

Modelo para suporte à otimização da viabilidade técnico-financeira na hibridização de plantas de geração solar e eólica com armazenamento de energia

Nicolas J. O. P. Manfredi*, Vitor H. Ferreira**

* PPGEET, Universidade Federal Fluminense,
Niterói, Brasil, (e-mail: nicolas.marteng@gmail.com)

** PPGEET, Universidade Federal Fluminense,
Niterói, Brasil, (e-mail: vhferreira@id.uff.br)

Abstract: This work pursues to present a model to support companies in the generation area to assess the viability of hybrid projects, by maximizing the global Net Present Value (NPV) of an enterprise, considering the implementation of a solar and / or wind farm using storage technologies. The conditions of land limitations for the construction and operational restrictions in the electric network for the flow of the generated energy were verified. There is a lack of solutions with simplified software and low associated costs to help entrepreneurs to support business analysis, with technical increment, in search of a viable and optimized solution. For modeling implementation, 2 types of base cases were defined, and 18 scenarios were simulated, with changes in the CAPEX values of each source, variation in the price of energy, changes of restrictions and increase verification for the solar and wind plants' resources. The results showed the best global NPV values for cases of energy sales at the average Settlement Price for the Differences (PLD) of the last 5 years. Comparatively among the basic cases generated, the scenarios related to land tests showed an increase of 56.10% in NPV and a reduction in curtailment of 93.4%.

Resumo: Este trabalho busca apresentar um modelo para suporte às empresas da área de geração na avaliação da viabilidade de projetos híbridos, por meio da maximização do Valor Presente Líquido (VPL) global de um empreendimento, considerando a implantação de um parque solar e/ou eólico com utilização de tecnologias de armazenamento. Na fase de testes para a modelagem implementada foram definidos 2 tipos de casos base e simulados 18 cenários de verificação, com alterações de valores do CAPEX de cada uma das fontes, variação no preço de venda de energia, modificações das restrições do problema e verificação de incremento nas capacidades solar e de vento dos parques. Os resultados apresentaram os melhores valores de VPL global para casos de venda de energia ao Preço de Liquidação das Diferenças (PLD) médio dos últimos 5 anos. Comparativamente entre os casos bases gerados, os cenários relativos aos testes fundiários demonstraram um incremento de 56,10% de VPL e redução para corte de energia de 93,4%.

Keywords: Optimization; Solar Generation; Wind Generation; Batteries; Hybridization; Network restriction; Land; CAPEX; OPEX; NPV

Palavras-chaves: Otimização; Geração solar; Geração Eólica; Baterias; Hibridização; Restrição de rede; Fundiário; CAPEX; OPEX; VPL

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a matriz energética no Brasil possui mais de 83% da sua capacidade instalada por meio de fontes renováveis, sendo entre elas divididas em biomassa (8,72%), hídrica (62,53%), solar (1,88%) e eólica (9,87%). Na potência instalada, a matriz possui mais de 176GW em operação, sendo a capacidade superior a 215GW, com as inclusões dos empreendimentos em fase de construção e as ainda não iniciadas. Dentro do volume total nos horizontes das instalações em operações e as outorgadas pela agência reguladora para implantação, destaca-se o montante de 29,4GW de energia eólica e 18,4GW de energia solar (“SIGA ANEEL,” 2021).

O Brasil possui uma enorme diversidade para o potencial de sistemas híbridos. Esses sistemas têm muito a acrescentar, tanto pelo ponto de vista da carga (*behind the meter*) como pelo lado da fonte (*after the meter*). Pela carga incluem-se a qualidade de energia, back-up, continuidade de fornecimento e diminuição de preço de pico. Pelo ponto de vista do cliente, estes complexos trazem ganhos econômicos no preço de energia e na redução de perdas financeiras, em casos de falta de suprimento. Na posição do gerador, engloba-se os controles de frequência, controle da intermitência e aumento da resiliência do sistema. (“Portalsolar,” 2021)

A combinação de diferentes fontes de energia renováveis proporciona, em sua grande maioria, uma maior garantia de continuidade dos suprimentos, se comparado a apenas uma fonte, uma vez que as produções acabam por se apresentar de

forma diversificadas e não correlacionadas. Ressalta-se que a utilização de projetos híbridos, além de depender de condições específicas de cada aplicação e sistema a qual essa planta será inserida, ainda apresenta muitas incertezas regulatórias e de sinergias. Em muitos países ainda se buscam aprimoramentos, ganhos financeiros e operacionais nas combinações de fontes. Contudo, o desenvolvimento de projetos híbridos ainda se encontra em fase inicial, com a maior parte dos empreendimentos de menor porte e operações recentes. (EPE, 2019)

As discussões cada vez mais constantes sobre as formas de hibridização para composição das fontes, a carência de ferramentas de apoio à decisão com baixo custo de implantação, assim como a escassez de definições da regulação para restrições referentes ao escoamento de energia e o tema fundiário motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

Ainda que verificada uma grande diversidade de estudos de caso referentes à hibridização de fontes de energia, a implantação destes modelos ainda é relativamente recente na literatura. Porém, possuem uma projeção de crescimento elevado, em razão dos incentivos por produções de energia limpa, das capacidades de escoamento de energia e das condições físicas associadas às reduções para impactos ambientais. A grande expectativa para o crescimento das soluções híbridas de energia e as atuais quedas nos preços de implantação de soluções em armazenamento em baterias fortalecem, ainda, uma necessidade de desenvolvimento deste tema de hibridização nos centros acadêmicos, órgãos reguladores, fabricantes e agentes do mercado.

1.1 Revisão bibliográfica

Durante a elaboração deste trabalho foram verificadas as implantações de projetos e metodologias ao redor do mundo em diversas referências, dentro das quais pôde-se perceber uma extensa lacuna nos recursos de linhas de pesquisas aplicadas aos empreendimentos híbridos solar e eólico de grande porte, para aplicação na geração centralizada. Em (SRG et al., 2020), (EPE, 2019), (“Chamada 021 - ANEEL,” n.d.), (Weschenfelder, 2020), (EPE, 2017a) pode-se observar uma série de trabalhos relativos à hibridização como referência. Contudo, não foram constatados projetos com aplicações de verificações conjuntas para a hibridização, restrições fundiárias e de rede operativa, simultaneamente.

2. METODOLOGIA

A modelagem utilizada teve como objetivo a busca de uma otimização para a maximização de VPL, nos empreendimentos que possam ser viabilizados com a implantação de plantas solares, complexos eólicos com a possibilidade de armazenamento de energia através de baterias. As avaliações dos empreendimentos são verificadas por fontes, com as elaborações dos seus fluxos de caixas. Uma vez compostos os fluxos individualmente, agrupam-se os custos e receitas correlacionados às condições técnicas e financeiras da modelagem. Sequencialmente, são realizadas as avaliações relacionadas às condições fundiárias e de limitação da

capacidade de escoamento de energia, em sistemas de redes de distribuições ou linhas de transmissões.

O simulador para aplicação da metodologia de otimização foi elaborado com a utilização do suplemento Solver do Excel do Microsoft Office 365. A busca desta plataforma para utilização neste trabalho deve-se à disseminação do programa nas empresas do setor e no mercado global, proporcionando, assim, facilidade na instalação do programa, além da acessibilidade com riscos de ataques cibernéticos reduzido.

2.1 VPL empreendimento solar

As composições para obtenção do VPL na implantação de um parque solar são estruturadas de acordo com o desenvolvimento dos fluxos de caixas de, principalmente, três pilares. O primeiro refere-se à projeção de receita do projeto, através da estimativa de produção de energia do empreendimento. Seguindo por esta vertente, realizam-se as definições dos custos de implantações (CAPEX). Por fim, implementam-se as condições para as despesas operacionais de manutenção e operação do ativo (OPEX).

Para início dos cálculos da estimativa de produção de energia solar, faz-se necessário que o usuário possua os dados de medições solarimétricas da localidade na qual está sendo realizada a avaliação do empreendimento. Pode-se obter essas informações através de torres solarimétricas instaladas nas proximidades do local, através da aquisição destas referências em fontes públicas ou através da compra de dados de satélites. Uma vez obtidas as informações imprescindíveis, estas devem ser tratadas e, assim, verificar-se as janelas de períodos de medições, organizar os dados de acordo com fuso horário, contabilizar os dados perdidos e as falhas de comunicações, realizar as conversões de medidas e interpolações de elementos e, por fim, criar um ano meteorológico típico (TMY) com 8760 amostras, que representam as horas deste ano.

Em seguida, é essencial que seja definidos os fatores de perdas k_{1S} em (1), com os seguintes dados de entradas: Nível de Incidência Abaixo do Limiar (em %): NIAL; Sombreamento Horizonte (em %): SH; Sombreamento Interno (em %): SI; Angulares (em %): ANG e Sujeira (em %): SUJ.

$$k_{1S} = (1 - NIAL) \times (1 - SH) \times (1 - SI) \times (1 - ANG) \times (1 - SUJ) \quad (1)$$

Com o fator de perda definido, encontra-se a irradiação efetiva (Mod_{irrad_efet}), que consiste no resultado da multiplicação de todas as horas do ano típico de irradiação, o ganho com a utilização de estruturas de rastreamento (caso aplicável) e k_{1S} . Assim, o próximo passo para o cálculo é encontrar a produção bruta de energia, que pode ser obtida multiplicando-se a irradiação efetiva pela eficiência e área do módulo fotovoltaico.

Com o objetivo de encontrar a produção líquida de energia anual do empreendimento solar, é crucial que sejam carregados os dados de entradas das perdas definidas como k_{2S} nas constantes: Nível de Irradiância (em %): NI; Temperatura

(em %): T; Tolerância sobre Potência Nominal dos Módulos (em %): TPNM; Degradação inicial (LID) (em %): LID; *Mismatch* (em %): MM; Perdas ôhmicas na cablagem (em %): P_{OC} ; Eficiência dos inversores (em %): EF_{INV} ; Sobrepotência CC/CA (em %): P_{CC-CA} ; Indisponibilidade Programada (em %): IP; Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada (em %): TEIF; Perdas elétricas após o inversor (em %): P_{INV} e Demais perdas (em %): D_{PERDAS} . O valor de k_{2S} pode ser obtido através de (2).

$$k_{2S} = (1 - NI) \times (1 - T) \times (1 - TPNM) \times (1 - LID) \times (1 - MM) \times (1 - P_{OC}) \times (1 - EF_{INV}) \times (1 - P_{CC-CA}) \times (1 - IP) \times (1 - TEIF) \times (1 - P_{INV}) \times (1 - D_{PERDAS}) \quad (2)$$

Desta forma, multiplica-se a produção solar bruta pelo fator de perda k_{2S} . Sequencialmente, é necessário definir o prazo de vida do projeto em anos e aplicar o fator de degradação com definição de acordo com (Jordan and Kurtz, 2013) e assim aplicadas em todos os anos de produção do empreendimento. Desta maneira, em conjunto com o valor de venda de energia em R\$/MW, obtém-se o fluxo de caixa da produção solar. Ressalta-se que os cálculos são baseados nesta etapa da modelagem para uma unidade de módulos fotovoltaico.

Na Fig. 1 pode ser observado todo o fluxograma para obtenção do fluxo de caixa para a receita, através da geração solar.

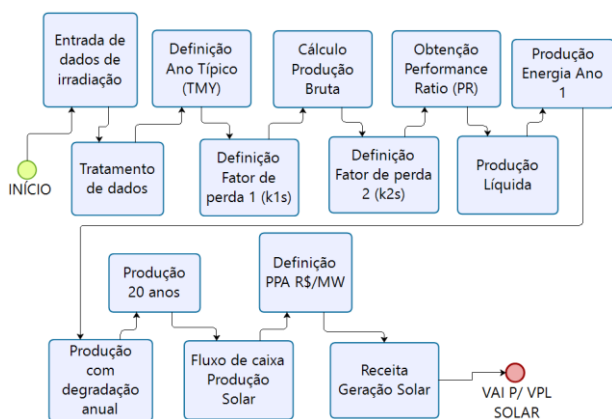


Fig. 1 Fluxograma para VPL solar - geração

Dando continuidade para composição do VPL solar, é imperativa a elaboração dos fluxos de caixas para os custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX). Na modelagem, foram definidos percentuais para cada uma das curvas de desembolsos, baseados nas práticas de mercado e multiplicados com os seus custos baseados na (EPE - PDE2030, 2021). Na Fig. 2, podem ser observados os processos para obtenção do CAPEX e OPEX solar, ambos para a implantação de uma unidade de módulo fotovoltaico.

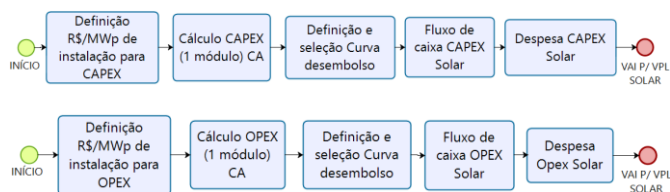


Fig. 2 Fluxograma para VPL solar – CAPEX e OPEX

2.2 VPL empreendimento eólico

De forma semelhante ao apresentado para cálculo do VPL solar, são utilizados os três pilares anteriormente mencionados, quais sejam: a produção de energia, CAPEX e OPEX para obtenção do VPL Eólico. Contudo, as premissas de desenvolvimento possuem particularidades, que serão apresentadas na sequência.

Para desenvolvimento da receita relativa à produção de energia, considerou-se a elaboração do TMY de vento de acordo com as regras do (EPE, 2017b) e (Portaria MME Nº 102, 2016). Os dados de entrada de vento podem ser obtidos em torres públicas ou torres anemométricas, dentro do raio de 6 a 10km da localidade do empreendimento. Após a elaboração do TMY, o usuário deve carregar a curva de potência do aerogerador escolhido de forma a calcular a produção bruta da amostra de 8760 dados de vento, conforme o rendimento dos dados do fabricante do aerogerador.

Para obtenção da produção líquida de um aerogerador, é primordial a multiplicação da produção de energia bruta pelo fator de perdas, que podem ser definidos através de (3).

$$k_{1E} = (1 - Desemp_{wtg}) \times (1 - Efeito_{esteira}) \times (1 - Ambiental) \times (1 - TEIF) \times (1 - IP) \times (1 - Efic) \times (1 - Rest_{op}) \quad (3)$$

Todos os dados de entradas devem ser definidos pelo usuário da modelagem em %, sendo eles: $Desemp_{wtg}$ o desempenho do gerador, $Efeito_{esteira}$ a composição dos percentuais dos efeitos esteiras, $Ambiental$ as perdas por condições ambientais, $TEIF$ a taxa equivalente de indisponibilidade forçados do ativo, IP a indisponibilidade programada do ativo, $Efic$ as combinações das perdas por eficiências e $Rest_{op}$ as restrições operativas.

Uma vez encontrada a produção líquida do empreendimento eólico, é aplicado o valor de venda de energia em R\$/MW, e desenvolvida a receita para todo o período de vida útil do projeto. Na Fig. 3 pode ser observado o fluxograma para elaboração do fluxo de caixa da receita relativa à geração eólica.

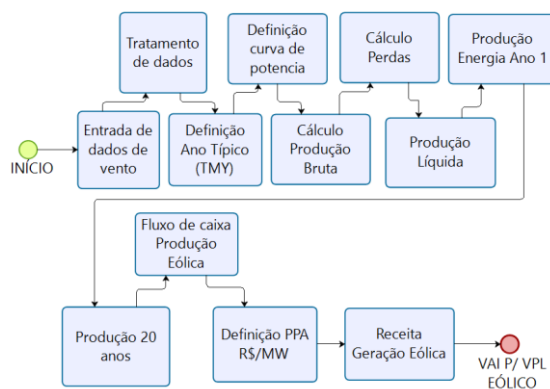


Fig. 3 Fluxograma para VPL eólico - geração

A composição dos fluxos de caixas com as inclusões dos custos de CAPEX e OPEX, são definidas de forma semelhante

ao apresentado no empreendimento solar com as devidas adequações nos preços de cada uma das atividades e com os percentuais das curvas de desembolsos compatíveis ao tipo de projeto.

2.3 VPL empreendimento bateria

Nesta etapa da modelagem vislumbra-se a verificação do armazenamento e da geração de energia através da bateria, a qual envolve elaborações de lógicas sequenciais condicionantes que vão definir as condições de carregamento e descarregamento da bateria, a sua vida útil e o corte de energia gerada (*curtailment*).

Deste modo, cinge-se verificar a produção líquida anual de cada uma das fontes solar, somadas à eólica na sua totalidade, de acordo com as quantidades de módulos e aerogeradores do projeto, e realizar a verificação da restrição de rede, de modo a validar se há um excedente ou déficit de energia no momento de análise. A modelagem é feita de forma horária para os anos típicos de cada uma das fontes. O estado da bateria é definido com os ciclos na seguinte sequência: descarregada, carregando, carregada e descarregando. Nesse sentido, necessita-se que seja respeitado este ciclo e, assim, preserve-se a vida útil da bateria. Além disso, as características de máximo carregamento e fundo de descarga foram definidas com 90% e 20% da capacidade nominal, respectivamente.

O tipo de bateria utilizado no modelo foi a de íon lítio, devido à sua maior aplicabilidade neste tipo de função, e a vida útil da bateria foi contabilizada pelo simulador de acordo com um ciclo de carregamento e descarregamento completos até 10.000 ciclos, tão somente à substituição delas em caso de viabilidade econômica.

De forma semelhante, mas com as devidas adequações, é calculada a geração de energia através da bateria, com o acúmulo horário da produção e multiplicada pelo fator de perda, associada à degradação e eficiência dos equipamentos. Assim, o fluxo de caixa da receita para produção é calculado com a produção híbrida de longo prazo, multiplicado pelo valor de venda de energia desta fonte, em R\$/MW. Na Fig. 4 pode ser observado o fluxograma com as etapas para obtenção da receita de geração da bateria, para composição do seu VPL.

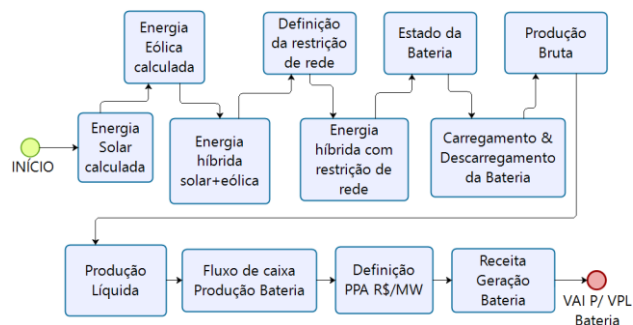


Fig. 4 Fluxograma para VPL bateria - geração

Ao longo das verificações de possibilidade de injeção de energia na rede operativa para a geração híbrida (solar e eólica), é contabilizado também o *curtailment*,

proporcionalmente ao momento horário de produção de cada uma das fontes, e somado anualmente, de forma a verificar e precificar a falta de receita aplicada ao modelo financeiro.

As composições de CAPEX e OPEX seguem a mesma linha de desenvolvimento apresentada anteriormente para as fontes solar e eólica, com as devidas adequações aos seus custos e percentuais de curvas de desembolsos.

2.4 Condições financeiras

As condições financeiras na busca de viabilidade de um empreendimento não são os únicos pontos que definem o avanço ou não do projeto, porém são itens de extrema importância, em combinação com as demais variáveis apresentadas dos custos de implantação, operação e manutenção, preço da venda de energia e produção de energia da planta.

Para aplicação ao simulador, é necessária a definição dos dados de entrada do custo próprio do empreendedor k_e , além da taxa de capital de terceiros k_d . Com esses dados de entrada, podem ser calculados o valor do custo médio ponderado de capital (WACC), em (4). Nesta etapa, são necessárias as definições dos pesos de cada uma das captações do capital próprio (CP) e capital de terceiros (CT), sendo todas as variáveis em %, sendo que CP somado a CT é igual VT, e semelhante a 1 (100%).

$$i_1 = \left(\frac{CP}{VT} \times k_e \right) + \left[\frac{CT}{VT} \times k_d \times (1 - t) \right] \quad (4)$$

Definido o valor de i_1 , este pode ser aplicado às fórmulas de VPL, representado em (5), e deve ser elaborado por fonte, utilizando-se os fluxos de caixas (FC_{fonte}) desenvolvidos na modelagem.

$$VPL_{Fonte} = \left(\sum_0^{nt} \frac{FC_{fonte}}{(1 + i_1)^{nt}} \right) \quad (5)$$

2.5 Otimização e restrições para modelagem

A modelagem do simulador utiliza o processo de otimização, através do método de gradiente reduzido generalizado não linear. A utilização de um método de programação não linear se deve ao fato de a quantificação de uma das variáveis (quantidade de bateria) ser dependente de outras duas (quantidade de módulos fotovoltaicos e aerogeradores). A função objetiva utilizada na modelagem está representada em (6).

$$\text{máximização } VPL_{total} \quad (6)$$

Onde:

$$VPL_{total} = Mod_{qde} \times VPL_{Solar} + WTG_{qde} \times VPL_{eólico} + Bat_{qde} \times VPL_{bateria} + VPL_{curt} \quad (7)$$

Cabe ressaltar que o valor VPL_{curr} é um número sempre negativo ou zero, e tem o objetivo de penalizar o modelo financeiro.

Consideram-se como as variáveis do problema a quantidade de módulos fotovoltaicos (Mod_{qde}), a quantidade de aerogeradores (WTG_{qde}) e a quantidade de baterias (Bat_{qde}).

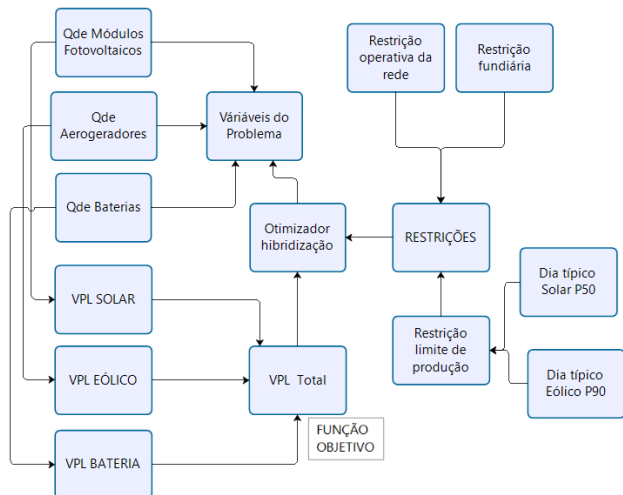


Fig. 5 Fluxograma da otimização e restrições

Na Fig. 5 podem ser observados os detalhes do macroprocesso para a otimização e restrições na modelagem.

Durante a elaboração das restrições do problema de otimização foram consideradas as limitações fundiárias do local do empreendimento. Nesta análise são calculadas as áreas solar, eólica e bateria. Paralelamente, verifica-se a área efetiva para a implantação das usinas de cada tipo de fonte, retirando, assim, as parcelas referentes às áreas comuns (subestação, rede de média tensão e reserva ambiental).

Nas avaliações referentes às produções de energia, são definidos dias típicos com 24 horas para cada tipo de fonte (solar e eólica), e calculadas as produções de energia para a probabilidade de ocorrência em P50 (solar) e P90 (eólica). O dia típico é calculado com a média e o desvio padrão de cada uma das horas de um dia, em toda a amostra anual, e aplicada a inversa da função normal de acordo com a probabilidade de ocorrência desejada para obtenção do dado de produção.

3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Na composição para otimização do VPL do empreendimento foram avaliados cenários de variações de CAPEX, alterações de preços de energia, alterações de premissas relativas às restrições do modelo, mudanças de condições dos recursos solar e eólicos em potencial de geração. Foram considerados dois tipos de casos, nomeados de “Base 1” e “Base 2”, que foram simulados nos cenários apresentados.

No caso “Base 1”, foram configuradas todas as definições expostas na metodologia, a qual ressalta-se na otimização do VPL global do empreendimento, considerando-se as restrições fundiárias, limites de capacidades dos parques solar e eólico em 300MW cada, limite de capacidade instalada de 30MW em

bateria e, por fim, a verificação de restrição de rede e consideração de armazenamento de energia entre os horários 9hrs até 17hrs, com a probabilidade de ocorrência da fonte horária solar de P50 e eólica em P90. Ou seja, nos horários com maior produção de energia combinada, a modelagem considera a produção de energia superior à capacidade que a rede de operação é capaz de escoar no sistema, e, assim, essa energia excedente deve ser armazenada em baterias, para descarregamento em horários que a produção solar e eólica está abaixo da capacidade da rede.

Para as considerações, no caso “Base 2” são também utilizadas as mesmas metodologias de cálculos definidas no caso “Base 1”, porém com a retirada das restrições relativas à produção combinada acima do limite operativo, não sendo necessária a geração superior à da capacidade da rede.

Foram gerados 18 cenários (9 em cada uma das bases 1 e 2), que foram considerados de acordo com os seguintes critérios:

Variações de CAPEX para os dados de entradas, que foram baseados no (EPE - PDE2030, 2021), com:

- valores mínimos da fonte solar de 3000 R\$/kW, fonte eólica de 3200 R\$/kW e Bateria 6000 R\$/kW;
- valores médios de fonte solar 4000 R\$/kW, fonte eólica 4350 R\$/kW e Bateria 7900 R\$/kW;
- valores máximos de fonte solar 5000 R\$/kW, fonte eólica 5500 R\$/kW e Bateria 9800 R\$/kW.

Variações no Preço de energia R\$/MW, com base em (CCEE, 2021):

- Valores semelhantes nas fontes solar e eólica, de acordo com preços de mercado em 130 reais, em contratos de longo prazo, e valor distinto para energia entregue pela bateria de 230 reais;
- Preço de energia R\$/MW, semelhantes em todas as fontes em valor PLD médio dos últimos 5 anos para o submercado nordeste com consideração dos valores em carga leve, média e pesada, de aproximadamente 230 reais.

Do ponto de vista das variações para as restrições consideradas no problema de otimização, foram criados os seguintes cenários:

- Restrição fundiária limitada à implantação do complexo híbrido, de área total com 200ha;
- Restrição operativa de rede em 100MW, para limitação da injeção de energia no ponto de conexão.

Por fim, na criação dos cenários simulados foram realizadas variações dos recursos naturais, com:

- Acréscimo de 15% da irradiação de todo o dado de entrada;
- Acréscimo de 15% da capacidade de vento também em todo o dado de entrada.

Nas tabelas 1 e 2, podem ser observados os resultados da simulação para todos os cenários mencionados, e verificados os melhores resultados (indicados em negrito) para demonstrar a coerência para os dados de saída da modelagem.

Adicionalmente, podem ser comparados os cenários no caso “Base 2” e “Base 1”. A consideração para restrição fundiária de 200 hectares é a situação que apresentou melhor resultado de incremento de VPL (56,10%), com redução de perda de energia (93,40%) entre os mesmos cenários avaliados entre as bases. A segunda melhor condição de implantação foi a de CAPEX no valor máximo, com aumento de 34,32% de VPL global e redução de energia 63,98%.

Tabela 1. Cenários Base 1

Cenários	VPL (10 ⁹ xRS)	Curtailment (MWh) 1º ano	Fator Capacidade (%)		
			Solar	Eólica	Bateria
Capex mín	R\$ 5,64	322.532	0,25	0,44	0,69
Capex med	R\$ 5,23	322.532	0,25	0,44	0,69
Capex máx	R\$ 4,81	322.532	0,25	0,44	0,69
Bat R\$230	R\$ 3,73	322.532	0,25	0,44	0,69
PLD med	R\$ 7,14	322.532	0,25	0,44	0,69
200ha	R\$ 2,70	240.917	0,25	0,44	0,79
100MW	*	*	*	*	*
15% solar	R\$ 5,27	314.811	0,29	0,44	0,69
15% vento	R\$ 6,80	277.184	0,25	0,59	0,46

* não foi possível obter resposta no modelo para o cenário de limite de rede até 100MW.

Tabela 2. Cenários Base 2

Cenários	VPL (10 ⁹ xRS)	Curtailment (MWh) 1º ano	Fator Capacidade (%)		
			Solar	Eólica	Bateria
Capex mín	R\$ 6,72	147.309	0,25	0,44	0,62
Capex med	R\$ 6,42	146.044	0,25	0,44	0,62
Capex máx	R\$ 6,46	116.181	0,25	0,44	0,63
Bat R\$230	R\$ 4,72	86.979	0,25	0,44	0,74
PLD med	R\$ 8,59	147.309	0,25	0,44	0,62
200ha	R\$ 4,22	15.901	0,25	0,44	0,63
100MW	R\$ 8,07	76.331	0,25	0,44	0,81
15% solar	R\$ 6,46	116.176	0,29	0,44	0,63
15% vento	R\$ 6,94	246.324	0,25	0,59	0,43

4. CONCLUSÕES

No cenário atual da matriz energética, os assuntos associados à preservação do meio ambiente, às demandas de clientes para consumo através de fontes em energia renovável com “selo verde”, às limitações da rede de operação e às questões fundiárias, são todas realidades no Brasil e em muitos lugares no mundo. O tema relacionado à hibridização de fontes de energia tende a ser cada vez mais discutido e aprofundado pelos agentes, fornecedores, áreas de pesquisas e empreendedores envolvidos do setor. Há uma projeção clara em relação ao mercado, no sentido de um crescimento expressivo da diversificação das fontes de geração, principalmente no que se refere às solares e eólicas. Além disso, é clara a posição diferenciada e de alta capacidade para o potencial solarimétrico e de ventos no território nacional. Desta forma, as linhas de pesquisa envolvendo a complementariedade de fontes de energia, em conjunto com a

visão de médio e longo prazo para queda dos preços de baterias é foco de trabalho de muitas instituições.

Durante as aplicações das metodologias em conjunto com as premissas utilizadas no simulador nos 18 cenários criados, com as mudanças de algumas das variáveis do modelo, pôde-se observar a alteração significativa do otimizador. Entre os 9 cenários gerados em cada um dos casos base, os valores mínimos e máximos de VPL global foram de R\$ 2,7x10⁹ e R\$ 7,14x10⁹, respectivamente para o caso “Base 1”, e R\$ 4,22x10⁹ e R\$ 8,59x10⁹ para o caso “Base 2”.

O desenvolvimento do simulador apresentou resultados satisfatórios para o objetivo de avaliações preliminares, no intuito de subsidiar as empresas na análise de viabilidade de empreendimento com essas características híbridas, e com restrições fundiárias e de limitação de injeção na rede elétrica.

Fica claro em todo o desenvolvimento do trabalho que o aperfeiçoamento desta linha de pesquisa ainda requer definições regulatórias e desenvolvimento das tecnologias no sentido de viabilização financeira para a hibridização de fontes. Contudo, as soluções híbridas destes tipos de projeto serão cada vez mais aplicadas no mercado, sendo assim necessário o aprimoramento e desenvolvimento do “*know-how*” para assertividade nas implantações e futuro energético.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica e de telecomunicações da Universidade Federal Fluminense e à empresa Energisa pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- CCEE, 2021. PLD semanal [WWW Document]. URL <https://www.ccee.org.br/> (accessed 4.24.21).
- EPE, 2019. NT-029.
- EPE, 2017a. NT-025.
- EPE, 2017b. EPE-DEE-017 41.
- EPE - PDE2030, 2021. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 - Parâmetros de Custos Geração e Transmissão.
- Jordan, D.C., Kurtz, S.R., 2013. NREL - Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review: Photovoltaic degradation rates. Prog. Photovolt: Res. Appl. 21, 12–29. <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Portalsolar [WWW Document], 2021. URL <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-renovavel/potencial-dos-sistemas-hibridos-para-o-brasil-e-enorme-e-diversificado.html>
- Portaria MME N° 102, 2016.
- SIGA ANEEL [WWW Document], 2021. URL <https://bit.ly/2IGf4Q0> (accessed 2.14.21).
- SRG, SRT, SCG, 2020. ANEEL - n° 002/2020.
- Weschenfelder, F., 2020. A review on the complementarity between grid-connected solar and wind power systems. Journal of Cleaner Production 10.
- Workshop - Projetos de armazenamento de energia chamada P&D - ANEEL, n.d.