

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Lúcia Marina Rosa da Silva

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE
ESGOTO**

Porto Alegre

Janeiro 2018

Lúcia Marina Rosa da Silva

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE
ESGOTO**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Beluco

Co-orientador: Prof. Dr. Giuliano Daronco

Porto Alegre

Janeiro 2018

Lúcia Marina Rosa da Silva

**DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA HÍBRIDO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE
ESGOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 04 de janeiro de 2018 pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

ORIENTADOR

Prof. Alexandre Beluco (IPH/UFRGS)

Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alfonso Risso (IPH/UFRGS)

Msc. Eng. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Elton Gimenez Rossini (UERGS)

Dr. Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho ao meu pai, primeira pessoa com quem eu discuti a possibilidade de talvez um dia me tornar engenheira ambiental. Sinto tua falta todos os dias da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio constante durante toda a minha vida.

À Universidade Federal do Rio Grande Sul e aos professores da instituição, pelo ensino público gratuito e de qualidade.

Ao meu orientador Alexandre Beluco, por acreditar neste trabalho e pela orientação durante o último ano, e ao co-orientador Giuliano Daronco por todas as informações necessárias para a realização do trabalho.

A CAPES e ao programa Ciências Sem Fronteiras que possibilitaram a realização de parte dos meus estudos na França, em um ano de intenso crescimento pessoal, aprendizado e amadurecimento, onde tive algumas das melhores experiências da minha vida até agora.

Aos colegas e amigos do curso de Engenharia Ambiental que estiveram presentes nesses anos de graduação. Agradeço em especial a todos os meus colegas da /11, muito obrigado pelo apoio e parceria dentro e fora da Universidade em todos os momentos. Agradeço também ao Pedro Ivo, por aparecer na minha vida.

RESUMO

As fontes renováveis de energia podem ser utilizadas para suprir a demanda crescente de eletricidade e para substituir os combustíveis fósseis, considerados agentes no aumento da emissão de gases de efeito estufa e cujas reservas estão em declínio. Para as energias renováveis, sistemas híbridos são muito utilizados e geram eletricidade através de dois ou mais tipos de energia em conjunto, compatibilizando as disponibilidades de cada recurso. Entre os setores da economia brasileira, o saneamento tem grande participação no consumo de energia devido ao bombeamento de água e de esgoto, entre outras aplicações. O presente trabalho tem como objetivo principal o dimensionamento preliminar de sistema híbrido de energias renováveis para atendimento da demanda de energia elétrica de uma estação elevatória de esgoto no município de Santa Rosa, Rio Grande do Sul. Uma revisão bibliográfica sobre energias renováveis e sobre sistemas híbridos é realizada, com levantamento de outros trabalhos já publicados sobre aplicações de sistemas híbridos no setor de saneamento. O sistema híbrido proposto para o local é montado no *software* HOMER, que permite a simulação, otimização e análises de sensibilidade. Três cenários são propostos: eólico-fotovoltaico-diesel conectado à rede, eólico-fotovoltaico-diesel isolado e eólico-fotovoltaico isolado, e o sistema ótimo para cada cenário é o que atende à demanda energética com menor valor presente líquido. O sistema ótimo para o primeiro cenário apresentou somente aerogerador e gerador a diesel; para o segundo cenário, aerogerador, gerador a diesel, conversor e baterias; e para o terceiro cenário, aerogerador, módulo fotovoltaico, conversor e baterias. Os sistemas híbridos são viáveis para o abastecimento elétrico de instalações de bombeamento e apresentam benefícios para o meio ambiente em comparação aos combustíveis fósseis, mas os custos desses sistemas ainda são elevados. Programas de incentivos governamentais às energias renováveis e implantação de penalidades à emissão de poluentes podem tornar esses sistemas de energias renováveis ainda mais competitivos no mercado.

Palavras-chave: energias renováveis, sistema híbrido, *software* HOMER, estação elevatória de esgoto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das fontes de geração de energia elétrica no mundo, em %	13
Figura 2 - Geração de energia elétrica por fonte no Brasil, em %	14
Figura 3 – Divisão das despesas de exploração dos prestadores de serviço participantes do SNIS	15
Figura 4 - Curva de potência para aerogerador WEG AGW110.....	18
Figura 5 - Exemplo de uma função de distribuição de probabilidades de Weibull.....	19
Figura 6 - Perfil de velocidades vertical do vento	20
Figura 7 - Balanço de radiação solar na Terra.....	22
Figura 8 - Representação de uma célula fotovoltaica.....	23
Figura 9 - Placa solar policristalina modelo JKM265P-60 da marca Jinko solar.....	24
Figura 10 – Complementariedade de tempo e energia entre inverno e verão para o RS.....	26
Figura 11 - Localização da área de projeto no município de Santa Rosa, RS.....	33
Figura 12 – Primeiro cenário considerado para as simulações no <i>software</i> HOMER, sistema eólico-fotovoltaico-diesel conectado à rede	36
Figura 13 – Segundo cenário considerado para as simulações no <i>software</i> HOMER para um sistema eólico-fotovoltaico-diesel isolado.....	36
Figura 14 – Terceiro sistema considerado para as simulações, eólico-fotovoltaico isolado....	37
Figura 15 – Curva construída pelo HOMER para cálculo dos custos de módulos fotovoltaicos	38
Figura 16 - Curva de potência para o aerogerador BWC Excel-R em CA.....	39
Figura 17 - Mapa de irradiação solar no plano horizontal para o Brasil	42
Figura 18 – Valores de irradiação global no plano horizontal e índice de claridade para a área de estudo.....	43
Figura 19 - Velocidade média anual de vento na região Sul do Brasil	44
Figura 20 – Variabilidade dos ventos na região da EEE em estudo.....	45
Figura 21 – Divisão por componente do VPL para o sistema conectado à rede	46
Figura 22 – Distribuição mensal média da eletricidade gerada por componente do sistema para o Cenário 1	47
Figura 23 – Distribuição horária da demanda atendida pelo gerador para o Cenário 1	48
Figura 24 – Análise de sensibilidade para o Cenário 1	48
Figura 25 – Divisão por componente do VPL para o Cenário 2	49

Figura 26 - Produção de energia média por mês no Cenário 2	50
Figura 27 – Produção média de eletricidade por mês para os aerogeradores no Cenário 2	50
Figura 28 - Produção média de eletricidade por mês para o gerador a diesel no Cenário 2	51
Figura 29 – Análise de sensibilidade para o Cenário 2	52
Figura 30 – Sistema eólico-fotovoltaico-diesel isolado da rede para multiplicador de 0,6 para os módulos fotovoltaicos	52
Figura 31 – Divisão por componente do VPL para o Cenário 3	54
Figura 32 – Geração média mensal de eletricidade para o Cenário 3	54
Figura 33 - Geração média mensal de eletricidade pelos módulos fotovoltaicos para o sistema eólico-fotovoltaico isolado	55
Figura 34 – Estado horário médio de carga das baterias durante os meses do ano para o Cenário 3	56
Figura 35- Fluxo de caixa para o Cenário 3	56
Figura 36 – Análise de sensibilidade para o Cenário 3	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos considerados para os módulos fotovoltaicos	38
Tabela 2 - Custos inseridos no HOMER para as unidades dos aerogeradores.....	39
Tabela 3 - Custos considerados para o gerador a diesel	39
Tabela 4 – Custos considerados para os conversores	40
Tabela 5 - Configurações obtidas para as condições iniciais	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos gerais	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	Energia eólica	17
3.1.1	Aerogeradores.....	17
3.1.2	Recurso eólico	18
3.2	Energia Solar Fotovoltaica.....	21
3.3	Sistemas híbridos de energias renováveis.....	25
3.3.1	Definições.....	25
3.3.2	Complementariedade das fontes de energia	25
3.3.3	Componentes dos sistemas híbridos	27
3.4	Impactos Ambientais	28
3.5	Estações elevatórias de esgoto	29
3.6	Sistemas híbridos aplicados ao saneamento e ao bombeamento de água.....	30
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	Área de Estudo e consumo energético	33
4.2	Dimensionamento e configuração do sistema.....	34
4.2.1	Software HOMER	34
4.2.2	Valor Presente Líquido.....	35
4.2.3	Configuração do sistema híbrido.....	35
4.3	Potenciais eólico e solar.....	42
4.3.1	Solar.....	42
4.3.2	Eólico.....	43
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	46
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE SIGLAS

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- CA – Corrente alternada
- CC – Corrente contínua
- COP – Conferência das Partes
- CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- EEE – Estação elevatória de esgoto
- ETE – Estações de tratamento de esgoto
- GEE – Gases de efeito estufa
- iNDC - *Intended Nationally Determined Contribution*
- NREL – *National Renewable Energy Laboratory*
- PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
- PCH – Pequena central hidrelétrica
- SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
- SOC – *state of charge*
- SIN – Sistema Elétrico Interligado Nacional
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
- UNFCCC – Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática
- VPL – Valor presente líquido

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é essencial para o desenvolvimento de todas as atividades econômicas a partir do século XX. A baixa disponibilidade de recursos para conversão em energia pode se tornar um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento de um país. A demanda crescente de eletricidade vinda de todos os setores da sociedade, aliada ao aumento do preço e à diminuição das reservas de combustíveis fósseis no mundo, incentivou a pesquisa e o investimento em fontes alternativas de energia.

Além da diversificação da matriz energética visando ao aumento da disponibilidade de energia, outro fator importante para o desenvolvimento de fontes de energia alternativas é a questão ambiental. As fontes alternativas de energia advêm de fontes renováveis, recursos naturais que se regeneram a curto ou médio prazo, e possuem impactos negativos muito menores sobre o meio ambiente em comparação aos combustíveis fósseis. No termo “energias renováveis” estão incluídas principalmente as energias eólica, solar, hidroelétrica, biomassa, geotérmica e das marés.

As emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente pela queima de combustíveis fósseis para os setores de transporte e de energia, são consideradas responsáveis pelo aquecimento global antropogênico que gera mudanças climáticas como aumento da temperatura média global, derretimento de geleiras e aumento do nível médio dos mares, além de mudanças no regime hídrico.

No contexto dessas mudanças climáticas, conferências mundiais têm sido realizadas desde 1979, com a Primeira Conferência Mundial do Clima, seguida de eventos marcantes como a Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) Rio-92 e a Conferência das Partes (COP), realizada em Quioto, Japão em 1997, evento em que foi assinado o Protocolo de Quioto. O Protocolo de Quioto foi o primeiro grande acordo global visando à redução das emissões de GEE com metas de redução de emissões para os países desenvolvidos que ratificaram o acordo. Para continuar atendendo à demanda energética, mas com menores níveis de emissão de GEE para atender aos níveis do Protocolo, pode-se então investir na troca da matriz energética por fontes renováveis.

O PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas) foi criado pela Lei nº10.438/2002 (BRASIL, 2002) para incentivar e aumentar o uso de energias renováveis no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), priorizando pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), aerogeradores e usinas termelétricas movidas com queima de biomassa. A primeira fase do programa, que foi revisado pela Lei 10.762, de 11 de novembro de 2003 incentivou de

forma direta a diversificação da matriz energética brasileira já que estipulou a instalação de 3.300 MW pelas fontes renováveis com garantia de compra da energia pela Eletrobrás por 20 anos (BRASIL, 2003). A segunda fase do programa prevê que as fontes renováveis participantes do programa devem atingir 10% do consumo anual de energia elétrica no Brasil.

O compromisso brasileiro com o desenvolvimento de energias renováveis e com a diversificação da matriz energética foi firmado na UNFCCC COP21, realizada em 2015, em Paris, evento onde foi aprovado o Acordo de Paris, sucedendo o Protocolo de Quioto. Nesse encontro, cada país apresentou um programa de metas para redução da emissão de GEE, na forma de Contribuição Nacionalmente Determinada (*Intended Nationally Determined Contribution* – iNDC). Entre outras metas, o iNDC brasileiro prevê “aumento da parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar”. Sendo assim, projetou-se atingir 105 TWh de geração de energia por fontes eólicas e 26 TWh por fonte solar em 2030, representando, respectivamente, 10% e 3% do total da geração centralizada no país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016a).

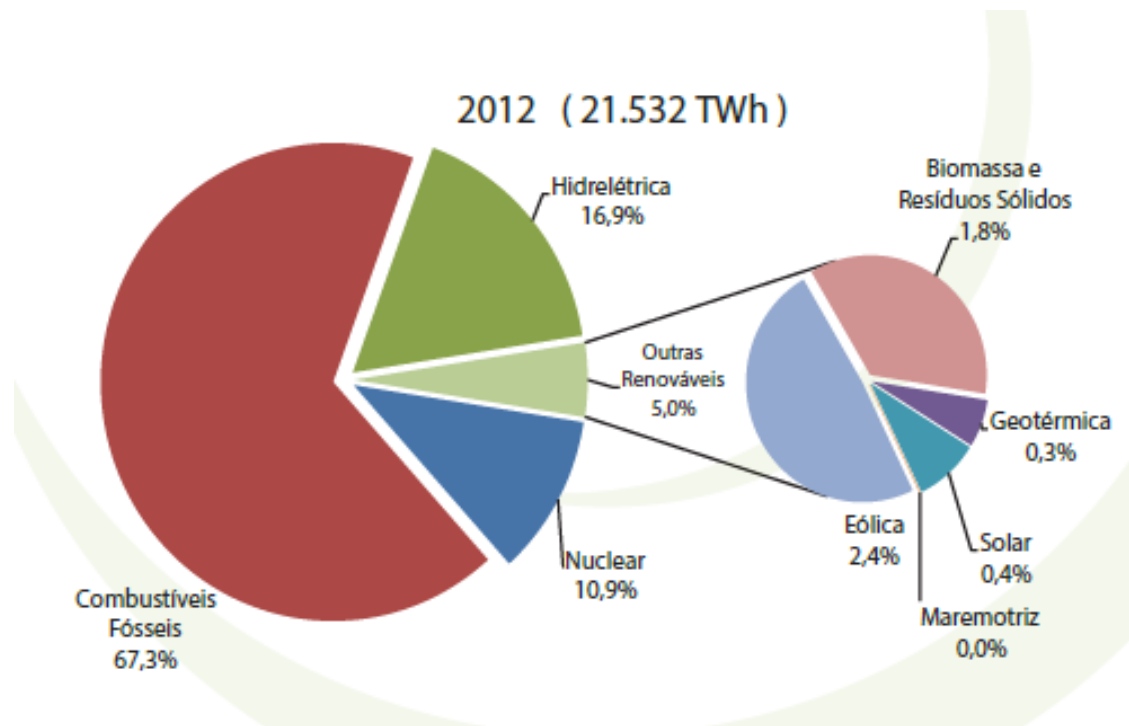
O investimento em energias renováveis é realizado também aliado ao conceito de geração distribuída de eletricidade. Nesse sistema, a energia é gerada por uma fonte para atender às cargas locais ou próximas, diminuindo assim a necessidade de grandes linhas de transmissão e, assim, diminuindo também as perdas de energia no sistema. Essa geração distribuída pode ser realizada em escalas variadas, atendendo às demandas de uma região, cidade ou às demandas específicas de usuários da rede distribuição, como para indústrias.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em sua resolução n° 482/2012, modificada pela resolução n° 687/2015, estabelece as condições para o acesso de microgeração distribuída (potência instalada menor ou igual a 75 kW) e minigeração distribuída (potência instalada entre 75 kW e 5 MW, para fontes de energia renováveis não-hídricas) nos sistemas de distribuição de energia elétrica no Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015). Esses sistemas podem ser incluídos em um programa de compensação de energia elétrica, também chamado de *net metering*, em que a energia excedente gerada por um usuário é injetada na rede em troca de créditos com a concessionária distribuidora de energia.

As energias renováveis também podem ser utilizadas compondo sistemas híbridos, com utilização de dois tipos de energia renováveis em conjunto que se complementam no tempo e no espaço.

Apesar do crescimento da utilização de fontes de energia renováveis desde a década de 80, a geração de energia no mundo em 2012, que ultrapassou 21 mil TWh, ainda era extremamente dependente das energias fósseis, conforme é apresentado na Figura 1 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016b).

Figura 1 – Participação das fontes de geração de energia elétrica no mundo, em %

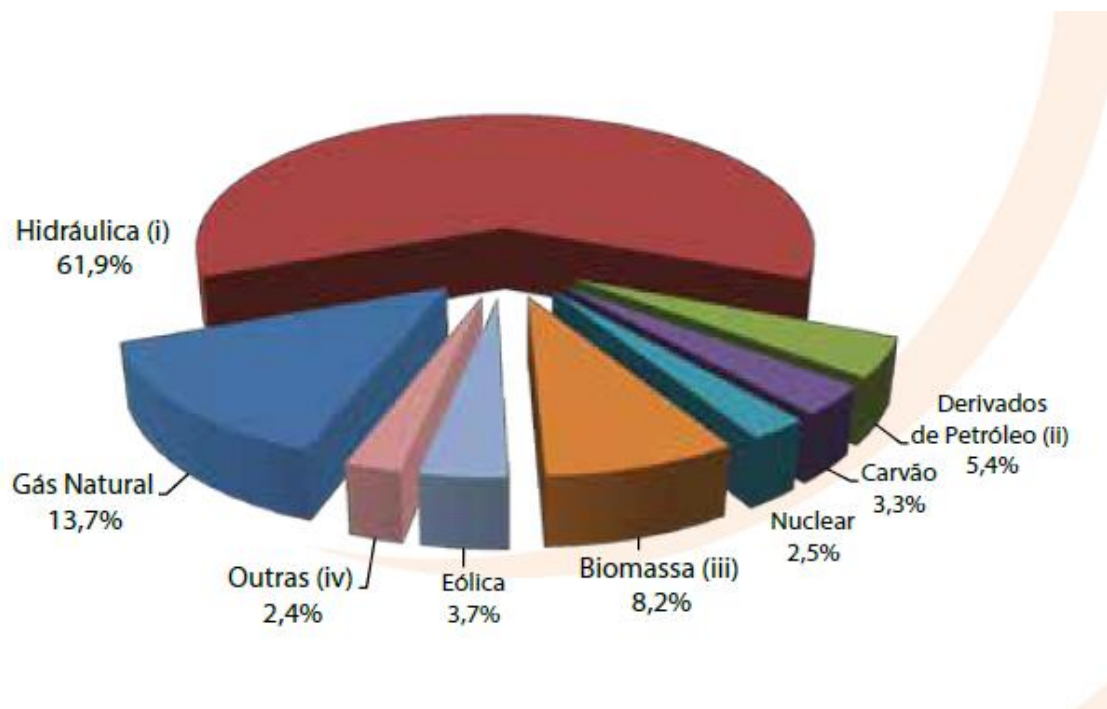


Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016b

Apesar disso, a matriz energética brasileira segue uma tendência diferente da média global, já que é focada no aproveitamento de recursos hídricos para geração de energia elétrica em centrais hidrelétricas devido ao grande potencial hídrico do país.

A Figura 2 apresenta a distribuição da geração de energia elétrica no SIN por fonte geradora no ano de 2015 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016b). O Brasil produziu, em 2015, um total de 581,5 TWh de energia elétrica, sendo 21,6 TWh por fontes eólicas, que representam apenas 3,7% do total. Percebe-se que as grandes centrais hidrelétricas que representam aproximadamente 62% da geração total de energia no país. A instalação de grandes usinas hidrelétricas é hoje muito contestada devido aos possíveis impactos ambientais causados pela instalação das barragens e reservatórios. Por ser expressivamente baseado em recursos hídricos, o SIN é ainda muito vulnerável às variações no ciclo hidrológico e às mudanças climáticas, além de propenso às perdas elevadas de energia na transmissão da fonte geradora à carga consumidora.

Figura 2 - Geração de energia elétrica por fonte no Brasil, em %



Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016b

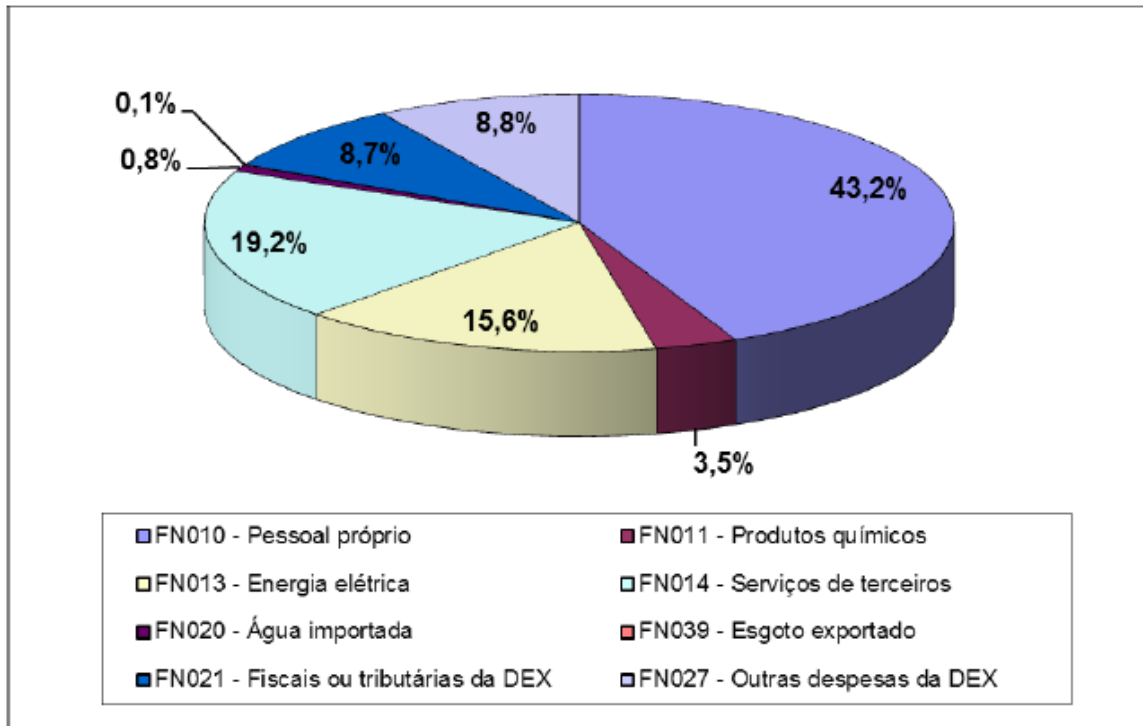
A energia gerada e consumida no Brasil é utilizada por diversos setores da economia. Entre eles, o saneamento pode ser considerado um grande consumidor da eletricidade gerada. No Brasil, estima-se que os sistemas de saneamento consomem aproximadamente 7,8 bilhões de kWh por ano (ANDRADE SOBRINHO e BORJA, 2016) Essa energia é utilizada para bombeamento de água e de esgoto, funcionamento de equipamentos nas estações de tratamento e também em suas áreas administrativas. Entre esses, o bombeamento em estações elevatórias se destaca pelo seu consumo elevado de eletricidade.

A Figura 3 apresenta uma composição média das despesas de exploração, ou seja, dos custos operacionais e administrativos dos prestadores de serviço de saneamento participantes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), do Ministério das Cidades (BRASIL, 2017). Pelo gráfico, percebe-se que os gastos com energia elétrica representam aproximadamente 15,6% dos gastos totais, apenas atrás do pagamento da folha de pessoal e dos gastos com serviços terceirizados.

Sendo assim, é evidente o potencial de utilização de energias renováveis no setor de saneamento principalmente quando aplicada a micro e minigeração, de forma a tornar as estruturas do setor independentes e autossuficientes em energia, sem consequências negativas para o abastecimento. Essa oferta de energia descentralizada pode contribuir para a ampliação

dos sistemas de tratamento de água e esgoto, visando a um atendimento universal e possível em áreas isoladas.

Figura 3 – Divisão das despesas de exploração dos prestadores de serviço participantes do SNIS



Fonte: BRASIL, 2017

Nesse contexto apresentado, o presente trabalho abordará o dimensionamento de um sistema de microgeração para fornecimento de energia elétrica por fontes renováveis para bombeamento em sistemas de saneamento.

2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos do presente trabalho.

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo principal o dimensionamento preliminar de sistema híbrido de energias renováveis para atendimento da demanda de energia elétrica de uma estação elevatória de esgoto, com determinação de sistema ótimo para o local baseado principalmente nos recursos eólico e solar.

2.2 Objetivos Específicos

1. Compor um referencial teórico sobre os sistemas híbridos de energias renováveis através de referências bibliográficas, focado principalmente em aplicações para abastecimento elétrico de instalações na área de saneamento e de bombeamento de água.

2. Simular o sistema híbrido para a estação elevatória em um *software* específico para condições definidas, com obtenção de sistemas viáveis e comparação de custos.

2. Analisar a influência de mudanças de variáveis do sistema em uma análise de sensibilidade, como a velocidade do vento, os custos de componentes e o preço de combustíveis.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Energia eólica

3.1.1 Aero geradores

O recurso eólico já é explorado pelo homem há séculos através de moinhos de vento para moagem de grãos, cata-ventos para bombeamento de água, barcos a vela movidos pelo vento e, a partir do século XX, geração comercial de energia elétrica através dos aerogeradores, também conhecidos como turbinas eólicas.

A energia do vento é uma forma indireta de energia solar, já que a distribuição desigual de temperaturas na Terra gera massas de ar com temperaturas diferentes que se movimentam, fenômeno que possibilita o funcionamento de rotores nos aerogeradores (FARRET e SIMÕES, 2006).

Os aerogeradores são os componentes que transformam a energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação, já que o vento faz girar as pás e, conseqüentemente, ocasiona o giro do eixo do rotor interno. Essa energia mecânica de rotação no rotor é então transformada em energia elétrica em um gerador acoplado.

Os aerogeradores podem ser classificados de acordo com a orientação do eixo do rotor, podendo ser eixo vertical ou horizontal, mas os mais utilizados atualmente são os de eixo horizontal. Além disso, a instalação eólica pode acontecer on-shore, no continente, ou off-shore, com turbinas instaladas no mar.

A quantidade de energia gerada por um aerogerador é dependente da velocidade do vento e de características do rotor. A potência total da massa de vento que pode ser utilizada pelo gerador eólico é apresentada por Burton et al (2011), na Equação 1.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A U^3 \quad (1)$$

onde: ρ é a densidade do ar (aproximadamente $1,25 \text{ kg/m}^3$); C_p é o coeficiente de potência do rotor (adimensional); A é a área varrida pelas pás do rotor (m^2); e U é a velocidade do vento (m/s).

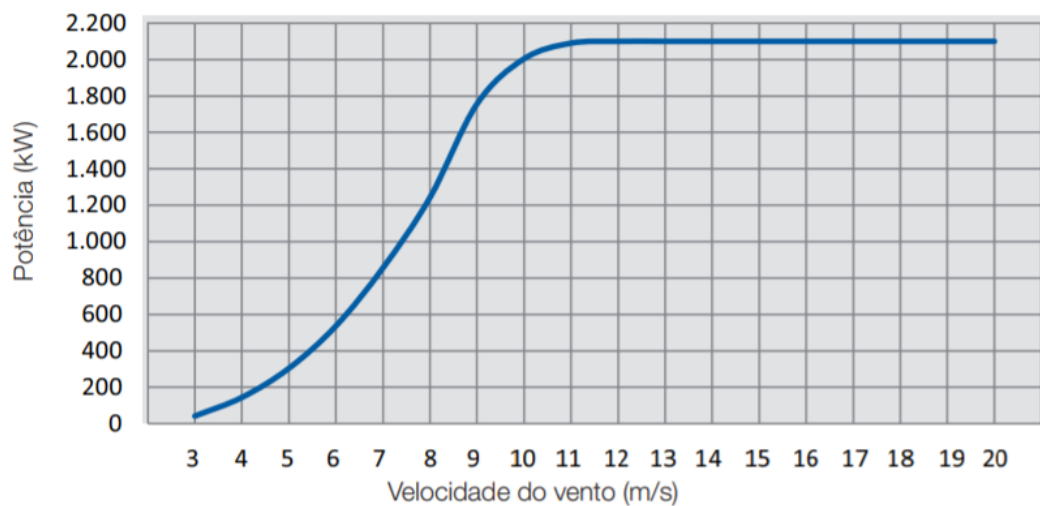
Esta equação apresenta ainda um coeficiente de potência (C_p), que representa a fração máxima de potência do vento que pode ser convertida pela turbina em trabalho mecânico. Esse valor nunca pode exceder um limite teórico, chamado de Limite de Betz, de 59,3%, mas

normalmente os rotores comerciais apresentam valores típicos da ordem de 35 a 45% (FARRET e SIMÕES, 2011).

Somente uma fração da potência total disponível na massa de vento é utilizada pelo aerogerador em função do rendimento η de cada modelo de aerogerador. Os fabricantes devem fornecer as especificações de cada turbina eólica, incluindo sua curva de potência característica, que relaciona a velocidade do vento com a potência elétrica produzida. Um exemplo de curva de potência real retirado do catálogo do aerogerador modelo AGW 110 da marca WEG (WEG, 2015) é apresentado na Figura 3.

Figura 4 - Curva de potência para aerogerador WEG AGW110

Curva de Potência



Fonte: WEG, 2015

3.1.2 Recurso eólico

Para dimensionar o sistema de geração de energia elétrica por fonte eólica, o conhecimento sobre o recurso eólico real disponível é essencial. Porém, a velocidade do vento não é constante nem no tempo nem no espaço, e valores médios anuais não representam corretamente o regime de ventos de um local. Além disso, medições corretas da velocidade do vento para avaliação de potencial eólico envolvem medições horárias por períodos de no mínimo um ano. Como essa medição é difícil e estudos desse tipo normalmente só são realizados para instalação de grandes parques eólicos, pode-se representar a variação da velocidade do vento em relação às velocidades médias como uma função de densidade de

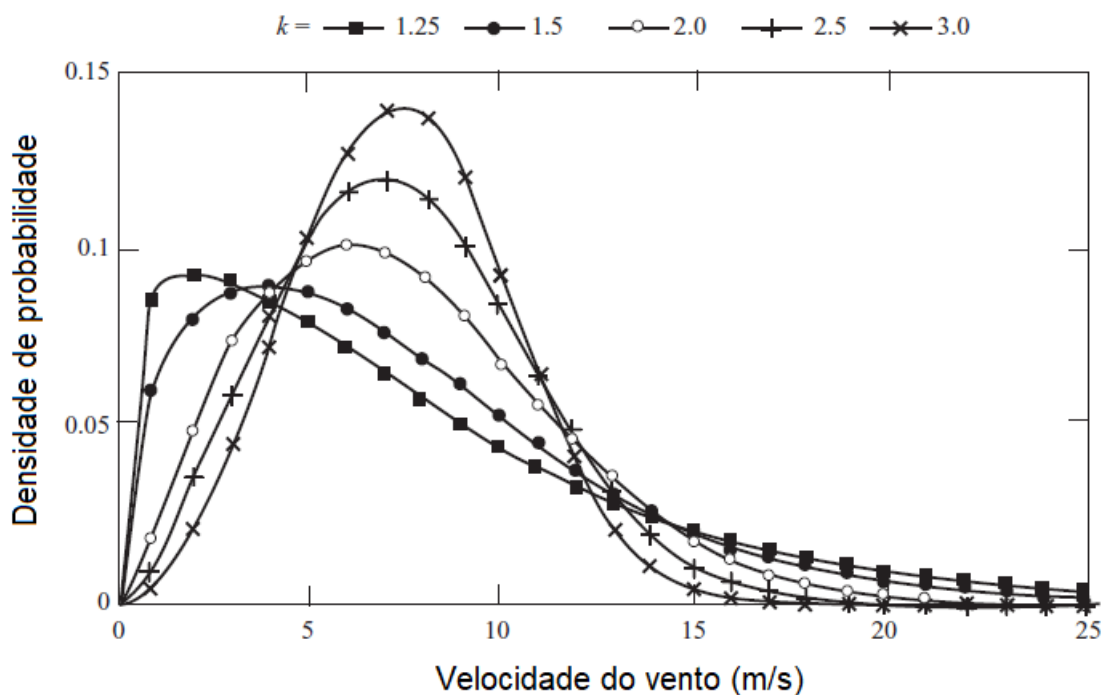
probabilidades. A função mais utilizada para a análise da velocidade dos ventos é a função de Weibull, uma distribuição estatística definida por parâmetros de escala e de forma e apresentada por RIO GRANDE DO SUL, 2014 (Equação 2).

$$f(U) = \frac{k}{C} \left(\frac{U}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{U}{C}\right)^k} \quad (2)$$

onde: $f(U)$ é a frequência de ocorrência de uma dada velocidade U ; C é o fator de escala (m/s); e k é o fator de forma (adimensional).

Um gráfico apresentando uma distribuição de Weibull com diferentes fatores de forma é apresentado na Figura 5 (adaptado de BURTON, 2011). No eixo y representa-se a densidade de probabilidades, e no eixo x a velocidade dos ventos, em m/s. Cada tipo de linha representa um fator de forma diferente, e assim pode-se notar que valores menores para k apresentam maior variabilidade na velocidade dos ventos.

Figura 5 - Exemplo de uma função de distribuição de probabilidades de Weibull



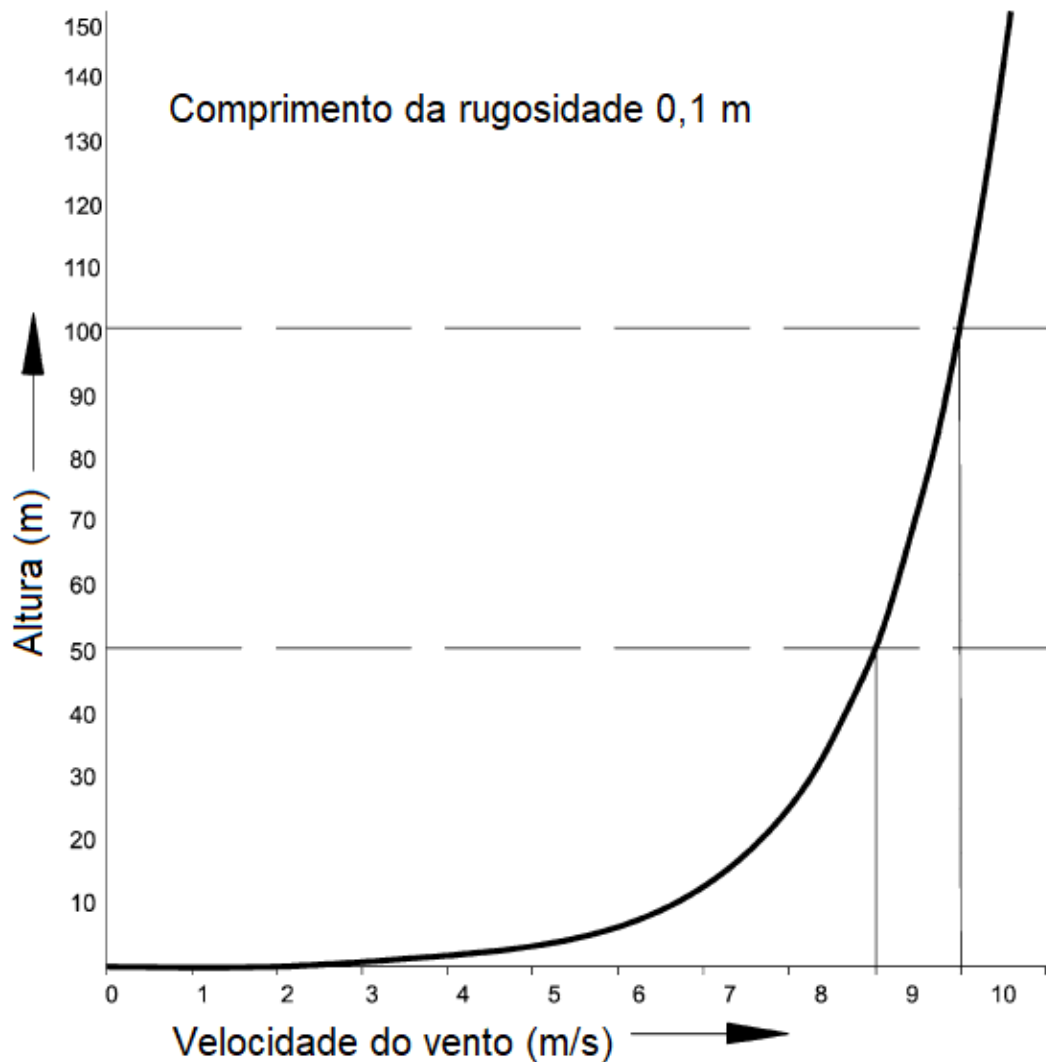
Fonte: adaptado de BURTON et al, 2011

O vento apresenta uma variação de velocidades não somente na horizontal, mas também na vertical. Mais próximo do solo a velocidade é menor, com valores crescentes em

função da altitude, até atingir um limite, criando um perfil de velocidades, semelhante ao apresentado na Figura 4 (adaptado de WAGNER e MATHUR, 2013).

Além disso, a rugosidade do terreno e a presença de obstáculos como construções também são fatores importantes para a análise do potencial eólico, pois podem alterar a velocidade do vento. O fator denominado comprimento de rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero (LIRA et al, 2017).

Figura 6 - Perfil de velocidades vertical do vento



Fonte: adaptado de WAGNER e MATHUR, 2013

Valores de velocidade para um aerogerador com altura H podem ser obtidos a partir de dados de velocidade de uma campanha de medições em alturas diferentes através da lei da

potência. Nesse modelo, supõe-se que a velocidade do vento segue a Equação 3, conforme apresentado por MASTERS, 2004:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (3)$$

onde: v é a velocidade na altura desejada para o aerogerador (m/s); v_0 é a velocidade na altura de referência (m/s); H é a altura desejada para o aerogerador (m); H_0 é a altura em que foi realizada a medição (m); e α é o coeficiente de fricção, função do tipo de terreno (adimensional).

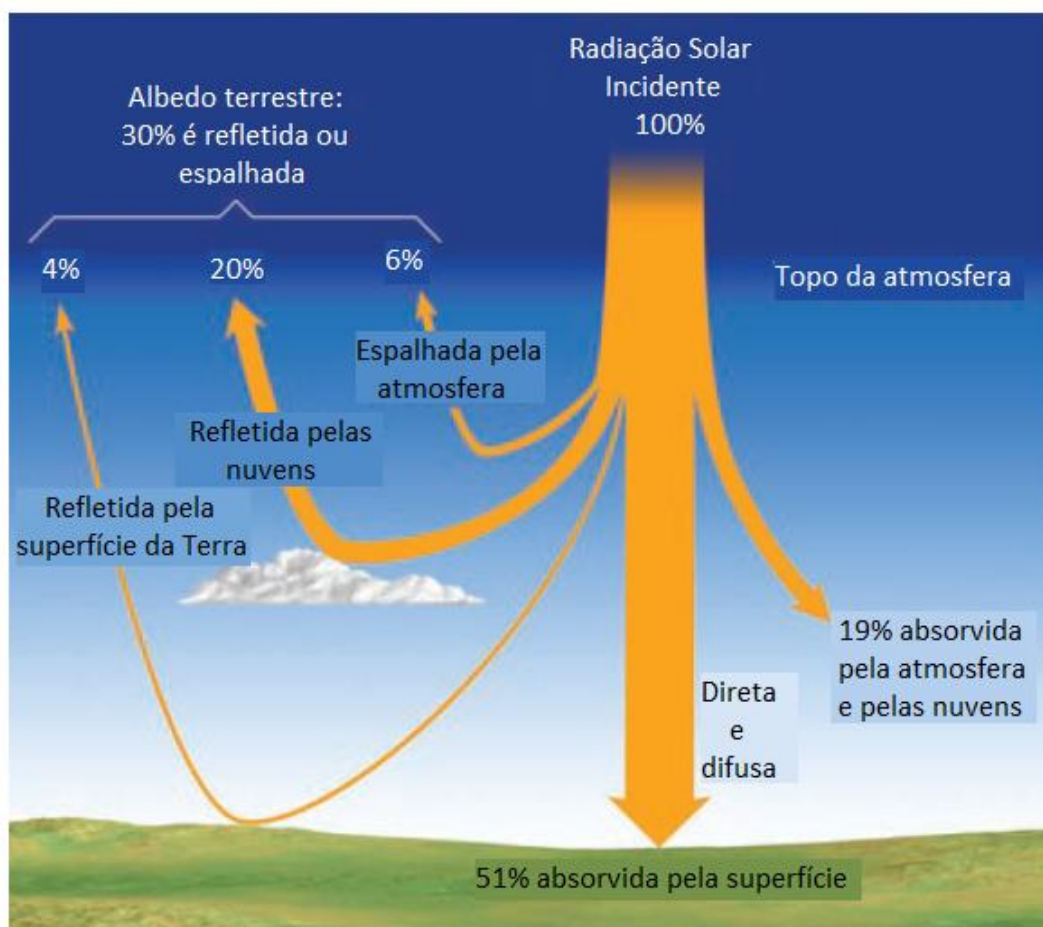
3.2 Energia Solar Fotovoltaica

Da mesma forma que para o recurso eólico, um estudo detalhado sobre o recurso solar é imprescindível para um bom aproveitamento do mesmo. A energia solar é intermitente no tempo e variável no espaço, em razão de sua forte relação com condições meteorológicas locais, como cobertura de nuvens, concentração de gases atmosféricos, sistemas sinóticos entre outros, e com fatores astronômicos associados aos movimentos orbital e de rotação da Terra (PEREIRA et al, 2017).

A radiação que atinge o topo da atmosfera terrestre não chega integralmente à superfície, já que ocorrem diversos processos radiativos na atmosfera, conforme Figura 6 (adaptado de AHRENS, 2010). Parte da radiação é espalhada, absorvida e refletida pelos gases presentes na atmosfera (destacando-se os GEE) e pelas nuvens. A fração que chega à superfície representa em média 51% do total de radiação solar incidente e inclui a radiação direta e difusa no plano da superfície, compondo o parâmetro definido como irradiância solar global, em W/m^2 .

Outro parâmetro importante é o índice de claridade, expresso pela razão entre a irradiação solar global que atinge a superfície horizontal em um período e a irradiação que seria recebida no topo da atmosfera. Esse fator varia em função do nível de cobertura da superfície por nuvens e da quantidade de aerossóis na atmosfera (TWIDELL e WIRE, 2006).

Figura 7 - Balanço de radiação solar na Terra



Fonte: adaptado de AHRENS, 2010

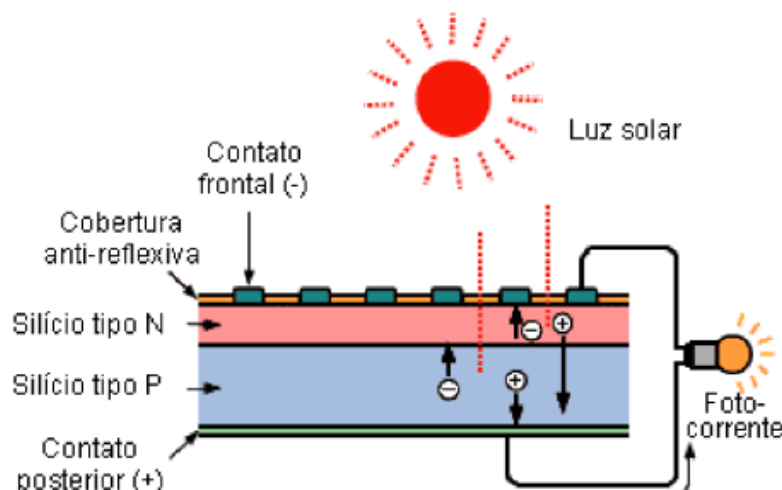
A energia solar pode ser diretamente convertida em energia elétrica nas chamadas células fotovoltaicas, feitas de materiais semicondutores, através do efeito fotovoltaico. Esse efeito foi descoberto por Becquerel em 1839 e ocorre quando a radiação eletromagnética atinge um material semicondutor como o silício, separando as cargas positivas e negativas e criando uma diferença de potencial no material.

Os materiais semicondutores apresentam bandas de energia de valência e de condução alternadas com bandas vazias. Com energia suficiente, os elétrons da banda de valência atravessam as bandas vazias e atingem a banda de condução, gerando assim a diferença de potencial. O efeito é amplificado pela dopagem do silício com uma “junção pn”, onde o dopante p recebe elétrons e o dopante n doa elétrons, geralmente utilizando fósforo e boro. A dopagem gera um campo elétrico permanente no material e assim uma corrente elétrica quando exposto aos fótons da radiação solar (TOLMASQUIM, 2016). O silício é o material semicondutor mais utilizado na atualidade para a produção de células fotovoltaicas, mas

tecnologias com outros compostos também podem ser utilizadas, como células baseados em compostos de Gálio e Cádmiio.

Uma representação de uma célula fotovoltaica é apresentada na Figura 7 (TOLMASQUIM, 2016 apud ZILLES et al, 2012).

Figura 8 - Representação de uma célula fotovoltaica



Fonte: TOLMASQUIM, 2016 apud ZILLES et al, 2012

O silício pode ser aplicado nas suas formas monocristalina, policristalina ou não-cristalina (amorfa). A forma mais eficiente na conversão de energia solar em elétrica é o silício monocristalino, apesar de ser mais cara, enquanto o silício amorfo apresenta os menores valores de eficiência, porém tem um custo menor.

Sendo assim, a célula fotovoltaica é o elemento básico do sistema, mas individualmente gera quantidades muito pequenas de energia. As células são então agrupadas formando módulos fotovoltaicos, montados em um quadro, geralmente de alumínio, e cobertas com camadas sucessivas de um material encapsulante, geralmente etileno acetato de vinila (EVA), e de vidro temperado. Essa montagem deve ser realizada de modo a tornar a placa resistente às condições variáveis do meio ambiente.

Segundo Twidell e Wire (2006), as células fotovoltaicas comerciais são ligadas uma a outra gerando corrente contínua (CC, também conhecida como *direct current* – DC) e têm eficiência de 10 a 22% na conversão de energia solar incidente em energia elétrica. Sendo assim uma desvantagem do uso de placas solares fotovoltaicas é a baixa eficiência de conversão da energia solar em eletricidade. Além disso, apesar de avanços recentes, as placas

solares ainda têm um custo de aquisição elevado, mas que pode ser contornado através de incentivos governamentais.

A Figura 9 apresenta uma placa solar comercial da marca Jinko Solar como modelo do produto final montado. Nessa placa, por exemplo, o silício é aplicado na forma policristalina, com 60 células fotovoltaicas e apresenta eficiência máxima de 16,19% (JINKO SOLAR, n.d.).

Figura 9 - Placa solar policristalina modelo JKM265P-60 da marca Jinko solar



Fonte: Jinko Solar, n.d.

3.3 Sistemas híbridos de energias renováveis

3.3.1 Definições

Sistemas híbridos geram eletricidade através de dois ou mais tipos de energia em conjunto. Essa alternativa é muito utilizada para energias renováveis, pois permite a diminuição do tempo de interrupção do sistema quando há menor disponibilidade de um dos recursos. Além disso, os sistemas híbridos permitem uma otimização da configuração do sistema, um controle mais eficiente da operação assim como uma potencial diminuição de custos de instalação e operação.

Os sistemas híbridos com energias renováveis podem ser a solução para a eletrificação de áreas isoladas, mas com grande potencial de recursos naturais como, por exemplo, a região da Amazônia. Nessas regiões, quando não é possível a extensão de linhas de transmissão, opta-se geralmente pela instalação de geradores que utilizam combustível fóssil, principalmente diesel. Esses geradores, além de causar impactos ambientais pela emissão de poluentes gasosos, podem apresentar custos elevados de operação, de manutenção e de aquisição de combustível, em função da logística de distribuição (PINHO, 2008). Assim, a inclusão de energias renováveis nesses sistemas torna-se viável do ponto de vista econômico e ambiental.

Os primeiros sistemas híbridos no mundo foram instalados na década de 70 e o primeiro no Brasil foi o do arquipélago de Fernando de Noronha, onde um sistema eólico-diesel, implantado em 1986 e posteriormente ampliado teve uma capacidade nominal de geração de 2,1 MW, contribuindo para o abastecimento elétrico da ilha (PINHO, 2008 apud FEITOSA, 2002).

3.3.2 Complementariedade das fontes de energia

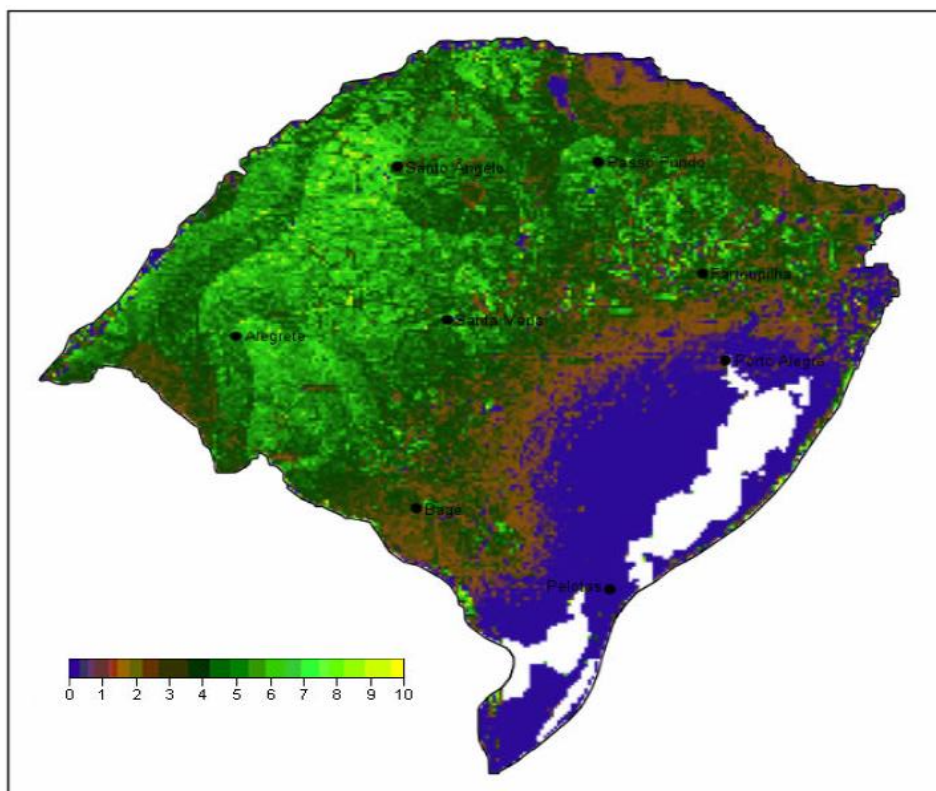
Para viabilizar o uso de diferentes fontes de energia renovável gerando um abastecimento regular essas fontes devem ter disponibilidades com certo nível de complementariedade no tempo e no espaço. Isso implica que as disponibilidades dos recursos se complementam em certa região para um período de tempo determinado (complementariedade no espaço) ou em um determinado período de tempo para uma região determinada (complementariedade no tempo), ou ambos (BELUCO, 2003).

Como exemplo de complementariedade, para um mesmo local, um sistema híbrido eólico-hídrico permite a utilização da energia gerada por uma pequena central hidrelétrica (PCH) em um período do dia em que o vento não tem intensidade o suficiente para a geração de energia pelos aerogeradores.

Duas fontes de energia podem ser consideradas como perfeitamente complementares se a variação nos seus valores de disponibilidade é periódica e se seus máximos e mínimos respectivos ocorrem em intervalos de tempo separados por meio período (fora de fase). Além disso, os valores médios das disponibilidades devem ser os mesmos, assim como a relação entre os máximos e mínimos respectivos de cada uma das fontes (BELUCO, 2008).

PIANEZZOLA (2006) estudou a complementariedade entre as energias eólica e solar Rio Grande do Sul. Nesse trabalho, observou-se uma maior complementariedade de tempo e energia entre o inverno e o verão (Figura 10) com valores razoavelmente altos em uma escala de 1 (mais baixa) a 10 (mais alta) na região norte e noroeste do estado, o que pode ser um fator relevante para a possibilidade de utilização de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico na região. Apesar disso, a mesma região apresenta uma complementariedade de amplitude (relação entre os valores máximos e mínimos das fontes) com valores baixos.

Figura 10 – Complementariedade de tempo e energia entre inverno e verão para o RS



Fonte: PIANEZZOLA, 2006.

3.3.3 Componentes dos sistemas híbridos

Os componentes principais de um sistema híbrido são as suas unidades geradoras. As mais utilizadas são módulos fotovoltaicos, aerogeradores, geradores a diesel e pequenas centrais hidrelétricas, mas podem incluir também geradores por queima de biomassa ou células de combustível.

Os componentes de um sistema híbrido podem incluir também uma forma de armazenamento, geralmente um banco de baterias. Esses módulos armazenam a energia elétrica excedente nos períodos em que a geração é maior do que a consumida, podendo em seguida fornecer essa energia armazenada quando a demanda não é atendida completamente pela geração direta. Sendo assim, a presença das baterias diminui a quantidade de energia desperdiçada no sistema. Essas baterias são utilizadas quando há necessidade de um fornecimento contínuo de energia, já em outros casos onde a demanda é intermitente esse armazenamento de energia pode não ser necessário ou essencial.

As baterias convencionais mais utilizadas na atualidade são geralmente de chumbo-ácido. As baterias são células eletroquímicas conectadas em série, formando uma bateria com potência nominal igual à soma das potências individuais das células. Entre as mais utilizadas, destaca-se o modelo de 12 V utilizado para veículos automotivos e também para armazenamento em sistemas híbridos de energias.

Segundo SAUER (2005) a vida útil das baterias depende das condições de operação e das estratégias de controle do uso. Alguns parâmetros importantes para essa avaliação são o *state of charge* (SOC), que representa a porcentagem da bateria que está carregada e pode ser utilizada (100% para uma bateria totalmente carregada) e o *depth of discharge* (DOD), parâmetro inverso ao SOC que representa a porcentagem da bateria que está descarregada (0% para uma bateria totalmente carregada).

De forma a aumentar a vida útil das baterias, deve-se respeitar um limite de descarga recomendado pelos fabricantes evitando descargas profundas, já que em ciclos completos sucessivos de carga e descarga há degradação do eletrólito que compõe a bateria, diminuindo assim sua capacidade de armazenar energia.

Além dos sistemas de armazenamento, pode ser necessária a instalação de sistemas de condicionamento de potência. A energia gerada pelos módulos fotovoltaicos e por alguns modelos de aerogeradores, além da armazenada em baterias, é fornecida ao sistema em corrente contínua (CC), mas para a maioria das aplicações correntes necessita-se de corrente alternada (CA). Para isso, devem-se utilizar inversores, que fazem essa transformação, de

forma a entregar para o consumidor a corrente na forma adequada. Da mesma forma, quando se necessita converter de CA para CC, utiliza-se um retificador com função contrária ao inversor, situação muito comum em sistemas híbridos que utilizam aerogeradores ou geradores a diesel que funcionam em CA com posterior armazenamento em baterias convencionais.

Os sistemas híbridos podem ser isolados agindo de forma autônoma atendendo a uma carga determinada (*off-grid*), ou ligados na rede convencional (*on-grid*), principalmente no formato de geração distribuída. Os sistemas são isolados geralmente quando estão localizados a grandes distâncias das linhas de transmissão, e o custo da ligação aliado à baixa demanda acaba sendo inviável, como, por exemplo, em comunidades rurais isoladas, unidades de conservação ambiental e áreas indígenas. Já os sistemas conectados à rede possibilitam a dispensa da necessidade de sistemas de armazenamento e possibilitam a inclusão do usuário de micro ou minigeração no sistema de geração distribuída. Como exemplo, segundo Pinho (2008) os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são mais eficientes, econômicos, em média 40% mais baratos, e duradouros que os sistemas fotovoltaicos autônomos, por não necessitarem de armazenamento.

Para ser incluído no sistema de geração distribuída o usuário deve instalar um medidor bidimensional de energia elétrica (*smart meter*), para medir tanto a energia consumida quanto gerada, e possibilitar o cálculo da compensação com a concessionária de energia.

Percebe-se então que a composição de um sistema híbrido, assim como sua operação, é bastante complexa. Para auxiliar na escolha da melhor configuração do sistema híbrido, foram concebidos diversos *softwares*. SINHA e CHANDEL (2014) apresentam uma revisão sobre os 19 principais *softwares* disponíveis. Entre eles, destaca-se o HOMER como o programa mais utilizado por realizar análises de viabilidade, otimização e sensibilidade para uma ampla gama de equipamentos.

3.4 Impactos Ambientais

A substituição do uso de energias convencionais pelo uso de energias renováveis como a eólica e a solar apresenta impactos benéficos para o meio ambiente, já que as fontes renováveis não utilizam combustíveis fósseis nem água para gerar energia elétrica e não emitem gases de efeito estufa. Além disso, elas não geram nenhum tipo de resíduo ou subproduto no processo de produção de energia.

Apesar desses benefícios, não se pode afirmar que essas são fontes isentas de impactos ambientais negativos. Tanto os aerogeradores como os painéis fotovoltaicos e seus componentes apresentam poluição associada aos seus respectivos processos de fabricação e à obtenção de materiais para seus componentes que deve ser controlada. Os aerogeradores e as placas fotovoltaicas apresentam uma vida útil estimada e, portanto, são descartados após certo período de tempo. Por isso, deve-se ter em vista uma possível reciclagem dos seus componentes e, se não for possível, o descarte correto dos equipamentos.

Os grandes parques eólicos também são responsáveis por impactos negativos sobre a fauna do local e poluição sonora gerada pelo fluxo de ar e pelo movimento dos mecanismos, que pode ser minimizada na etapa de projeto e *design* do aerogerador (SAIDUR et al, 2011). Esses impactos ambientais são muito mais relevantes para grandes instalações, sendo bem menos importantes para sistemas híbridos, devido à escala.

Entre os componentes dos sistemas híbridos, as baterias utilizadas para armazenamento de energia podem apresentar impactos mais significativos para o meio ambiente durante o seu processo produtivo e principalmente se descartadas de forma incorreta. A Resolução CONAMA 401/2008 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2008) dispõe sobre a disposição correta das baterias usadas no Brasil. Os estabelecimentos que vendem as baterias devem disponibilizar um ponto de coleta que deve receber do usuário as baterias usadas, mas a destinação final ambientalmente correta é de responsabilidade do fabricante ou importador. Sendo assim, o descarte dessas baterias que já atingiram o fim de sua vida útil deve ser realizado de maneira correta pelos responsáveis.

3.5 Estações elevatórias de esgoto

O tratamento do esgoto cloacal é um dos componentes essenciais do saneamento básico, pois possibilita o lançamento desses efluentes nos corpos hídricos sem causar poluição ambiental. Os sistemas de esgotamento sanitário se dividem em sistemas individuais, com uso de fossa séptica, e sistemas coletivos. Nos sistemas coletivos, os esgotos são coletados em tubulações e enviados para as estações de tratamento de esgoto (ETE), onde passam por diversas etapas físicas, químicas e biológicas de tratamento para remoção de sólidos suspensos e de matéria orgânica.

Ao contrário das redes de água, as redes de esgoto normalmente não funcionam sob pressão e, por isso, dependem da ação da gravidade para o escoamento, seguindo ou não o

desnível do terreno. As estações elevatórias de esgoto (EEE) são utilizadas pelas prestadoras de serviço de saneamento para o recalque do esgoto na rede coletora quando é necessário vencer elevações do terreno, através de bombeamento.

A ABNT NBR 12.208/1992 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992) é a norma técnica que regulamenta o projeto de uma EEE. De acordo com essa norma, as EEE devem possuir dispositivos de remoção de sólidos grosseiros, como gradeamento ou cestos coletores, de forma a proteger as bombas e garantir seu funcionamento correto. Além disso, devem ser previstos dispositivos que possibilitem a conexão em gerador elétrico para emergências.

3.6 Sistemas híbridos aplicados ao saneamento e ao bombeamento de água

Os sistemas híbridos de energias renováveis podem atender a diversas demandas energéticas, podendo ser isolados ou conectados à rede. As energias renováveis como solar, eólica, biomassa podem gerar energia para o tratamento convencional de água, assim como para novas tecnologias como a dessalinização, e estão se tornando cada vez mais atrativas para o setor. Trabalhos já foram publicados para avaliar a viabilidade e dimensionar sistemas híbridos de microgeração com energias renováveis para equipamentos de saneamento ou de bombeamento de água, muitos com a utilização de *softwares* para auxílio na melhor configuração.

Para o bombeamento de água, o uso de módulos fotovoltaicos para produção de energia já é amplamente pesquisado e desenvolvido, conforme relatado por GOPAL et al, 2013; o uso de sistemas híbridos, porém, ainda é recente.

Na cidade de Fortaleza, Ceará, um projeto apresentado por ARRUDA (2015) avaliou o funcionamento de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico para um conjunto moto-bomba de 0,5 cv utilizado no bombeamento de água, composto por quatro módulos fotovoltaicos e um aerogerador, com potência total instalada de 1,348 kW. Neste local, verificou-se que a complementariedade entre as fontes não é adequada, apesar de um alto potencial solar, pois em um trimestre do ano a disponibilidade do recurso eólico é baixa. Mesmo assim, o dimensionamento do sistema híbrido deve considerar outras variáveis do projeto, podendo ser viável.

VICK e NEAL (2012) analisaram a possibilidade de substituição dos meios convencionais de fornecimento de energia elétrica para bombeamento de água em regiões agrícolas por sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos isolados no Texas, Estados Unidos.

Na Líbia, país em que uma guerra civil destruiu boa parte das redes transmissoras de energia elétrica, o estudo da implantação de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos não-conectados à rede apresentou resultados promissores para atendimento de demanda em locais isolados, incluindo para o bombeamento de água para agricultura (ALKARRAMI, 2016).

De forma semelhante, em AMMAR et al (2015) o *software* HOMER foi utilizado no dimensionamento do sistema híbrido isolado fotovoltaico-diesel para bombeamento de água para irrigação no sul da Argélia, para diferentes pressões de bombeamento, com resultados favoráveis à implantação dos sistemas híbridos.

O fornecimento de energia elétrica é um desafio para comunidades recém-assentadas nas margens do rio Nilo, no Egito. De forma a fornecer energia para bombeamento de água para a agricultura nessa região, KHATTAB et al (2016) compararam a utilização de diversas configurações de sistemas híbridos no HOMER, com uso de aerogeradores, placas fotovoltaicas e gerador a diesel. Como o local apresenta ótimo recurso solar, mas limitações para o uso de energia eólica devido às baixas velocidades do vento, o sistema ótimo para o local conta apenas com placas fotovoltaicas.

Em sistemas de tratamento de água, o custo de bombeamento da água bruta e tratada representa parte importante dos gastos com energia elétrica das companhias de saneamento, mas a instalação de sistemas híbridos de energia elétrica pode contribuir para a diminuição dessas despesas.

RAMOS e RAMOS (2008) compararam a utilização de configurações diferentes de sistemas, conectados à rede e isolados, para abastecimento elétrico do bombeamento de água da rede de distribuição de uma cidade em Portugal, utilizando o *software* HOMER. Para um valor de velocidade do vento média de 3,75 m/s no local, a maior parte da energia elétrica necessária para funcionamento da bomba pode ser suprida por aerogeradores, tanto em sistemas conectados à rede quanto isolados. A utilização de placas fotovoltaicas não apresentou bom fator de custo-benefício, mas diminuição nos preços poderiam tornar os sistemas fotovoltaicos competitivos no mercado.

Sistemas híbridos podem ser aplicados também em instalações de tratamento de esgoto. O primeiro sistema híbrido eólico-fotovoltaico-biogás do mundo foi instalado para suprir o consumo de energia elétrica de uma estação de tratamento de esgoto na Alemanha em

1989, cobrindo com sucesso 85% do consumo total da estação e fornecendo energia excedente à rede (KRAUSEN e MERTIG, 1991).

Na África subsaariana, a falta de eletricidade é considerada como uma das maiores barreiras para o amplo desenvolvimento do tratamento de esgotos, mas a integração com as energias renováveis para geração de energia para os sistemas pode contribuir para eliminar essa barreira, com impactos positivos nas comunidades, mitigação de riscos de segurança interna e de fronteiras e diminuição de conflitos pelo uso da água (BRANDONI e BOSNJAKOVI, 2016).

DARONCO e BELUCO (2015) realizaram um estudo de viabilidade de sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel conectado à rede para geração de energia para o bombeamento, aeradores e para a área operacional de uma ETE em Alto Alegre, no Rio Grande do Sul com consumo médio de 539,46 kWh, através do software HOMER. Para este sistema, o custo de energia foi de 0,195US\$/KWh, com incremento no valor se não houvesse venda de energia excedente para a rede ou se não fossem instaladas placas fotovoltaicas.

Algumas companhias de saneamento no Brasil já investem no potencial de utilização de energias renováveis para suas instalações.

No Rio Grande do Sul, a CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento) começa a investir nas energias renováveis em 2017, com a ordem de início para a instalação de um sistema eólico-solar com potência instalada de 60 kW em Atlântida Sul, município de Osório (CORSAN, 2017).

A SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) também começa a estudar a implantação de sistemas de energias renováveis em suas instalações, com estudos de regime de vento para futura instalação de aerogeradores em uma estação elevatória de água que consome cerca de 100 mil kWh por ano (SABESP, 2017).

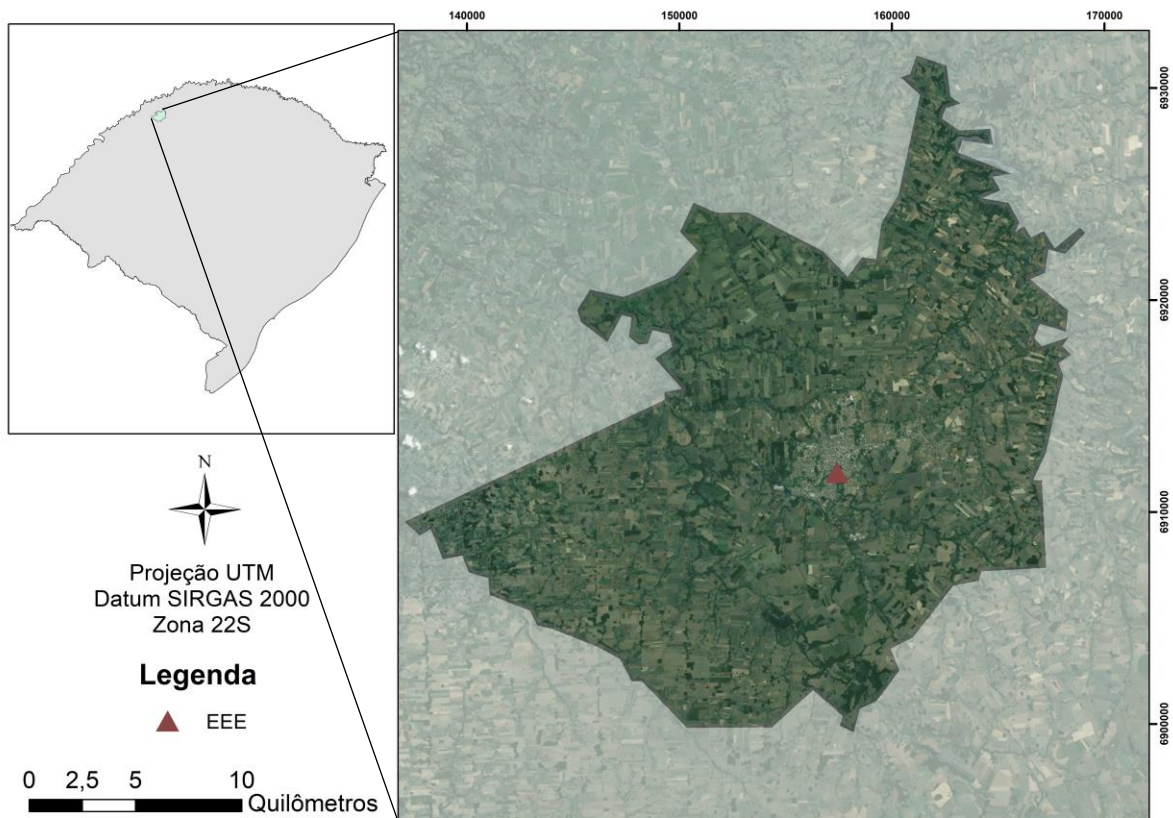
4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo e consumo energético

Estações elevatórias de esgoto são partes integrantes dos sistemas de tratamento de esgotos, e estão presentes na grande maioria dos sistemas coletivos. Como modelo para este trabalho, utiliza-se uma estação localizada no município de Santa Rosa (coordenadas $27^{\circ}52'27,17''S$, $54^{\circ}28'44,41''O$), na região norte do Rio Grande do Sul. Esse local foi escolhido pela facilidade na obtenção de dados, porém a instalação da estação elevatória em estudo é padronizada, e já é aplicada em outros municípios do estado. Sendo assim, essa metodologia de dimensionamento pode ser aplicada a outras localidades.

A Figura 11 apresenta a localização da estação de estudo no centro do município de Santa Rosa, na área urbana.

Figura 11 - Localização da área de projeto no município de Santa Rosa, RS



A estação elevatória conta com uma bomba submersível FBS JAC com potência mecânica fornecida de 1,0 cv e rendimento percentual do motor considerado como 50%, e

uma bomba reserva. Sendo assim, o consumo energético da bomba é de aproximadamente 1,472 kWh por hora de operação.

4.2 Dimensionamento e configuração do sistema

4.2.1 Software HOMER

Conforme explorado no capítulo anterior, o dimensionamento do sistema híbrido pode ser realizado com a ajuda de *softwares* em que se analisa a viabilidade de um determinado sistema para um local ou comparar diferentes configurações de sistema. Para o presente projeto, utilizou-se o *software* HOMER Legacy, em sua versão 2.68 beta, de livre acesso. O HOMER é um modelo computacional desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para auxiliar no *design* de sistemas de microgeração e para facilitar a comparação entre diferentes tecnologias de geração de energia em uma ampla gama de aplicações (LAMBERT et al, 2005). Esse *software* possibilita, além da simulação e da otimização de diferentes configurações de sistema, a realização de uma análise de sensibilidade, onde se podem quantificar os possíveis efeitos das incertezas do modelo na escolha da configuração ideal do sistema ao longo do tempo.

Durante a simulação e otimização do sistema, o *software* fornece resultados para todas as possíveis combinações de equipamentos para atender a demanda definida e elimina as configurações de sistemas inviáveis através de um balanço de energia para cada hora do ano, comparando entradas e saídas. Em seguida, classifica as configurações viáveis de acordo com o *net present cost* (NPC) – em português, valor presente líquido (VPL). A configuração considerada como “ótima” apresenta o menor VPL, dentro das condições estipuladas. O HOMER calcula esse custo total durante o ciclo de vida do sistema para o período determinado, incluindo o capital de investimento (compra e instalação dos equipamentos), custos de operação e manutenção e custos de reposição dos equipamentos durante a expectativa vida determinada pelo usuário para o sistema. Os custos são considerados em dólares americanos (US\$) e devem ser convertidos antes de inclusão no programa.

4.2.2 Valor Presente Líquido

O VPL é um conceito econômico que representa uma maneira de agrupar investimentos iniciais (R0) e gastos periódicos (P) em um único valor trazendo todos os gastos para o presente, utilizando uma taxa de juros. O cálculo do VPL da mesma forma em que é utilizado pelo HOMER é apresentado por Masters (2004) conforme Equações 4 e 5.

$$\text{VPL} = \text{R0} + \text{P} \quad (4)$$

$$\text{P} = \text{A} \times \text{PVF}(i,n) \quad (5)$$

onde: P é o valor presente líquido do custo total do sistema; A é a custo anual do sistema; e PVF é a função do valor presente para uma taxa de juros anual e o período da vida útil estimada do sistema, através da Equação 6:

$$\text{PVF}(i,n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (6)$$

onde: i é a taxa de juros anual (%) e n é o tempo de vida útil do sistema (ano).

4.2.3 Configuração do sistema híbrido

Para dimensionar o sistema híbrido ótimo para o local, o sistema para a área de estudo é inserido no *software* HOMER. Os modelos de equipamento, incluindo aerogeradores, placas fotovoltaicas, gerador a diesel, conversores e baterias foram escolhidos entre as opções da base de dados do programa, de forma que fossem semelhantes ou próximos dos equipamentos disponíveis no mercado nacional.

Com base nesses componentes, três cenários de sistemas híbridos foram montados no programa, todos com a possibilidade de instalação de aerogeradores, placas fotovoltaicas e baterias, além de prever uma possível necessidade de conversão. O Cenário 1 conta também com ligação à rede e com um gerador a diesel. Para Cenário 2, a ligação à rede foi retirada, mas o gerador a diesel ainda pode ser utilizado. Já o Cenário 3 engloba somente as energias renováveis, isolado da rede. A configuração final dos sistemas é apresentada para o primeiro, segundo e terceiro cenário nas Figuras 12, 13 e 14, respectivamente.

Na Figura 12, no lado AC, ou seja, em corrente alternada, estão representados o aerogerador BWC Excel R-AC, o gerador a diesel (Generator 1) e a conexão à rede (Grid).

No lado DC (em corrente contínua) são representados o módulo fotovoltaico (PV) e as baterias, com a nomenclatura baseada em seu modelo. Entre os dois, aparece a demanda energética (Equipment), representada pela lâmpada, e o conversor, com conexão com os dois lados já que esse componente faz a conversão entre eles.

Figura 12 – Primeiro cenário considerado para as simulações no *software* HOMER, sistema eólico-fotovoltaico-diesel conectado à rede

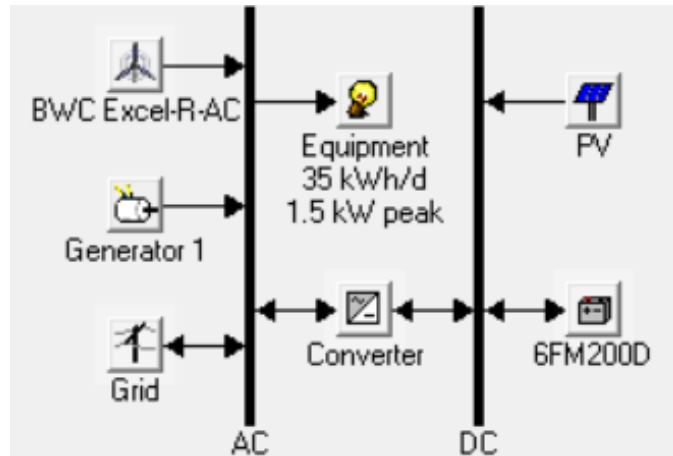


Figura 13 – Segundo cenário considerado para as simulações no *software* HOMER para um sistema eólico-fotovoltaico-diesel isolado

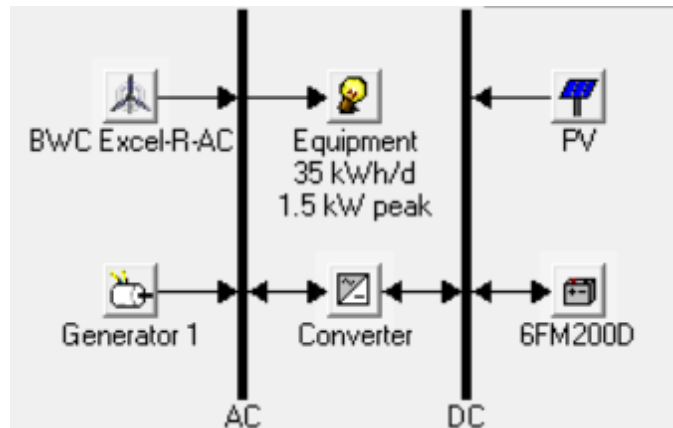
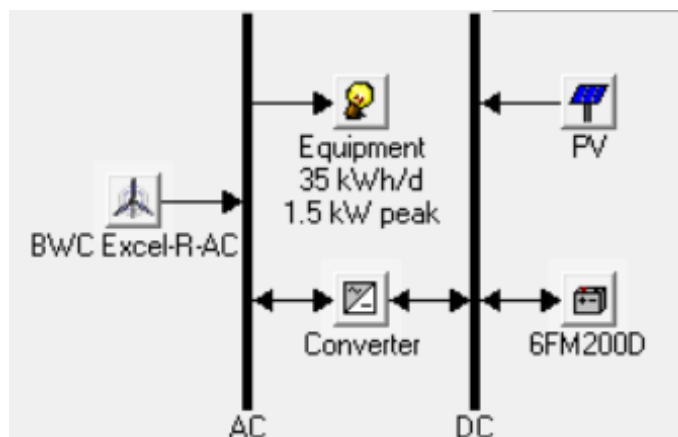


Figura 14 – Terceiro sistema considerado para as simulações, eólico-fotovoltaico isolado



As simulações foram realizadas para um período de vida útil do sistema de 25 anos e taxa de juros anuais de 6%, valores utilizados para o cálculo do valor presente líquido. Esse tempo de projeto é utilizado baseado no prazo de 25 anos que a ANEEL utiliza para os cálculos da de referência em empreendimentos para produção de eletricidade (PINHO, 2008). Os custos inseridos para as simulações foram baseados em trabalhos anteriores e em preços de mercado para aparelhos semelhantes.

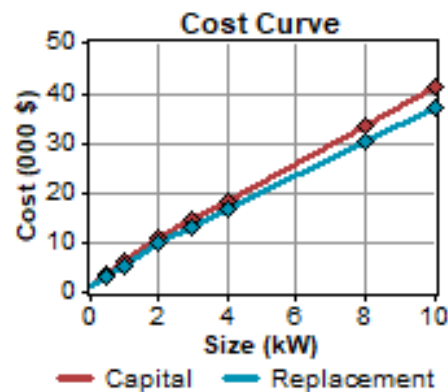
Quanto ao consumo, considerou-se que a bomba da estação deverá estar ligada continuamente, sem interrupções. Sendo assim, para um consumo horário de 1,472 kWh, o consumo diário é de aproximadamente 35 kWh e o consumo anual é de 12.884 kWh. A demanda de pico é considera como 1,472 kW, já que o funcionamento é constante.

Para os módulos fotovoltaicos, foi incluída a possibilidade de adoção de módulos de 0,5, 1, 2, 3, 4, 8 e 10 kW, de forma a incluir todas as possibilidades necessárias. A expectativa de vida útil dos módulos é de 12,5 anos. Os custos de aquisição, de reposição após o fim da vida útil e de operação e manutenção para cada tipo de módulo baseado em sua potência são apresentados na Tabela 1. Esses valores são utilizados para a construção de uma curva linear de custos em relação à potência (Figura 15), e para potências diferentes das listadas o programa utiliza uma interpolação para calcular os custos.

Tabela 1 – Custos considerados para os módulos fotovoltaicos

Potência kW	Aquisição US\$	Reposição US\$	Operação e Manutenção US\$
1	6.000	5.400	300
2	10.800	9.720	540
4	18.360	16.524	918

Figura 15 – Curva construída pelo HOMER para cálculo dos custos de módulos fotovoltaicos



Quando são inseridos módulos fotovoltaicos, o *software* estimou uma inclinação necessária de $27,87^\circ$ em relação à horizontal para que os módulos fiquem na direção mais eficaz para captação de energia solar de acordo com as coordenadas geográficas do local. O valor corresponde então à latitude do local.

Para os aerogeradores, inicialmente diversos modelos com potências diferentes foram testados. O modelo utilizado na otimização final do sistema foi o BWC Excel-R de 7,5 kW em CA, cuja curva de potência é apresentada na Figura 16. A altura do rotor foi inserida como 27 metros e a expectativa de vida útil é considerada de 12,5 anos e os custos são apresentados na Tabela 2. Os sistemas podem contar com 1, 2 ou 4 aerogeradores e, da mesma forma que para as placas fotovoltaicas, os custos para unidades diferentes são interpolados da curva gerada pelo próprio programa.

Figura 16 - Curva de potência para o aerogerador BWC Excel-R em CA

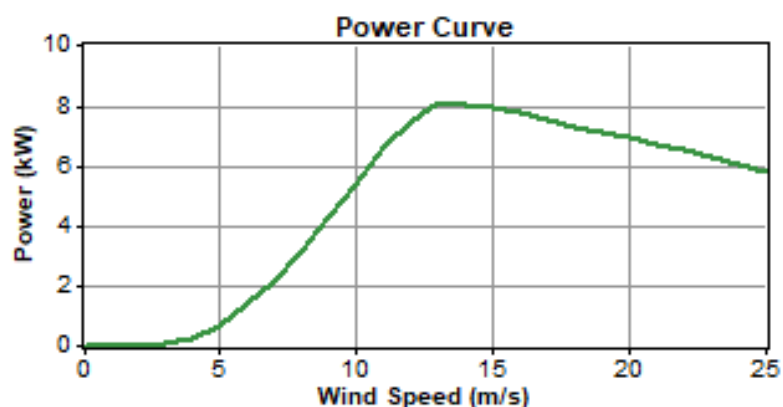


Tabela 2 - Custos inseridos no HOMER para as unidades dos aerogeradores

Unidades	Aquisição	Reposição	Operação e Manutenção
	US\$	US\$	US\$
1	22.500	18.000	1.100
2	40.500	32.400	2.000

Nos dois sistemas em que um gerador a diesel foi inserido nas simulações, contou com opções de potência de 1 kW e de 5 kW e preços variáveis conforme a Tabela 3. A vida útil desse componente foi considerada como 15000 horas de uso, independente da potência.

Tabela 3 - Custos considerados para o gerador a diesel

Potência	Aquisição	Reposição	Operação e Manutenção
kW	US\$	US\$	US\$/hora
1	300	250	0,018
5	1.500	1.200	0,050

Em consulta ao Sistema de Levantamento de Preços no site da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o combustível diesel custa na região de Santa Rosa atualmente uma média de R\$ 3,30 (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2017). Utilizando uma conversão aproximada, inseriu-se nas simulações o custo do combustível diesel US\$ 1,00 por litro.

Foram também utilizados conversores com função de retificação e de inversão, com opções de potência de 4, 8 e 12 kW. O conversor inserido nos sistemas apresenta vida útil de 15 anos e eficiência de 90% para inversão, e capacidade relativa ao inversor de 100% com eficiência de 85% para o retificador. Os custos de aquisição, reposição e operação utilizados para a construção da curva de custos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Custos considerados para os conversores

Potência	Aquisição	Reposição	Operação e Manutenção
kW	US\$	US\$	US\$
1	1.000	900	50
2	1.800	1.620	90
4	3.400	3.060	170

Os sistemas foram montados com possibilidade de armazenamento da energia excedente gerada em baterias. Para o Cenário 1, a ligação à rede também é possível e pode ser importante para possibilitar o funcionamento da estação elevatória mesmo em caso de falha no sistema híbrido de geração, já que a coleta e o tratamento de esgoto são serviços essenciais para a população.

As baterias foram escolhidas entre as opções pré-definidas disponíveis no *software*. Optou-se pelo modelo Vision 6FM200D com capacidade nominal de 200 Ah com possibilidade de adoção de 16, 32, 64 ou 96 baterias de 12 V semelhantes às disponíveis no mercado atual, com custo de aquisição de US\$ 200, custo de operação e manutenção de US\$ 10/ano e custo de substituição de US\$ 180 para cada bateria. A vida útil mínima para as baterias foi considerada como quatro anos.

A ligação na rede é prevista com valores diferentes para horas normais e horas de pico, quando a tarifa é mais elevada, consideradas como o período entre 19h e às 22h. Os valores utilizados para compra de energia foram de US\$ 0,162 para compra e de US\$ 0,08 para a venda em horário normal, e US\$ 0,80 para a compra e US\$ 0,45 para a venda em hora de pico. Foi também estabelecido uma restrição na capacidade limite para compra de energia da rede de 1,5 kW, igual à demanda de pico. Considera-se que a ligação à rede já é existente e seu custo de instalação é zero.

Para as análises de sensibilidade, foram utilizadas como variáveis as velocidades médias anuais do vento de 4, 6, 8, 10 e 12 m/s. Essa análise é importante para garantir sistemas viáveis caso as medições de velocidade do vento utilizadas estejam incorretas. Além

disso, a variação na velocidade do vento no local na configuração do sistema híbrido para que a demanda energética seja atendida pode possibilitar a aplicação desse sistema em outros locais com disponibilidades de recurso eólico diferentes.

O custo do óleo diesel também foi inserido nas análises de sensibilidade para avaliar a possível influência da mudança de preços, com valores por litro de US\$ 0,80, US\$ 0,90, US\$ 1,10 e US\$ 1,20.

Além disso, consideraram-se diminuições sucessivas nos custos das placas fotovoltaicas para avaliar a viabilidade do uso das mesmas. Assim, foram inseridos fatores de 90%, 80%, sucessivamente até 10% dos custos totais de instalação e operação dos módulos. Esse fator é chamado de multiplicador de custos (*PV cost multiplier*), e sua aplicação pode representar economia significativa nos sistemas.

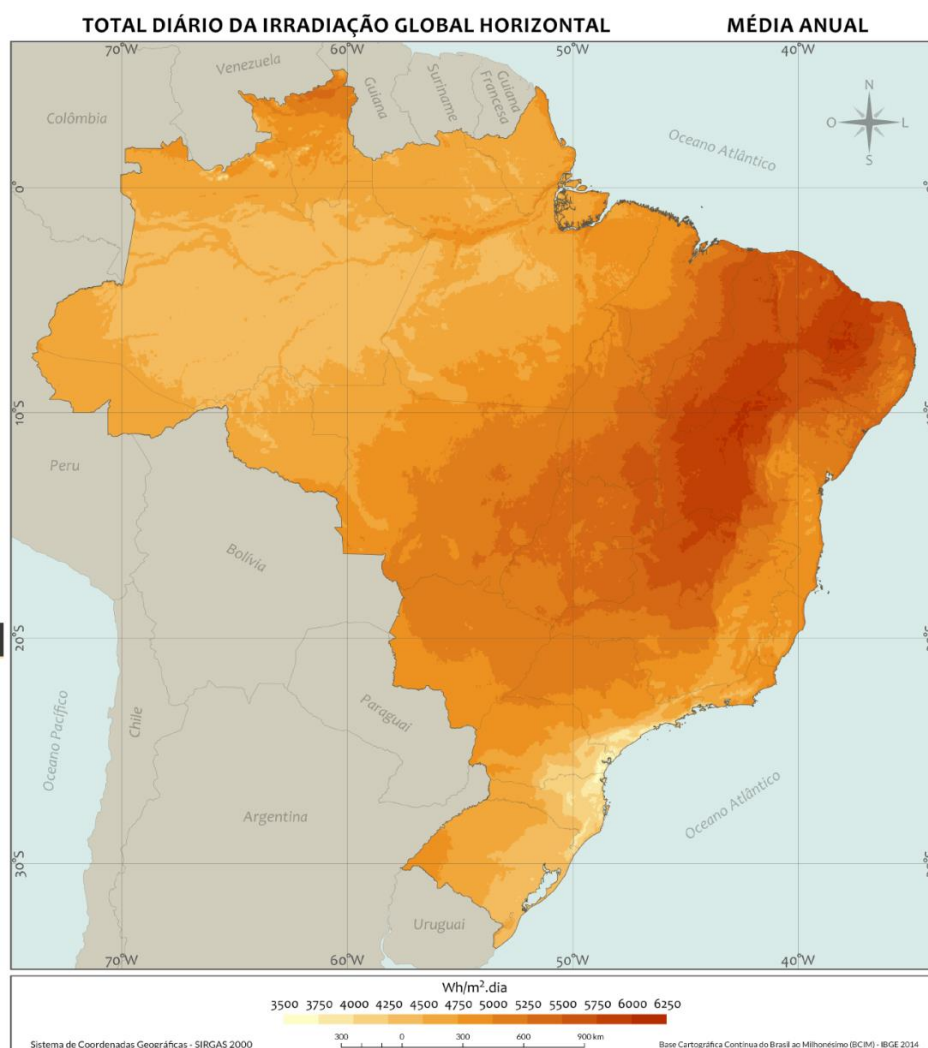
4.3 Potenciais eólico e solar

O conhecimento da disponibilidade de cada recurso é importante para o dimensionamento de qualquer sistema de energias renováveis. Como foram inseridos aerogeradores e módulos fotovoltaicos, os potenciais solar e eólico são descritos abaixo.

4.3.1 Solar

A Figura 17 (PEREIRA et al, 2017) apresenta um mapa da média anual da irradiação solar global no plano horizontal para o Brasil, que é a componente que representa a soma da radiação direta e difusa que atinge o solo. A área de estudo está localizada em uma área com valores médios de irradiação solar média anual entre 4.500 a 4.750 Wh/m²dia, valores elevados que demonstram o potencial de utilização do recurso solar.

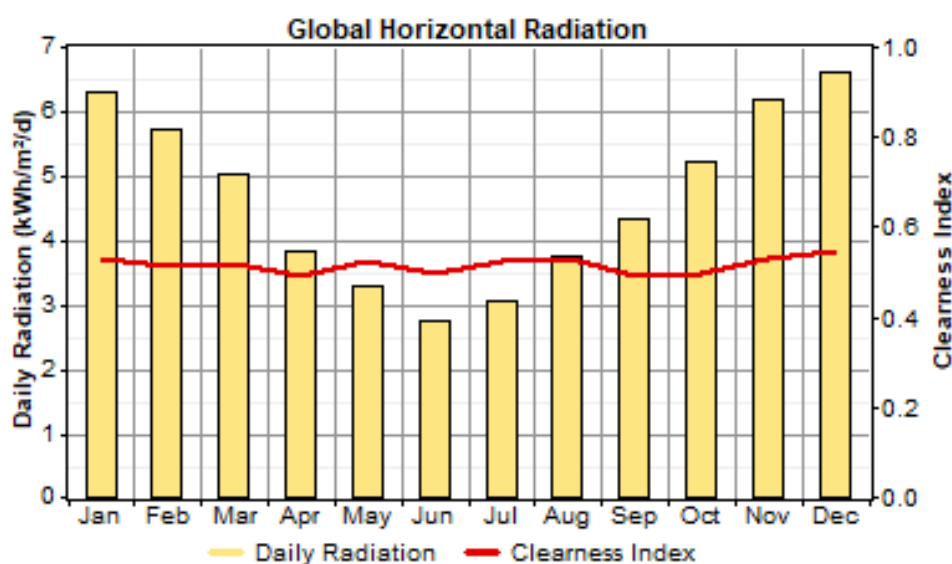
Figura 17 - Mapa de irradiação solar no plano horizontal para o Brasil



Fonte: PEREIRA et al, 2017

Para o *software* HOMER, pode-se acessar a base de dados de irradiação solar dos satélites do NREL e da NASA, a agência espacial dos Estados Unidos, através das coordenadas geográficas do local de estudo. A Figura 18 apresenta a irradiação solar global e o índice de claridade no plano horizontal para cada mês do ano utilizada no HOMER, com valores coerentes com a irradiação média anual do local. Pode-se notar que a insolação máxima ocorre em dezembro e a mínima em junho, correspondendo ao início das estações do verão e do inverno respectivamente na área de estudo.

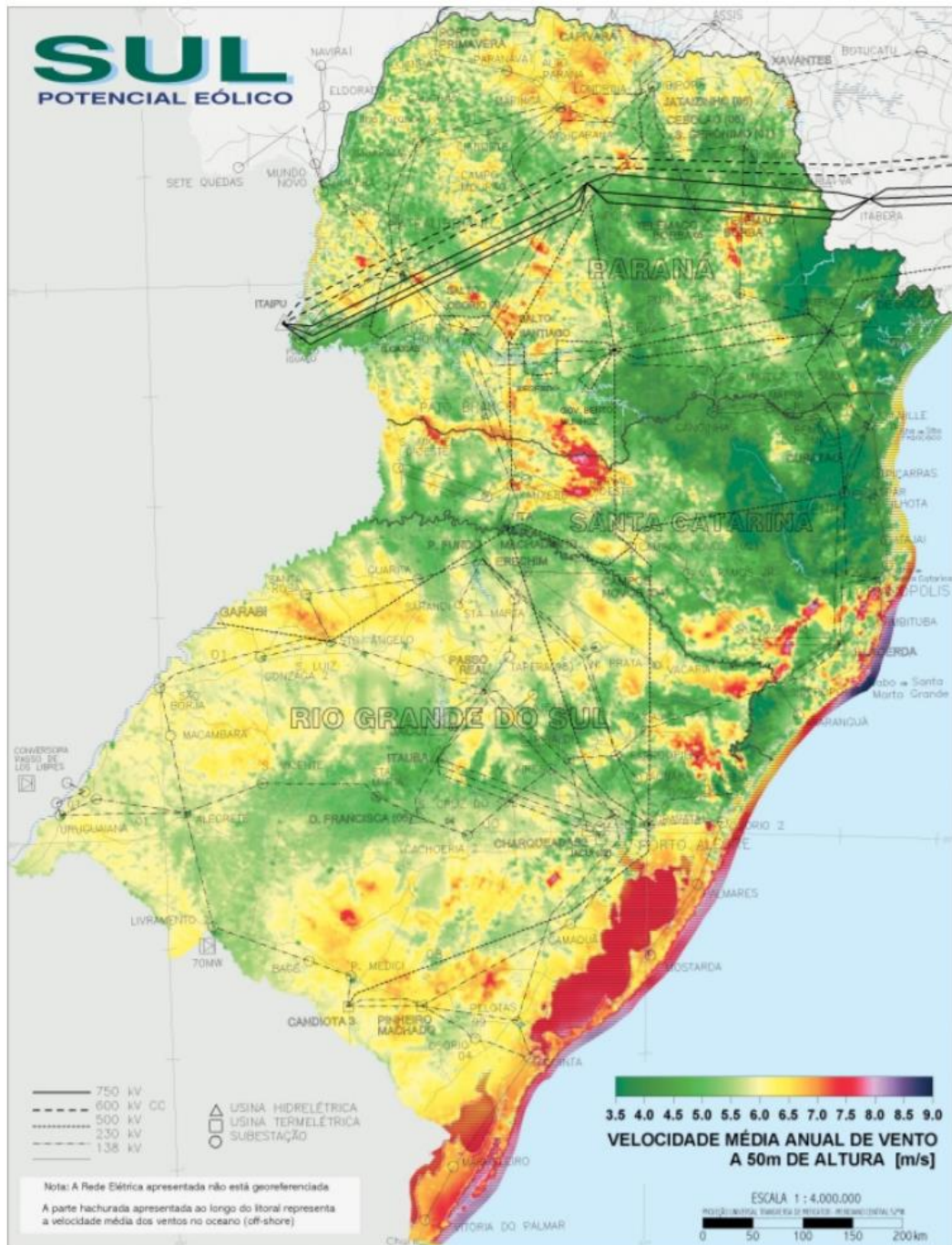
Figura 18 – Valores de irradiação global no plano horizontal e índice de claridade para a área de estudo



4.3.2 Eólico

Na Figura 19 é apresentado o mapa da velocidade média anual de vento a 50 metros de altura, em m/s, para a região Sul do Brasil, retirado do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE, 2001). As velocidades na área de estudo variam entre 6 e 7 m/s para essa altura, e esses valores servem como um indicativo do potencial de utilização da energia eólica na região. Porém, conforme a Figura 5 apresentada anteriormente, a velocidade do vento é menor para alturas menores. Portanto, para sistemas de microgeração com aerogeradores de pequeno a médio porte, a velocidade real do vento para essa aplicação é menor do que a medida a 50 metros, já que as turbinas operam mais próximas ao solo e sob maior influência da rugosidade do terreno.

Figura 19 - Velocidade média anual de vento na região Sul do Brasil



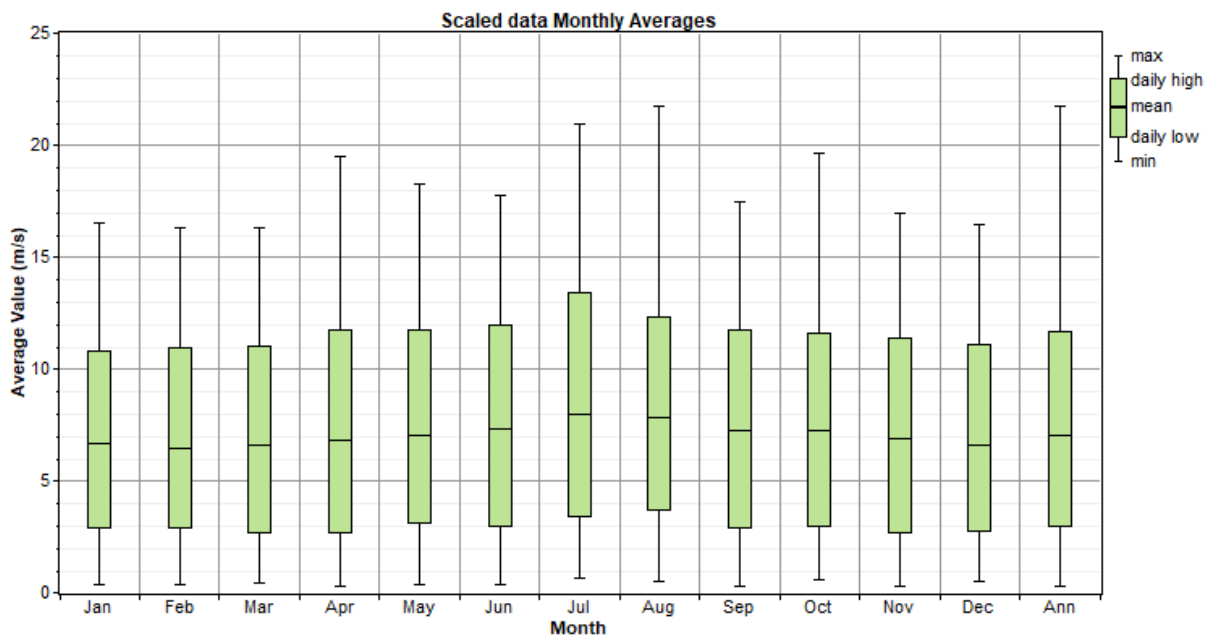
Fonte: AMARANTE, 2001

Quando se deseja dimensionar sistemas que possuam aerogeradores em sua composição, deve-se fornecer ao *software* HOMER medições da velocidade do vento. Para o presente projeto, velocidades médias mensais no local foram inseridas e um gráfico de variabilidade sintético foi gerado através da distribuição de Weibull (Equação 2), com um conjunto de dados para a velocidade dos ventos para cada mês do ano. O gráfico da

variabilidade dos ventos no local é apresentado na Figura 20, com um gráfico *box plot* representando os valores médios de velocidade do vento (m/s) para os meses do ano,

A série de dados utilizada é medida em anemômetros a 50 metros de altura, mas a altura do rotor escolhida para as simulações é de apenas 27 metros. Sendo assim, a lei da potência expressa na Equação 3 é utilizada pelo HOMER em suas rotinas de cálculo para a obtenção da velocidade que atinge o rotor do aerogerador. A imagem apresenta a variabilidade típica dos ventos para a região e de acordo com os valores médios anuais apresentados na Figura 19 para a mesma altura. A velocidade média anual é de, aproximadamente, 7,07 m/s.

Figura 20 – Variabilidade dos ventos na região da EEE em estudo



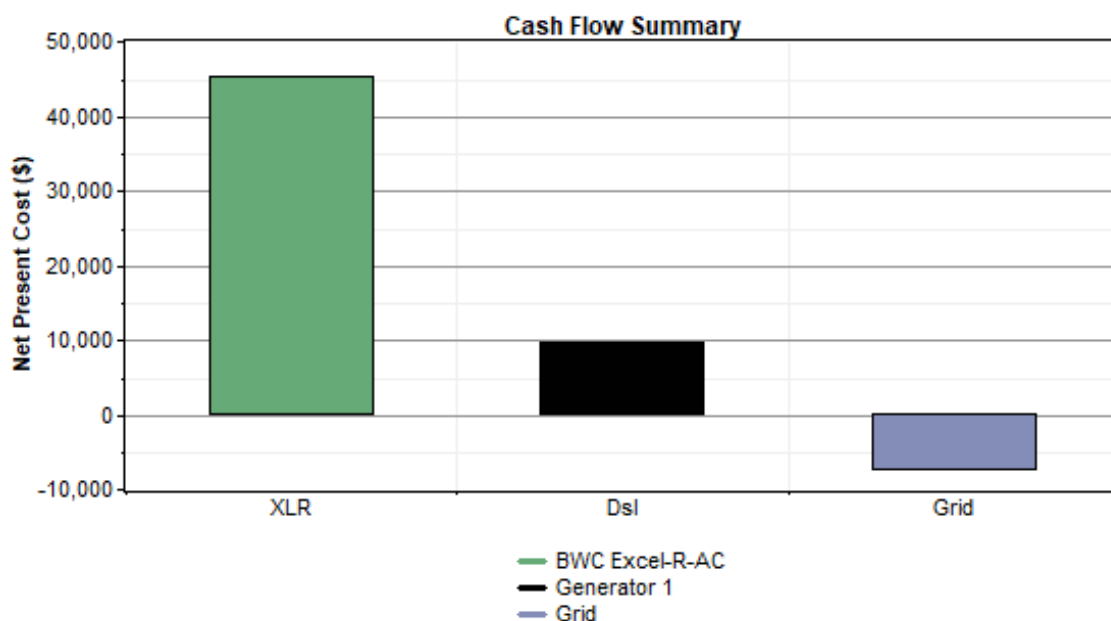
5 RESULTADOS E ANÁLISES

A partir das três configurações propostas nas Figuras 12, 13 e 14, o sistema foi simulado no HOMER para cada cenário.

Para o primeiro cenário, com conexão à rede e possibilidade de venda de energia excedente gerada e aplicando-se as condições iniciais de valor do diesel de US\$ 1,00 e velocidade do vento média de 7,07 m/s, 11 configurações viáveis são apresentadas pelo programa, com combinações diversas possíveis para a potência de cada componente.

O sistema ótimo apresenta somente um aerogerador, um gerador a diesel de 5 kW e a conexão à rede. O sistema funciona todo em CA, não sendo necessária a retificação de corrente. O custo inicial dos componentes é de US\$ 22.800 e o valor presente líquido dessa configuração é de US\$ 47.867, com custo de energia por kWh de US\$ 0,291. A geração de energia para atendimento do consumo de energia da EEE representou somente 56% do tempo de operação do sistema, e no restante do tempo o sistema vendia energia produzida para o sistema. O VPL é menor do que o esperado já que a energia excedente é vendida para a rede, abatendo parte dos custos, conforme Figura 21. A cor verde representa o aerogerador, a cor preta o gerador a diesel e lilás a rede elétrica.

Figura 21 – Divisão por componente do VPL para o sistema conectado à rede

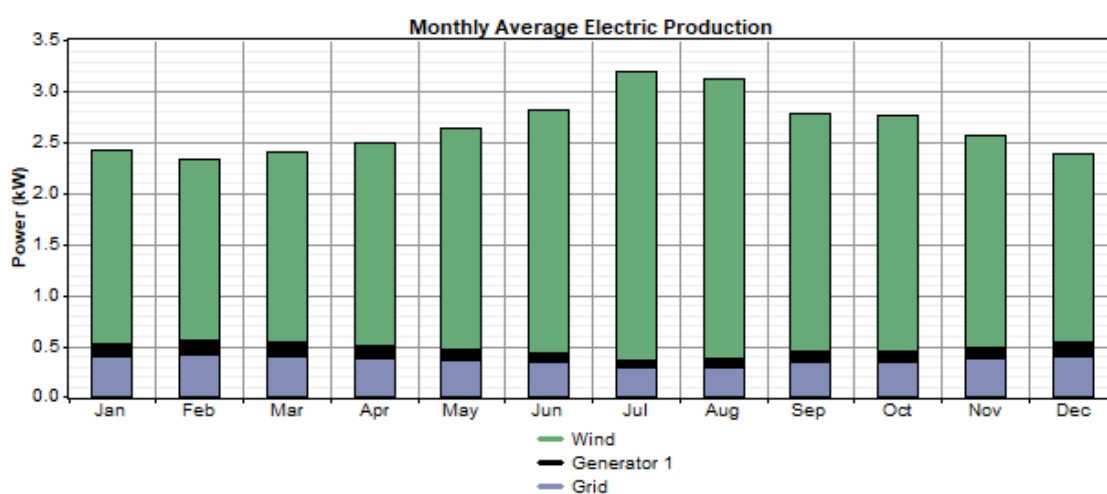


Quanto à produção de energia, o gerador é responsável por apenas 5% da média total de energia produzida, enquanto 13% são comprados da rede pelo sistema e o restante (82%) é

produzido pelo aerogerador. Sendo assim, mesmo sendo um sistema com gerador a diesel e conectado à rede, apresenta produção de energia 82% por fontes renováveis, sendo boa opção para diminuir a emissão de GEE na produção de energia. O excesso de energia no sistema é de menos de 2%, já que a energia excedente é em boa parte vendida à rede.

A Figura 22 apresenta a potência média gerada por cada componente para cada mês do ano, onde fica evidente essa grande participação dos aerogeradores no atendimento à demanda da EEE.

Figura 22 – Distribuição mensal média da eletricidade gerada por componente do sistema para o Cenário 1

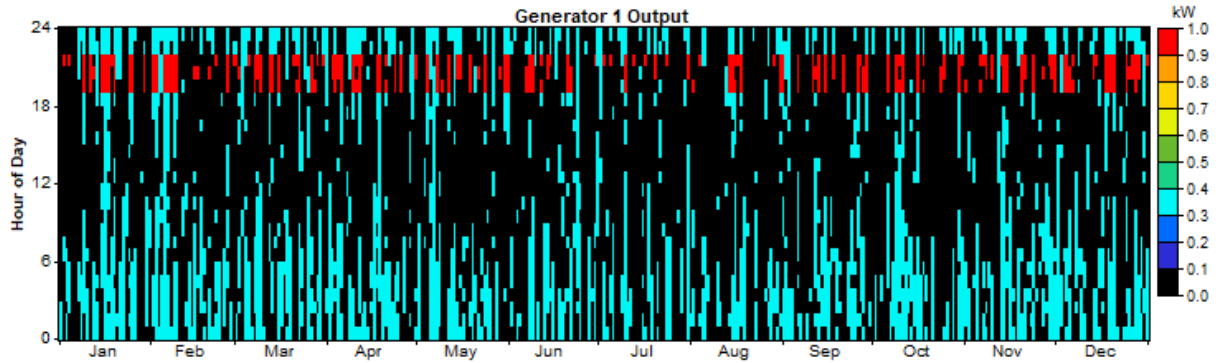


A Figura 23 apresenta a produção de energia pelo aerogerador para o Cenário 1. O eixo x apresenta os meses do ano, enquanto que no eixo y são representadas as horas do dia. Pelo código de cores à direita do gráfico, produções maiores de energia, perto da potência nominal do componente, aparecem nas cores laranja e vermelha. Quando o gerador não é utilizado, a cor preta representa a produção nula. Sendo assim, pode-se perceber que a parte da demanda de energia atendida pelo gerador a diesel é mais importante durante o período de pico para a compra de energia da rede, entre as 19h e às 22h. Nesse período, o custo da utilização do combustível compensa a tarifa mais elevada rede, e o gerador a diesel complementa a produção do aerogerador.

O uso de baterias no sistema conectado à rede não apresenta grande benefício econômico e não foi incluída no sistema ótimo, já que a energia excedente em um horário pode ser vendida para a rede ao invés de ser armazenada e as baterias apresentam custos relativamente elevados para aquisição e substituição quando em maior número. Já os módulos fotovoltaicos aparecem no espaço de soluções para as condições iniciais apenas com pequenas

capacidades como 0,5 kW ou 1 kW e com VPL mais elevado, devido a seus custos de aquisição em comparação à quantidade de energia produzida.

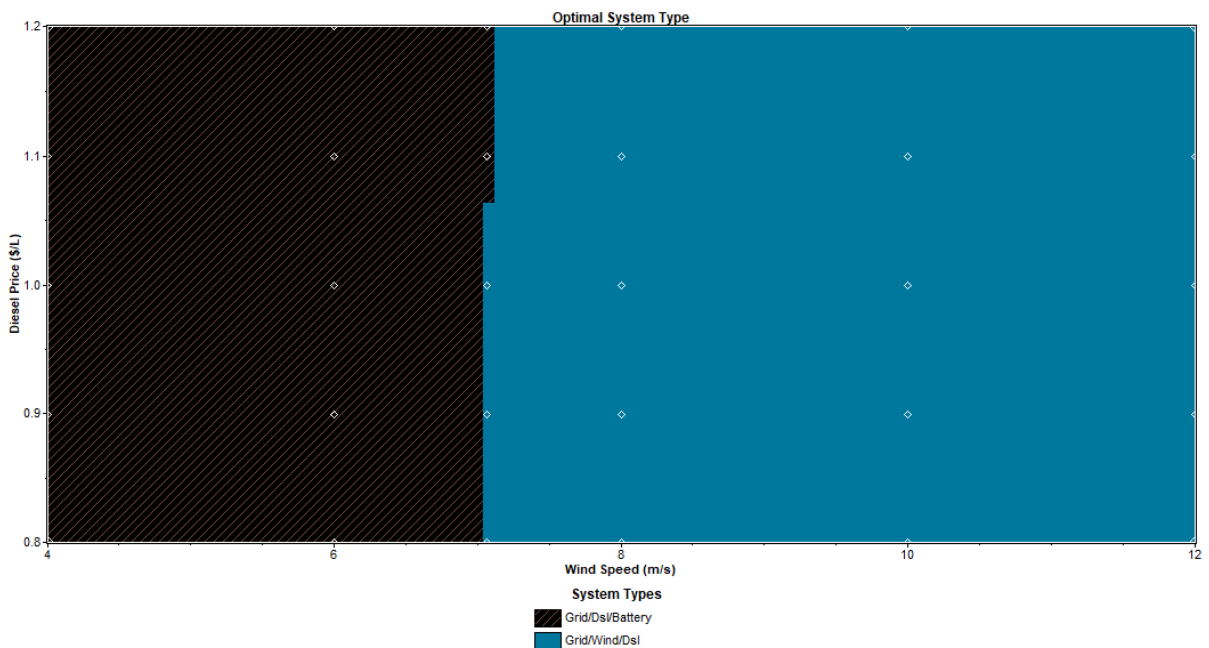
Figura 23 – Distribuição horária da demanda atendida pelo gerador para o Cenário 1



A configuração ótima do sistema pode mudar se preços diferentes para a compra e venda de energia forem considerados ou se forem estipulados limites diferentes para essas operações.

Para velocidades menores do vento, o sistema conectado à rede com operação somente de geradores a diesel mostra-se a melhor solução (Figura 24). Essas soluções representaram apenas uma parte dos sistemas viáveis, já que para velocidades médias do vento acima de 7 m/s, para todos os preços de diesel, essa montagem já não é mais a ótima e o uso conjunto com os aerogeradores conectados à rede mostra-se mais economicamente viável.

Figura 24 – Análise de sensibilidade para o Cenário 1

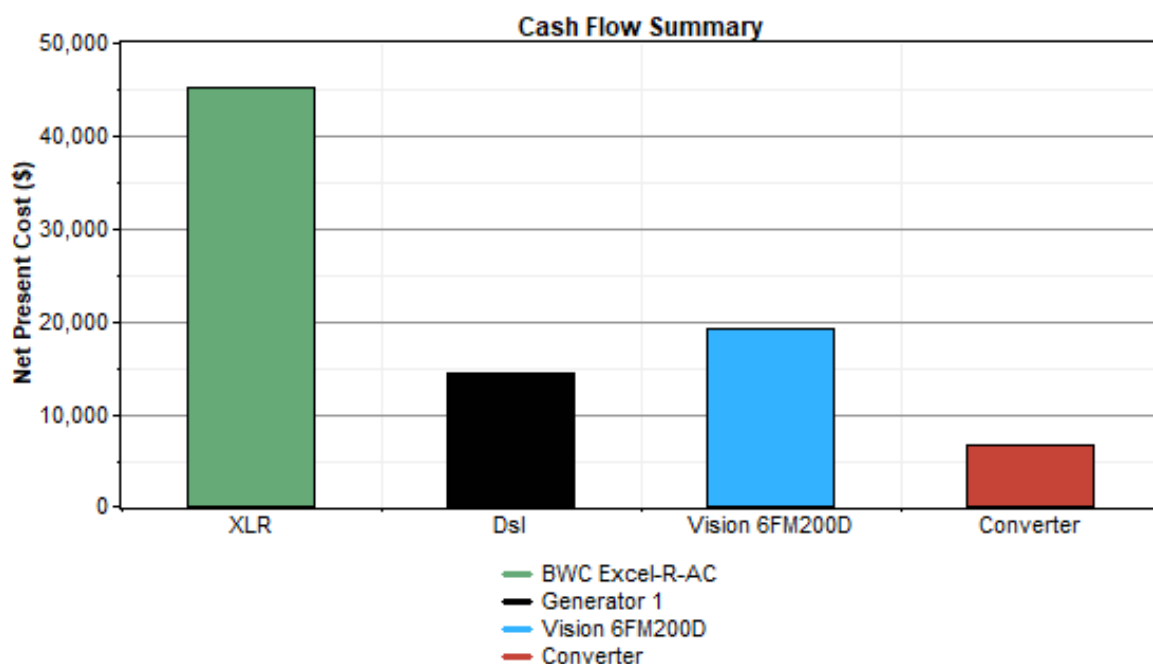


Para a condição inicial de vento, a diminuição do preço do diesel para US\$ 0,80 já apresenta um VPL com redução de US\$ 2.000. Com isso pode se perceber como mudanças nos parâmetros podem alterar os preços finais.

No segundo cenário, é apresentado um sistema isolado composto por energias renováveis, mas com a possibilidade de utilização de um gerador a diesel de apoio. A configuração proposta é simulada e os sistemas viáveis são obtidos, com obtenção de 10 configurações diferentes possíveis. A organização desses sistemas pelo VPL demonstra que o sistema ótimo é composto de um aerogerador, um gerador a diesel de 5 kW, um conversor de 4 kW e 32 baterias, com custo de aquisição de US\$ 33.800 e VPL de US\$ 85.381, e custo de energia de US\$ 0,518/kWh. As placas fotovoltaicas não aparecem nessa solução, provavelmente devido ao seu custo elevado e baixo rendimento.

Os custos totais, representados pelo VPL, são apresentados em função do componente na Figura 25. O gráfico segue o mesmo código de cores da Figura 20, com inclusão das baterias na cor azul e do conversor na cor vermelha. Percebe-se então que o aerogerador representa a parte mais importante dos custos do sistema, principalmente devido a seus custos de aquisição. O gerador a diesel, apesar de seu custo de aquisição baixo, gera gastos elevados pela necessidade de aquisição de combustível.

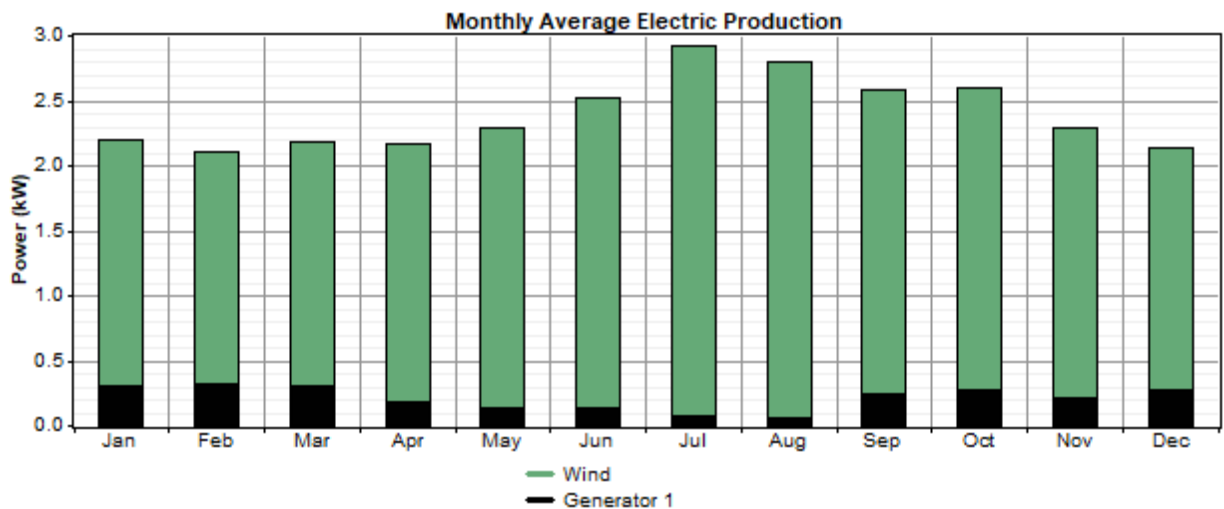
Figura 25 – Divisão por componente do VPL para o Cenário 2



A divisão da produção de eletricidade média por mês é apresentada na Figura 26. Percebe-se que para todos os meses o aerogerador produzia energia em quantidades muito

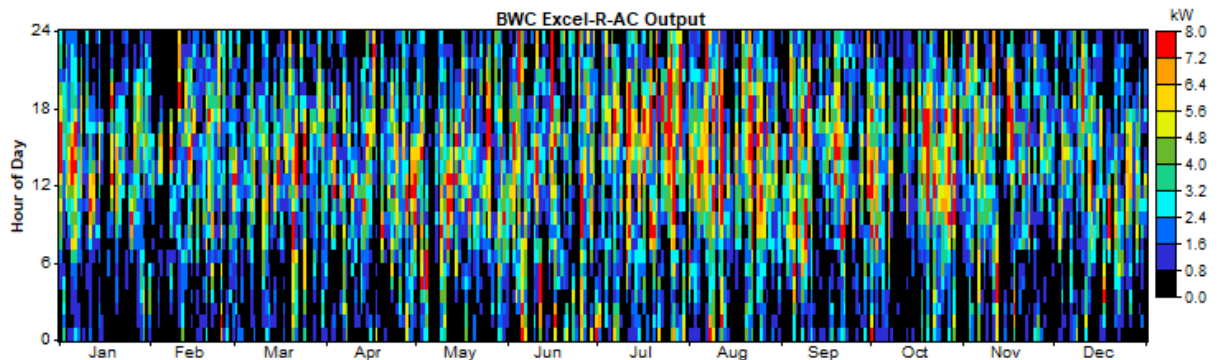
superiores ao gerador a diesel, que realmente funciona apenas como apoio em períodos do dia com velocidades menores do vento. Isso é coerente com os dados de dimensionamento do sistema apresentado pelo *software*: do total de energia produzida, aproximadamente 91% é de fonte eólica e somente os outros 9% pelo gerador. Portanto, o sistema apresenta baixo nível de emissões de poluentes, mesmo com um gerador a diesel em funcionamento em comparação com sistemas convencionais baseados unicamente em combustíveis fósseis.

Figura 26 - Produção de energia média por mês no Cenário 2



A Figura 27 apresenta a produção média horária de eletricidade do aerogerador para um ano. Essa produção é bem distribuída durante o dia e durante os meses do ano e não apresenta padrão horário ou de sazonalidade bem definido. O tempo de funcionamento é de 8.420 horas/ano.

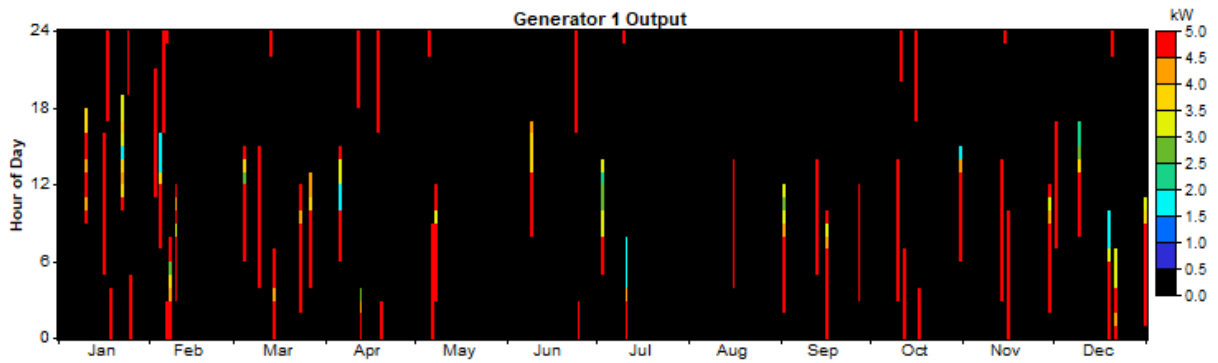
Figura 27 – Produção média de eletricidade por mês para os aerogeradores no Cenário 2



As informações sobre a produção de energia total podem são confirmadas pela Figura 28, que apresenta a produção do gerador a diesel no tempo, com variação horária e durante os

meses do ano. Nos meses de maior velocidade média do vento como julho e agosto, o gerador quase não é colocado em funcionamento, já que o aerogerador é capaz de atender à demanda sozinho. Para essa situação, o gerador consome em média 1.000 litros/ano de combustível em 404 horas de funcionamento e produz 1.878 kWh/ano de energia.

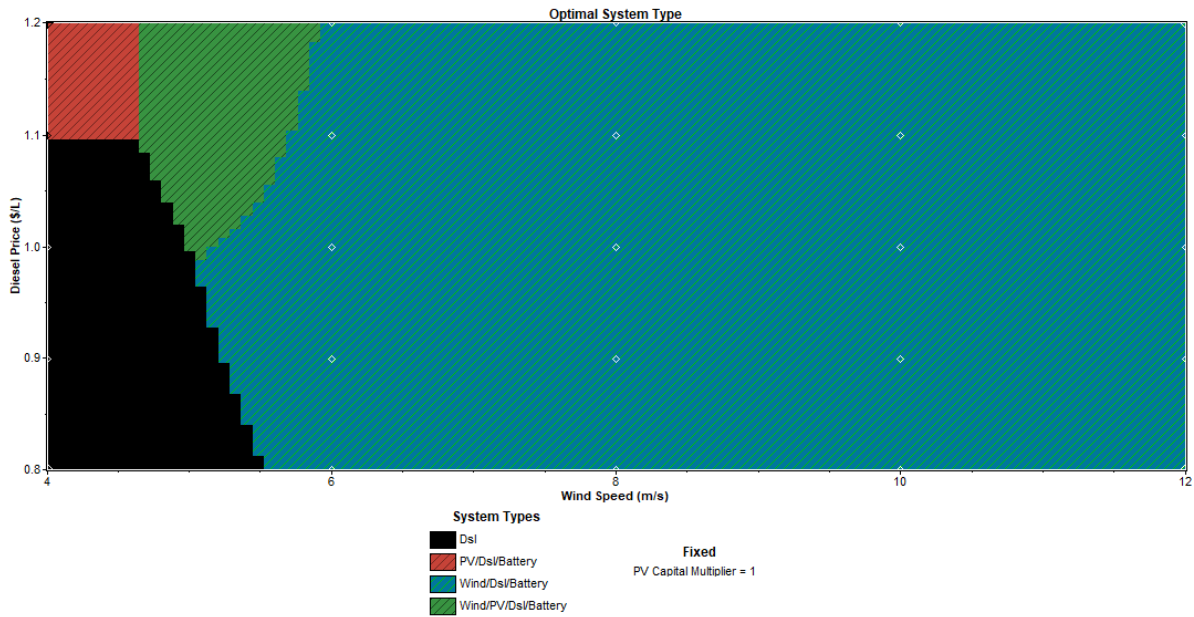
Figura 28 - Produção média de eletricidade por mês para o gerador a diesel no Cenário 2



Uma análise de sensibilidade também é realizada para o Cenário 2. Para modificações no regime de ventos e no preço de diesel, os sistemas com menor custo são apresentados na Figura 29. O eixo x representa a velocidade dos ventos em m/s e o no eixo y é representado o preço do combustível, em US\$. Percebe-se que, para todas as situações, a inclusão de um gerador a diesel de apoio tornou-se viável economicamente. Os geradores a diesel inclusive aparecem operando sozinhos para custos de até aproximadamente US\$ 1,09/litro e velocidades muito baixas de vento, inferiores a 5,5 m/s. É importante ressaltar que não foram consideradas penalidades pela emissão de poluentes devido à utilização do diesel, e a implantação dessa cobrança pode inviabilizar esse tipo de sistema.

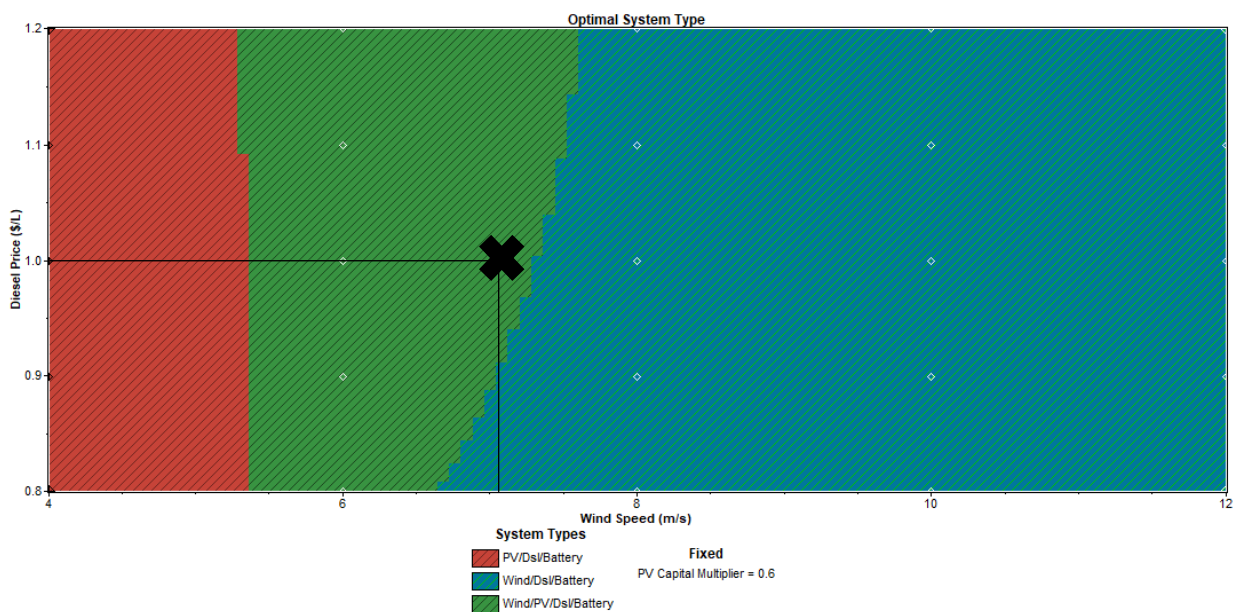
Para velocidades médias do vento menores que 4,5 km/h os aerogeradores deixam de ser viáveis para o sistema ótimo.

Figura 29 – Análise de sensibilidade para o Cenário 2



A inclusão da energia solar torna-se viável para as condições iniciais com aplicação de um multiplicador de 0,6 para os módulos, conforme análise de sensibilidade apresentada na Figura 30, compondo um sistema eólico-fotovoltaico-diesel. Isso significa que uma diminuição de custos de aproximadamente 40% para os módulos justificariam a inclusão desse componente no sistema. Em velocidades médias menores para o vento, percebe-se ainda o aumento da faixa vermelha no gráfico, onde não são incluídos aerogeradores no sistema ótimo.

Figura 30 – Sistema eólico-fotovoltaico-diesel isolado da rede para multiplicador de 0,6 para os módulos fotovoltaicos



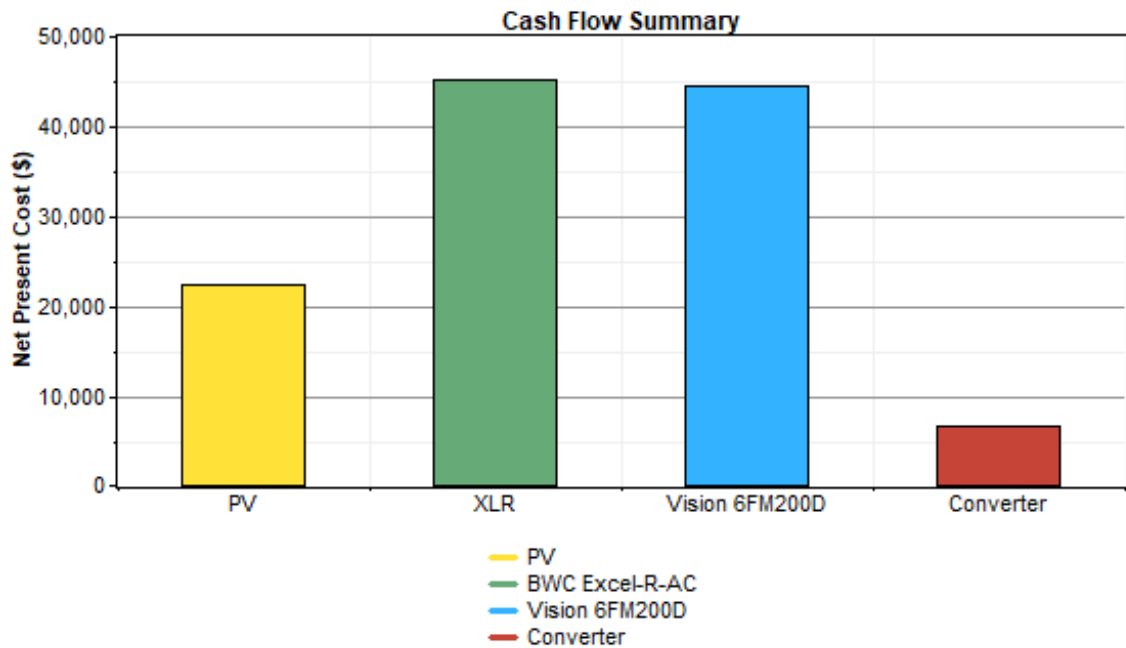
Por fim, para o terceiro cenário considera-se um sistema somente com energias renováveis. Somente duas configurações são possíveis, sistema eólico ou fotovoltaico-eólico. Para o número de componentes estipulado no início das análises, um sistema puramente fotovoltaico não atende à demanda da EEE, mas a inclusão da possibilidade de utilização de módulos fotovoltaicos de maior potência nominal e de baterias para abastecer o sistema à noite poderia tornar viável esse tipo de sistema, apesar dos custos elevados.

Para as condições iniciais, o sistema ótimo apresenta aerogerador, módulo fotovoltaico, conversor e baterias, com custo de aquisição inicial de US\$ 55.900, mais elevado que os cenários anteriores devido à aquisição dos componentes. Os componentes necessários são um aerogerador, 96 baterias, módulo fotovoltaico de 2 kW e conversor de 4 kW. O VPL final é de US\$ 118.753 e o custo de energia é de US\$ 0,721/kWh, também mais elevado em relação ao segundo cenário provavelmente devido ao pagamento da aquisição de equipamentos ao longo de sua vida útil.

A energia em excesso é de aproximadamente 30% do total gerado. Isso significa que a geração é maior do que o consumo em alguns períodos, provavelmente quando as baterias já estão 100% carregadas. Um aumento no número de baterias do sistema poderia ser útil para armazenamento dessa energia.

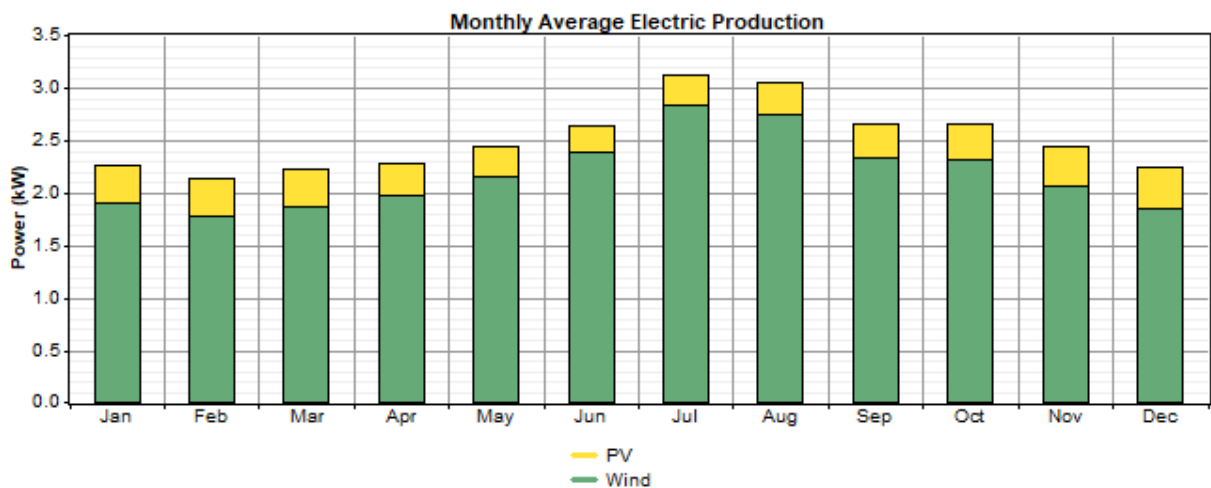
A divisão de custos necessários para a implantação desse sistema é apresentada na Figura 31, com os módulos fotovoltaicos na cor amarela e os outros componentes como citados na Figura 24. Fica evidente que os custos com as baterias em sistemas de energias renováveis são elevados e não podem ser negligenciados, já que o preço pode ser praticamente semelhante ao custo de componentes com preço unitário muito superior como os aerogeradores.

Figura 31 – Divisão por componente do VPL para o Cenário 3



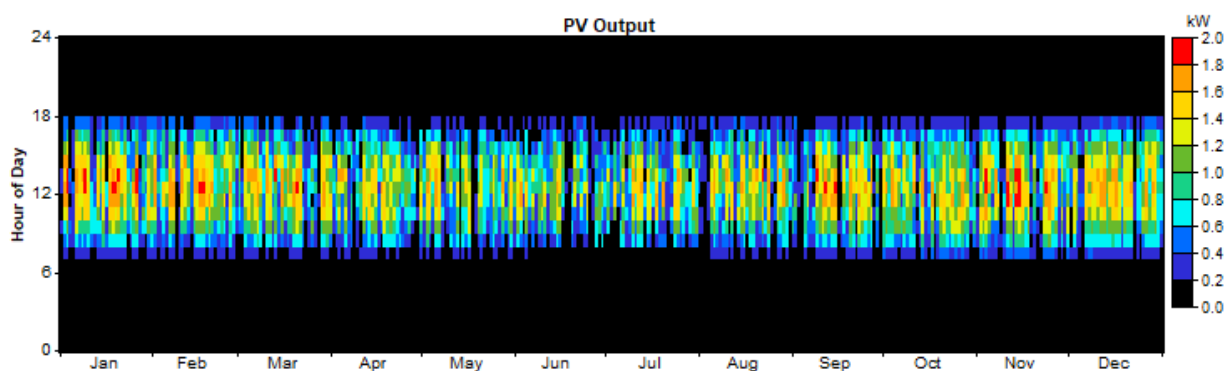
Quanto à fonte da energia, aproximadamente 87% da energia total é fornecida pelo aerogerador, enquanto o módulo fotovoltaico fornece os outros 13%, e a geração mensal com diferenciação da geração por fonte é apresentada na Figura 32. Em comparação com a Figura 29, percebe-se que apesar de que a fonte solar fornece apenas 13% da energia do sistema, os módulos fotovoltaicos representam aproximadamente 20% do total dos custos do sistema. Os aerogeradores produzem energia em quantidade e distribuição semelhantes ao Cenário 2, segundo a Figura 26.

Figura 32 – Geração média mensal de eletricidade para o Cenário 3



A produção de energia pelos módulos fotovoltaicos ocorre, conforme esperado, das 7 até aproximadamente 18 horas, com períodos menores de tempo nos meses de inverno, e no resto do tempo a produção é nula, como é apresentado na distribuição horária da geração dos módulos fotovoltaicos da Figura 33.

Figura 33 - Geração média mensal de eletricidade pelos módulos fotovoltaicos para o sistema eólico-fotovoltaico isolado

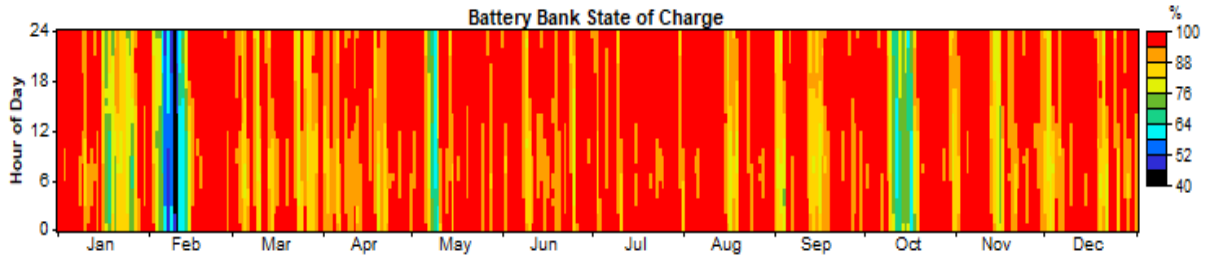


A potência chega próxima da potência nominal do módulo no horário do meio do dia quando ocorre a maior irradiação solar, atingindo o valor de 1,96 kW, exceto para os meses de inverno quando a potência não excede o valor de 1,6 kW. Os módulos fotovoltaicos operam por 4.370 horas/ano, o que representa apenas 50% do tempo total de operação dos aerogeradores para o mesmo cenário. Isso faz sentido já que a geração por fonte solar só pode acontecer por aproximadamente 11 horas do dia, enquanto os aerogeradores podem apresentar produção 24 horas por dia.

O fornecimento de energia pelas fontes renováveis não é constante no tempo e a energia armazenada em baterias pode se tornar essencial para suprir a demanda energética em períodos de menor disponibilidade dos recursos. Sendo assim, o uso de baterias é necessário e incluído em todos os sistemas viáveis para essa configuração e o número total de componentes desse tipo é mais elevado em relação ao sistema com gerador a diesel.

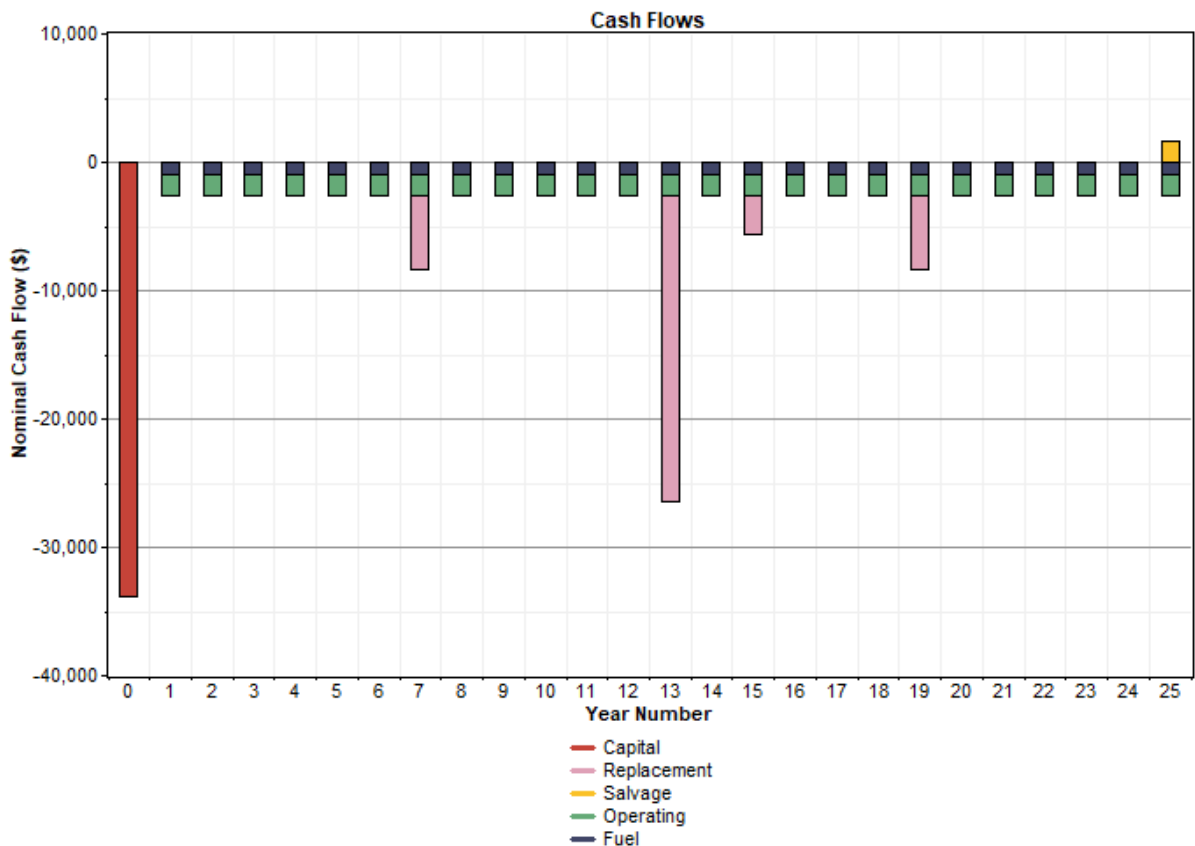
A Figura 34 apresenta o SOC, mostrando que as baterias estão praticamente carregadas na maior parte do ano exceto durante períodos nos meses de janeiro, fevereiro, maio e outubro. Isso pode ser explicado por uma complementariedade temporal baixa entre as duas fontes nesses meses, com combinação de valores mais baixos para os dois recursos em relação ao resto do ano, resultando em mais períodos com consumo maior do que produção de energia e necessidade de utilização das reservas das baterias.

Figura 34 – Estado horário médio de carga das baterias durante os meses do ano para o Cenário 3



Para visualizar a espacialização dos gastos totais no período de 25 anos escolhido para a análise, na Figura 35 é apresentado o fluxo de caixa de operação do sistema. Conforme esperado para o Cenário, os custos iniciais são os mais representativos e o custo de operação e manutenção é baixo. Os custos de reposição são necessários a cada 10 anos para troca das baterias e entre 12 e 13 anos para a substituição dos outros componentes, baseado em suas estimativas de vida útil.

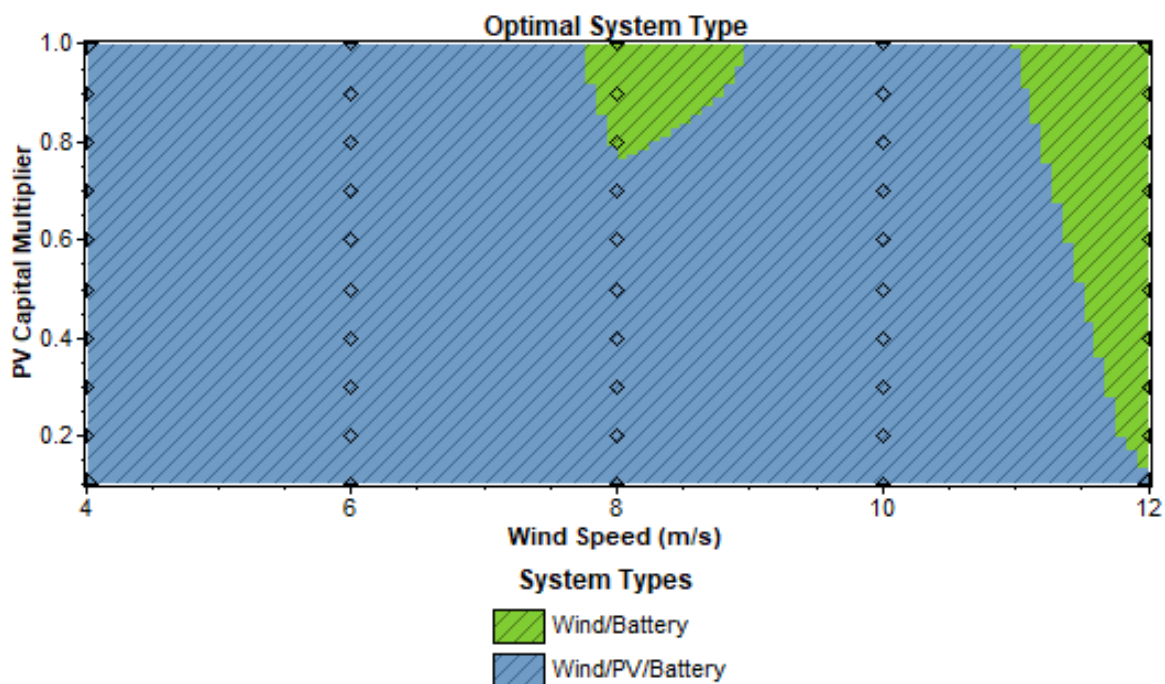
Figura 35- Fluxo de caixa para o Cenário 3



A Figura 36 apresenta a análise de sensibilidade para essa configuração, com o multiplicador dos custos dos módulos fotovoltaicos no eixo y e a velocidade média do vento no eixo x. A maioria dos sistemas é composta por aerogeradores e módulos fotovoltaicos, mas uma parcela para altas velocidades dos ventos e maiores multiplicadores de PV apresenta sistemas puramente eólicos como ótimos.

A análise de sensibilidade demonstra também que o sistema constituído somente de energias renováveis pode ter seu custo reduzido de forma importante através da diminuição no custo dos módulos fotovoltaicos. Para uma diminuição de 50% nesses custos, o VPL para o cenário nas condições iniciais passa dos US\$ 118.753 iniciais para aproximadamente US\$ 99.000 e o custo de energia por kWh passa de US\$ 0,721 para US\$ 0,608. Demonstra-se assim o potencial crescente de utilização de energias renováveis quando recebem incentivos para diminuição do preço dos componentes.

Figura 36 – Análise de sensibilidade para o Cenário 3



A Tabela 5 apresenta um resumo dos três cenários apresentados para a otimização do sistema nas condições iniciais, com velocidade média do vento de 7.07 m/s, óleo diesel com custo de US\$ 1,00 por litro e sem multiplicador para o preço das placas fotovoltaicas. Os três sistemas são viáveis do ponto de vista de atendimento à demanda.

A partir dos dados da Tabela 5, fica evidente que os investimentos necessários para a utilização de energias renováveis em sistemas isolados ainda são expressivos. Os sistemas

isolados necessitam do apoio de baterias, que podem ser dispensadas quando a rede é conectada. O desenvolvimento de novas tecnologias e de novos modelos de componentes tem contribuído para uma tendência de diminuição no custo de aquisição dos componentes. Além disso, em diversos países do mundo, a utilização de energias renováveis é incentivada por políticas públicas, financiamentos e incentivos de redução de impostos, que podem contribuir para diminuição desses valores.

Tabela 5 - Configurações obtidas para as condições iniciais

Configuração	Custo de aquisição (US\$)	Valor Presente Líquido (US\$)	Custo de energia (US\$/kWh)	Componentes
Cenário 1	22.800	47.867	0,291	1 aerogerador 1 gerador diesel 1 kW ligação à rede
Cenário 2	33.800	85.381	0,581	1 aerogerador 1 gerador diesel 5 kW 32 baterias 1 conversor 4 kW
Cenário 3	55.900	118.753	0,721	1 aerogerador módulo fotovoltaico 2 kW 96 baterias 1 conversor 4 kW

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas híbridos utilizam dois ou mais tipos de energias atuando em conjunto, sendo muito utilizados para energias renováveis já que proporcionam uma possível diminuição no tempo de interrupção de fornecimento de energia, e aumentam a eficiência do sistema através do uso de mais de um recurso natural.

A utilização de energias renováveis em todos os setores da economia pode contribuir para diminuição da emissão de gases de efeito estufa por fontes de energia que utilizam combustíveis fósseis, seja em geração no local por geradores a diesel ou por conexão a redes que são abastecidas por energia produzida por combustíveis fósseis.

A energia elétrica é de grande importância para o desenvolvimento de atividades econômicas. Sendo assim, os custos de energia elétrica podem representar parte importante dos gastos em diversos setores, entre eles no setor de saneamento. A partir desse problema, o presente trabalho apresentou o dimensionamento de sistema híbrido de energias renováveis para atender à demanda de uma estação elevatória de esgoto utilizada pela concessionária local de saneamento em Santa Rosa no Rio Grande do Sul, visando à uma produção limpa de energia.

Uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos já desenvolvidos sobre sistemas híbridos destinados à geração de energia para o saneamento e para o bombeamento de água foi realizado, com levantamento de trabalhos de pesquisa e de instalação reais realizados no mundo todo para sistemas com demandas energéticas de magnitudes variadas.

O *software* HOMER foi utilizado para simulação e otimização do sistema de energia renováveis. Três configurações para atendimento da demanda da EEE foram propostas: eólico-fotovoltaico-diesel conectado à rede, eólico-fotovoltaico-diesel isolado e eólico-fotovoltaico, compondo os Cenários 1, 2 e 3, respectivamente.

O sistema conectado à rede torna-se muito interessante quando há possibilidade de venda da energia excedente para a rede, principalmente em horários de pico, abatendo assim uma parte dos custos de operação e de manutenção anuais e diminuindo o custo de energia por kW.

Quanto aos sistemas isolados, esses são totalmente capazes de suprir a demanda energética na área de estudo e os recursos solar e eólico apresentam valores interessantes para a exploração. Sendo assim, os resultados obtidos no presente trabalho evidenciam o potencial de utilização de energias renováveis em microgeração para bombeamento também quando isolado da rede transmissora, possibilitando o abastecimento de energia elétrica sem

necessidade de gastos com extensão da rede de transmissão de energia, em locais onde essa não existe.

Apesar disso, é importante ressaltar que os custos ainda são elevados, principalmente devido a gastos com a aquisição dos componentes. Programas de incentivos governamentais à produção limpa de energia e implantação de penalidades à emissão de GEE podem contribuir para diminuir os custos totais e tornar esses sistemas de energias renováveis competitivos no mercado. Além disso, estratégias de operação mais eficientes e desenvolvimento de novas tecnologias tanto para os componentes geradores como para os de armazenamento também podem auxiliar na redução de custos.

Para a instalação real de um sistema híbrido, uma melhor caracterização dos recursos eólico e solar torna-se necessária e pode contribuir para a diminuição dos custos, evitando um superdimensionamento desse sistema.

Como resumo dos sistemas propostos, os cenários 1, 2 e 3 apresentam VPL de US\$ 47.867, US\$ 85.381 e US\$ 118.753, respectivamente. O custo de energia por kWh também é um parâmetro importante e apresentou valores de US\$ 0,291, US\$ 0,581 e US\$ 0,721 para os Cenários 1, 2 e 3 respectivamente. Ressalta-se que para o terceiro cenário, esse custo de energia poderia ser reduzido para US\$ 0,608 com uma diminuição de 50% nos custos dos módulos fotovoltaicos. Ainda, a substituição do aerogerador utilizado nas simulações por uma ou mais unidades de um aerogerador de menor potência nominal, mas com curva de potência mais vantajosa às velocidades da área de estudo, poderia contribuir para uma diminuição nesses custos.

Além disso, destaca-se o importante potencial do *software* HOMER para auxílio no dimensionamento de sistemas híbridos de energias renováveis, com a escolha do sistema ótimo através de análises de custos, interface simplificada e disponibilidade de modelos prontos de componentes, semelhantes aos encontrados no mercado.

Apesar de os sistemas híbridos em geral apresentarem impactos ambientais muito menores do que a geração tradicional de energia deve-se atentar para os possíveis impactos causados por sistemas desse tipo, destacando-se como mais significativos os decorrentes do possível descarte inadequado das baterias após o fim da sua vida útil, mas que pode ser mitigado pela reciclagem e destinação correta desses equipamentos.

Como sugestão para trabalhos futuros, o estudo da complementariedade entre as fontes eólica e solar na área de estudo pode contribuir para uma melhor compreensão da disponibilidade dos recursos na região. Quanto ao dimensionamento dos sistemas, a inclusão de um quarto cenário correspondendo a um sistema somente com energias renováveis (eólica

e solar), mas conectado à rede com possibilidade de compra e venda de energia pode apresentar uma diminuição de custos e pode ser interessante para uma aplicação real em áreas urbanas, já que as estações elevatórias existentes já são conectadas à rede.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa n° 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Sistema de Levantamento de Preços**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/preco/>>. Acesso em 04 dez. 2017.

AHRENS, C. D. **Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere**. 6th ed. Brooks/Cole Cengage Learning, 2012.

ALKARRAMI, F. IQBAL, T. POPE, K. **Optimal sizing of a stand-alone hybrid energy system for water pumping in Sirte, Libya**. In: IEEE Electrical Power and Energy Conference, 2016, Ottawa, Canada. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2016, p.121-125.

AMARANTE, O. A. C. et al. **Atlas Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2001.

AMMAR, H. MELIT, A. Techno-economic evaluation of a hybrid PV/diesel water pumping system for different pumping heads. In: 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference, 2015, Marrakech, Marrocos. **Proceedings...** Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2015, p.325-332.

AMUTHA, W. M. RAJINI, V. Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p.236-246, 2016.

ANDRADE SOBRINHO, R. BORJA, P. C. Gestão das perdas de água e energia em sistema de abastecimento de água da Embasa: um estudo dos fatores intervenientes na RMS. **Eng. Sanit. Ambient.**, vol.21, n.4, pp.783-795, 2016.

ARRUDA, M. F. **Desempenho técnico-financeiro de sistema híbrido eólico-solar aplicado ao bombeamento de água**. 2015. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12208**: projeto de estações elevatórias de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1992.

BRASIL. Lei n° 10.438 de 26 de abril de 2002. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 29 de abril de 2002. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm>.

BRASIL. Lei nº 10.762 de 11 de novembro de 2003. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 12 de novembro de 2003. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/L10.762.htm>.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema nacional de informações sobre saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos** – 2015. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2017.

BELUCO, A. SOUZA, P. K. KRENZINGER, A. A complementariedade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.88, n. 1, p.99-109, 2003.

BELUCO, A. SOUZA, P. K. KRENZINGER, A. A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies. **Renewable Energy**, v. 33, p. 2157-2165, 2008.

BRANDONI, C. BOSNJAKOVIC, B. HOMER analysis of the water and renewable energy nexus for water-stressed urban areas in Sub-Saharan Africa. **Journal of Cleaner Production**, v.155, p.105-118, 2017.

BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. 2nd ed. West Sussex, Reino Unido: John Wiley & Sons, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 401 de 4 de novembro de 2008. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 5 de novembro de 2008. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2008_401.pdf>.

CORSAN. **CORSAN investe em energia limpa**. 4 jan. 2017. Disponível em: <<http://www.corsan.com.br/corsan-investe-em-energia-limpa>>. Acesso em: 17 set. 2017.

DARONCO, G. BELUCO, A. A wind PV hybrid system for power supply of a sewage treatment plant in a small town in southern Brazil. In: STAMATELATOU, K. TSAGARAKIS, K. P (Org.). **Sewage Treatment Plants: Economic Evaluation of Innovative Technologies for Energy Efficiency**. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, p. 341-355, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: produção e uso de energia**. Ministério de Minas e Energia, 2016a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estatístico de energia elétrica 2016 - Ano base 2015**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2016b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>.

FARRET, A. F. SIMÕES, M. G. **Integration of Alternative Sources of Energy**. West Sussex, Reino Unido: John Wiley & Sons, 2005.

FEITOSA, E. PEREIRA, A. ROSAS, P. **Increasing wind penetration on Fernando de Noronha wind/diesel system**. In: World Wind Energy Conference, Berlim, Alemanha, 2002.

GOPAL, C. MOHANRAJ, M. CHANDRAMOHAN, M. CHANDRASEKAR, P. Renewable energy source water pumping systems – a literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p.351-370, 2013.

Grupo WEG. **Catálogo do aerogerador modelo AGW 110/2.1**. 2015. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-aerogeradores-agw-110-2.1-50030583-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2017.

JINKO SOLAR. Módulo solar modelo JKM265P-60. n.d. Disponível em: <https://www.jinkosolar.com/product_detail_231.html?lan=pt>. Acesso em : 25 out. 2017.

KHATTAB, N. M. BADR, M. A. SHENAWY, E. T. SHARAWY, H. H. SHALABY, M. S. Feasibility of hybrid renewable energy water pumping system for a small farm in Egypt. **International Journal of Applied Engineering Research**, v.11, n.11, p.7406-7414, 2016.

KRAUSEN, E. MERTIG, D. Sewage plant powered by combination of fotovoltaic, wind and biogas on the island of Fehmarn, Germany. **Renewable Energy**, v.1, p.745-748, 1991.

LAMBERT, T. W. GILMAN, P. LILIENTHAL, P. D. Micropower system modeling with HOMER. In: Farret, F. A. Simões, M. G. **Integration of Alternative Sources of Energy**. West Sussex, Reino Unido: John Wiley & Sons, p. 379-418, 2005.

LIRA, M. A. T. MOITA NETO, J. M. LOIOLA, J. V. L. SILVA, E. M. ALVES, J. M. B. Caracterização do Regime de Ventos no Piauí Para o Aproveitamento de Energia Eólica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p.77-88, 2017.

MASTERS, G. M. **Renewable and Efficient Electric Power Systems**. 1st ed. New Jersey, USA:John Wiley & Sons, 2004.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

PIANEZZOLA, G. **Mapas de complementariedade dos potenciais solar e eólico no estado do Rio Grande do Sul**. 2006. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PINHO, J. T. et al. **Sistemas Híbridos**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

RAMOS, J. S. RAMOS, H. M. Sustainable application of renewable sources in water pumping systems: optimized energy system configuration. **Energy Policy**, v. 37, p.633-643, 2009.

RIO GRANDE DO SUL. **Atlas eólico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SDPI AGDI, 2014.

SABESP. **Estação Elevatória de Água Sapopemba testa nova tecnologia movida a energia eólica**. 24 mai. 2016. Disponível em : <<http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaoId=65&id=6993>>. Acesso em 17 set. 2017.

SAIDUR, R. RAHIM, N. A. ISLAM, M. R. SOLANGI, K. H. Environmental impact of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2423-2430, 2011.

SAUER, D. U. Electrochemical Storage for Photovoltaics. In: Luque, A e Hegedus, A. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. 2nd ed. West Sussex, Reino Unido: John Wiley & Sons, p. 896-953, 2011.

Software HOMER, versão 2.68 beta. **The Micropower Optimization Model**, Homer E-Energy. Disponível em <www.homerenergy.com>.

SINHA, S. e CHANDEL S. S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 192-205, 2014.

ZILLES, R. et al. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.) **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

TWIDELL, J. WEIR, T. **Renewable Energy Resources**. 2nd ed. Reino Unido: Taylor & Francis, 2006.

VICK, D. B. NEAL. B. A. Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems. **Solar Energy**, v. 86, p.1197-1207, 2012.

WAGNER, H. J. MATHUR, J. **Introduction to Wind Energy Systems: Basics, Technology and Operation**. 2nd ed. Springer, 2013.