidade do MWh/MW. Na prática, isso é uma tarefa operacional complexa, pois, para acumular receita, as decisões de consumir ou gerar energia com o BESS devem ser tomadas antes da entrega física, ou seja, devem ser otimizadas para os leilões dos vários mercados de serviço ancilar e de capacidade [Z3, Z4].

Infelizmente no Brasil ainda não existem esses tipos de mercados competitivos para prestação de serviço ancilar e capacidade como existem nos outros países. Então, caso o custo do investimento do BESS não diminua e/ou caso não sejam criados esses mercados elétricos mais avançados, o BESS continuará sendo inviabilizado para aplicação de grande porte no sistema elétrico brasileiro.

5.3 Payback Simples

Para finalizarmos nossos estudos para a análise de viabilidade de uma planta híbrida (geração eólica e solar) com BESS (Battery Energy Storage System), são apresentados abaixo os valores de Payback simples para os 3 casos de planta híbrida com BESS que foram apresentados acima para os cálculos do LCOE.

Podemos calcular o Payback Simples da seguinte forma:

$$Payback = \frac{C_{inv} + C_{conexão} + C_{TUST} + C_{O\&M} + C_{BESS}}{Receita_{anual} + Receita_{arb_anual}}$$

Em que:

C_{inv} , $C_{conexão}$, C_{TUST} , $C_{O\&M}$ e C_{BESS} já estão apresentados acima (R\$);

$Receita_{anual}$ = receita anual obtida com a venda da energia gerada pela planta híbrida (R\$); e

$Receita_{arb_anual}$ = receita anual obtida pela arbitragem de energia operacionalizada pelo BESS (R\$).

Para o cálculo da $Receita_{anual}$ foi considerado neste trabalho um preço de venda de energia de 180,00 R\$/MWh, conforme referência de especialistas de mercado que foram consultados pelos autores.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos 3 casos estudados acima para o cálculo do Payback simples.

Tabela 4: Resumo dos Casos de Payback simples

	Payback simples (anos)
Caso 1 – Planta Híbrida sem complementaridade horária e sem BESS	12,77

Caso 2 – Planta Híbrida com complementaridade horária de 100% e sem BESS	10,01
Caso 3 – Planta Híbrida com complementaridade horária de 100% e com BESS	10,95

6 CONCLUSÕES

Podemos concluir, através do cálculo do LCOE, que o investimento utilizado com a compra de baterias ainda não é suficiente para tornar o LCOE de planta híbrida igualado ao de uma planta única. Mas, é necessário o acompanhamento em pesquisa de mercado para analisar a cada ano, o cenário das baterias no Brasil.

Em estudos futuros, pode-se também elencar que as Pesquisas e Desenvolvidos sobre baterias de íon-lítio são importantes pois são através delas que podem ser encontrados economias viáveis na fabricação destas baterias, tornando assim, viável a aplicação em plantas híbridas.

Além disso, a aplicação de baterias pode no futuro vir a auxiliar o planejamento do sistema elétrico brasileiro, adiando a necessidade de novas linhas de transmissão de energia. Dessa forma, a aplicação de baterias, quando LCOE for favorável, poderá trazer benefícios ao investidor por economizar na subestação coletora de uma planta híbrida, tanto no montante uso do sistema de transmissão, quanto para o sistema interligado nacional na economia do planejamento de novas linhas de transmissão.

Por fim, concluímos que a análise de viabilidade é necessária para um acompanhamento da realidade atual do mercado, com objetivo de planejar o comportamento do sistema elétrico e investimentos de geração de energia no futuro.

REFERÊNCIAS

- [1] LOPES, Paulo Henrique Silvestre. Nota Técnica nº 0043/2010-SRD/ANEEL. Setembro, 2010.
- [2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- [3] Lemgruber, W. Impacto Ambiental de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa de Duas Abordagens. Rio de Janeiro: Pós-Graduação UFRJ, 2000.
- [4] GREENPEACE INTERNATIONAL; CONSELHO EUROPEU DE ENERGIA RENOVÁVEL – EREC. [r]evolução

- energética: a caminho do desenvolvimento limpo. São Paulo: Greenpeace, 2010.
- [5] ALVES, Marliana de Oliveira Lage. ENERGIA SOLAR: ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID. Belo Horizonte: Graduação UFOP, 2019.
- [6] MEYER, M.F; SEIXAS, A.S; MELO, I.M.L.; CASSIANO, L.J.S.; RAPOSO, L.Q. Energia eólica e seus impactos ambientais. Rio Grande do Norte: IFRN, IV Congresso Internacional de Tecnologia para o Meio Ambiente, 2014.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS - ABEEólica. Boletim Anual 2021. São Paulo: ABEEólica 2021.
- [8] EXAME. Disponível em <https://exame.com/tecnologia/tesla-liga-bateria-gigante-para-apoiar-rede-eletrica-da-australia/> Acesso: fevereiro 2023.
- [9] VINICIUS, M. Otimização de projetos híbridos de geração de energia elétrica compostos pelas fontes eólica e solar fotovoltaica. Rio de Janeiro: UFRJ, Mestrado, 2020.
- [10] Schipitoski, K. Estudo Comparativo de Tecnologias de armazenamento de energia produzida a partir de fontes renováveis. São Paulo: UNESP Sorocaba, Graduação, 2022.
- [11] ZUBI, G.; DUFO-LÓPEZ, R.; CARVALHO, M.; PASAOGU, G. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 89, n. March, p. 292–308, 2018.
- [12] Lennin, V.; Vieira, R.; Cunha, D. Análise LCOE de um Sistema Simulado de Torre Solar no Mercado de Energia Brasileiro. Rio de Janeiro: UFRJ, IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2022.
- [13] Souto, F.; Dittmar, A. Análise de Retorno do Investimento: Um Estudo Aplicado em Microempresa. Santa Maria: UFSM, Pós-Graduação, 2014.
- [14] ABEÓLICA. Disponível em <https://abeeolica.org.br/> Acesso: fevereiro 2023.
- [15] CANAL SOLAR – Artigo Técnico Preço de Baterias de Íon Lítio <https://canalsolar.com.br/preco-das-baterias-de-ion-litio-cai-89-em-2021/> Acesso: fevereiro 2023.
- [16] ABEÓLICA. Disponível em <https://abeeolica.org.br/> Acesso: fevereiro 2023.
- [17] Arns, G.; Generoso, C. Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica. Criciúma: UNICENTRO, Graduação, 2012.
- [18] Alex Coutinho, Eduardo Sodré, Rodrigo Salim, Marina Dantas e Alcides Codeceira Neto, "Análise de Portfólio de Geração Eólica e Solar com Armazenamento em Mercados de Energia Horário", XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 10 a 13 de novembro de 2019 – Belo Horizonte - MG.
- [19] NREL. Annual Technology Baseline - Commercial Battery Storage. Disponível em: https://atb.nrel.gov/electricity/2022/commercial_battery_storage. Acesso em: 08 março de 2023.
- [20] V. M. Nakashima, A. Bianco, E. K. El Hage, et al., "Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia como Alternativa Inovadora para o Reforço do Atendimento Elétrico ao Litoral Sul do Estado de São Paulo", XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 15 a 18 de maio de 2022 - Rio de Janeiro - RJ.
- [21] ANEEL, Nota Técnica nº 600/2021-SCT/ANEEL, em 2 de setembro de 2021, Processo: 48500.004306/2021-63, Assunto: Autorização e estabelecimento da Parcela da Receita Anual Permitida – RAP referente à reforços em instalações de transmissão sob responsabilidade da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista - CTEEP.
- [22] W. Gorman, A. Mills, M. Bolinger, et al., "Motivations and Options for Deploying Hybrid Generator-plus-Battery Projects within the Bulk Power System", *The Electricity Journal*, Volume 33, Issue 5, 2020.
- [23] B. Bernhardt, M. R. M. Carvalho e L. A. Barroso, "Modelos de Mercado para a Integração de Sistemas De Armazenamento e Formas de Remuneração", XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 15 a 18 de maio de 2022 - Rio de Janeiro - RJ.