

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Filipe Papa de Figueiredo

1611739

**Armazenamento de Energia Solar e Eólica por
Usinas Hidráulicas Reversas: Uma Solução para
o Brasil?**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento
de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Florian Pradelle, D. Sc.
Departamento de Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro

Junho de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Florian Pradelle D.Sc. pela consideração e dedicação perante todas as dúvidas tratadas e atendimento durante a elaboração do presente projeto de graduação.

Ao corpo docente da PUC-Rio, principalmente aos professores do Curso de Engenharia Mecânica garantindo um ensino de qualidade e muito importantes durante minha trajetória na universidade, que me inspiraram confiando no meu potencial e apoiando meu desenvolvimento.

À equipe de AeroRio de AeroDesign da PUC-Rio, que, desde o início de meu curso, contribuiu para um elevado crescimento acadêmico, profissional e pessoal, com as amizades que foram criadas e mantidas durante todo o curso.

A todos os colegas de curso, em especial ao Caio Falcão, ao Matheus Seif e ao Rodrigo Lomonte, pelo incentivo, apoio e desenvolvimento conjunto ao longo dos anos.

A minha família, que me inspirou desde o início a escolher este curso e me apoiou ao longo dos anos sempre respeitando meus momentos de estudo e dedicação e dando todo suporte que precisei tornando possível esta conquista de final de curso.

RESUMO

Armazenamento de Energia Solar e Eólica por Usinas Hidráulicas Reversas: Uma Solução para o Brasil?

Atualmente, o uso de fotovoltaicas e eólicas são tecnologias principalmente usadas durante o seu período de geração diurna em Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), pois se usadas com bancos de baterias para o armazenamento seriam aumentados os desafios para a diminuição de custo e eficiência do sistema. O presente projeto de graduação tem como foco o estudo do armazenamento das energias solar e eólica intermitentes, por meio de usinas hidráulicas reversas. Dessa forma, mediante detalhamentos técnico, econômico e ambiental, serão analisadas as soluções tecnológicas e as vantagens e desvantagens da geração das energias renováveis intermitente solar e eólica. Além disso, serão estudadas as possíveis configurações de hibridização com armazenamento e será avaliado o potencial do Brasil para a implementação dessa tecnologia. Por fim, um sistema solar-eólico-hidráulico foi dimensionado por meio de uma modelagem numérica e a sua viabilidade foi avaliada pelas análises energética, exergética, ambiental e econômica. Dessa forma, foi demonstrado que por mais simples o funcionamento do projeto, é necessária uma configuração complexa demais de integração entre os sistemas e elevada altura dos reservatórios para MMGD no Brasil, e assim obtendo uma eficiência baixa para o aproveitamento da energia armazenada.

Palavras chaves: Hibridização com Armazenamento. Modelagem Numérica. Modelo MATLAB. Análise Termodinâmica. Análise Exergética. Análise Econômica.

Área de concentração: Energias Renováveis.

ABSTRACT

Solar and Wind Energy Generation with Pumped Hydro Storage: A Solution for Brazil?

Currently, the use of photovoltaics and wind energy technologies are mainly used during their daytime generation period in Micro and Mini Distributed Generation (MMGD), caused by its challenges to reduce costs and increase efficiency, which in case battery banks are usually implemented for storage. This graduation project focuses on the study of intermittent solar and wind renewable intermittent energy storage, through reverse hydraulic power plants. Through technical, economic, and environmental details, technological solutions and the advantages and disadvantages of harnessing solar and wind energy are analyzed. In addition, possible configurations of hybridization with storage are studied and Brazil's potential for the implementation of this technology are evaluated. Finally, a solar-wind-hydraulic system is designed through numerical modeling and its viability will be evaluated by energetic, exergetic, environmental and economic analyses. Thus, it was demonstrated that however simple the operation of the project, it is necessary a too complex integration configuration between the systems and too high head of the reservoirs for MMGD in Brazil, therefore obtaining low efficiency for the usage of stored energy.

Keywords: Energy Storage Hybridization. Numerical Modeling. MATLAB Model. Thermodynamic Analysis. Exergy Analysis. Economic Analysis.

Concentration Area: Renewable Energy

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Contexto	10
1.1.1. Matrizes energéticas e elétricas do Brasil e do Mundo	10
1.1.2. Questões ambientais	13
1.1.3. Intermitência e armazenamento	15
1.2. Objetivos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Energia Solar	18
2.1.1. Potencial no Brasil	18
2.1.2. Soluções tecnológicas	19
2.1.3. Vantagens e desvantagens	20
2.2. Energia eólica	21
2.2.1. Potencial no Brasil	21
2.2.2. Soluções tecnológicas	22
2.2.3. Vantagens e desvantagens	23
2.3. Hibridização com armazenamento	23
2.3.1. Configurações possíveis de hibridização	23
2.3.2. Solar-eólico com usina hidráulica reversa	25
3. MODELAGEM NUMÉRICA	27
3.1. Modelagem do sistema fotovoltaico	27
3.2. Modelagem do sistema eólico	30
3.3. Modelagem da usina hidráulica reversa	33
3.4. Análise de eficiências termodinâmica e exergética	36
3.5. Análise econômica	37

4. METODOLOGIA.....	38
4.1. Sistema fotovoltaico	39
4.2. Sistema eólico	40
4.3. Método para análise econômica.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1. Resultados do subsistema fotovoltaico	42
5.2. Resultados dos subsistemas eólico e fotovoltaico	43
5.3. Resultados do subsistema usina hidráulica reversa.....	45
5.4. Resultado dos sistemas integrados.....	47
6. CONCLUSÕES	49
7. REFERÊNCIAS	51

Lista de Figuras

Figura 1: Matriz Energética Brasileira 2019 (BEN, 2020).....	11
Figura 2: Matriz Energética Mundial 2019 (BP, 2020).....	11
Figura 3: Matriz Elétrica Brasileira 2019 (BEN, 2020).....	12
Figura 4: Matriz Elétrica Mundial 2019 (BP, 2020).....	13
Figura 5: Mapa de Irradiação Global Horizontal em Média Anual (ABES, 2017)	19
Figura 6: Gráfico de Células FV de Melhores Eficiências [8].....	20
Figura 7: Mapas de Potencial Eólico Brasileiro Sazonal	22
Figura 8: Possíveis Configurações de Híbridação (ANEEL 014/2019)	24
Figura 9: Sistema Isolado HPWPS [16].....	26
Figura 10: Curva característica I–V do sistema FV.	29
Figura 11: Curva característica P–V do sistema FV para $G_{ref}= 1000 \text{ W/m}^2$	29
Figura 12: Curva característica do coeficiente de potência em função do TSR para diferentes ϕ	31
Figura 13: Curva característica potência mecânica adimensional vs velocidade angular do rotor	31
Figura 14: Curva de potência simulada do Gerador Eólico Bergey BWL XL.1	32
Figura 15: Curva característica do head durante o enchimento	34
Figura 16: Curva característica da vazão durante o enchimento	34
Figura 17: Curva de esvaziamento dos reservatórios	35
Figura 18: Curva de potência gerada no esvaziamento dos reservatórios.....	36
Figura 19: Demanda média diária de energia por residência [20]	39
Figura 20: Irradiação diária média da série histórica	40
Figura 21: Média móvel da velocidade do vento no ano	41
Figura 22: Gráfico da potência elétrica solar em um dia típico no ano.....	42
Figura 23: Duck curve no saldo de energia sem bombeamento	43

Figura 24: Gráfico da média móvel da potência elétrica eólica gerada no ano	44
Figura 25: Superposição da potência gerada sem bombeamento	44
Figura 26: Curva da altura do reservatório dimensionado	45
Figura 27: Curva da vazão do reservatório dimensionado	45
Figura 28: Curva de esvaziamento do reservatório	46
Figura 29: Curva da potência hidráulica gerada pelo reservatório	46
Figura 30: Curva de potência gerada com usinas reversas	47

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros do módulo FV TitanS6_60 a 25°C e 1000 W/m ²	28
Tabela 2: Parâmetros do conjunto Gerador Eólico Bergey BWC XL.1	32
Tabela 3: Parâmetros da usina hidráulica reversa	35

1. INTRODUÇÃO

A motivação do presente projeto consiste em explorar novas possibilidades de implementação de energias de fontes renováveis intermitentes eólica e solar, uma vez que atualmente se mostram em intenso crescimento e provavelmente continuarão a desempenhar um papel importante nos planos de eletrificação do Brasil. A alta volatilidade dos preços do petróleo, a baixa diversidade da matriz elétrica e os problemas de poluição do ar e aquecimento global levaram ao desenvolvimento de vários projetos destinados ao desenvolvimento ambientalmente sustentável em áreas rurais. Etanol, biomassa, biogás, hidroeletricidade, geração eólica e solar serão as principais fontes de projetos de eletrificação rural em todo o país [3].

1.1. Contexto

1.1.1. Matrizes energéticas e elétricas do Brasil e do Mundo

O Brasil tem capacidade elétrica instalada de 73,4 milhões de quilowatts, 85% da qual é hidrelétrica (em 1 de janeiro de 2001). Dos 321,2 bilhões de quilowatts-hora (bkWh) gerados no Brasil em 2001, 83% foram de energia hidrelétrica (abaixo dos 91% em 1999). Desde então, o Brasil é consistentemente um dos maiores produtores mundiais de energia hidrelétrica. Já hoje, junto com o Paraguai, o Brasil mantém o segundo maior complexo hidrelétrico operacional do mundo, a instalação de Itaipu no rio Paraná, com capacidade de 14.000 megawatts (MW) [1].

A capacidade restante de geração de eletricidade do Brasil vem do carvão e uma quantidade cada vez maior do gás natural. As pequenas redes elétricas do norte e do sul do Brasil foram unidas em janeiro de 1999 em uma rede que atende 98% do país. Oferta de energia doméstica do Brasil é aumentada por importações da vizinha Argentina em casos de falta de chuva causando baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas [2].

Após 20 anos de seu desenvolvimento, a atual matriz energética do Brasil pode ser visualizada no gráfico da Figura 1, e é muito diferente da mundial. Apesar da oferta interna de energia de fontes não renováveis ser maior do que a de renováveis, ainda são usadas mais fontes renováveis que no resto do mundo. Somando lenha e carvão

vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis, nossas renováveis totalizam 47,6%, quase metade da matriz energética brasileira [3].

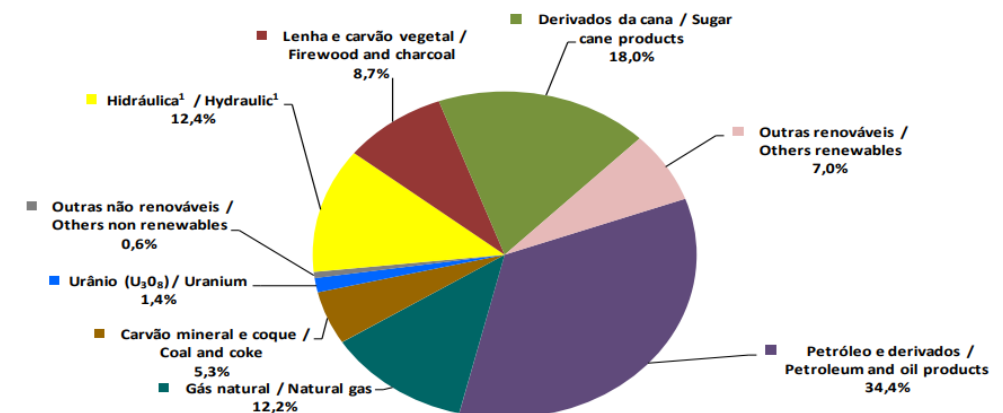


Figura 1: Matriz Energética Brasileira 2019 (BEN, 2020)

Porém, analisando a matriz energética mundial, fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 1,60%, assinaladas como “Outros” no gráfico da Figura 2. Além disso, se somarmos à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam apenas 14%.

O consumo de energia primária mundial aumentou 1,3% no ano passado, menos da metade de sua taxa em 2018 (2,8%). O crescimento foi impulsionado por renováveis (3,2 EJ) e gás natural (2,8 EJ), que juntos contribuíram com três quartos do aumento. Todos os combustíveis cresceram em um ritmo mais lento do que suas médias de 10 anos, além do nuclear, com consumo de carvão caindo pela quarta vez em seis anos (-0,9 EJ) [9].

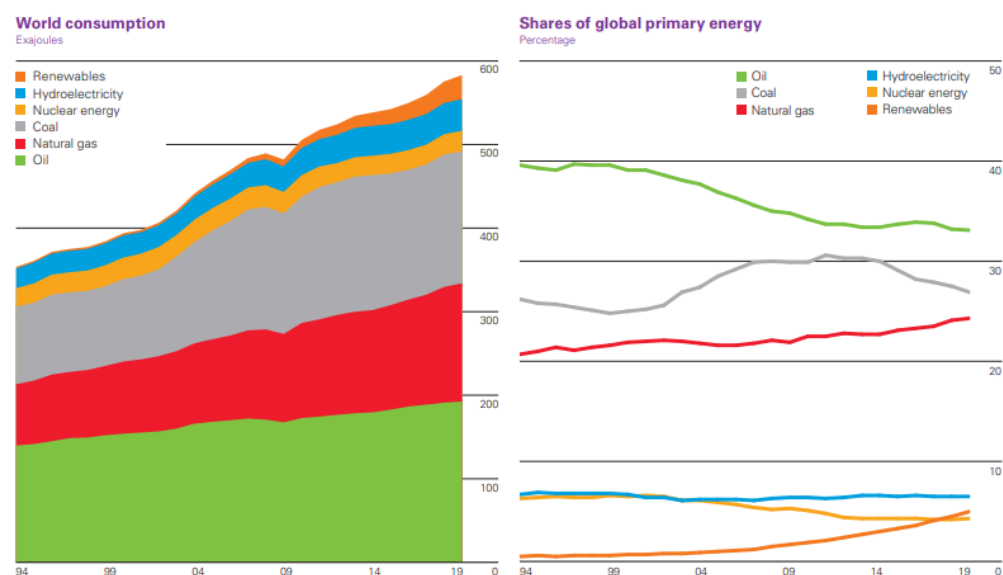


Figura 2: Matriz Energética Mundial 2019 (BP, 2020)

A matriz elétrica brasileira é ainda mais renovável do que a energética, podendo ser vista no gráfico da Figura 2 pela oferta interna de energia elétrica por fontes. Grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas, e a geração de energia eólica também vem crescendo bastante, contribuindo para que a nossa matriz elétrica continue sendo, em sua maior parte, renovável [3].

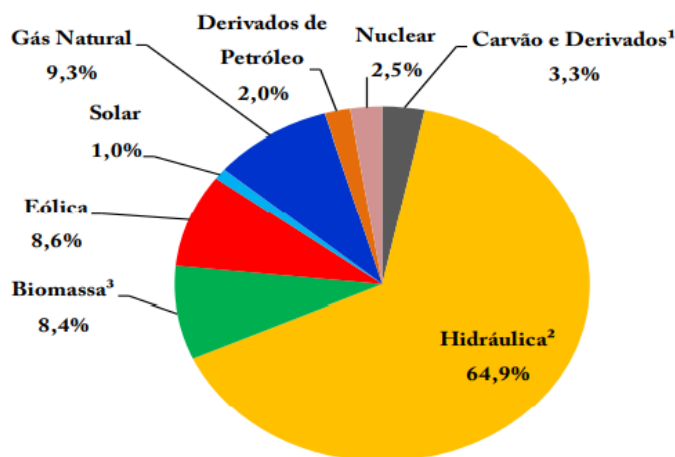


Figura 3: Matriz Elétrica Brasileira 2019 (BEN, 2020)

As energias de fonte renovável provavelmente continuarão a desempenhar um papel importante nos planos de eletrificação do Brasil. Os altos preços do petróleo, a escassez de energia elétrica em período de seca e os problemas de poluição do ar e do aquecimento global levaram ao desenvolvimento de vários projetos destinados ao desenvolvimento ambientalmente sustentável em áreas rurais. Etanol, biomassa, hidroeletricidade, geração eólica e solar serão as principais fontes de projetos de eletrificação rural em todo o país [3].

Além disso, em abril de 2002 o governo brasileiro aprovou a Lei 10.438, também chamada por Proinfa. O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas é um programa de energia desenvolvido para estimular desenvolvimento de cogeração de biomassa, eólica, pequenas centrais hidrelétricas, garantindo contratos de venda de energia aos primeiros 3300 MW de empreendimentos que utilizam essas tecnologias. O Proinfa busca privilegiar empreendedores que não tenham vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição [4].

Por outro lado, a matriz elétrica mundial é principalmente baseada em fontes não renováveis como termelétricas a base de combustíveis fósseis como carvão, óleo e gás natural. O gráfico da matriz elétrica do mundo pode ser observado a seguir na Figura 4.

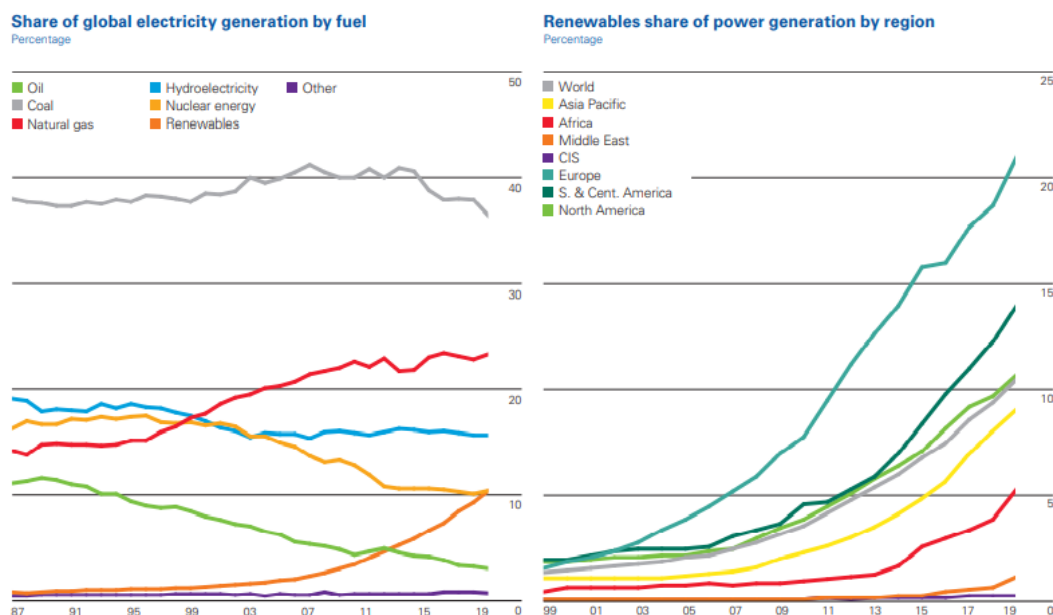


Figura 4: Matriz Elétrica Mundial 2019 (BP, 2020)

Em nível global, o carvão é o combustível dominante para geração de energia, porém, sua participação caiu 1,5% se mantendo em 36,4% em 2019, o nível mais baixo da série de dados desde 1987. As participações tanto do gás natural quanto das renováveis atingiram níveis recordes no ano passado (para 23,3% e 10,4%, respectivamente), e a geração de renováveis superou a nuclear pela primeira vez. Regionalmente, há variação significativa da penetração das energias renováveis: a Europa tem a maior penetração com 20,9% - o dobro da média mundial, seguida por América do Sul e Central com 13,9% [9].

1.1.2. Questões ambientais

1.1.2.1. Impactos – Energia Hidráulica

Construir barragens para produzir eletricidade foi um protagonismo de política pública desde a Ditadura Militar Brasileira. Porém, isto mostra-se em declínio no Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (PDE), também causado pela escassez de locais ótimos para a implantação delas, ao mesmo tempo que se aumenta o uso de fontes alternativas e de combustíveis fósseis. Assim, torna-se importante analisar a respeito do viés ambiental brasileiro é se os impactos da crise do clima e do desmatamento sobre o regime de chuvas além dos prejuízos a populações rurais e indígenas fazem valer a construção e a operação de hidrelétricas sobretudo na Amazônia [5]. Assim, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) informa que

existem 221 hidrelétricas operando na Amazônia, sendo 27 de grande porte, 102 médias e pequenas e 92 micro geradoras, sendo que outras 35 estão em construção. Desde usinas gigantes como Belo Monte, a terceira maior do mundo em capacidade de geração de energia (11.233MW) a uma profusão de pequenas usinas [5].

1.1.2.2. Impactos – Energia Fotovoltaica

Ao construir uma usina fotovoltaica, a região de instalação estará comprometida a partir de alterações da fauna, como o processo de reprodução, perda de habitat natural e alimentação, mudança dos padrões de movimentação. Há também outros riscos de degradação da área em questão como terraplanagem, retirada de cobertura vegetal e alteração dos níveis de lençol freático. Além disso, o impacto visual também será prejudicado pelo ofuscamento em vista da reflexão da luz solar sobre as placas solares instaladas.

A manufatura das placas solares é constituída a partir da fabricação de painéis solares, que são responsáveis por 85% da energia utilizada em um sistema de geração de energia solar [6]. Portanto, as placas solares são os principais consumidores da energia na manufatura, visto que o equipamento necessita de diversos recursos, etapas e elementos químicos para a sua produção. Assim, uma Avaliação do Ciclo de Vida deve ser realizada para analisar os impactos ambientais causados aos painéis solares durante sua vida útil. Com isso, ao depender do país de fabricação esta avaliação estima que entre 1,5 e 2,5 anos a placa solar já tenha produzido a mesma quantidade de energia.

Ao final de sua vida útil, é recomendado que o consumidor faça o reaproveitamento e reciclagem dos equipamentos, tais como placas solares, inversores e demais resíduos que não precisam ser desfeitos. No entanto, muitos optam pelo descarte desses materiais, contribuindo para o aumento dos impactos ambientais.

1.1.2.3. Impactos – Energia Eólica

A geração de energia por usinas eólicas também possui o ponto positivo de não queimar combustíveis fósseis. Porém, para se tornarem atrativas economicamente devem ser de grande porte, e por isso alteram as paisagens com suas torres e hélices.

O maior impacto que causam é interferir nas rotas dos pássaros migratórios, que costumam voar em formações e não tem boa capacidade de visão [7]. Os bandos de pássaros se movimentam por mecanismos instintivos e aproveitam as correntes convectivas ascendentes do ar para se movimentarem, principalmente quando estão em grandes formações.

Além disso, as usinas ou fazendas eólicas emitem um certo nível de ruído de baixa frequência, que podem causar desconforto e até interferir em transmissão de televisão ou outros tipos de ondas provenientes de radiações eletromagnéticas [11].

1.1.3. Intermitência e armazenamento

As plantas eólicas não são consideradas como uma fonte de energia firme, pois dependem da existência de ventos que por sua vez depende de variações de temperatura e outros fatores. Nas regiões muito afetadas por chuvas, ocorre desperdício energético muito elevado nesta fonte de geração. Por isso, normalmente se utiliza a energia produzida por usinas ou fazendas eólicas apenas para adição aos sistemas integrados de geração energética, uma vez que em certos momentos, a produção proveniente desta geração pode ser relativamente reduzida [11].

Mas sem dúvida, a energia eólica se soma a energia solar como duas das fontes de alto potencial em nosso país. A estruturação de uma matriz energética que contemple a integração da geração a partir destas fontes alternativas é de extrema importância.

Não apenas no Brasil, mas principalmente entre os países desenvolvidos, o maior desafio no setor elétrico dos últimos anos se tornou realizar uma eficaz incorporação de fontes de energia renováveis em suas matrizes elétricas. Países como a Espanha e Alemanha que lidaram com este desafio liderando a trajetória de difusão das fontes eólicas e solar, atualmente têm de lidar com custos de operar o sistema elétrico com elevada capacidade ociosa para administrar a participação de fontes intermitentes em um parque de geração predominantemente termelétrico [9].

A geração hidrelétrica, por sua vez apresenta características distintas das fontes solar e eólica, mas a volatilidade é igualmente presente. Nas regiões do Sudeste e Centro-Oeste brasileiro, em anos de hidrologia mais favorável, a energia

natural afluente é quatro vezes superior à de anos de hidrologia menos favorável nos meses do período úmido [7].

A solução brasileira para lidar com a intermitência hidrelétrica contou com dois elementos principais: os reservatórios hidrelétricos de grande porte e o sistema de transmissão nacional. Os reservatórios brasileiros permitem acumular energia equivalente a cinco meses de consumo nacional, situação sem paralelo em sistemas elétricos de maior relevância. O sistema integrado de transmissão de porte continental permite a complementação entre as diferentes bacias hidrográficas brasileiras. Durante um longo período, essa solução permitiu ao setor lidar de forma satisfatória com a intermitência, recorrendo em raros casos à geração termelétrica apenas de maneira complementar [24].

As novas hidrelétricas são distantes dos centros de consumo, localizadas em áreas de elevada sensibilidade ambiental e, por razões técnicas e ambientais, não contam com reservatórios de acumulação. Os custos são amplificados ainda pelos atrasos recorrentes nessas obras de elevada complexidade técnica, social e ambiental [24].

Nesse contexto, os reservatórios hidrelétricos, peça fundamental da coordenação do sistema brasileiro, perdem capacidade de regularização. Na última década, a capacidade de armazenagem caiu de seis para cinco meses de consumo. Na próxima década, a capacidade de regularização cairá para menos de quatro meses. A geração termelétrica, dessa forma, se torna mais frequente e perde o caráter complementar do passado. O grande problema é que o custo do backup termelétrico no Brasil é muito elevado, como ficou claro nos últimos anos [24].

1.2. Objetivos

O presente projeto de graduação tem como foco o estudo do armazenamento das energias solar e eólica, ambas intermitentes, por meio de usinas hidráulicas reversas. Dessa forma, mediante detalhamentos técnico, econômico e ambiental, serão analisadas as soluções tecnológicas e as vantagens e desvantagens da geração das energias solar e eólica. Além disso, serão descritas as possíveis configurações de hibridização com armazenamento e será avaliado o potencial do Brasil para a implementação dessa tecnologia. Por fim, um sistema solar-eólico-

hidráulico será dimensionado por meio de uma modelagem numérica e a sua viabilidade será avaliada pelas análises energética, exergética, ambiental e econômica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia Solar

2.1.1. Potencial no Brasil

De acordo com Rigo [7], considerando a escassez de estudos sobre os fatores determinantes para o sucesso da implementação de painéis FV em pequena escala, os principais fatores críticos de sucesso para a geração de energia FV foram considerados no processo de revisão da literatura permitiu um destaque para o sucesso desta implementação. Estes fatores variam em função de sobretudo 6 aspectos, que são econômicos, ambientais, mercadológicos, políticos, sociais e tecnológicos. Esses fatores são considerados relevantes para o cenário internacional, especialmente para os países do BRICS, em que no Brasil apresenta recentes aspectos de desenvolvimento de geração de energia FV de pequena escala. Dessa maneira, para alcançar o sucesso da geração de energia FV de pequena escala no Brasil existem fatores favoráveis que não precisariam de muito esforço para serem melhorados, porém as barreiras que impedem o sucesso precisam ser mudadas [7].

Apesar disso, dados de sensores fornecidos pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (ABES) permitiram elaborar a Figura 5 de irradiação solar global horizontal em todo o território brasileiro, que evidenciam um forte potencial de produção em média anual principalmente na região nordeste, com valores de irradiação entre 5500 e 6250 Wh/m².dia [10].

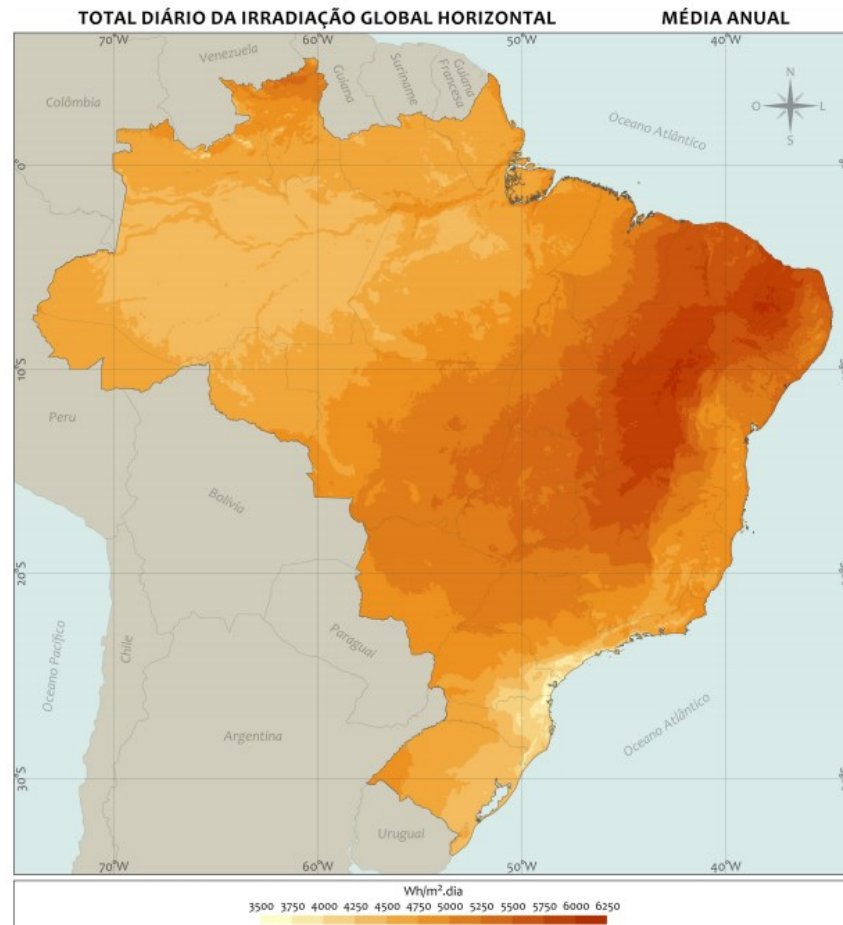


Figura 5: Mapa de Irradiação Global Horizontal em Média Anual (ABES, 2017)

2.1.2. Soluções tecnológicas

A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio, pois além de possuir muito desenvolvimento pela frente por sua baixa eficiência das células fotovoltaicas (em torno de 20%), a sua fonte de energia proveniente do sol não é renovável, mas sim inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida de um ser humano no planeta Terra [8].

Assim, a energia irradiada pelo sol cobre uma faixa ampla do espectro eletromagnético, sendo que aproximadamente 80% da energia que chega a nossa atmosfera está em comprimentos de onda que vai do visível ao infravermelho. Esta energia alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos, e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos com conteúdo tecnológico produzido pela sociedade [10].

Além das tecnologias de aquecimento solar, geração de eletricidade e climatização de ambientes terem se desenvolvido bastante nas últimas décadas, o

avanço do aproveitamento fotovoltaico para geração de eletricidade fotovoltaica apresentou um intenso desenvolvimento que está resultando em um crescimento significativo da participação da energia solar na matriz energética mundial [10].

Dados fornecidos pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) mostram justamente este desenvolvimento com os resultados de eficiência celular fornecidos dentro de cada família de semicondutores, sendo estas: células multijunção, células de arsenieto de gálio de junção única, células de silício cristalino, tecnologias de filme fino e fotovoltaicos emergentes.

Na Figura 5, cerca de 28 subcategorias diferentes são indicadas na por símbolos coloridos distintos e seus desenvolvimentos mostrados ao longo das últimas 4 décadas [8]. O gráfico contém a eficiência e o símbolo atribuído a cada tecnologia com o nome da empresa ou grupo que fabricou o dispositivo.

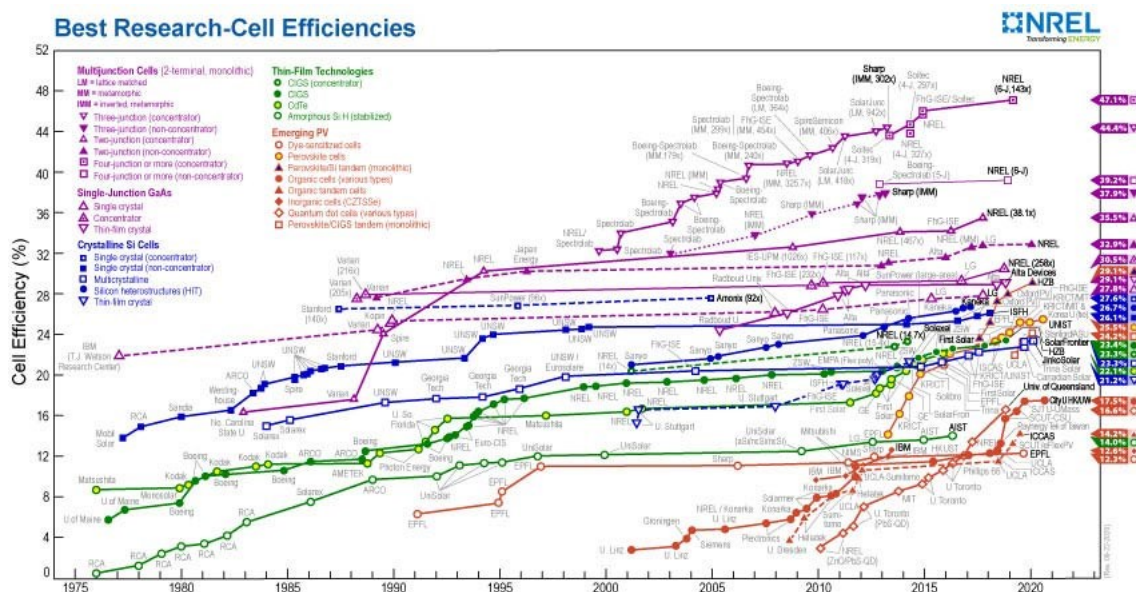


Figura 6: Gráfico de Células FV de Melhores Eficiências [8].

2.1.3. Vantagens e desvantagens

Os principais aspectos favoráveis ao sucesso são a alta viabilidade técnica da produção de energia devido aos altos níveis de irradiação do país; bom equilíbrio com a matriz energética brasileira, formada principalmente por usinas hidrelétricas (demandas sazonais atreladas aos períodos chuvosos). Quando há secas, a produção de hidroelétricas diminui e a produção de energia por meio da tecnologia PV aumenta; o aumento do número de empresas instalando sistemas fotovoltaicos e do número de

unidades MMDG (Micro e Minigeração Distribuída) no país; o sistema de compensação de energia aprovado pela ANEEL em 2012; e isenção de impostos para energia injetada na rede [4].

Em contrapartida, os aspectos impeditivos, que constituem as barreiras ao sucesso, estão associados a: a falta de produção nacional de módulos fotovoltaicos; logística cara e lenta; o custo dos sistemas e as dificuldades dos investidores em conseguir financiá-los. Essas barreiras podem ser superadas por meio de políticas de incentivo ao desenvolvimento do mercado de energia fotovoltaica. Assim, a principal barreira identificada foi a falta de incentivo político, o que gera uma relação de causa e efeito com outras barreiras [10].

2.2. Energia eólica

2.2.1. Potencial no Brasil

Na publicação da COPEL, o “Mapa do Potencial Eólico do Estado do Paraná” foi gerado a partir das medições efetuadas por 5 anos em 25 locais especialmente selecionados, em torres de 18m a 64m de altura. Além de revelar áreas de grande potencial eólico no interior do Paraná, o trabalho indicou um potencial de geração eólica de 5,8 TWh/ano no estado, utilizando-se apenas as áreas com velocidades médias anuais superiores a 6,5 m/s [11].

No final da década de 1990, com a instalação das primeiras usinas eólicas no Brasil e a aceleração mundial do aproveitamento eólico-elétrico em escala iniciaram-se as primeiras medições anemométricas específicas para estudos de viabilidade, com uso de torres de 30-50m e concentraram-se inicialmente nos Estados do Pará, Ceará, Paraná, de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul [11].

Já resultante dessas medições mais precisas, a Secretaria da Infra-Estrutura do Governo do Estado do Ceará publicou em 2001 o “Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará”, gerando mapas temáticos de velocidades médias anuais de vento apresentados na resolução de 500m, para as alturas de 50m e 70m. Destacaram-se as áreas de baixíssima rugosidade das dunas do litoral cearense, com velocidades médias anuais da ordem de 9m/s. A integração das áreas em software de

geoprocessamento revela um potencial aproveitável da ordem de 12,0 TWh na altura de 50m e de 51,9 TWh na altura de 70m, para ventos médios anuais superiores a 7 m/s. Assim, a região nordeste acaba sendo a mais privilegiada para o setor devido a maior constância climática e fatores de relevo para o vento [11].

Incluindo o fator da sazonalidade do potencial eólico no Brasil visto no mapa da Figura 7, a partir dos resultados das diversas medições do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, estimou-se um potencial disponível da ordem de 143,47 GW de potência instalável em todo o território brasileiro.

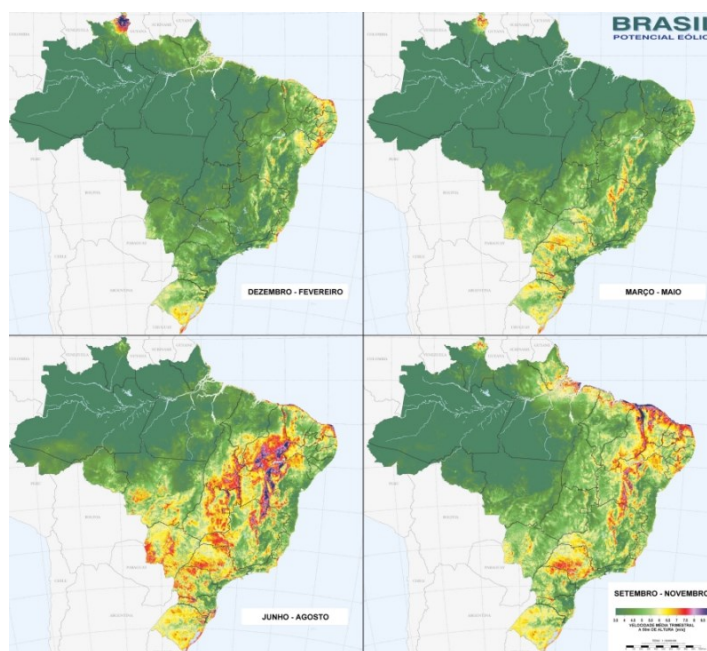


Figura 7: Mapas de Potencial Eólico Brasileiro Sazonal

2.2.2. Soluções tecnológicas

O principal problema ambiental inicial dos impactos das pás em pássaros praticamente desapareceu com as turbinas de grande porte e menores velocidades angulares dos rotores, se mostrando com um crescimento intenso na capacidade eólico-elétrica instalada [12].

Porém, na maioria das vezes que é citada a fonte de energia eólica, esta é realizada onshore. Um dos grandes desafios da energia eólica foi o aproveitamento da energia do vento offshore, uma vez que a estrutura da plataforma de apoio da torre é de elevado custo. Mesmo assim, de acordo com A. Silva [12], os resultados de um estudo do potencial eólico offshore brasileiro indicam que o seu potencial ambiental e

social de instalação é de 330,5 GW, o que corresponde a mais de 20 vezes a capacidade instalada de energia eólica onshore no Brasil.

2.2.3. Vantagens e desvantagens

Apesar dos últimos anos a demanda energética mundial ter crescido juntamente com a geração elétrica e o nível de emissões de CO₂, alguns países apresentam uma diminuição do nível de emissões devido ao desenvolvimento de energias renováveis (IEA, 2020), sendo que a energia eólica vem colaborando como uma fonte de energia principal para uma transição da matriz energética e elétrica mundial com menos emissões. Ela é responsável pela maior parte do crescimento das energias renováveis que cresce mais de 50 GW por ano desde 2014. Assim, no Brasil, o investimento na tecnologia é vantajoso principalmente nas regiões com maior potencial eólico, conforme visto na Figura 7.

As limitações da implementação da tecnologia no território brasileiro consistem principalmente na localização dos pontos de melhor potencial serem afastados dos centros urbanos, limitando a transmissão de energia elétrica. Além disso, o fator da intermitência, assim como na energia fotovoltaica, é uma grande ameaça à acuracidade de uma estimativa de geração em um certo intervalo temporal.

2.3. Hibridização com armazenamento

2.3.1. Configurações possíveis de hibridização

A discussão sobre a possibilidade de produção de energia com usinas que utilizem mais de uma fonte primária vem crescendo. Assim, as usinas híbridas entram em cena no Brasil, onde a questão ganhou impulso com o argumento de que a complementaridade entre determinados recursos, como eólico e solar, possibilitaria o melhor aproveitamento do sistema de transmissão existente e planejado [13].

A respeito da evolução da micro e minigeração distribuída, conforme a indicação do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, a próxima década deverá ser marcada pelo grande crescimento da MMGD, e serão necessárias alterações regulatórias no setor para a modernização do formato das tarifas de baixa tensão.

Diante destas incertezas, o PDE 2030 trabalha com dois cenários possíveis para a expansão do MMGD que atualmente indicam capacidade instalada de 17 a 25 GW em 2030. O investimento no setor deve continuar a ser atrativo, podendo oferecer taxas de retorno reais acima de 10% ao ano [23].

Assumindo que o nível de integração entre as fontes de energia primária é um parâmetro que varia para cada caso nos benefícios, impactos, barreiras à sua viabilização e possíveis ações para eliminar ou reduzir tais obstáculos, podem ser citados principalmente quatro tipologias. Estas são denominadas de acordo com a EPE de usinas adjacentes, associadas, híbridas e portfólios comerciais, como visto esquematicamente na Figura 8 [13].

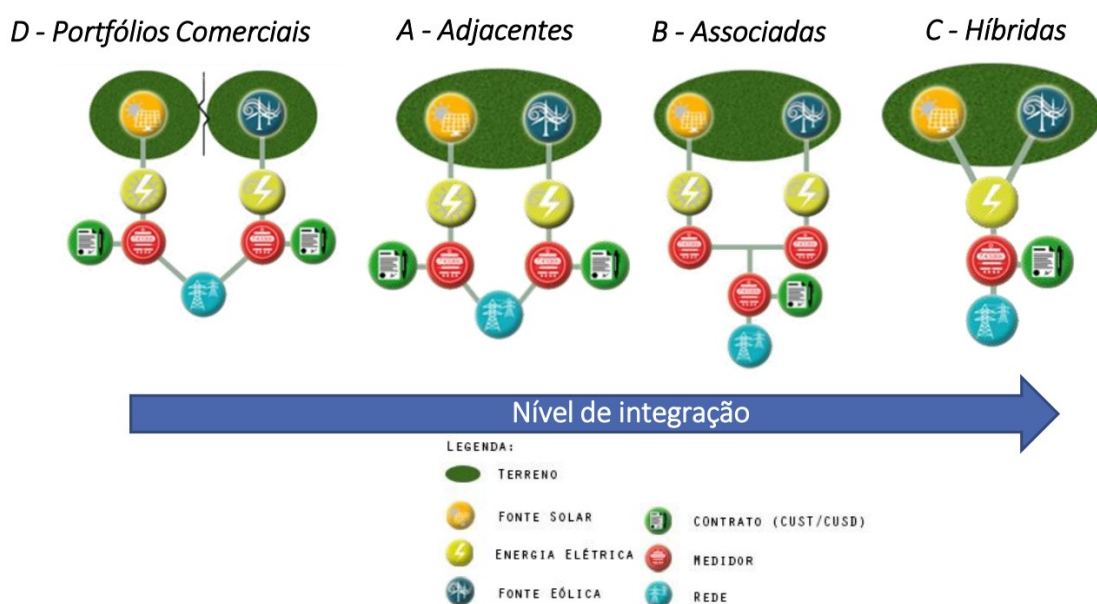


Figura 8: Possíveis Configurações de Hibridização (ANEEL 014/2019)

As usinas adjacentes são aquelas construídas próximas entre si, podendo inclusive utilizar o mesmo terreno e compartilhar instalações de interesse restrito. Esse arranjo pode proporcionar economia no custo de terreno, além de algumas sinergias de logística, construção e operação. Contudo, do ponto de vista do sistema, trata-se de duas usinas distintas, já que não há compartilhamento de equipamentos de geração. Assim, por essa definição, não são propriamente usinas híbridas. Esse tipo de arranjo já tem sido frequentemente empregado por parques eólicos, que se associam em complexos, podendo também incluir, por exemplo, novos empreendimentos fotovoltaicos.

Similares às adjacentes, as usinas associadas possuem um nível maior de integração: duas (ou mais) usinas de fontes energéticas que, além de estarem próximas (podendo utilizar o mesmo terreno), compartilham fisicamente e contratualmente a infraestrutura de conexão e acesso à Rede Básica ou de Distribuição. Uma vantagem além dos benefícios já citados e incluídos desta configuração é a contratação de capacidade do uso da rede menor que da soma das suas potências individuais, o que traria uma economia com tarifas de uso da rede. Por conta disso, possíveis desperdícios de energia podem ocorrer, sendo denominados curtailments.

As usinas híbridas *strictu sensu* são aquelas em que as fontes se combinam ainda no processo de produção de energia elétrica, não sendo possível sequer distinguir qual fonte primária foi responsável por qual parte da geração de energia elétrica. Portanto, nessa tipologia o nível de integração das fontes é ainda maior, pois além de evitar curtailments possibilita benefícios similares aos dos demais arranjos com uma economia potencialmente maior.

Por último, a configuração de portfólios comerciais não afeta a contratação do uso da rede, que deve ser feito individualmente para cada usina, podendo ter diferentes fontes sendo diferente das categorias anteriores por não envolver, necessariamente, qualquer proximidade física ou compartilhamento de equipamentos.

2.3.2. Solar-eólico com usina hidráulica reversa

Para este estudo de caso, será analisada a configuração de usinas associadas solar eólica com um reaproveitamento da energia que não pode ser escoada por meio de uma usina hidráulica reversa, estocando a energia de maneira que não haja curtailments. Porém, para entrarmos em maior detalhamento de como é realizada a modelagem numérica e metodologia do sistema associado, torna-se importante discorrer sobre o que é um sistema solar-eólico com usina hidráulica reversa, ou seja, com um sistema de bombeamento de água isolado a um reservatório conjugado com uma turbina hidráulica.

Os sistemas de bombeamento de água isolados podem usar geradores fotovoltaicos (GFV), geradores eólicos (GE) ou ambos como fontes de energia. Quando essas fontes são utilizadas em conjunto, há maior disponibilidade de energia,

pois são sazonais e podem se complementar diariamente. Nestes sistemas, um banco de baterias (BB) é usualmente usado para conexão paralela dos geradores GFV–GE e como um dispositivo de armazenamento de energia [14]. No entanto, o BB é um componente oneroso que pode exigir custo e espaço elevados na instalação do sistema, tendo vida útil curta e causando danos ao meio ambiente quando descartado indevidamente.

A integração dos sistemas GFV e GE se dão por meio de um conversor de múltiplos inputs DC-DC (MIC) [15], permitindo uma operação individual dos sistemas. Desde que o MIC permita a conexão de diferentes fontes de energia, esta pode ser armazenada na forma de energia potencial gravitacional em sistemas de bombeamento de água isolados. Assim, no presente trabalho é justamente proposto este caso de um pequeno sistema híbrido fotovoltaico-eólico de bombeamento de água (HPWPS) sem BB, no qual GFV–GE serão conectados através de um MIC, cuja saída vai diretamente para uma bomba-motor DC (DC-MP), todos modelados e analisados mais a diante. Este sistema foi pensado para ser instalado e testado em regiões isoladas amazônicas que não são atendidas por rede elétrica convencional [16]. O HPWPS proposto é bastante prático, porque neste tipo de sistema as variações de tensão e corrente causadas pela intermitência das fontes de energia e ausência de BB não são um problema crítico, uma vez que o DC-MP pode aceitar essas variações (desde que sob os valores nominais de tensão e corrente da especificação do DC-MP em prática). A Figura a seguir mostra o sistema proposto isolado.

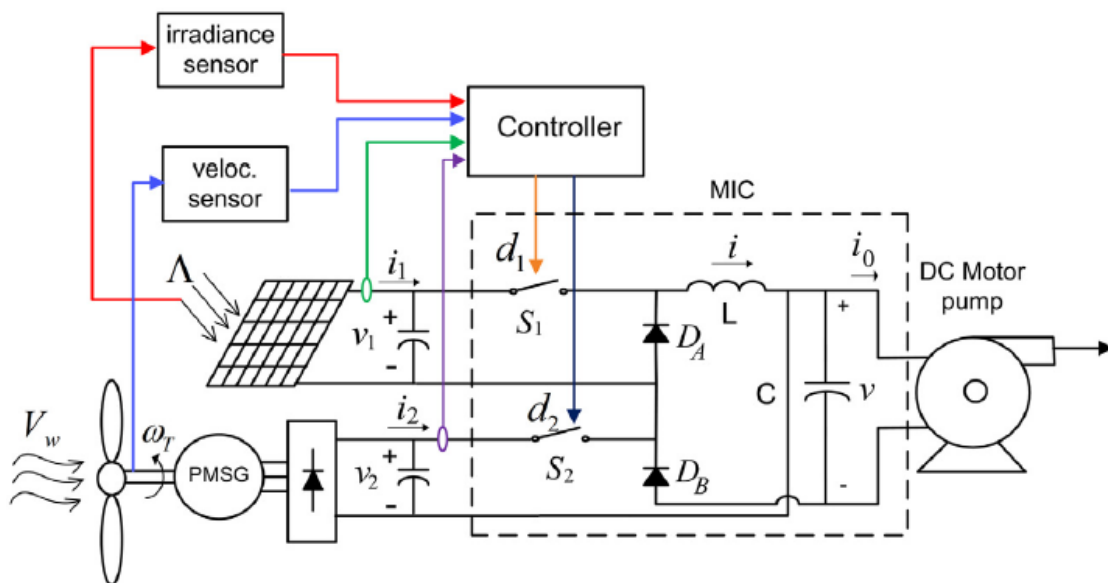


Figura 9: Sistema Isolado HPWPS [16]

3. MODELAGEM NUMÉRICA

Uma descrição sucinta da modelagem do sistema HPWPS pode ser realizada para cada um de seus subsistemas isolado, e assim, com seus devidos equacionamentos baseados na literatura, tornou-se possível implementar a metodologia e análises propostas para este projeto.

3.1. Modelagem do sistema fotovoltaico

Para este dimensionamento foram levadas em conta equações da literatura para modelar painéis fotovoltaicos, cuja formação é composta por combinações de células em série e em paralelo produzindo valores de corrente e tensão desejáveis. A performance desse sistema demonstra um comportamento não linear para as curvas características de corrente-voltagem (I–V) [17]. A curva característica I–V pode ser expressa como:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_{cell}} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Nesta equação, a tensão V é a tensão do terminal (V), I_L é a corrente da luz (A), I_0 é a corrente reversa de saturação (A), γ é o fator de forma, R_s a resistência equivalente em série (Ω), q a carga de um elétron e k a constante de Boltzmann.

A corrente provocada pela luz depende da radiação solar e da temperatura:

$$I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (I_{L,ref} + k_t (T_{cell} - T_{ref})) \quad (2)$$

Onde G é a radiação solar (W/m^2), G_{ref} é a radiação solar nas condições de projeto, $I_{L,ref}$ (A) é calculada baseada nos dados coletados para curto-circuito e ponto de máxima corrente, k_t é o coeficiente de temperatura fornecido para curto-circuito ($^\circ\text{C}$) e T_{ref} (K) é a temperatura de referência utilizada do fornecedor.

O desempenho do sistema fotovoltaico é afetado pela temperatura ambiente, e é considerada na modelagem por meio da Eq. (2), em que a temperatura da célula é dada em função da temperatura ambiente. A velocidade do vento também afeta a temperatura da célula e é contabilizada para na modelagem (ver Eq. (3)). A

temperatura da célula PV T_{cell} é determinada pela Eq. (3), em função da temperatura ambiente T_0 , velocidade do vento V_{vento} e irradiância total G :

$$T_{cell} = 0,943 T_0 + 0,028 G - 1,528 V_{vento} + 4,3 \quad (3)$$

Assumindo o modelo de diodo único [18], cuja modelagem é amplamente mais usada devida simplicidade, pode-se obter a corrente reversa do diodo I_0 , dada que a energia de banda de referência do silício seja 1,121 eV:

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_{cell}}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{q}{k} \left(\frac{1.121}{T_{ref}} - \frac{E_{bg}}{T_{cell}} \right) \right) * \exp \left(- \frac{qV_{oc}}{kyT_{ref}} \right) \quad (4)$$

Na qual o termo y é o fator de forma, que mensura as imperfeições das células e é dado pelo produto de correção a pelo número de células em série NCS e o número de módulos em série NS . A energia de célula do material da célula E_{bg} é dada como:

$$E_{bg} = 1,121 [1 - 0,0002677 * (T_{cell} - T_{ref})] \quad (5)$$

De acordo com estes equacionamentos, uma simulação foi realizada para encontrar os pontos de máxima potência do sistema para o par I–V nas Figuras a seguir, encontrando em MPP os valores de potência de 246,85 W, de corrente de 5,65 A e de voltagem de 43,7 V, visto que a voltagem de circuito aberto foi considerada como 47.7 V.

Tabela 1: Parâmetros do módulo FV TitanS6_60 a 25°C e 1000 W/m²

Parâmetro	Valor
Potência máxima (MPP) P_{mvp}	215,01 W
Voltagem em MPP V_{mvp}	28,9 V
Corrente em MPP I_{mvp}	7,44 A
Voltagem de curto-circuito V_{sc}	37 V
Coeficiente de temperatura k_t	3,184 mA/°C
Número de células em série NCS	60

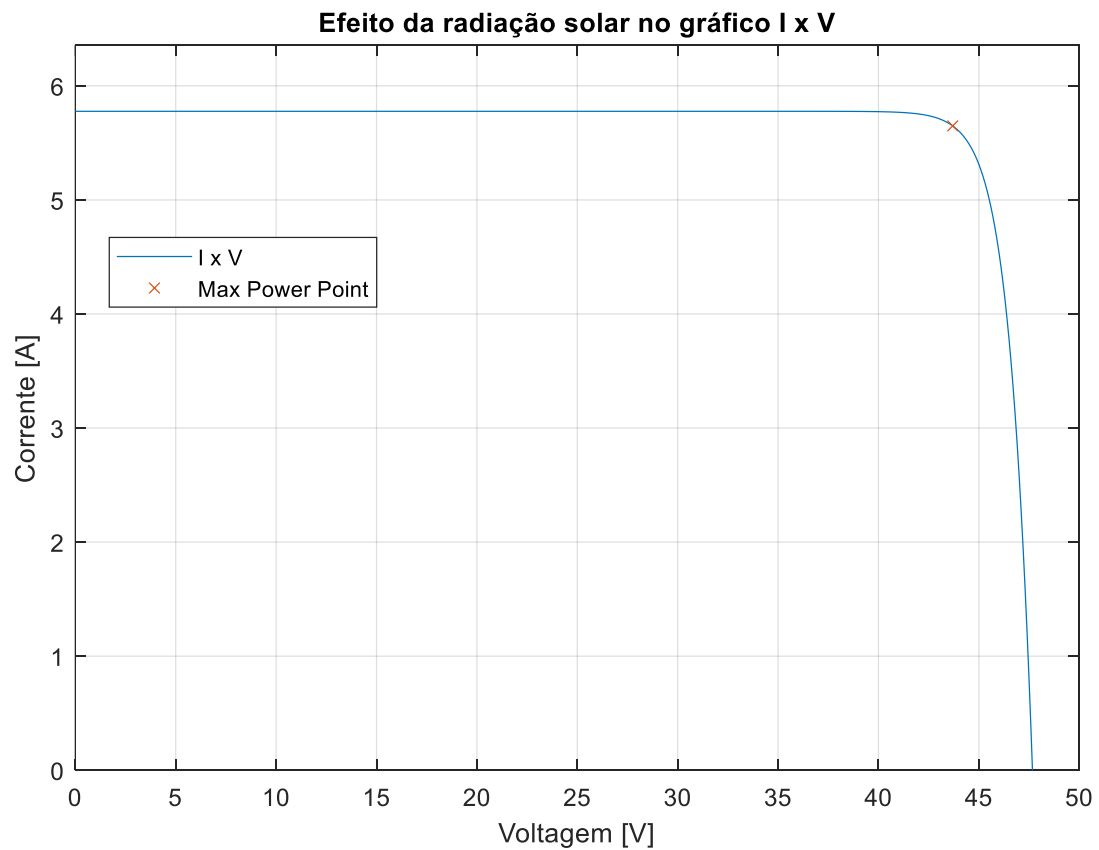


Figura 10: Curva característica I-V do sistema FV.

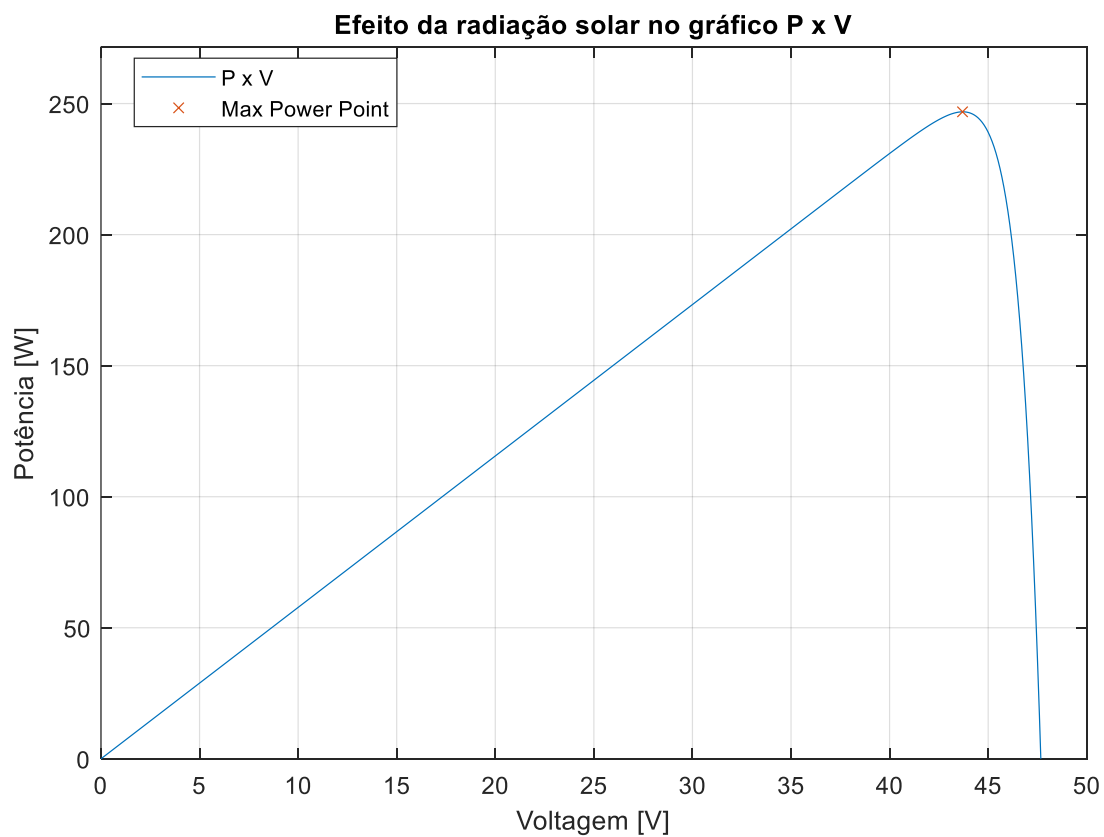


Figura 11: Curva característica P-V do sistema FV para $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$

3.2. Modelagem do sistema eólico

O modelo da turbina eólica projetado consiste na extração da energia cinética do vento através das pás do rotor, gerando sustentação e exercendo torque aerodinâmico que aciona um gerador elétrico. A potência gerada pela turbina eólica pode ser obtida por [19]:

$$P_w = \frac{1}{2} \pi \rho C_p(TSR, \phi) R_t^2 V_w^3 \quad (6)$$

Onde R (m) é para raio do rotor da turbina, V_w (m/s) é a velocidade do vento, ρ (kg/m³) é a densidade do ar, C_p é o coeficiente de potência, TSR é a razão de velocidades na ponta das pás (*tip speed ratio*) e ϕ (rad) é o ângulo de arfagem do eixo do rotor. O TSR é dado por:

$$TSR = \frac{\Omega R}{V_w} \quad (7)$$

Em que Ω é a velocidade angular da turbina. O coeficiente de potência da turbina $C_p(TSR, \phi)$ é não-linear e dado por [19]:

$$C_p(TSR, \phi) = 0,22 \left(\frac{116}{\beta} - 0,4\phi - 5 \right) \exp \left(-\frac{12,5}{\beta} \right) \quad (8)$$

Sendo que o ângulo nominal de incidência do vento (*stagger angle*) pode ser obtido por [19]:

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{(TSR + 0,08\phi)} - \frac{1}{\frac{0,035}{\phi^3 + 1}}} \quad (9)$$

De acordo com estes equacionamentos, foi modelado o sistema de acordo com uma análise do coeficiente de potência, variando o ângulo de arfagem do eixo:

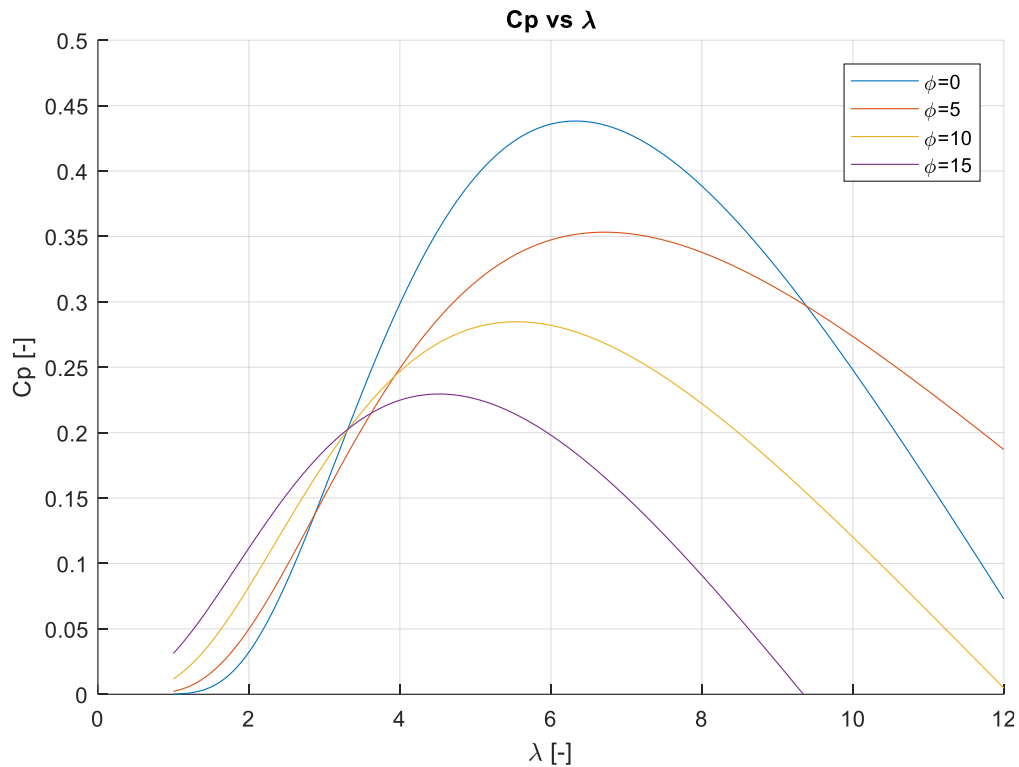


Figura 12: Curva característica do coeficiente de potência em função do TSR para diferentes ϕ

Também, foi possível observar o comportamento da potência mecânica em escala gerada em função da velocidade angular do rotor da turbina para diferentes velocidades do vento em configuração de C_p ótimos para cada velocidade do vento.

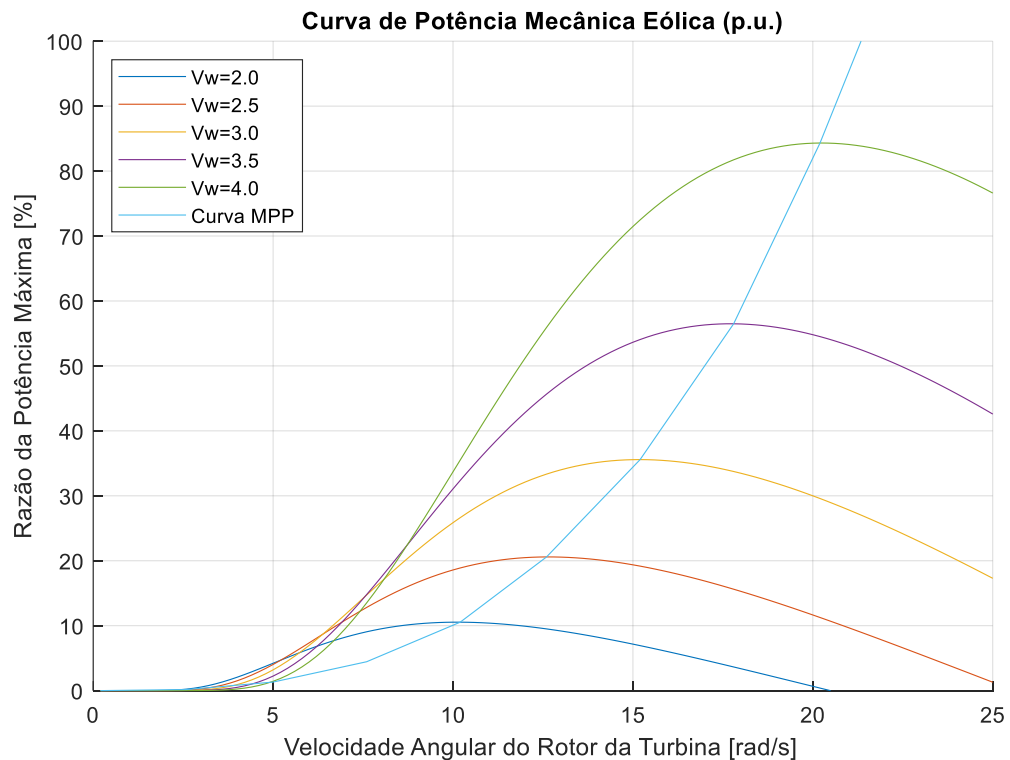


Figura 13: Curva característica potência mecânica adimensional vs velocidade angular do rotor

Assim, a curva de potência emulando um gerador eólico real Bergey BWC XL.1, cujas especificações podem ser vistas na Tabela abaixo foi encontrada a seguir:

Tabela 2: Parâmetros do conjunto Gerador Eólico Bergey BWC XL.1

Parâmetro	Valor
Diâmetro do Rotor D	2,5 m
Vento de Start-Up	3,0 m/s
Velocidade de vento nominal	11 m/s
Voltagem	24 V
Potência nominal P_{rated}	1000 W
Potência máxima P_{max}	1300 W
kWh por mês a 5,4 m/s de vento médio	17,5 – 295 kWh/mês

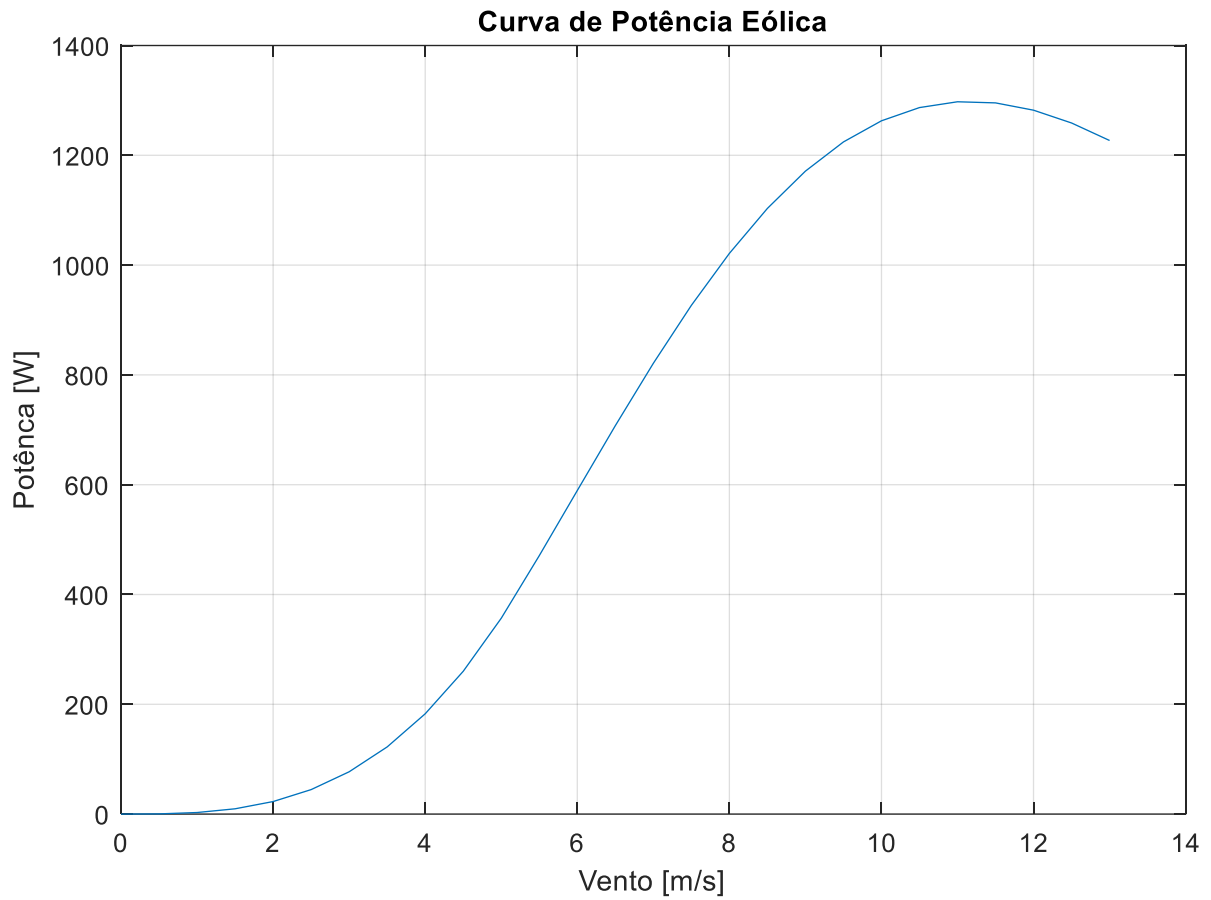


Figura 14: Curva de potência simulada do Gerador Eólico Bergey BWC XL.1

3.3. Modelagem da usina hidráulica reversa

O modelo da usina hidráulica reversa tem como fluido de trabalho a água e leva em consideração o sistema conjugado da bomba motor, reservatório e uma turbina hidráulica. A bomba centrífuga, por ser uma bomba rotor-dinâmica, pode ser facilmente simulada por [18]:

$$\eta = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_m} \quad (10)$$

Onde ρ (kg/m³) é a densidade da água, H (m) o head operacional, g (m/s²) a aceleração da gravidade, Q (m³/s) a vazão do fluido, e P (W) a potência de entrada na bomba.

Dessa forma, dada uma potência constante de entrada na bomba é possível manipular a equação e obter o parâmetro da vazão Q e a velocidade de descida dh da superfície do reservatório.

$$Q_p = \frac{\eta_p P_m}{\rho_{ag} g H} \cdot 3600 \quad [m^3/h] \quad (11)$$

$$dh = \frac{4Q_p}{\pi D^2} \quad [m/h] \quad (12)$$

Sendo que, D é o diâmetro do reservatório de geometria cilíndrica. Com isso, é possível calcular uma nova altura devido a vazão por meio de:

$$h_i = h_{i-1} + dh(t_i - t_{i-1}) \quad (13)$$

Para uma simulação de 3 horas, foi possível observar o comportamento da curva da altura do reservatório e da curva de vazão em função do tempo, para um diâmetro fixo. Nesta parte não foi considerada a altura máxima para parar o enchimento, e sim apenas uma verificação qualitativa da modelagem do sistema.

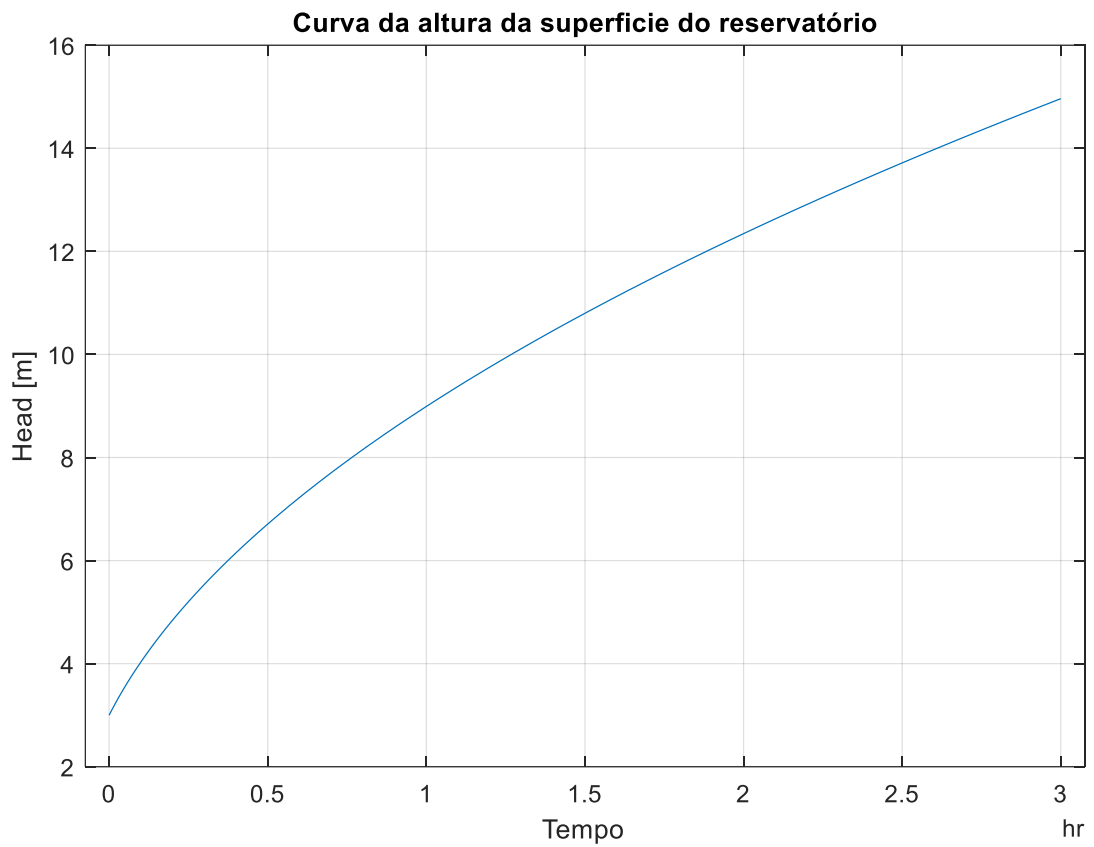


Figura 15: Curva característica do head durante o enchimento

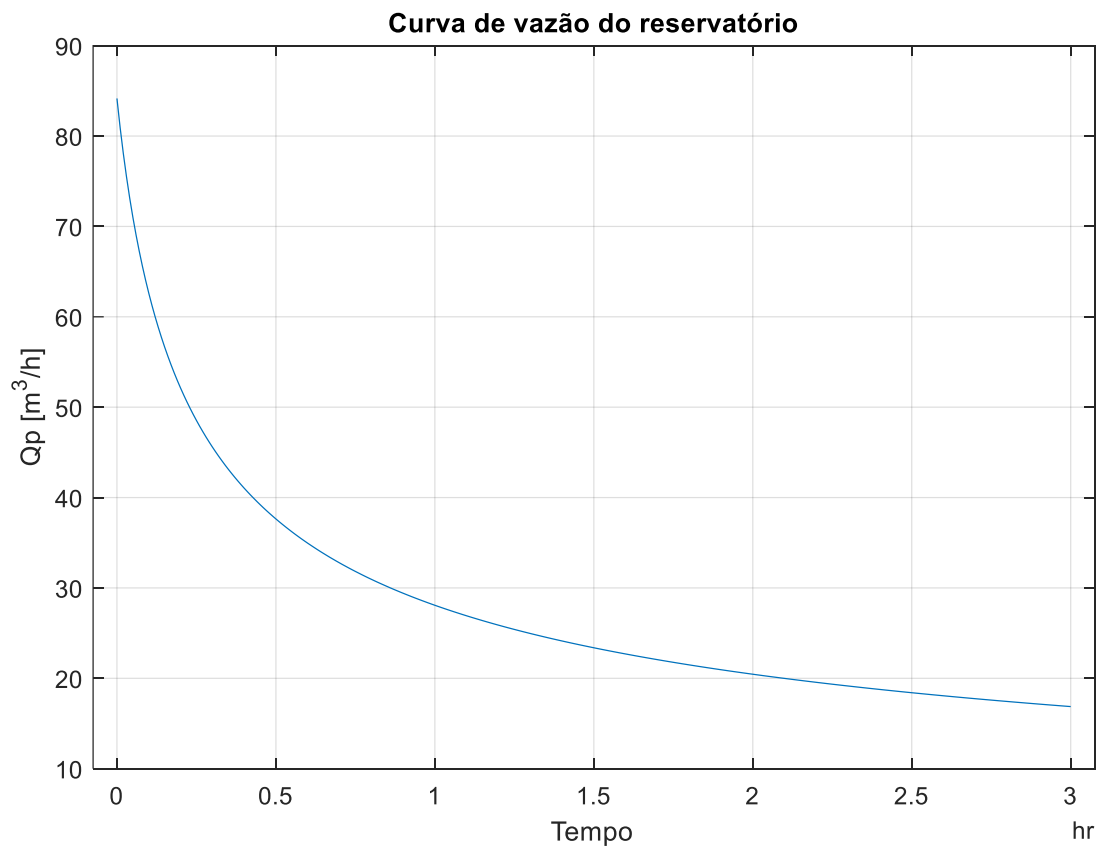


Figura 16: Curva característica da vazão durante o enchimento

Para a modelagem da turbina hidráulica, foi realizada a manipulação da mesma Eq. (10) para obtermos a potência hidráulica:

$$P_t = \eta_t \rho_{ag} g H \frac{Q_p}{3600} \quad (14)$$

Assim, é possível verificar o comportamento da curva de potência hidráulica gerada com o esvaziamento do reservatório nas Figuras abaixo.

Alguns valores utilizados para a modelagem do sistema são:

Tabela 3: Parâmetros da usina hidráulica reversa

Parâmetro	Valor
Eficiência da bomba	86 %
Eficiência da turbina	70 %
Diâmetro do reservatório	3 m
Tempo de enchimento dos reservatórios	3 h
Altura de elevação do reservatório	30 m

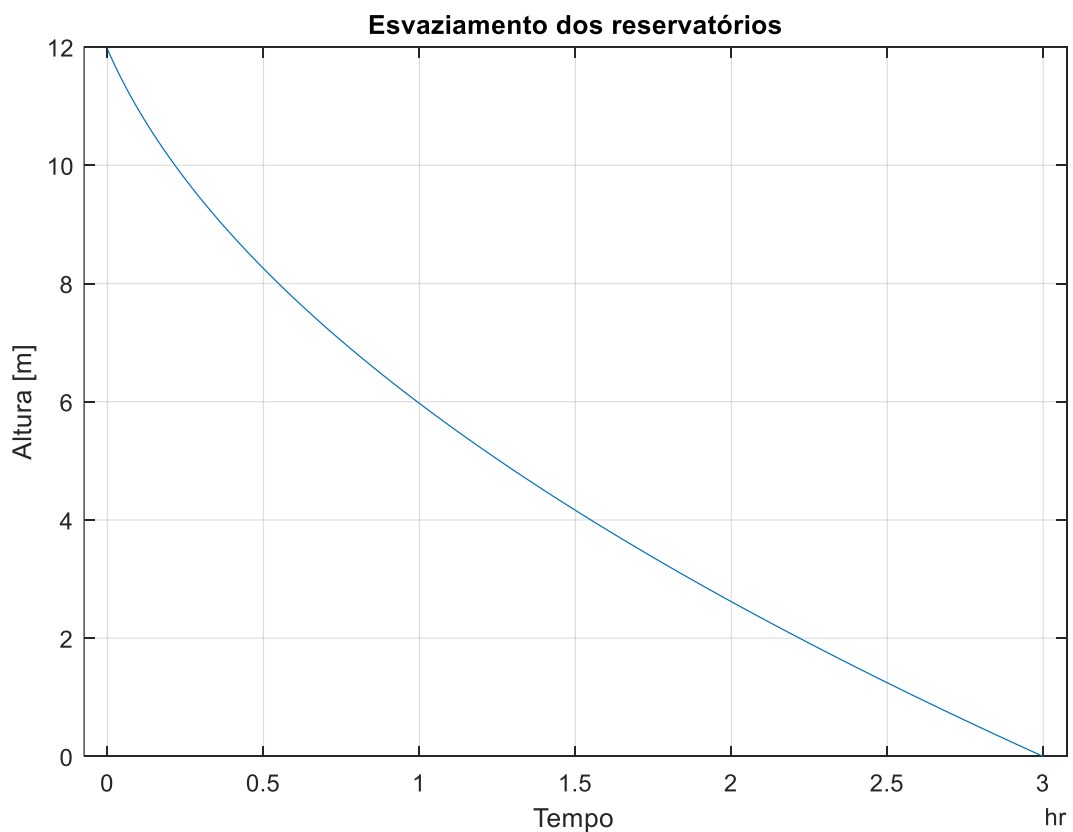


Figura 17: Curva de esvaziamento dos reservatórios

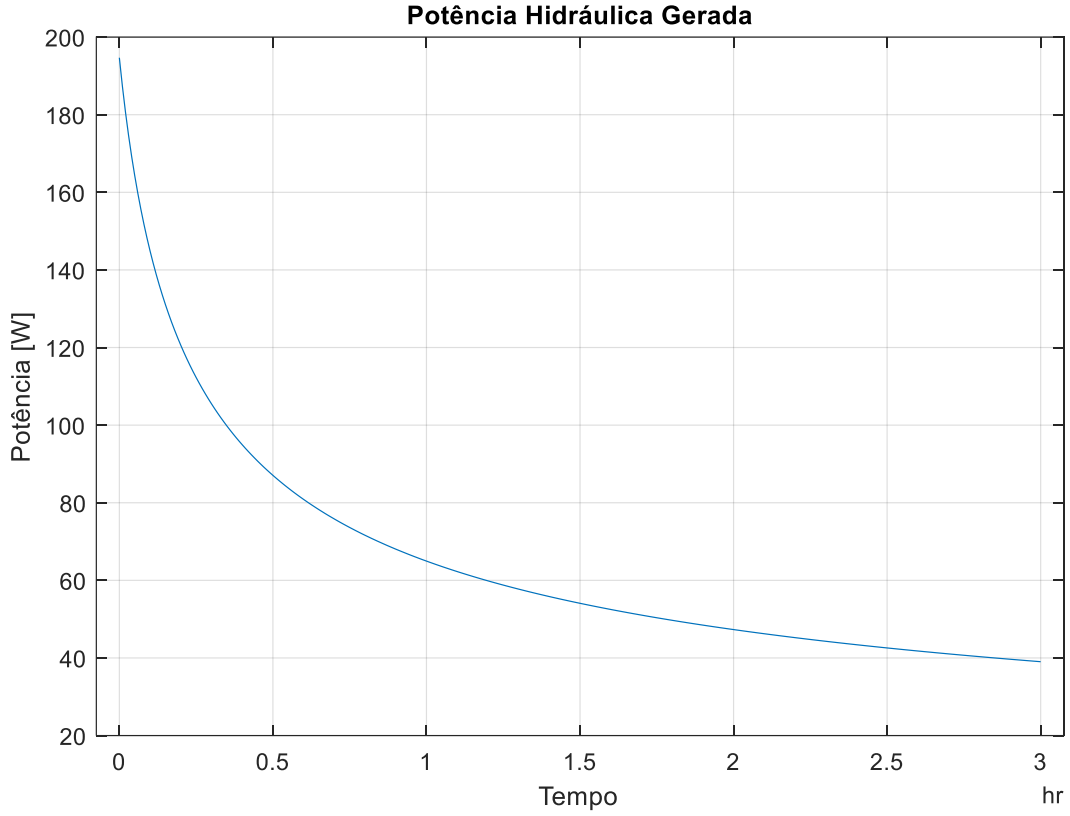


Figura 18: Curva de potência gerada no esvaziamento dos reservatórios

3.4. Análise de eficiências termodinâmica e exergética

Ambas as eficiências termodinâmicas e exergética são aplicadas ao sistema fotovoltaico. Como a potência de saída do módulo FV é $I \times V$ e baseada na curva característica não linear da Eq.(1), existe um ponto de máxima potência que pode ser obtida, como já mostrado na Figura 10. Assim, o controle do sistema FV é realizado para que o mesmo opere em pontos de máxima potência (MPP)

Com isso, as eficiências termodinâmicas e exergéticas podem ser definidas a seguir [21]:

$$\eta_{FV,max} = \frac{P_{FV,mpp}}{\dot{E}n_{solar}} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{G \times A_{cell}} \quad (15)$$

$$\psi_{FV,max} = \frac{P_{FV,mpp}}{\dot{E}x_{solar}} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{G \times A_{cell} \times \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_{sun}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)^4\right)} \quad (16)$$

3.5. Análise econômica

Após disponibilização do dimensionamento efetuado, é realizada uma análise do investimento no projeto proposto, para estudar a viabilidade financeira do projeto.

O método do valor presente líquido VPL tem por finalidade calcular o valor presente considerando o impacto de eventos futuros associados a uma alternativa de investimento, medindo o valor presente dos fluxos de caixa gerados pelo projeto ao longo de sua vida útil. Não existindo restrição de capital, argumenta-se que esse critério leva à escolha ótima, pois maximiza o valor de retorno.

A expressão que define o VPL é a seguinte [22]:

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (17)$$

Sendo que o I_0 é o investimento inicial, FC é o fluxo de caixa do t -ésimo período, e i é o custo de capital. O critério de decisão é do projeto ser economicamente viável se o VPL é maior que zero.

Outra forma é saber o tempo de recuperação do investimento, conhecido como o método do payback descontado. Este, por sua vez, consiste em determinar o valor no tempo T_p na seguinte equação obtida pela manipulação da equação do VPL [22]:

$$I_0 = \sum_{t=1}^{T_p} \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (18)$$

4. METODOLOGIA

Tendo como objetivo final deste estudo de caso a análise da configuração de usinas associadas solar–eólica com um armazenamento da energia excedente por meio de uma usina hidráulica reversa, foi dimensionado o sistema para que evite o desperdício da energia de maneira que não haja curtailments e diminua os picos de demanda de energia causados pela demanda excessiva de energia em certos horários do dia.

Assim, a partir da amostra de dados coletados por hora durante um ano na Estação de Dados da PUC-Rio em Xerém de radiação solar (kJ/m^2), temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e velocidade do vento (m/s) e da modelagem numérica no software MATLAB com equacionamentos já detalhados, foi possível gerar resultados para um possível dimensionamento do sistema (campo solar e eólico) simplificando a série histórica de um ano para um dia “típico”, para que seja comparado com valores médios da demanda diária de energia residencial.

Além da modelagem termodinâmica que levou em conta análises globais de eficiência energética e exergética, também foi realizada, por fim, uma modelagem econômica do problema para verificação da viabilidade do possível projeto de dimensionamento com os dados usados.

A demanda de energia média residencial normalizada foi o ponto de partida para o estudo a seguir:

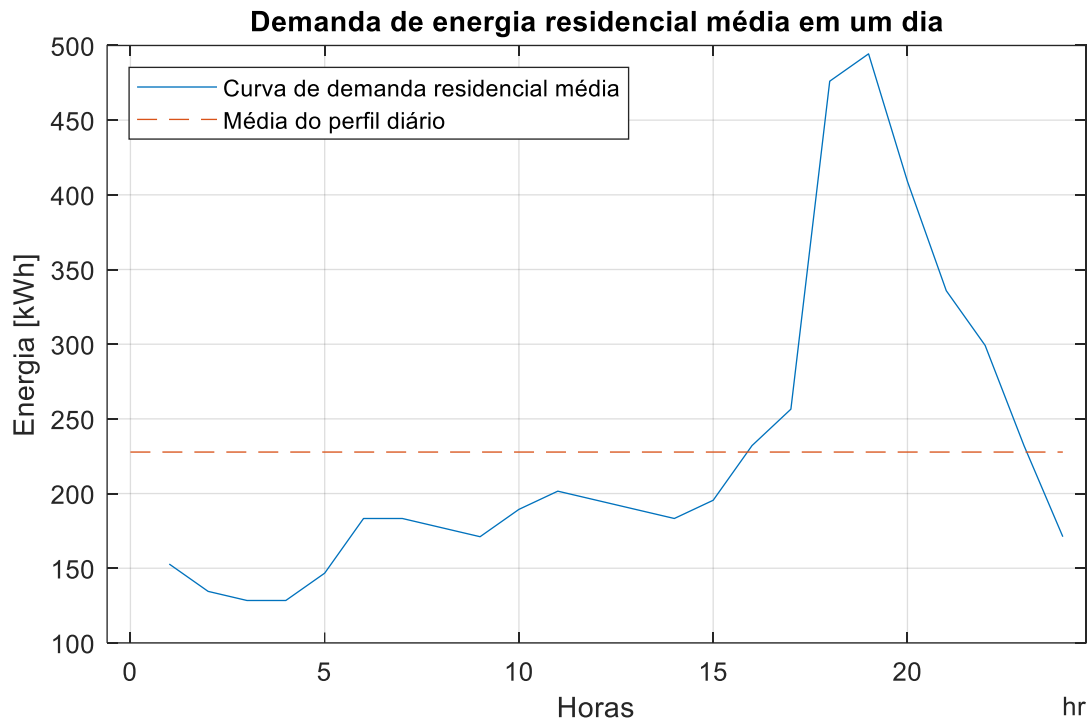


Figura 19: Demanda média diária de energia por residência [20]

4.1. Sistema fotovoltaico

A implementação dos equacionamentos discorridos na seção anterior permitiu o dimensionamento do sistema fotovoltaico de acordo com referências de painéis fotovoltaicos estudados do mercado, como por exemplo o painel da TitanS6_60.

Dada a série histórica da radiação da estação de dados vista na Figura abaixo, foi possível parametrizar a curva da potência gerada de acordo com a demanda e assim achar uma quantidade ideal por casa de módulos fotovoltaicos.

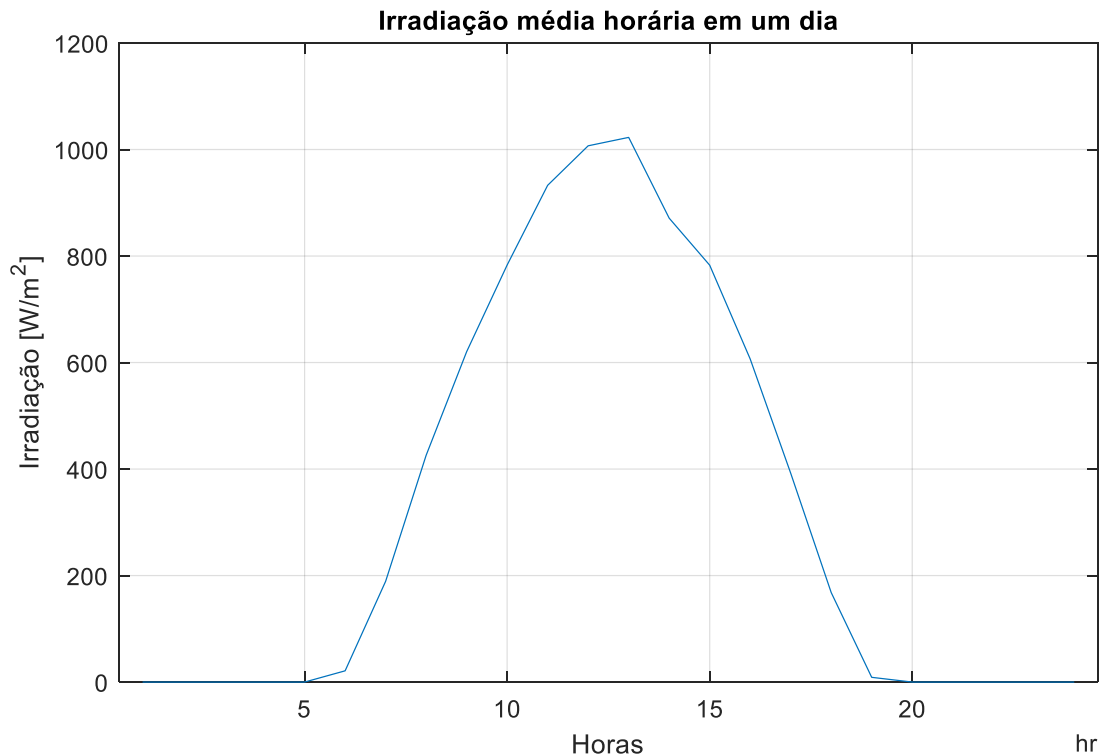


Figura 20: Irradiação média durante um dia da série histórica

4.2. Sistema eólico

Dado o perfil da velocidade do vento durante o ano, foi possível parametrizar a curva para um valor médio móvel de velocidade do vento, como pode ser visto na Figura 21 abaixo.

Como a velocidade do vento foi 97% dos samples maiores que a velocidade de vento de start-up da turbina de referência, foi considerada a curva inteira para os cálculos da modelagem de dimensionamento, e assim como a irradiação, usado um valor médio dos valores para um dia típico, simplificando a simulação.

O objetivo desta simplificação tem em vista usar valores médios para o ano, e assim comparar mais adiante com a demanda média mensal anual disponibilizada em [20].

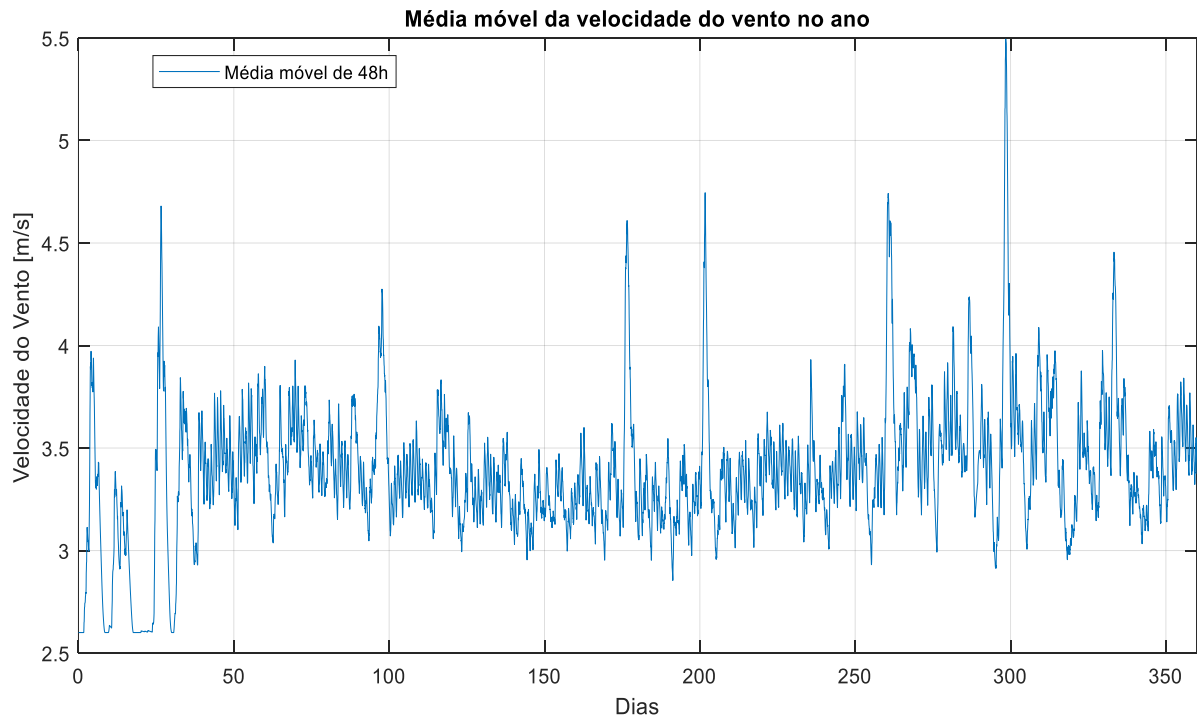


Figura 21: Média móvel da velocidade do vento no ano

4.3. Método para análise econômica

O procedimento de coleção de dados para montar o sistema proposto foi montado considerando o custo individual de itens similares no mercado. Assim, foi visto que o investimento no sistema total seria bastante elevado, sendo de mais de R\$10.000,00 apenas um reservatório de 20.000L da FortLev, mais aproximadamente R\$600,00 por módulo fotovoltaico e em torno de \$8.000,00 a turbina eólica em estudo proposta.

Assim, com a Eq. (18), estes valores somados iriam compor o parâmetro I_o , e o fluxo de caixa descontado seria a economia de energia, que seria o produto de seu custo R\$0,80/kWh pela geração de energia do sistema. O custo de capital i utilizados seria o valor fixo da taxa Selic, sendo taxa de juros livre de risco, não assumindo o possível aumento ou diminuição da mesma para os próximos anos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por vias da análise econômica com dados atualizados e aplicados ao caso brasileiro, esperava-se o desenvolvimento de um simulador bem-sucedido para avaliar o potencial do tipo de instalação em análise e identificar os principais gargalos que impediriam que a implementação do projeto tenha uma demanda satisfatória para a manutenção do projeto e possa ser uma solução para produtores de MMGD.

O comportamento do sistema integrado solar-eólico foi obtido de acordo com o esperado, e pode ser observado nas figuras a seguir. A potência elétrica solar gerada ao longo do dia possui o mesmo perfil que o da radiação solar em um dia típico de acordo com os dados utilizados. O conjunto de 2 módulos obtém um valor máximo de 505.4 W, para a série histórica da radiação da Figura 20. A gráfico da potência elétrica solar gerada sem bombeamento pode ser visualizada na Figura 22, o que por mês forneceria em média 80,4 kWh.

5.1. Resultados do subsistema fotovoltaico

No sistema fotovoltaico isolado, e sem bombeamento, suprimindo parte da demanda residencial, é possível observar o comportamento do saldo de energia em rápido crescimento atingindo um pico entre 15-18h atingindo um pico de demanda em 19h. Este gráfico é chamado de Duck Curve, e com este estudo foi possível simulá-lo obtendo o gráfico da Figura 23.

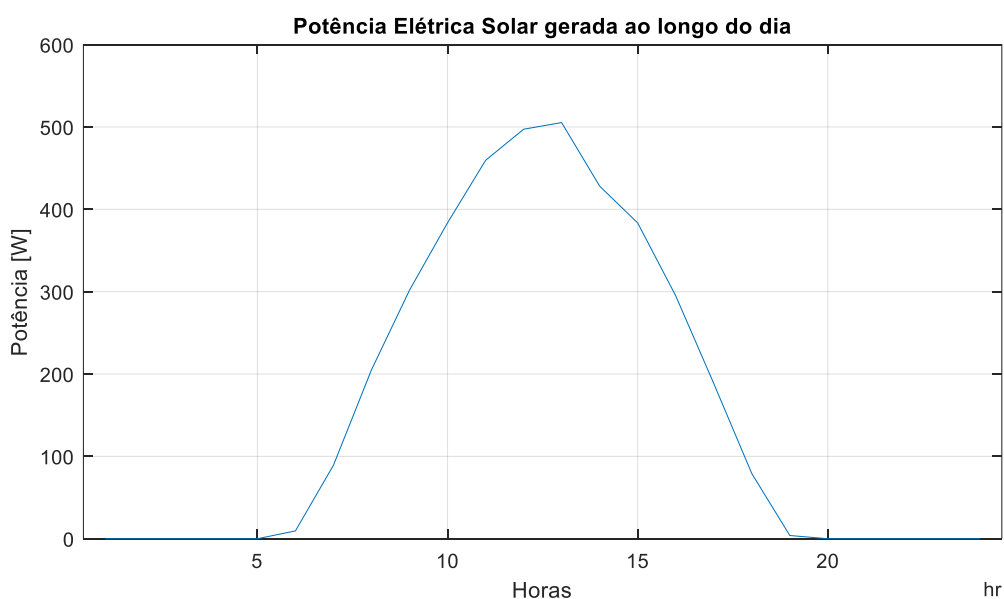


Figura 22: Gráfico da potência elétrica solar em um dia típico no ano.

O gráfico da Figura 23 mostra um problema muito atual no mercado de energia cada vez mais renovável, e aponta para a motivação do presente projeto como uma possível solução. Nele, considerando apenas o sistema fotovoltaico, é possível observar um intervalo de tempo de sobre-geração de energia entre 8-16h, que poderia ser utilizado para alimentar a demanda no seu pico, equilibrando mais a curva.

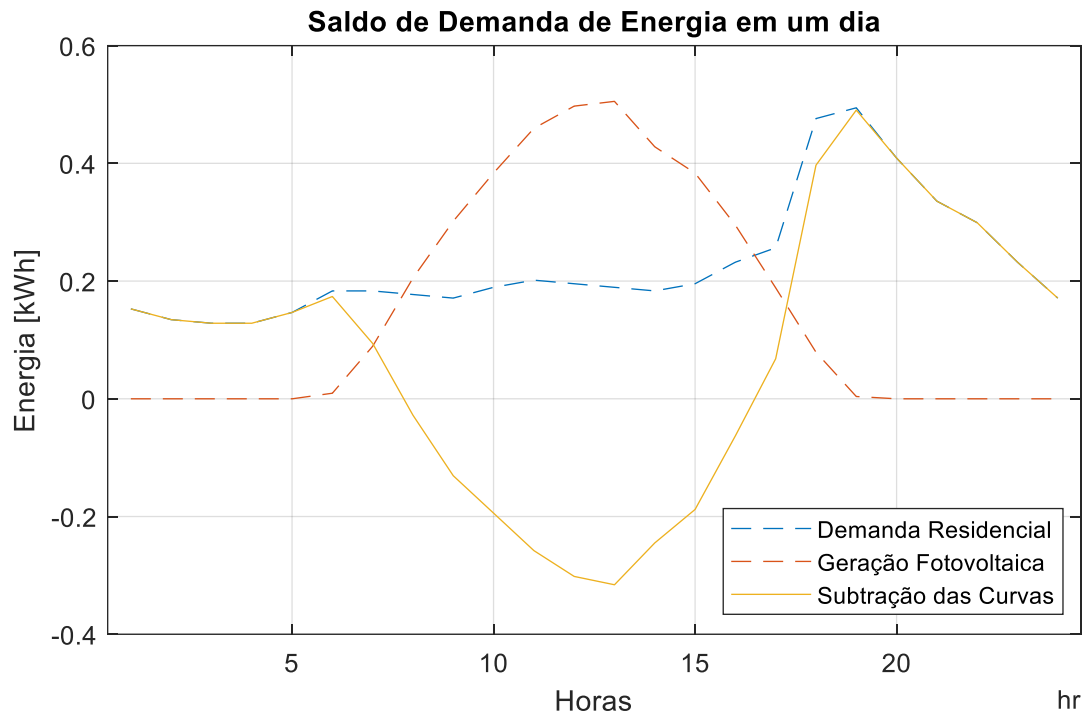


Figura 23: Duck curve no saldo de energia sem bombeamento

Assim, na Figura 23, a superposição das curvas apresenta os valores resultantes da subtração da demanda de energia média mensal de uma residência pela geração de energia fotovoltaica durante um dia.

5.2. Resultados dos subsistemas eólico e fotovoltaico

A modelagem do sistema eólico foi capaz de gerar os resultados vistos na Figura 24 em um ano, o que por mês forneceria em média 96.6 kWh.

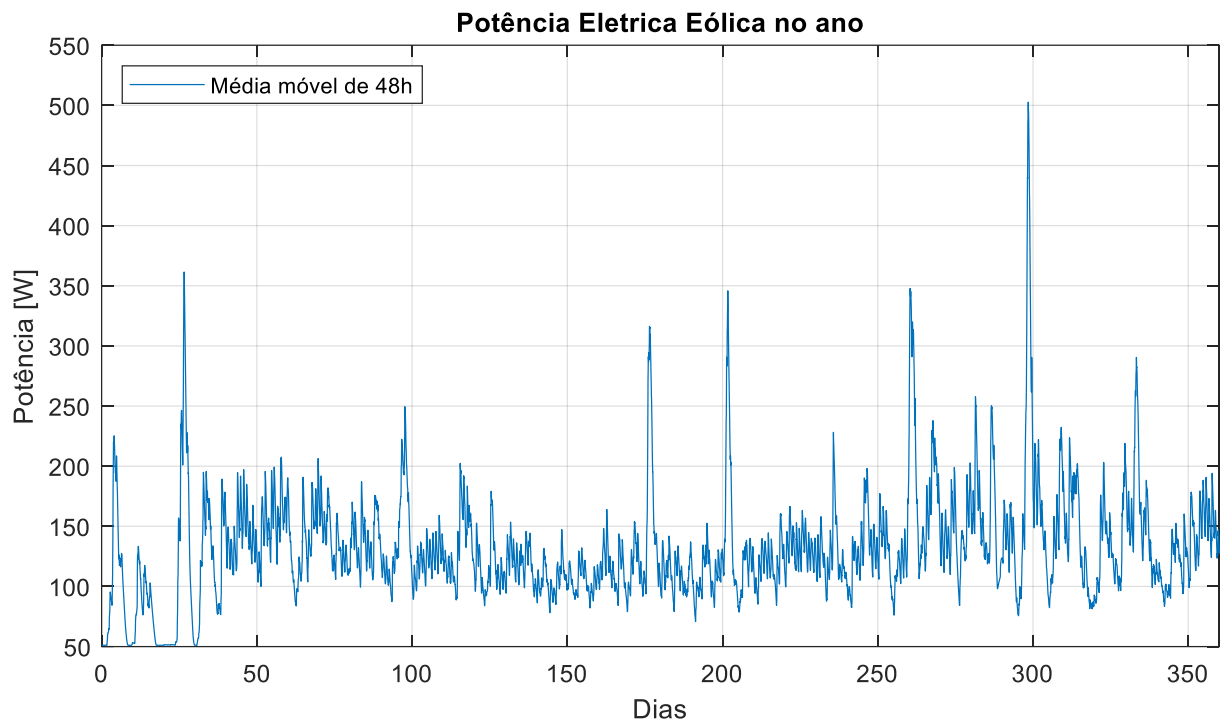


Figura 24: Gráfico da média móvel da potência elétrica eólica gerada no ano

Considerando o mesmo dia típico da Figura 23, foi realizada a superposição das curvas de potência geradas do sistema fotovoltaico e eólico, obtendo assim o gráfico a seguir. Assim, em um mês seria capaz de disponibilizar um total de 177 kWh, sendo maior que a demanda mensal média de uma casa (164 kWh) [20].

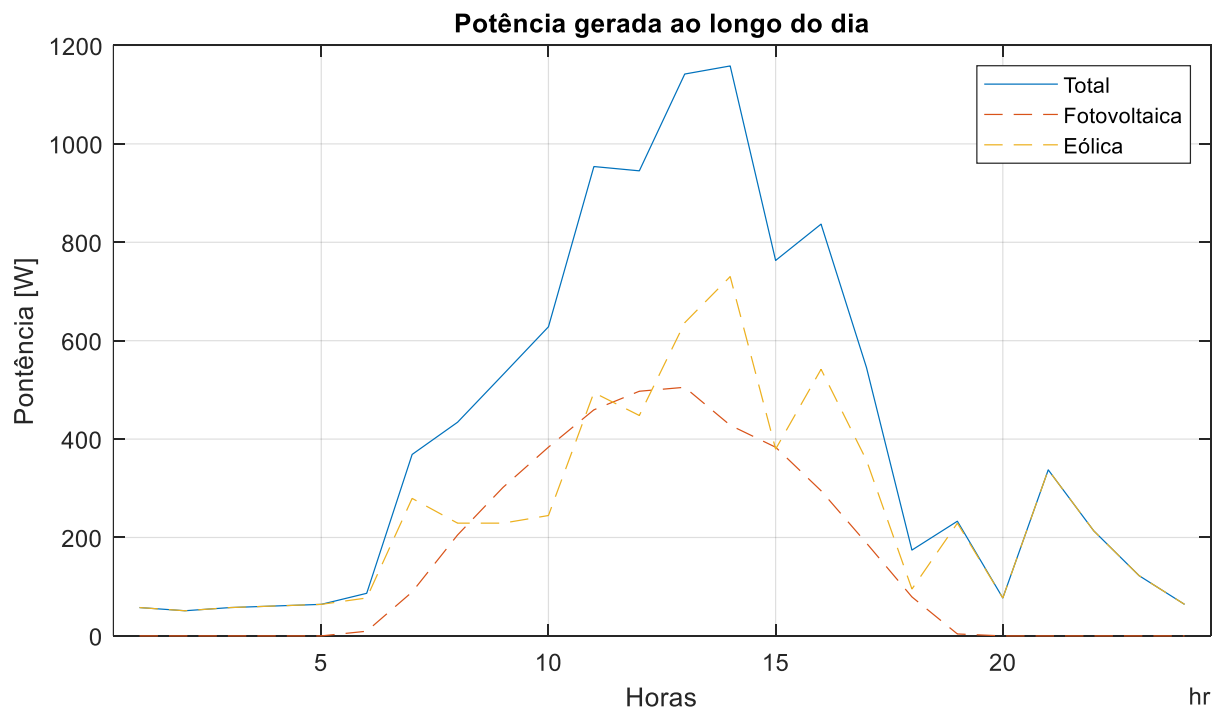


Figura 25: Superposição da potência gerada sem bombeamento

5.3. Resultados do subsistema usina hidráulica reversa

Para o sistema da usina hidráulica reversa, foi ajustada a altura de elevação do reservatório para 30 metros, o que garantiria uma vazão menor armazenando um volume de fluido menor, mas com um head maior. Dessa forma, podemos observar que um reservatório de 20000 litros pode ser enchido por completo em aproximadamente 2,5 horas, considerando que ele tem 3 metros de diâmetro e altura 2,8 metros de altura.

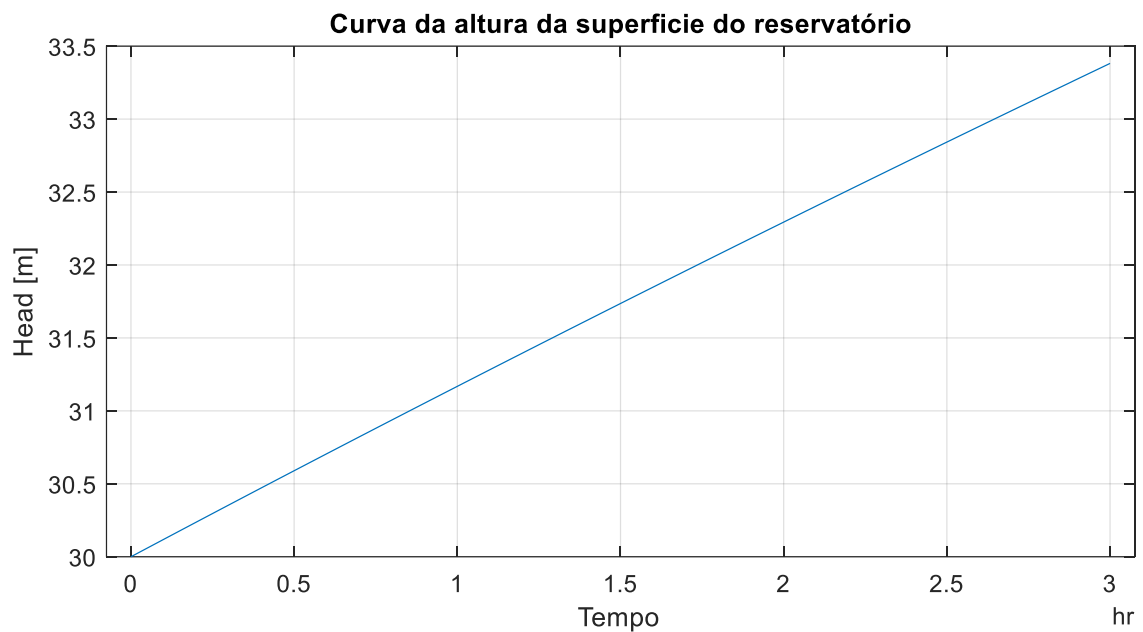


Figura 26: Curva da altura do reservatório dimensionado

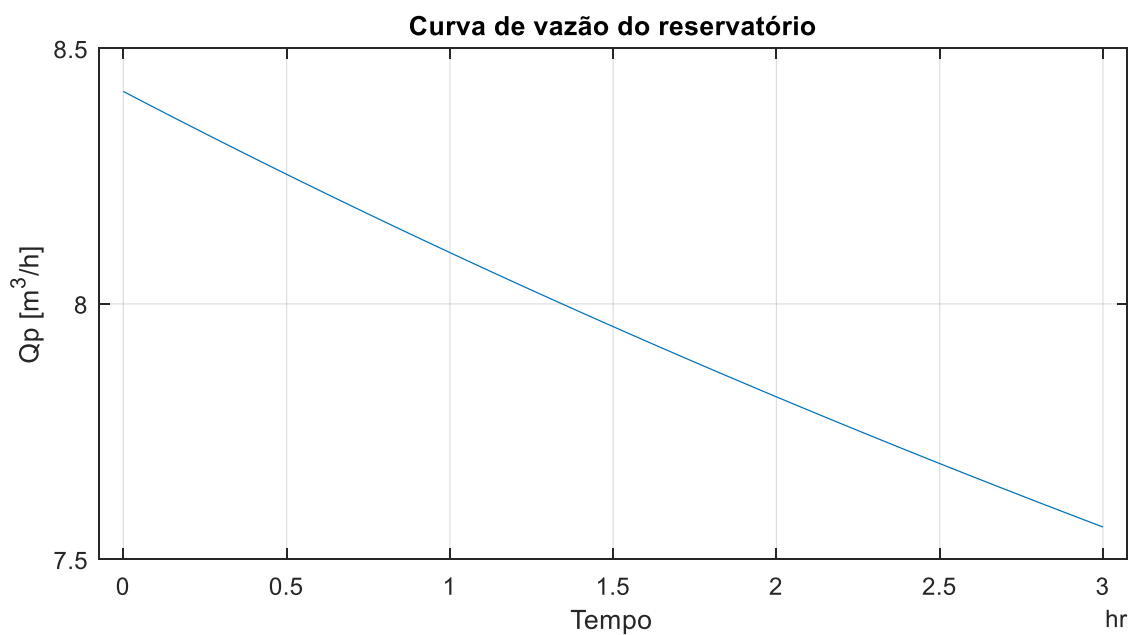


Figura 27: Curva da vazão do reservatório dimensionado

Assim, da mesma forma que os reservatórios teriam sido enchidos, a potência hidráulica gerada durante o esvaziamento deles e a curva da altura podem ser vistos nas figuras a seguir.

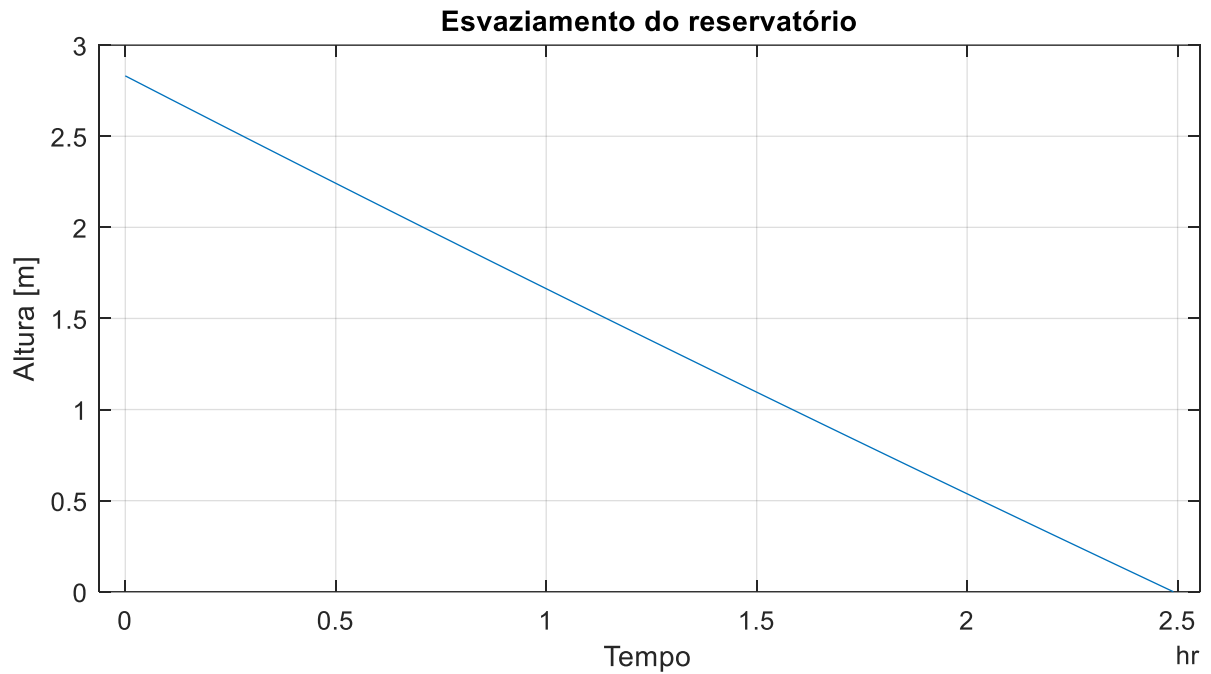


Figura 28: Curva de esvaziamento do reservatório

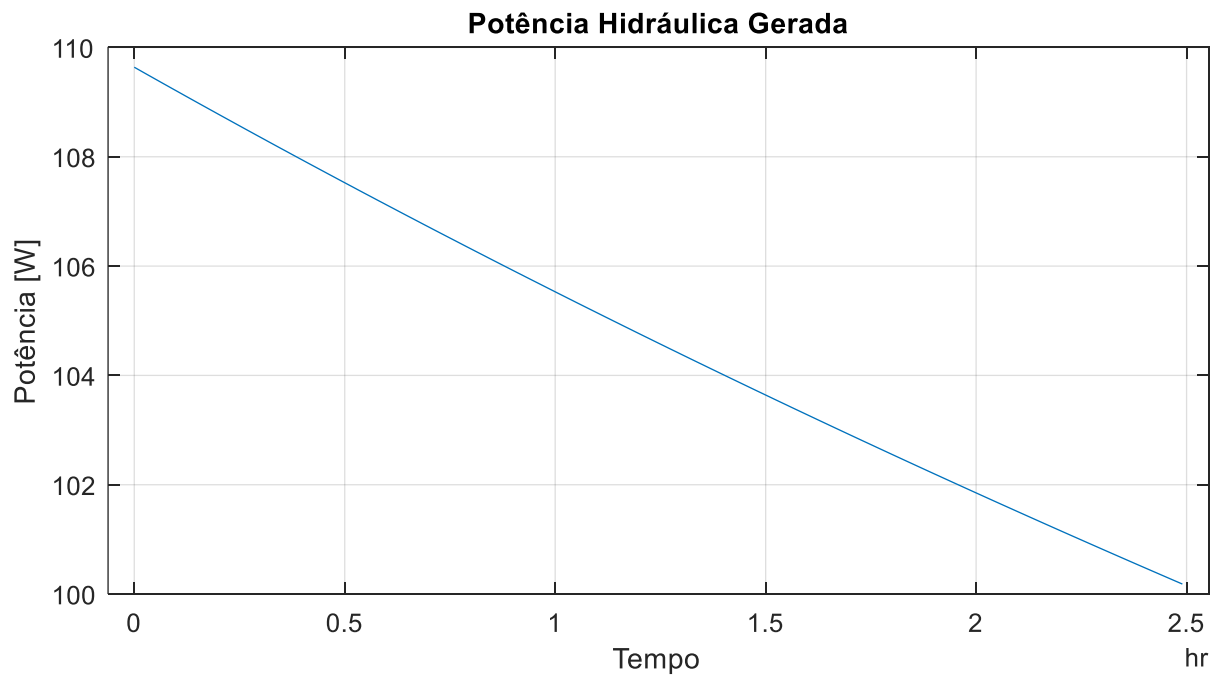


Figura 29: Curva da potência hidráulica gerada pelo reservatório

5.4. Resultado dos sistemas integrados

Com a Figura 29 pode-se observar como a geração de energia por meio do reservatório será muito menor que a geração direta ao longo do dia. Assim, incorporando a geração pelo armazenamento nos reservatórios, é notável que a melhoria no sistema não é muito elevada, visto na Figura 30.

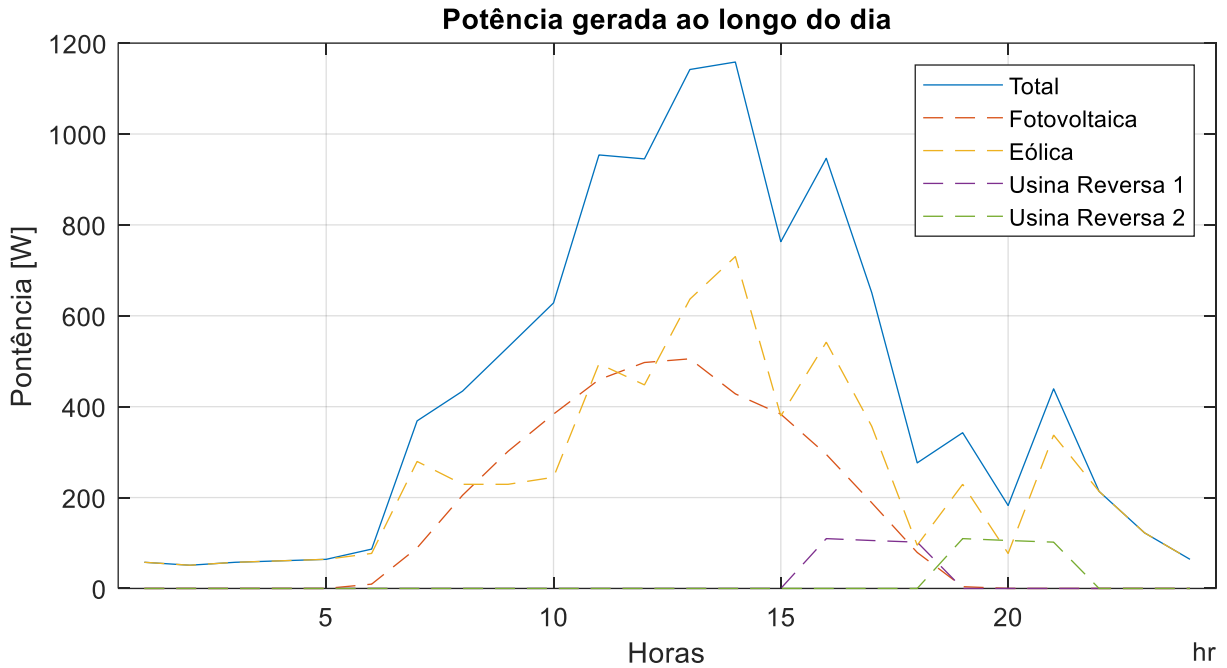


Figura 30: Curva de potência gerada com usinas reversas

As curvas identificadas na legenda como usinas reversas 1 e 2 seriam o conjunto de bomba, reservatório e turbina, de mesmas dimensões, para que pudessem atender ao uso no momento desejado. Assim, enquanto uma estivesse carregando a outra estaria em uso ou em *stand-by*.

A análise termodinâmica e exergética dos módulos fotovoltaicos obtidos por (15) e (16) foram calculadas visando os valores médios de irradiação solar e temperatura ambiente mostram que o sistema tem 12,34% de eficiência termodinâmica, e 13,22% de eficiência exergética, sendo valores próximos do esperado de acordo com [8].

A obtenção do *payback PB* do investimento pode ser dada pela resolução da equação abaixo

$$50600 = 177 \frac{(1,035^{PB} - 1)}{1,035^{PB} \cdot 0,035} \quad (19)$$

Sendo, R\$50.600,00 o investimento total, R\$132,00 o valor descontado por não pagar energia elétrica considerando um consumo mensal de 165kWh, e custo de R\$0,80/kWh, e o custo de capital de 3,5% ao ano, sendo a taxa básica de juros atual.

Também pela análise do valor líquido presente VPL, pode-se perceber a inviabilidade do projeto assumindo uma vida útil de 10 anos do sistema. Assim, o equacionamento se daria por:

$$VPL = -50600 + 177 \frac{(1,035^x - 1)}{1,035^x \cdot 0,035} = -49127,96 \quad (20)$$

Assim, pode-se notar que o valor do VPL negativo é traduzido como inviabilidade do sistema para o investimento proposto, mesmo com a taxa de juros livre de risco sendo baixa.

6. CONCLUSÕES

A principal conclusão do presente projeto é dada pela dificuldade do dimensionamento do próprio por motivos financeiros, sendo necessários subsídios governamentais se colocados em prática para MMGD. A importância da continuação da melhoria dos métodos para equilibrar a curva de demanda de energia diária é nítida, uma vez que cada vez mais são utilizados métodos renováveis de geração de energia e mais são inseridos no mercado.

Os resultados da simulação mostram que o sistema eólico está sujeito a variações abruptas na geração, assumindo que o gerador fotovoltaico seja a média dos valores de um ano e assim com uma curva mais suave. Espera-se que essas variações sejam mais abruptas para o sistema enquanto o gerador eólico opere sozinho. Portanto, pode-se concluir que a bomba deve ser robusta a possíveis variações de tensão e corrente.

Além disso, o valor encontrado para o sistema sem bombeamento foi ótimo para a configuração considerada, o que garante uma fiabilidade na modelagem e nos procedimentos de cálculo implementados neste projeto aprendidos durante o curso de Engenharia Mecânica. Porém, os resultados para o sistema com bombeamento mostraram um gargalo para a tecnologia de armazenamento por usinas hidráulicas reversas, uma vez que o armazenamento é muito limitado e custoso, tendo em vista o custo de energia barato que é descontado.

Com isso, pode-se concluir que o principal motivo para isto foi um subdimensionamento do sistema, e que, possivelmente, em uma escala maior, o atendimento à demanda de pico seria bem-sucedida. Também, configurações diferentes do sistema poderiam trazer resultados satisfatórios e não sendo limitantes tendo em vista fatores realísticos do sistema. Por exemplo, um pequeno gerador poderia ter o terreno em declínio e ter uma lagoa no alto, e assim ter um volume de reservatório muito grande, podendo fazer o uso da energia potencial da água em altitude elevada quando a demanda de energia atingir o pico no fim de tarde. Isso seria uma porta de entrada para o estudo de outras configurações dos subsistemas, levando em conta mudanças do sistema fotovoltaico e de armazenamento.

Pode-se observar também que uma das principais causas para este gargalo é o grande volume necessário para encher os reservatórios associado também a seus

custos, e a baixa geração de potência no funcionamento de seu sistema de usina hidráulica, apesar do head para o reservatório vazio já ter sido assumido como bastante alto. Portanto, seria um gasto excessivo com um sistema complexo para ser tangível da realidade e com uma eficiência baixa, considerando o uso do armazenamento, para assim, ter um desconto de uma energia “barata” de R\$0,80/kWh ofertada.

Por fim, o proposto sistema híbrido associado a um armazenamento com usina reversa pode em teoria ser uma solução para substituição do armazenamento por um banco de baterias, sendo um tema alvo de desenvolvimento futuro para uma possível redução de custos e assim implementação em massa na MMGD no Brasil

7. REFERÊNCIAS

- [1] GLOBAL ENERGY NETWORK INSTITUTE (GENI). **National Energy Grid Brazil**. 2012. Disponível em <<http://www.geni.org/global-energy/library/national-energy-grid-brazil-index.shtml>>. Acesso em: nov. 2020.
- [2] G1 GLOBO. **Brasil vai importar energia de Argentina e Uruguai até dezembro de 2018**. 2017. Disponível em <<https://g1.globo.com/economia/noticia/brasil-vai-importar-energia-de-argentina-e-uruguai-ate-dezembro-de-2018.ghtml>>. Acesso em: set. 2020.
- [3] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em: set. 2020.
- [4] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas**. 2015 Disponível em <<https://www.aneel.gov.br/proinfa>> Acesso em: nov. 2020.
- [5] INFO AMAZONIA. **Amazônia livre das grandes hidrelétricas?** Disponível em <<https://infoamazonia.org/pt/2019/08/portugues-amazonia-livre-das-grandes-hidreletricas/>>. Acesso em: set. 2020
- [6] PORTAL SOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica: Impactos Ambientais**. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-impactos-ambientais>> Acesso em: set. 2020.
- [7] RIGO P., SILUK J.; Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? **Journal of Cleaner Production**, v. 240, 2019, 118243.
- [8] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Best Research-Cell Efficiency Chart**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>> Acesso em: nov. 2020.
- [9] THE BRITISH PETROLEUM COMPANY (BP). **Statistical Review of World Energy 2020**, ed 69. 2020. Disponível em: < <https://www.bp.com/content/>

dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> Acesso em: nov. 2020.

[10] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, ed 2. 2017. Disponível em < http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html> Acesso em: nov. 2020.

[11] CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL). **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, 2001.

[12] Silva A, Schaeffer R. **Potencial Eólico Offshore no Brasil: Localização de Áreas Nobres Através de Análise Multicritério**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (COPPE-UFRJ). 2019.

[13] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Usinas Híbridas: Conceitos, Barreiras à sua Viabilização e Propostas**. 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-393/Informe%20Usinas%20H%C3%ADbridas.pdf>> Acesso em: nov. 2020.

[14] Priyadarshi N, Padmanaban S, Bhaskar M S, Blaabjerg F, Holm-Nielsen J B. **An improved hybrid PV-wind power system with mppt for water pumping applications**. International Transactions on Electrical Energy Systems (2019): 12210.

[15] Li Y, Ruan X, Yang D, Liu F, Tse C K. **Synthesis of multiple-input dc-dc converters**. IEEE Trans Power Electr 2010; 25(9): 2372–85.

[16] Ferreira A, Brito A, Galhardo M. **Modeling, control and simulation of a small photovoltaic-wind water pumping system without battery bank**. Computers and Electrical Engineering, 2020. 84(20):106619.

[17] Chenni R, Makhlouf M, Kerbach T, Bouzid A. **A detailed modeling method for photovoltaic cells**. Energy 32 (2007): 1724-1730.

[18] Tiwari A, Kalamkar V, Pande R, Sharma S, Sontake V, Jha A. **Effect of head and PV array configurations on solar water pumping system**, Materials Today: Proceedings, 2020, 200.

- [19] Bogaraj T., Kanakaraj J., **Development of MATLAB/SIMULINK Models for PV and Wind Systems and Review on Control strategies for Hybrid Energy Systems.** International Review on Modelling and Simulations 5(4): 1701-1709 (2012).
- [20] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Resenha Mensal.** Mensal do Mercado de Energia Elétrica. 2019, Ano XIII, N.148. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/resenha-mensal-do-mercado-de-energia-eletrica>> Acesso em jul. 2021.
- [21] Hosseini M, Ibrahim D, Rosen M. **Hybrid solar-fuel cell combined heat and power systems for residential applications: Energy and exergy analyses.** Journal of Power Sources 221. 2013: 371-380.
- [22] Samanez C. **Matemática Financeira.** 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 305 páginas.
- [23] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Caderno do PDE 2030: Micro e Minigeração Distribuída & Baterias.** Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/caderno-do-pde-2030-micro-e-minigeracao-distribuida-baterias>> Acesso em: jul. 2021.
- [24] BRASIL ENERGIA. **A intermitência da geração renovável: A trajetória do sistema elétrico brasileiro.** Disponível em: < <https://editorabrasilenergia.com.br/intermitencia-da-geracao-renovavel-trajetoria-do-sistema-eletrico-brasileiro/>>. Acesso em nov. 2020.