

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HÍDRICA**

**Lenin Domingues Garcia**

**SISTEMA HÍBRIDO GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA  
SUSTENTAÇÃO DE ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO**

Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

2018

**Lenin Domingues Garcia**

**SISTEMA HÍBRIDO GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA  
SUSTENTAÇÃO DE ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO**

Trabalho de conclusão do curso de graduação em  
Engenharia Hídrica da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul.

**Orientador: Prof. Dr. Alexandre Beluco**

**Co-orientador: Prof. Dr. Giuliano Daronco**

Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Garcia, Lenin Domingues  
Sistema híbrido gerador de energia elétrica para  
sustentação de estação de bombeamento / Lenin  
Domingues Garcia. -- 2018.  
84 f.  
Orientador: Alexandre Beluco.

Coorientador: Giuliano Daronco.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Painéis fotovoltaicos. 2. Aerogeradores. 3.  
Energias renováveis. 4. Sistema híbrido. 5. Estação de  
bombeamento. I. Beluco, Alexandre, orient. II.  
Daronco, Giuliano, coorient. III. Título.

**Lenin Domingues Garcia**

**SISTEMA HÍBRIDO GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA  
SUSTENTAÇÃO DE ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com defesa realizada em 2018.

**ORIENTADOR**

**Prof. Alexandre Beluco (UFRGS)**

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

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Alfonso Risso (UFRGS)**

Dr. 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 o tempo investido na realização deste trabalho à minha mãe. Tua ausência sempre me provocará melancolia, tua memória conforto. Todos esses momentos se perderão no tempo, como lágrimas na chuva, até que, uma vez mais, nos encontremos na poeira das estrelas de onde viemos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meu querido pai, irmãos e familiares pelo imenso apoio, esforço e paciência, constantemente renovados ao longo dos últimos anos. Agradeço também à Bruna Uhry por surgir em minha vida.

Aos meus amigos pessoais e colegas de curso que dividiram uma parte de suas vidas e experiências comigo.

Ao Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade e ao Instituto de Geociências por terem proporcionado a oportunidade de estagiar e crescer profissionalmente durante a graduação.

A Alexandre Beluco orientação e por sua vida de dedicação ao ensino e à evolução da sociedade, bem como a Giuliano Daronco pela co-orientação e ao conjunto de professores que fizeram parte da minha trajetória na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, instituição que me ofertou ensino gratuito de excelência e pela qual nutro profunda gratidão pelo crescimento pessoal propiciado. Que eu consiga utilizar o conhecimento dividido comigo durante minha formação para benefício da coletividade, como forma de agradecimento pelo benefício incalculável que me foi concedido e que, infelizmente, não abraça plenamente os setores e classes que compõem nossa sociedade.

## RESUMO

Os combustíveis de origem fóssil utilizados de maneira desenfreada são considerados protagonistas na parcela de responsabilidade antrópica para o aquecimento global vivenciado nos últimos séculos, tendo em vista que sua queima, visando gerar energia, emite substâncias responsáveis pelo agravamento do efeito estufa atmosférico. A velocidade em que são consumidos é infinitamente superior à que são repostos pela natureza, o que provoca o declínio de suas reservas e inflação no seu valor comercial. Considerando que são, ainda hoje, a principal fonte energética utilizada no planeta, alternativas para frear seu consumo são amplamente estudadas ao redor do mundo.

O emprego de sistemas híbridos permite que se gere eletricidade com o uso associado de duas ou mais matrizes renováveis, unindo suas características e podendo acrescentar ao sistema a operação de um combustível fóssil, por segurança e atenuação de gastos, bem como uma eventual conexão à empresa responsável por distribuição energética através da rede compartilhada. Atualmente, na realidade econômica que rege nosso país e sua distribuição de gastos, o setor responsável pelo saneamento básico possui contribuição acentuada no montante energético consumido e recursos financeiros, principalmente no campo responsável por bombear água e esgoto.

O trabalho realizado objetivou, principalmente, estudar a viabilidade e dimensionar preliminarmente um sistema híbrido visando obtenção energética. A estrutura contará com células fotovoltaicas e aerogeradores trabalhando em conjunto com um gerador movido a diesel. Se buscou satisfazer o montante de energia demandado por uma estação de bombeamento de esgoto que se localiza na cidade de Santa Rosa - RS, empreendimento que atualmente passa por problemas de disponibilidade energética. Visualizou-se, no cenário *on grid*, redução de 63% no consumo de energia elétrica da rede. O sistema atingiu vendas de até 21034 kWh de energia para a rede, anualmente, com sua operação. Estimou-se um custo inicial de US\$ 108.580, investimento total de US\$ 1.285.258 e o valor para produção de energia em US\$ 0,374 por kWh. Já no cenário *off grid*, ocorreu redução de 13% no consumo de energia elétrica da rede. Estimou-se um custo inicial de US\$ 117.580, investimento total de US\$ 1.945.668 e o valor estimado para produção de energia em US\$ 0,567 por kWh.

**Palavras-chave:** painéis fotovoltaicos, aerogeradores, energias renováveis, óleo diesel, sistema híbrido, estação de bombeamento.

## ABSTRACT

Fossil fuels used in a rampant way are considered protagonists in the share of anthropogenic responsibility for global warming experienced in recent centuries, in view that their burning, in order to generate energy, emits substances responsible for the exasperation of the atmospheric greenhouse effect. The speed of consume is infinitely greater than the natural replacement, which causes the decline of their reserves and inflation in their commercial value. Considering that they are still the main energy source used on the planet, alternatives to slow down their consumption are widely studied around the world.

The use of hybrid systems allows the generation of electricity through the associated use of two or more renewable matrices, combining their characteristics and adding to the system the operation of a fossil fuel for safety and expense reduction, as well as a possible connection to the power distribution company through the shared network. Currently, in the economic reality that governs our country and its distribution of expenditures, the sector responsible for basic sanitation has a significant contribution in the amount of energy consumed and, as well, of the financial resources, especially in the area of pumping water and sewage.

The objective of this study was to evaluate the practicability and preliminary design a hybrid system for energy production. The structure will feature photovoltaic cells and wind turbines working together with a diesel generator. It seeks to satisfy the amount of energy demanded by a sewage pumping station located in the city of Santa Rosa - RS, enterprise that currently faces problems of energy availability. In the on grid scenario, a 63% reduction in grid electricity consumption was observed. The system achieved sales of up to 21034 kWh of power to the grid, annually, with its operation. An initial cost of US\$ 108.580 was estimated, total investment of US \$ 1.285.258 and the value for energy production of US\$ 0,374 per kWh. In the off grid scenario, there was a 13% reduction in grid electricity consumption. An initial cost of US \$ 117,580 was estimated, total investment of US \$ 1.945.668 and estimated value for energy production of US \$ 0,567 per kWh.

**Keywords:** photovoltaic panels, wind turbines, renewable energy, diesel oil, hybrid system, pumping station.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Relação entre o PIB brasileiro e seu consumo energético.</i>	12
<i>Figura 2 – Parcela de cada matriz energética a nível global.</i>	16
<i>Figura 3 - Parcela de cada matriz energética a nível nacional.</i>	17
<i>Figura 4 - Parcela de cada matriz energética a nível nacional.</i>	17
<i>Figura 5 – Discretização das despesas com o saneamento nacional .</i>	18
<i>Figura 6 - Evolução da capacidade fotovoltaica global.</i>	23
<i>Figura 7 - Irradiação solar e seu balanço na superfície terrestre.</i>	23
<i>Figura 8 - Irradiação proveniente do Sol de forma direta normal diária – Média anual.</i>	25
<i>Figura 9 – Irradiação solar e sua relação com a célula solar.</i>	26
<i>Figura 10 – Placa policristalina JKM265P-60.</i>	27
<i>Figura 11 – Placa monocristalina JKM210M-72.</i>	28
<i>Figura 12 – Evolução da capacidade mundial instalada de energia eólica. Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)</i>	30
<i>Figura 13 - Componentes usualmente encontrados em uma turbina eólica convencional: 1 - Fundação, 2 - Conector à linha elétrica, 3 - Torre, 4 – Escada de acesso, 5 - Controle de orientação do vento, 6 - Nacela, 7 - Gerador, 8 - Anemômetro, 9 - Freio elétrico ou mecânico, 10 - Caixa de velocidades ou de câmbio, 11 – Lâmina ou Pá, 12 - Controle de inclinação da pá, 13 – Roda ou Cubo Rotor. Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)</i>	33
<i>Figura 14 – Perfil das Potências AGW 110, modelos 2.1 e 2.2 – WEG.</i>	34
<i>Figura 15 – Exemplificação do comportamento da distribuição de probabilidades de Weibull.</i>	36
<i>Figura 16 – Exemplificação da curva de variação da velocidade dos ventos distribuída em uma vertical.</i>	37
<i>Figura 17 – Índice de complementaridade (eólico-fotovoltaica) entre as estações de inverno e verão no Rio Grande do Sul.</i>	40
<i>Figura 18 – Índice de complementaridade de amplitude.</i>	41
<i>Figura 19 – Estação de Bombeamento de Esgoto localizada no município de Santa Rosa e eleita para realização do estudo.</i>	48
<i>Figura 20 – Irradiação direta para o território brasileiro.</i>	53
<i>Figura 21 – Irradiação no plano inclinado para o território brasileiro.</i>	54
<i>Figura 22 – Irradiação solar horizontal para o território brasileiro.</i>	55
<i>Figura 23 – Irradiação no plano horizontal e índice de claridade para a região estudada.</i>	56
<i>Figura 24 – Relação distribuída regionalmente para o potencial de exploração de energia eólica no Brasil.</i>	57
<i>Figura 25 – Relação de velocidades de vento esperadas para Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.</i>	58
<i>Figura 26 – Regime dos ventos por estação do ano.</i>	59
<i>Figura 27 – Variação esperada para o recurso eólico na localidade de estudo.</i>	60

<i>Figura 28 – Variabilidade em torno da taxa de variação média para o recurso eólico na localidade.</i>	60
<i>Figura 29 – Esboço do sistema on grid para o Cenário 1 (Software HOMER).</i>	62
<i>Figura 30 - Esboço do sistema off grid para o Cenário 2 (Software HOMER).</i>	62
<i>Figura 31 - Relação de custo por componente para o sistema 1 (Software HOMER).</i>	63
<i>Figura 32 – Porcentagem de cada fonte na produção energética para o Cenário 1 (Software HOMER).</i>	63
<i>Figura 33 – Relação mensal da potência por cada recurso no sistema on grid (Software HOMER).</i>	64
<i>Figura 34 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os aerogeradores atendem no sistema on grid (Software HOMER).</i>	65
<i>Figura 35 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os painéis solares atendem no sistema on grid (Software HOMER).</i>	65
<i>Figura 36 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os geradores a diesel atendem no sistema on grid (Software HOMER).</i>	66
<i>Figura 37 – Análise de sensibilidade que permeia o Cenário 1 ótimo (Software HOMER).</i>	66
<i>Figura 38 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a carga das baterias no sistema on grid (Software HOMER).</i>	67
<i>Figura 39 - Relação de custo por componente para o sistema 2 (Software HOMER).</i>	68
<i>Figura 40 – Porcentagem de cada fonte na produção energética para o Cenário 2 (Software HOMER).</i>	68
<i>Figura 41 – Relação mensal da potência por cada recurso no sistema off grid (Software HOMER).</i>	69
<i>Figura 42 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os aerogeradores atendem no sistema off grid (Software HOMER).</i>	70
<i>Figura 43 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os painéis solares atendem no sistema off grid (Software HOMER).</i>	70
<i>Figura 44 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os geradores a diesel atendem no sistema off grid (Software HOMER).</i>	71
<i>Figura 45 – Análise de sensibilidade que permeia o Cenário 2 ótimo (Software HOMER).</i>	72
<i>Figura 46 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a carga das baterias no sistema off grid (Software HOMER).</i>	72
<i>Figura 47 – Fluxo de Caixa para o sistema 1; on grid (Software HOMER).</i>	73
<i>Figura 48 - Fluxo de Caixa para o sistema 2; off grid (Software HOMER).</i>	73

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	20
2.1 Objetivos em geral .....	20
2.2 Objetivos em específico.....	20
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1 Conceitos que envolvem a energia solar e seu aproveitamento.....	21
3.2 Conceitos que envolvem a energia eólica e seu aproveitamento.....	28
3.2.1 Aerogeradores e sua utilização para aproveitamento do recurso eólico .....	32
3.2.2 Exploração do Recurso Eólico .....	34
3.3 Sistemas Híbridos compostos por matrizes energéticas renováveis e não renováveis .....	38
3.3.1 Elucidação .....	38
3.3.2 Complementaridade entre as matrizes energéticas em um conjunto/sistema híbrido .....	39
3.3.3 Equipamentos que constituem os conjuntos/sistemas híbridos.....	41
3.4 Impactos comumente associados a ambientes de exploração energética baseada em matrizes energéticas renováveis.....	44
3.5 Estações de bombeamento de esgoto e a importância do serviço prestado .....	45
4 METODOLOGIA.....	47
4.1 Informações acerca da região estudada.....	47
4.2 Empreendimento e estimativa do consumo energético.....	48
4.2 Estudo sobre o conjunto/sistema híbrido .....	49
4.2.1 Aplicabilidade do <i>Software - Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources</i> .....	49
4.2.2 Metodologia de determinação dos investimentos associados .....	51
4.2.3 Ajuste e dimensionamento do conjunto/sistema híbrido.....	52
4.3 Potencial energético dos recursos propostos .....	52
4.3.1 Potencial do recurso solar .....	53
4.3.2 Potencial do recurso eólico .....	56
5 RESULTADOS E ANÁLISES .....	61
5.1 Simulações realizadas com as rotinas do HOMER Legacy.....	61
6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	75
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a segunda metade do século XIX a eletricidade vem se tornando uma ferramenta essencial para a vida moderna, foi a força motriz para a Segunda Revolução Industrial e atualmente é o pilar do desenvolvimento e das atividades econômicas globais.

A eletricidade é um estado de energia baseada na geração de diferenças de potencial elétrico entre dois pontos, que permitem estabelecer uma corrente elétrica entre ambos. Mediante a conversão adequada é possível lograr que tal energia mostre-se em outras formas finais de uso direto, em forma de luz, movimento ou calor, segundo os elementos da conservação da energia. Graças a sua facilidade de transporte, baixo índice de perda energética durante conversões, a eletricidade é a forma de energia mais utilizada atualmente. Obtenção/produção é o primeiro processo na entrega da eletricidade aos consumidores. Outros três processos são: transmissão, distribuição e venda. A importância da geração, da transmissão e da distribuição seguras de eletricidade ganhou destaque quando se tornou aparente que a eletricidade era útil para fornecer o calor, a luz e a energia em geral para as atividades humanas. A descentralização tornou-se altamente atrativa quando se reconheceu que as linhas de corrente alternada podiam transportar a eletricidade com baixos custos por grandes distâncias. A transmissão é realizada, rotineiramente, por linhas de alta potência, geralmente utilizando corrente alternada, conectando uma usina ao consumidor, ao passo que a ação de distribuir - tida como a etapa final no fornecimento - se trata da parcela do sistema elétrico interconectada ao subsistema de transmissão, por meio do qual é realizada a entrega aos consumidores.

O crescimento econômico dos países está diretamente relacionado com a sua habilidade de produção energética e é uma condição que restringe a evolução e prosperidade dos povos. Essa relação fica bem evidente ao utilizar a realidade brasileira como parâmetro, como evidencia o gráfico que compara a variação do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro em contraste com o que se consome energeticamente.

O gráfico em questão está contido no Atlas de Energia Elétrica do Brasil, publicado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), em 2008, e está representado na Figura 1, a seguir.

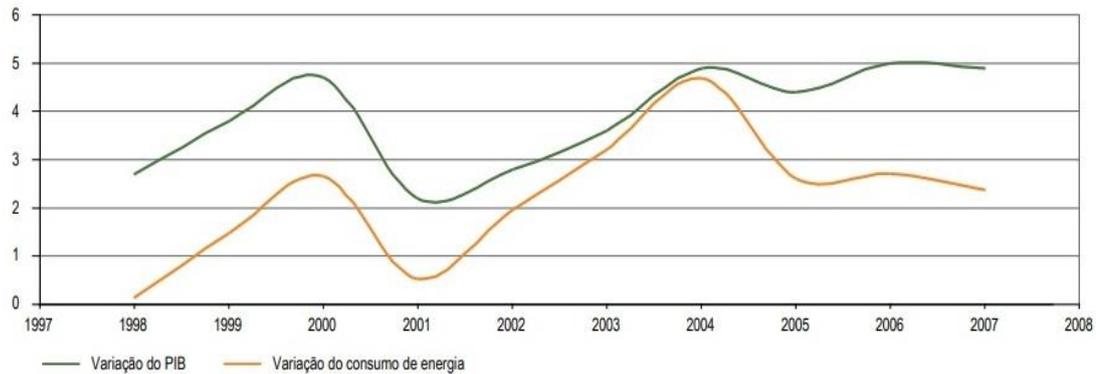


Figura 1 - Relação entre o PIB brasileiro e seu consumo energético.

Fonte: (ANEEL, 2008).

A principal fonte para se produzir energia elétrica, a nível global, são os recursos de origem fóssil, que acabam tornando-se um limitador para o progresso de nações que carecem de sua disponibilidade e, na atualidade, são motivo de consternação por sua utilização exacerbada na busca de avanço econômico. A crescente demanda por energia elétrica, que advém de múltiplas esferas sociais, combinada ao inevitável decréscimo dos estoques mundiais de recursos fósseis utilizáveis para combustão, propicia um recente incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico no campo das energias renováveis.

A gigante petrolífera americana ExxonMobil (Valor Econômico, 2016) estima um crescimento de 25% na demanda global por energia até 2040, impulsionada por um incremento populacional de 2 bilhões, pela duplicação da produção econômica mundial e pela rápida expansão da classe média em economias emergentes, conforme projeções divulgadas nesta sexta-feira. A variação é praticamente equivalente a toda a energia que se consome hoje na América do Norte e América Latina. A demanda por energia elétrica passa, conjuntamente, pela acelerada mudança no mercado automobilístico.

Em 2040, mais da metade dos carros novos vendidos serão plug-in, como os oferecidos pela Tesla, segundo relatório da *Bloomberg New Energy Finance* (Uol Economia, 2017). A expectativa aponta que a procura dos veículos elétricos se multiplicará por 300 em comparação ao consumo atual. As fabricantes de veículos estão se comprometendo com um distanciamento em relação aos motores movidos por combustão. A crescente popularidade dos veículos plug-in - impulsionada pela queda dos preços das baterias de íon de lítio - é uma boa notícia para as provedoras de eletricidade, que foram prejudicadas pela queda dos preços da energia em meio à oferta abundante de

energia de origem capaz de se regenerar a curto prazo; entretanto, os veículos elétricos apresentarão outro desafio às empresas distribuidoras e aos órgãos reguladores, que já trabalham para adicionar a geração intermitente dos parques eólicos e solares à matriz energética sem interromper a oferta. Os veículos elétricos representarão 5% da demanda energética total do planeta em 2040, segundo estimativas da BNEF. Pode-se aferir que as operadoras de rede terão que tomar medidas para gerenciar o rápido aumento na procura por eletricidade, o que inclui o armazenamento de mais energia e a oferta de tarifas que incentivem recargas fora dos instantes de pico.

Segundo a Anfavea, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Auto Esporte, 2018), a venda de carros elétricos ou híbridos no Brasil configura 0,05% dos veículos comercializados. A previsão é que esse índice chegue a 0,4% em 2020, e passe para 2,5% em 2026, quando a expectativa é a de ter 100 mil elétricos nas ruas brasileiras. A Noruega lidera o cenário com 23% da frota eletrificada. Em segundo lugar vem a Holanda com 10% e em terceiro lugar a Suécia com 2%, segundo a EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

A união dos fatores supracitados corrobora para o entendimento de que matrizes energéticas não convencionais ganham corpo não só como solução econômica, mas, também, como resposta à cobrança da sociedade por maior responsabilidade ambiental.

A diversificação das matrizes utilizadas busca o emprego de recursos naturalmente reabastecíveis, a curto e médio prazo, e que propiciem impactos ambientais inferiores aos registrados na utilização de combustíveis de derivação fóssil. Os conceitos renováveis para produção energética brasileira se baseiam, principalmente, em energia hidráulica, eólica, solar, biomassa e biocombustíveis.

A parcela de contribuição antropogênica atribuída ao aquecimento global é oriunda, principalmente, da combustão do recurso fóssil e da emissividade de compostos que acentuam o efeito estufa atmosférico. O aumento de temperatura tende a resultar em acréscimos no nível médio registrado dos oceanos, modificações de regime hídrico e derretimento acelerado de geleiras, que, por sua vez, pode proporcionar o decréscimo do albedo nas regiões de degelo e, reflexivamente, acréscimo da temperatura registrada.

As mudanças climáticas que podem advir desses fenômenos são motivo de grande preocupação já há algumas décadas; dessa forma, diversas conferências foram organizadas por líderes mundiais acerca dessa problemática. O marco inicial foi a Conferência de Estocolmo, em 1972, seguida da Eco-92 (Rio-92), realizada pela ONU (Organização das Nações Unidas) e que teve como desdobramento a criação do Protocolo

de Quioto, assinado em 1997 por 55 nações que se comprometeram a mitigar o que se emite de carbono. Os Estados Unidos foram a maior nação a se recusar a assinar o tratado; já a China foi considerada um país em desenvolvimento e ficou isenta de cumprir as medidas.

Após vinte anos, ocorreu a Conferência da ONU sobre desenvolvimento sustentável, apelidada de Rio+20. Em 2015, ocorreu a COP 21 (21ª Conferência do Clima da ONU) na França, que gerou o “Acordo de Paris”, considerado um marco universal da luta contra o aquecimento registrado na superfície terrestre, sendo o único acordo climático desde o Protocolo de Quioto. Embora os Estados Unidos tenham sido signatários, recentemente o presidente Donald Trump anunciou que seu país deixaria de fazer parte do acordo. Por outro lado, o Brasil determinou, no acordo realizado em Paris o compromisso, em meio a outras pautas, de aumentar a parcela de energia oriunda de matrizes renováveis utilizadas para obter eletricidade até o ano de 2030.

O comprometimento também sugere uma disposição em diversificar as matrizes, amplificando a atuação fotovoltaica, biomássica e eólica. Além disso, as Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (INDC, na sigla em inglês), apresentadas pelo governo brasileiro diziam almejar uma redução de 43% nas emissões de carbono, levando em consideração o ano de 2005.

Em 2002, com o intuito de incentivar o emprego de mais matrizes renováveis no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), foi criado o PROINFRA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas), através da Lei nº 10.438 (DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2002). Dentre as previsões legais, estava a prioridade na aplicação de aerogeradores, PCHs (Pequenas Centrais Hidroelétricas) e usinas termoelétricas abastecidas por biomassa, mencionando Produtores Independentes Autônomos (PIA) como possíveis colaboradores, seguindo a Lei nº 9433 (DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 1997), conhecida como Lei das Águas, que previa que toda a outorga estaria condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos.

Foi prevista a segmentação do programa em duas fases, sendo a primeira revisada no ano seguinte, pela Lei nº 10762 (DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2003), que ratificava a importância da diversificação energética no território nacional. A lei estabeleceu a meta de implantação de 3000 MW de energia oriunda exclusivamente de recursos renováveis, assegurando a compra pela Eletrobras pelo período de duas décadas. Na fase seguinte do programa estabeleceram-se

previsões sobre o consumo brasileiro, determinando que as quantias presentes no programa deveriam girar em torno de um décimo do que se estima que se consuma anualmente.

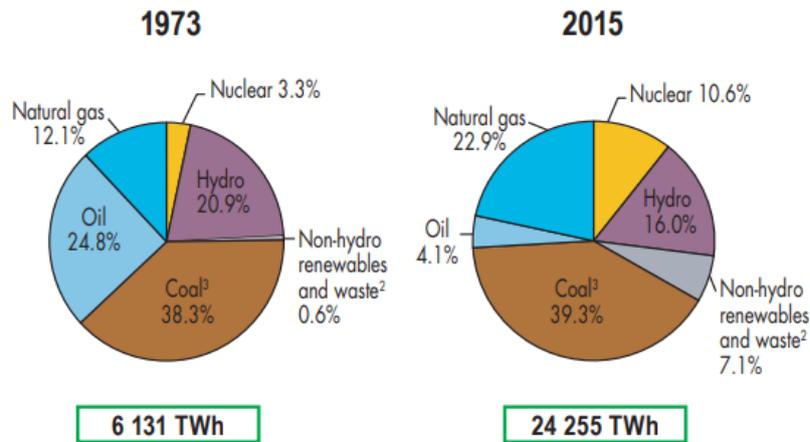
A lei de 2003, supracitada, também criou a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), visando o desenvolvimento energético dos Estados e a competitividade da energia produzida. A geração distribuída foi um conceito que se aliou à exploração de matrizes renováveis na eletricidade, destacando-se por ser um sistema que busca atender cargas locais e regionais, diminuindo o empecilho gerado na elaboração de gigantescas linhas de distribuição, o que resulta na diminuição da perda de energia.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) regula os pontos necessários para praticar microgeração e minigeração distribuídas, através da resolução n° 482/2012, alterada pela resolução n° 687 (ANEEL, 2015).

Se a potência instalada for 75 kW, ou menos, se enquadra em microgeração, se flutuar de 75 kW a 5 MW, para matriz renovável não hídrica, é considerada minigeração. Casos como estes podem ser acrescidos ao programa de compensação de energia, em que, o que exceder a demanda do usuário, retorna à rede. Como recompensa, o produtor de energia recebe bonificação da empresa que distribui energia. A complementariedade entre energias, a partir da utilização de conjuntos/sistemas híbridos, também é citada como possibilidade.

Mesmo que a matriz renovável para produção energética venha ganhando muito espaço, ainda não é majoritária mundialmente, como mostra o estudo *Key World Energy Statistics*, de 2017, da *International Energy Agency*, exposto na Figura 2, logo abaixo.

1973 and 2015 source shares of electricity generation<sup>1</sup>



1. Excludes electricity generation from pumped storage.
2. Includes geothermal, solar, wind, tide/wave/ocean, biofuels, waste, heat and other.
3. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.

Figura 2 – Parcela de cada matriz energética a nível global.

Fonte: (IEA, 2017).

Em contrapartida, as bases energéticas presentes no Brasil demonstram maior dependência de fontes hídricas, o que, por consequência, faz as parcelas renováveis tomarem um grande espaço no cenário de produção energética nacional, como é mostrado na Figura 3 e, também, na Figura 4, retiradas do Anuário Estatístico de Energia Elétrica, do ano de 2016, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética em parceria com o Ministério de Minas e Energia.

	2011	2012	2013	2014	2015	Δ% (2015/2014)	Part. % (2015)	
<b>Total</b>	<b>531.758</b>	<b>552.498</b>	<b>570.835</b>	<b>590.542</b>	<b>581.486</b>	<b>-1,5</b>	<b>100</b>	<b>Total</b>
Gás Natural	25.095	46.760	69.003	81.073	79.490	-2,0	13,7	Natural Gas
Hidráulica (i)	428.333	415.342	390.992	373.439	359.743	-3,7	61,9	Hydraulics (i)
Derivados de Petr. (ii)	12.239	16.214	22.090	31.529	25.662	-18,6	4,4	Petroleum products (ii)
Carvão	6.485	8.422	14.801	18.385	19.096	3,9	3,3	Coal
Nuclear	15.659	16.038	15.450	15.378	14.734	-4,2	2,5	Nuclear
Biomassa (iii)	31.633	34.662	39.679	44.987	47.394	5,4	8,2	Biomass (iii)
Eólica	2.705	5.050	6.578	12.210	21.626	77,1	3,7	Wind
Outras (iv)	9.609	10.010	12.241	13.590	13.741	1,1	2,4	Other (iv)

Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN 2016; Elaboração: EPE

Notas:

i) Inclui autoprodução

ii) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível

iii) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia

iv) Outras: gás de coqueria, outras secundárias, outras não renováveis, outras renováveis (solar)

Figura 3 - Parcela de cada matriz energética a nível nacional.

Fonte – (EPE & MME, 2016).

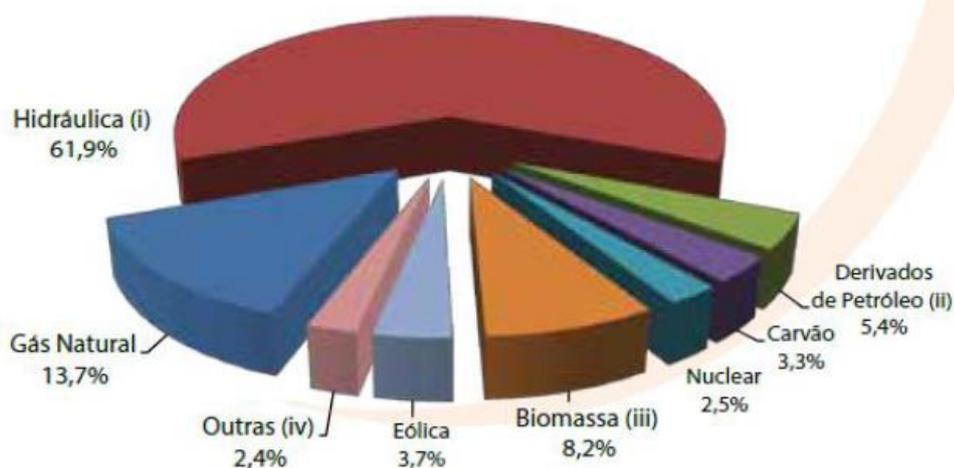


Figura 4 - Parcela de cada matriz energética a nível nacional.

Fonte – (EPE & MME, 2016).

A geração energética nacional é expressivamente baseada na matriz hidráulica, o que a torna, atualmente, frágil a modificações de clima e ciclo hidrológico. Por consequência, essa realidade se reflete em diferentes repartições da economia e seus orçamentos, em especial no saneamento, que consome uma parcela considerável: mais de 7 bilhões de kWh todos os anos (ANDRADE SOBRINHO e CAMPOS BORJA, 2016). Grande parte do recurso energético é alocado para sustentação de maquinário relacionado a tratamento e bombeamento, tanto de água, como de esgoto. As maiores consumidoras ainda são as estações elevatórias.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), que tem seus recursos financeiros atrelados ao Ministério das Cidades e Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, apresenta relatórios de seus investimentos no Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto (SNIS, 2016), como apresenta a Figura 5.

Pela representação gráfica, evidencia-se que mais de 14% dos dispêndios se dão com eletricidade, sendo somente superados pelos segmentos de pagamento de funcionários próprios e do gasto com serviços de terceiros.

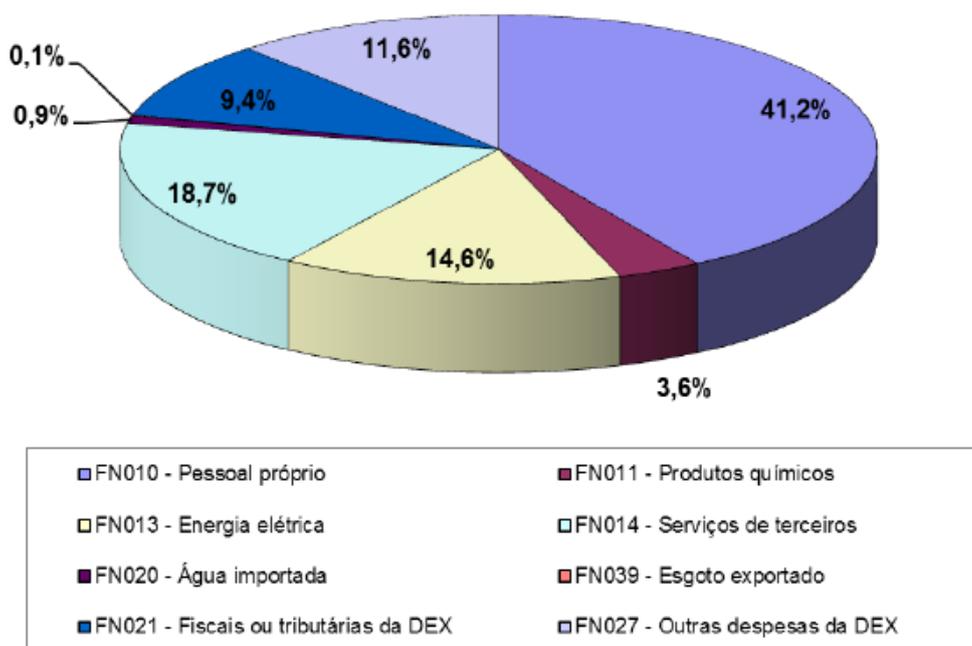


Figura 5 – Discretização das despesas com o saneamento nacional .

Fonte – (SNIS, 2016).

Dessa forma, o campo do saneamento possui elevado potencial para diversificação das matrizes energéticas, buscando autossuficiência e independência energética. Pluralizar a dependência energética no setor responsável pelo saneamento e abastecimento pode, ademais, resguardá-los de eventos isolados de carência energética que o país possa sofrer. Oferecer eletricidade de maneira descentralizada pode gerar evoluções no setor, permitindo atingir regiões atualmente desabastecidas e isoladas, contribuindo na busca do atendimento universal.

Levando-se em consideração o contexto retratado, o presente estudo visa realizar o pré-dimensionamento de um conjunto/sistema que permita fornecer eletricidade através

da combinação de fontes energéticas consideradas renováveis e não renováveis, buscando sustentar uma estação de bombeamento.

## 2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Em seguida, os dois segmentos objetivados por este estudo.

### 2.1 Objetivos em geral

O presente estudo teve como maior objetivo dimensionar preliminarmente um conjunto/sistema híbrido, compondo um diagnóstico da viabilidade para seu emprego. A estrutura terá sua composição fundamentada por energias renováveis e não renováveis, visando cobrir a solicitação energética de uma estação de bombeamento de esgoto.

### 2.2 Objetivos em específico

- Tecer referencias teóricas acerca de conjuntos/sistemas híbridos baseados em energia oriunda de matrizes consideradas renováveis e não renováveis, e que sejam satisfatórias para a compreensão do tema abordado e para a realização do dimensionamento, focando-se no âmbito do saneamento básico.
- Realizar simulações para pré-dimensionar sistemas híbridos com o auxílio de *softwares* adequados para os arranjos estabelecidos, visando conceber de sistemas física e financeiramente viáveis, discretizados em função de seus custos e retornos associados.
- Investigar modificações nos valores de variáveis de entrada e sua interferência na concepção dos cenários propostos, analisando e alterando a sensibilidade do conjunto.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo objetiva apresentar o referencial teórico utilizado na pesquisa e fundamentar os principais tópicos nela investigados.

#### 3.1 Conceitos que envolvem a energia solar e seu aproveitamento

À energia elétrica obtida através da conversão direta da luz em se dá a alcunha de energia solar fotovoltaica, sendo a célula fotovoltaica um dispositivo fabricado com material semicondutor, considerada a unidade fundamental desse processo.

O efeito fotoelétrico, base teórica inicial para beneficiar-se desse recurso, se dá pela projeção de elétrons por um material, geralmente metálico, quando exposto a uma radiação eletromagnética (como a luz solar) de frequência suficientemente alta, que depende do material, como a radiação ultravioleta. Ele pode ser observado quando a luz incide numa placa de metal, arrancando elétrons da placa. Os elétrons ejetados são denominados fotoelétrons. O efeito foi primeiramente demonstrado experimentalmente pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel. Em 1839, aos 19 anos, realizando experimentos no laboratório de seu pai, ele construiu a primeira célula fotovoltaica do mundo. Willoughby Smith descreveu pela primeira vez o "Efeito da Luz em selênio durante a passagem de fluxo de partículas", em um artigo que foi publicado no dia 20 de fevereiro de 1873 pela revista Nature. Contudo, só em 1883 foram construídas as primeiras células fotovoltaicas, por Charles Fritts, que cobriu o selênio semicondutor com uma camada extremamente fina de ouro, elaborando junções. O dispositivo teve apenas cerca de 1% de eficiência. A explicação satisfatória para o efeito fotoelétrico, dada em 1905 por Albert Einstein, deu ao cientista alemão o prêmio Nobel de Física de 1921, o único de sua vida. O efeito fotovoltaico, atualmente utilizado nas células fotovoltaicas, se difere processualmente do efeito fotoelétrico, embora estejam diretamente relacionados. O efeito fotovoltaico é a criação de tensão elétrica ou de uma corrente elétrica correspondente num material, após a sua exposição à luz.

Em contrapartida a metodologias convencionalmente utilizadas, a energia do Sol é temporalmente intermitente e apresenta uma variabilidade espacial acentuada, muito em função de sua associação com as condições meteorológicas do local - como a interferência de nuvens, gases diversos e sistemas sinóticos – e aos fatores astronômicos relacionados à movimentação do nosso planeta (PEREIRA, 2017). Assim sendo, é essencial a

investigação acerca do montante incidente para impulsionar a utilização dessa forma de energia.

A energia proveniente do Sol vem sendo apropriada pelo homem durante toda a sua história. Por meio dele, por exemplo, são supridas necessidades básicas de aquecimento, iluminação e alimentação (via fotossíntese e cadeias alimentares). No entanto, o uso do Sol como fonte direta para desenvolver eletricidade é relativamente recente, datando de meados do século passado. Com essa finalidade, distinguem-se duas classes: a fotovoltaica, que consiste na conversão direta da luz em eletricidade; e a heliotérmica, que é um ramo de geração termelétrica, no qual um fluido é aquecido pela energia proveniente do Sol para produzir vapor (TOLMASQUIM, 2016). Dessas duas tecnologias, a fotovoltaica é a que vem conquistando mais mercado nos últimos anos, representando 98% da capacidade instalada em 2014 (REN21, 2015). O presente estudo se atém ao conceito fotovoltaico.

O uso da energia fotovoltaica esteve inicialmente voltado às aplicações espaciais – em satélites, por exemplo. Posteriormente, a tecnologia passou a ser alternativa para o atendimento de locais isolados, funcionando em conjunto com baterias (sistemas *off-grid*). No século XXI, no entanto, foi quando se observou um grande salto na utilização dessa tecnologia, sendo aplicada em sistemas com conexão direta à rede (*on-grid*), tanto de forma distribuída (pequenas unidades residenciais e comerciais), como centralizada (grandes plantas geradoras). Atualmente, a tecnologia ainda é utilizada em elementos isolados; porém, a capacidade instalada conectada à rede supera 99% do total (IEA - PVPS, 2014). A Figura 6 ilustra a evolução recente da capacidade fotovoltaica acumulada ao redor do planeta.

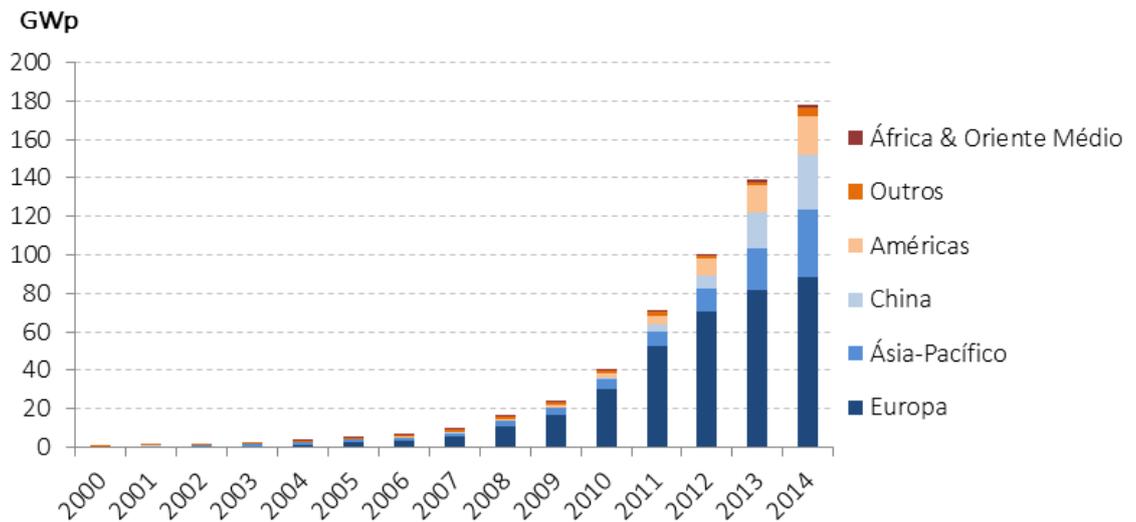


Figura 6 - Evolução da capacidade fotovoltaica global.

Fonte - (IEA - PVPS, 2014).

Como evidencia a Figura 7, (AHRENS, 2012), somente uma parcela da radiação que alcança o início, ou topo atmosférico, chega de fato na superfície da Terra, devido a nuvens e a processos atmosféricos que a dissipam.

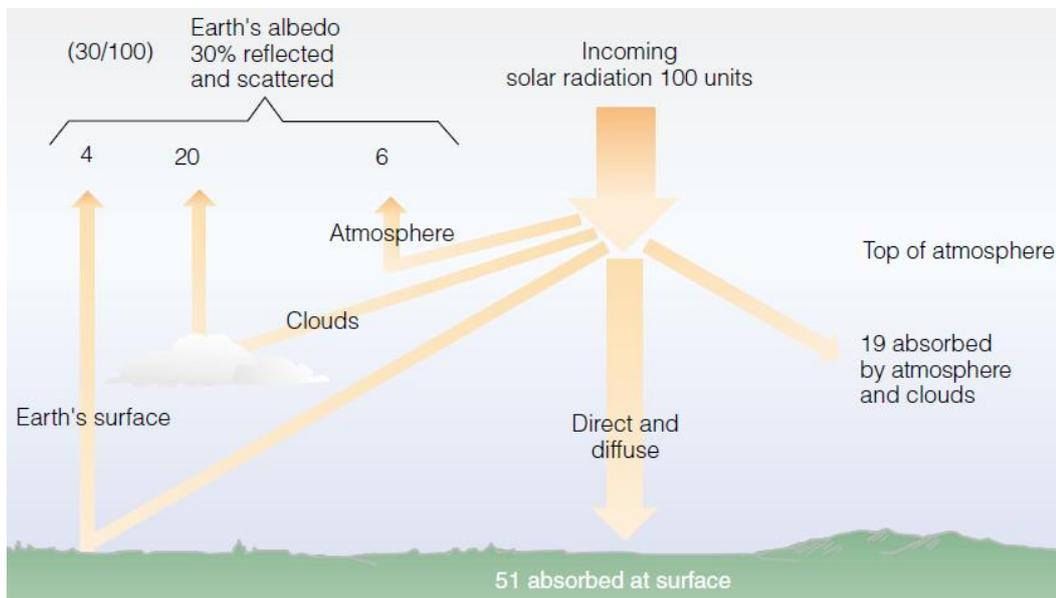


Figura 7 - Irradiação solar e seu balanço na superfície terrestre.

Fonte - (AHRENS, 2012).

A Figura 7 também notabiliza que o fragmento que de fato alcança a superfície terrestre representa cerca de 51% da radiação total incidente, incluindo a que ocorre

diretamente e a que ocorre de forma difusa superficial, que compõem a irradiância solar global, expressa em Watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

Consegue-se relacionar a radiação do topo atmosférico com a que chega de fato na superfície obtendo-se a razão entre ambas, no mesmo período, resultando no “índice de claridade” (TWIDELL e WEIR, 2006), que se modifica conforme o estado da cobertura ocasionada pela nebulosidade e a porção de aerossóis agindo na atmosfera. Os aerossóis podem modificar de maneira momentânea esse índice; ao contrário do que muitos pensam, o aerossol, em seus diversos formatos, não é gasoso, mas sim partículas sólidas ou líquidas que se encontram suspensas em um meio gasoso (geralmente o ar).

Dentre os sólidos, pode-se citar a fumaça e a poeira, por exemplo. Assim, é possível dizer que o aerossol pode ser de origem natural ou produzido em decorrência das atividades humanas. As emissões antropogênicas, ou seja, resultantes de atividades humanas, de aerossol atmosféricos têm aumentado significativamente nos últimos 150 anos, causando vários impactos ambientais, que incluem efeitos adversos à saúde humana, como problemas de visão. Antigamente, os aerossóis não eram inclusos em modelos matemáticos que buscavam prever o clima, o tempo e a qualidade do ar. O fato de hoje suas influências sobre o clima serem consideradas demonstra um aumento na complexidade dos cenários de variação do clima e das incertezas neles envolvidas. Uma vez emitidas para a atmosfera, seja de maneira natural ou não, essas partículas podem passar dias suspensas antes de se depositarem novamente na superfície da Terra, podendo também serem carregadas a longas distâncias por correntes de ar, causando impactos não só regionais e locais, mas também globais. Partículas de aerossol podem atuar absorvendo ou espalhando a radiação solar, influenciando diretamente no clima ao atuar na formação das nuvens, modificando os ciclos hidrológicos e o regime das chuvas.

Somando-se as razões supracitadas e levando-se em consideração as grandes variações de latitude presentes no território brasileiro, também se verifica uma significativa variação na irradiação incidente. A Figura 8 traz uma representação dessa variação.



Figura 8 - Irradiação proveniente do Sol de forma direta normal diária – Média anual.

Fonte – (PEREIRA, 2017).

O efeito fotovoltaico, como introduzido anteriormente, é o responsável pela conversão do recurso proporcionado pelo Sol, que incide na superfície do nosso planeta, em energia aproveitável.

Uma vez que a radiação eletromagnética entra em contato com o silício, ou outro material semicondutor, presente nas células, cria-se diferencial de potencial mediante a separação entre cargas positivas (prótons) e negativas (elétrons). Os prótons possuem uma carga elétrica elementar de uma unidade positiva, já os elétrons têm uma carga elétrica negativa. A tensão elétrica produzida é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos ou a diferença em energia potencial elétrica por unidade de carga elétrica entre dois pontos. Sua unidade de medida é o volt. O diferencial de potencial (tensão) é igual ao

trabalho que será feito, por unidade de carga, contra um campo para se movimentar uma carga qualquer.

Além do silício, algumas tecnologias vêm utilizando células baseadas em arsenieto de gálio, teluriato de cádmio ou disselenieto de cobre e índio. O semiconductor geralmente apresenta uma banda de valência, que, com exposição a uma quantidade suficiente de energia acaba, perdendo seus elétrons, que viajam através das bandas desocupadas e rumam às bandas de condução, fenômeno que gera a tensão. Uma maneira recorrente de amplificar o efeito se dá pela “dopagem” do silício em uma junção “pn”, situação em que o dopante p ganha e o dopante n perde elétrons. Dopagem eletrônica consiste em um procedimento de adição de impurezas químicas a um elemento semiconductor para transformá-lo em um elemento mais condutor, porém, de forma controlada. Em geral, utiliza-se boro e fósforo. Um campo magnético é gerado pela dopagem, criando-se corrente elétrica no momento em que se expõe a fótons oriundos da radiação do Sol (TOLMASQUIM, 2016). Campo Magnético é a concentração de magnetismo que é criado em torno de uma carga magnética num determinado espaço. É o ímã que cria o campo magnético, bem como é a carga elétrica e a massa que, respectivamente, criam os campos elétrico e gravitacional. Já a corrente é o fluxo ordenado de partículas portadoras de carga elétrica ou é o deslocamento de cargas dentro de um condutor, quando existe ddp elétrico entre as extremidades.

A Figura 9, posicionada abaixo, traz uma ilustração de uma célula solar.

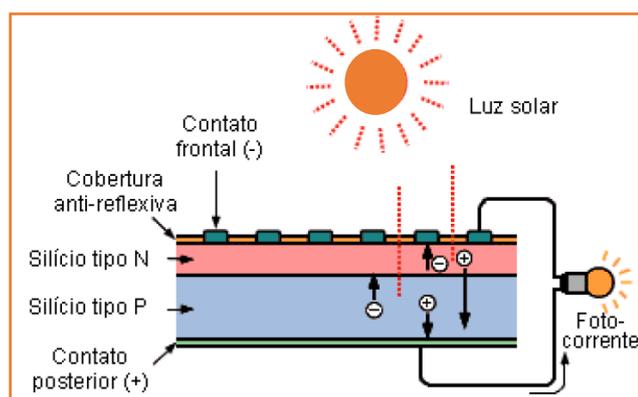


Figura 9 – Irradiação solar e sua relação com a célula solar.

Fonte – (TOMALSQUIM, 2016 adaptado de ZILLES, 2012).

A célula fotovoltaica é o componente fundamental da composição do sistema, embora gere individualmente quantidades ínfimas de energia. Por essa razão, são

agrupadas em módulos, montadas em um plano, em geral de alumínio, e revestidas com material que haja para encapsular, na maioria dos casos EVA (etileno acetato de vinila; espuma sintética é produzida por seu copolímero termoplástico) e vidro temperado, medidas que visam a conservação das células em meio a condições variáveis de meio ambiente. Os modelos comercializados são conectados entre si, geram corrente contínua, possuindo índices de eficiência que transitam entre 10 e 22% quando se converte as energias, o que caracteriza um inconveniente na sua aplicação (TWIDELL e WEIR, 2006).

Recentes avanços vêm tornando as placas/painéis solares um pouco mais acessíveis; entretanto, no geral ainda possuem um investimento elevado para se adquirir. O rápido avanço tecnológico e a tendência mundial de incentivos de governos para emprego de energias renováveis tendem a melhorar a conjuntura para o futuro. A Figura 10 exibe uma placa solar produzida pela empresa Jinko Solar. Nessa placa, utiliza-se o silício em seu estado policristalino.

O formato que traz maior eficiência é o do silício monocristalino, de valor mais acentuado, ao passo que o silício amorfo (não-cristalino) dispõe da menor, porém, no entanto, possui menor valor no mercado. Esse modelo de placa, trazido abaixo, conta com 60 células fotovoltaicas e garante eficiência de, no máximo, 16,19%.



Figura 10 – Placa policristalina JKM265P-60.

Fonte - (JINKO SOLAR, 2018).

A Figura 11 ilustra uma placa solar também produzida e comercializada pela empresa Jinko Solar; porém, nessa versão o silício é aplicado na forma monocristalina. A placa conta com 72 células fotovoltaicas e eficiência máxima de 16,45%.



Figura 11 – Placa monocristalina JKM210M-72.

Fonte - (JINKO SOLAR, 2018).

### 3.2 Conceitos que envolvem a energia eólica e seu aproveitamento

A energia proveniente de recursos eólicos é comumente definida como a transformação da energia oriunda do vento em energia útil, processo recorrente na utilização de aerogeradores para produzir eletricidade, moinhos que giram para produzir energia mecânica ou velas para impulsionar veleiros. O recurso eólico, enquanto alternativa aos combustíveis de origem fóssil, é renovável, está permanentemente disponível, pode ser produzida na maior parte das regiões, não produz substâncias que agravem o efeito de estufa durante a produção e requer menos terreno para operar. Ademais, o impacto ambiental associado é geralmente menos problemático se em comparação a outras metodologias. As massas de ar nascem para a conversão energética com a concepção de moinhos que se utilizavam do vento. Esses instrumentos transformadores possibilitavam que a água fosse elevada e que grãos fossem moídos. A energia que vem dos ventos é considerada uma prática indireta de aproveitamento da energia solar, assim como quase todas as fontes de energia, tendo em vista que o planeta Terra possui uma disposição desordenada de temperaturas, o que gera massas de ar com diferentes condições de temperatura que acabam se movimentando e trocando de posição

com o passar do tempo, possibilitando a rotação das pás que compõem os aerogeradores, tanto verticais quanto horizontais (FARRET e SIMÕES, 2005).

Os dispositivos mais rústicos que aproveitavam a energia contida nos ventos datam de 200 AC (KALDELLIS e ZAFIRAKIS, 2011), e são moinhos de vento de eixo vertical encontrados na fronteira da antiga Pérsia (Irã). Seguindo na linha do tempo, algumas centenas de anos depois, acontece a era de ouro dos moinhos na Europa ocidental (entre os anos de 1200 e 1850), época na qual se estima haver existido milhares deles, principalmente na Inglaterra, Alemanha e Holanda.

Os moinhos tiveram seu apogeu e evolução entre os anos de 1850 e 1930, quando, aproximadamente, 6 milhões de pequenas máquinas com múltiplas pás foram utilizadas para bombear água nos EUA (TOLMASQUIM, 2016).

O uso da energia oriunda dos ventos para fins elétricos é relativamente recente, datando das últimas décadas do século XIX, na Dinamarca e nos EUA, com a operação de máquinas já similares aos aerogeradores. Vale lembrar que a eletricidade com fins comerciais, nos moldes similares ao que conhecemos hoje, data também dos finais do século XIX. Um século após, quando a eletricidade já era fortemente provida por combustíveis fósseis, ocorre a crise do petróleo de 1973, instigando o governo dos EUA a apoiar a pesquisa e o desenvolvimento da energia dos ventos em meio a outras energias renováveis consideradas promissoras.

Os parques eólicos são conjuntos de centenas de aerogeradores individuais ligados a uma linha que transmite eletricidade. As companhias de produção elétrica progressivamente compram o excedente elétrico produzido de maneira doméstica. Existem também parques eólicos costeiros, uma vez que a força das massas de ar é superior e mais estável e o conjunto tem menor impacto visual, embora a despesa com manutenção seja bastante superior. Em 2010, esta modalidade dizia respeito a mais de 2,5% da eletricidade mundial, totalizando taxas de crescimento no patamar dos 25% por ano; ademais, já se destaca na infraestrutura elétrica de mais de oitenta países.

A potência no movimento das massas de ar é consideravelmente consistente ao longo de intervalos anuais, mas sofre variações representativas em escalas de tempo curtas. À medida que se ascende a proporção de aproveitamento eólico numa determinada região, torna-se necessário aumentar a capacidade da linha para absorver os picos de produção, mediante acréscimo da capacidade de estoque, e de recorrer à importação e à exportação para regiões adjacentes quando há menos procura ou quando a produção

eólica é insuficiente. As previsões meteorológicas auxiliam no ajustamento de acordo com as variações de produção previstas.

A capacidade instalada no Brasil vem se fortalecendo ano a ano. Em 2008, eram 341 MW; em 2009 atingiu-se 606 MW e, em 2010, alcançou-se 920 MW. O Brasil responde por cerca da metade da capacidade instalada na América Latina, mas somente 0,38% do total mundial.

Até 2005, a Alemanha liderava o ranking dos países em geração através da exploração das massas de ar; entretanto, em 2008 foi ultrapassada pelos EUA.

Desde 2010, a China é a maior produtora. Em 2011, o total instalado ultrapassava os 62000 MW (62GW). Comparando-se com os 44000 MW instalados até 2010, foi um aumento de 41%. Atualmente, a China possui 145362 MW instalados, os EUA 74471 MW, a Alemanha 44974 MW, e o Brasil, na décima posição no ranking global, possui 8.715 MW (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017). A Figura 12 ilustra a evolução da capacidade mundial instalada.

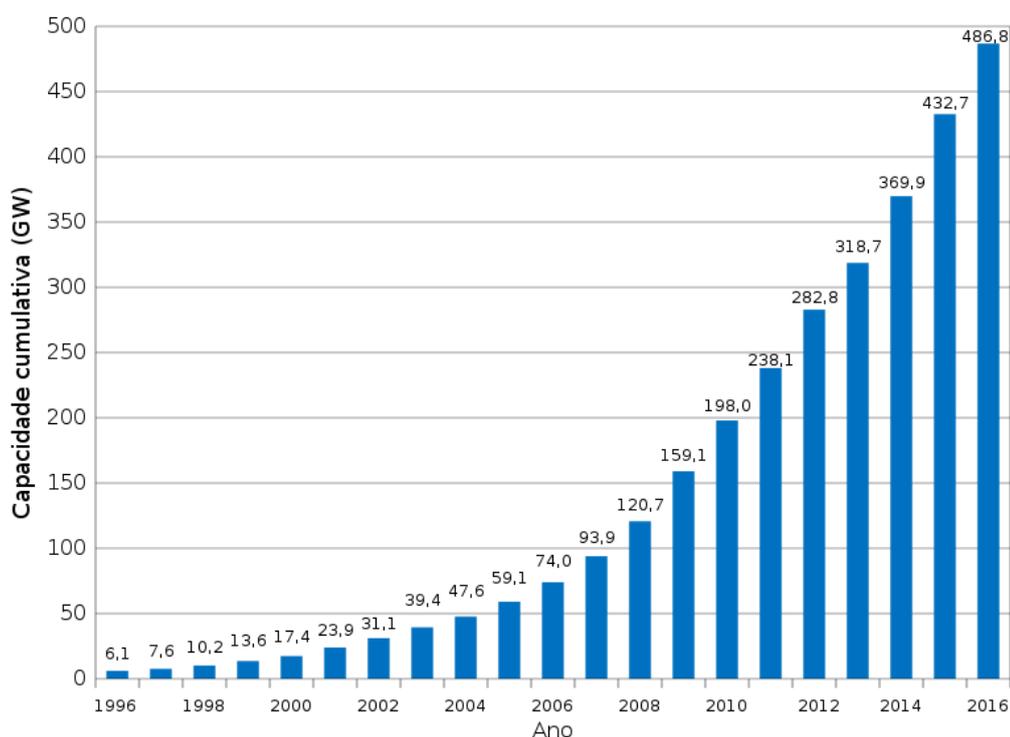


Figura 12 – Evolução da capacidade mundial instalada de energia eólica. Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)

Em alguns países, esses números representam significativa parcela da demanda. Na Dinamarca, coincidem com 28% da produção, 19% em Portugal, 16% na Espanha,

16% na Irlanda e 8% na Alemanha. Globalmente, esse montante não ultrapassa 2,5% da totalidade. Desde 2011, pelo menos 83 países fazem uso da energia eólica em escala comercial.

As despesas associadas à exploração eólica têm caído rapidamente nos últimos anos. Em 2005, eram cerca de um quinto do que no final da década de 90, e essa queda de custos deve se perpetuar com a ascensão da tecnologia de produção de grandes aerogeradores. A título de exemplo, em 2003, foi a forma de exploração que mais cresceu nos Estados Unidos.

Grande parte das formas de exploração requerem altíssimos investimentos de capital e baixos custos de manutenção. Isso é particularmente visível para o caso da energia eólica, em que a despesa com a fabricação de cada aerogerador pode alcançar milhões de reais, com manutenção é baixa e com combustível é nula. Na composição do cálculo de investimento e custo nessa modalidade, levam-se em conta diversos fatores, como a produção anual estimada, as taxas de juros, construção, manutenção, localização e os riscos de queda dos geradores. Esses fatores fazem com que os cálculos sobre o real custo difiram muito de acordo com a localização de cada usina.

Apesar da grandiosidade dos modernos instrumentos, a base da tecnologia utilizada permanece similar há muito tempo. Vislumbra-se que brevemente haverá suplantação por outras tecnologias de maior eficiência, como é o caso da “turbovela”, uma voluta (ornamento em espiral) vertical, apropriada para capturar vento a baixa pressão nos rotores axiais internos. Esse tipo oferece certos riscos de colisões das pás com objetos voadores (animais silvestres) mas não interfere em ondas de rádio e TV. Tais aparatos já podem ser introduzidos no meio marinho, entendendo-se que a fauna aquática não corre riscos de colisão, analogamente ao que se visualiza no ambiente terrestre.

O território nacional seria capaz de gerar até 300 GW, porém, atualmente obtém-se cerca de 8,12 GW, aproximadamente 3% da capacidade mencionada. Por outro lado, o potencial para aproveitamento é superior a todo o potencial elétrico hoje instalado, o que diz respeito a 5,8% da matriz nacional, abastecendo 6 milhões de residências. O centro nacional mais robusto é o complexo eólico Alto Sertão I, situado na Bahia, com capacidade de gerar até 300 MW, seguido do Parque eólico de Osório, localizado em terras gaúchas, com a capacidade de gerar até 150 MW e do Parque Eólico Cerro Chato com capacidade de gerar 91 MW, em Santana do Livramento - RS.

A previsão mais otimista assume que a participação continue crescendo gradativamente, como vem acontecendo no restante do mundo, apresentando taxas médias de crescimento de potência instalada superiores a 20%.

### 3.2.1 Aerogeradores e sua utilização para aproveitamento do recurso eólico

Um aerogerador (ou sistema de produção eólico) é um gerador elétrico integrado ao eixo de um “catavento” e que converte, com as devidas dissipações energéticas, energia eólica em eletricidade. É um equipamento que tem se popularizado rapidamente por ser uma fonte de energia “limpa”, ou seja, considerada muito pouco poluente. O vento passa por um processo de transformação de sua energia cinética em mecânica de rotação com a operação de componentes denominados aerogeradores. O vento provoca a rotação das pás que, por consequência, produz a rotação do eixo interno. Os rotores, usualmente, podem se dividir em rotores de eixo vertical e rotores de eixo horizontal.

Acoplar um gerador ao equipamento torna possível realizar conversões entre as matrizes energéticas.

Como introduzido acima, a maneira como se orienta o eixo do rotor é uma das maneiras de classificação dos aerogeradores, havendo a alternativa de possuir eixo vertical ou horizontal, sendo que os mais recorrentes nos dias de hoje são os de eixo horizontal, muito em função de sua maior eficiência, que geralmente compensa seu custo mais elevado. Ademais, a instalação das estruturas eólicas pode ser concebida no continente (*on-shore*), ou com turbinas operantes no mar (*off-shore*). O regime ou comportamento da velocidade do vento e as características particulares do rotor indicam a capacidade de produção energética possível para um aerogerador.

A Figura 13 traz uma ilustração com os principais componentes usualmente encontrados em um aerogerador de eixo horizontal convencional.

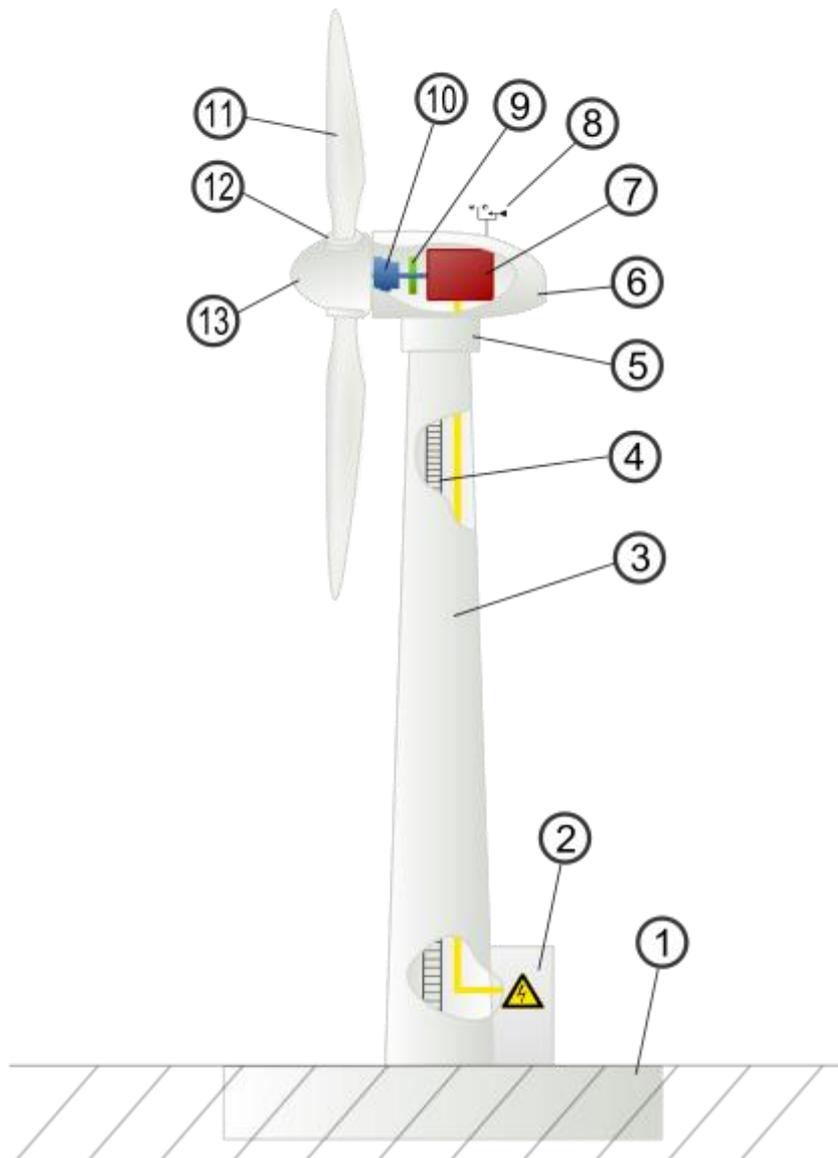


Figura 13 - Componentes usualmente encontrados em uma turbina eólica convencional: 1 - Fundação, 2 - Conector à linha elétrica, 3 - Torre, 4 – Escada de acesso, 5 - Controle de orientação do vento, 6 - Nacela, 7 - Gerador, 8 - Anemômetro, 9 - Freio elétrico ou mecânico, 10 - Caixa de velocidades ou de câmbio, 11 – Lâmina ou Pá, 12 - Controle de inclinação da pá, 13 – Roda ou Cubo Rotor. Fonte: (GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, 2017)

É possível estimar a potência total da massa de vento possivelmente aproveitada pelo componente; a relação proposta é citada por (BURTON, 2011), na Equação 1.

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

Onde  $\rho$  é a densidade do ar (aproximadamente 1,25kg/m<sup>3</sup>);  $C_p$  é o coeficiente de potência relacionado ao rotor (adimensional);  $A$  é a área que pode ser varrida pelas pás acopladas ao rotor (m<sup>2</sup>);  $U$  é a velocidade estimada para o vento (m/s).

A parcela de potência que pode, em valores máximos, se converter em trabalho ou energia mecânica pelas turbinas se dá pelo coeficiente de potência. Essa estimativa não pode exceder o limite teórico conhecido como Limite de Betz, cerca de 59,3 (FARRET e SIMÕES, 2005).

Os equipamentos comercializados possuem parcelas bem inferiores, não ultrapassando 50% nos dispositivos mais sofisticados. As empresas responsáveis pela fabricação dos componentes devem especificar valores para o rendimento ( $\eta$ ) dos modelos, especificando suas características. Um exemplo é a curva de potência real, trazida na Figura 14. Essa relação foi retirada do catálogo do aerogerador modelo AGW 110 da marca WEG, nos seus modelos 2.1 e 2.2 (Grupo WEG, 2018).

### Curva de Potência

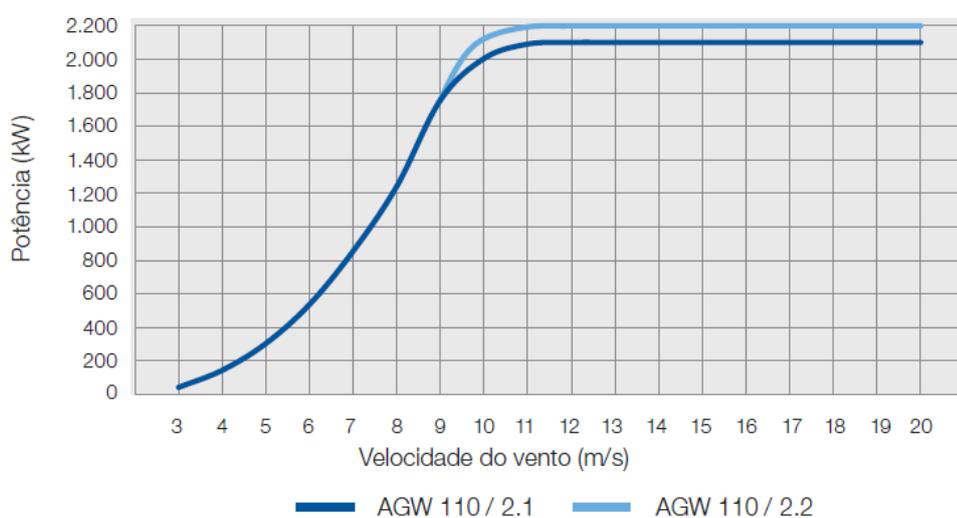


Figura 14 – Perfil das Potências AGW 110, modelos 2.1 e 2.2 – WEG.

Fonte - (Grupo WEG, 2018).

### 3.2.2 Exploração do Recurso Eólico

Assim como nas fontes solares, o dimensionamento do aparato de geração de eletricidade partindo da matriz eólica requer aprofundamento para compreender a disponibilidade que realmente ocorre na localidade. Entretanto, o fato de a velocidade do vento se comportar de maneira inconstante tanto no tempo quanto no espaço é um

agravante para a compreensão de suas características. Ademais, valores que se baseiam em médias anuais podem não representar precisamente o comportamento dos ventos de uma localidade. Por isso, é de suma importância realizar medições corretas para estimar o comportamento dos ventos, afim de avaliar o potencial para exploração. O mínimo que se costuma efetuar são registros de hora em hora por até um ano. Levando em consideração que mensurar a velocidade de vento é considerada uma tarefa árdua e que estudos dessa magnitude, regularmente, realizam-se quando ocorrem investigações para prospectar a implementação de amplos parques exploradores, é possível caracterizar a variabilidade correlacionada às velocidades médias como uma função da densidade de probabilidades, como, por exemplo, a função de distribuição estatística de Weibull, trazida por (RIO GRANDE DO SUL, 2014) através da 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 com que ocorre velocidade  $U$ ;  $C$  é um fator relativo à escala (m/s);  $k$  é um fator relativo à forma (adimensional).

Uma representação gráfica é esboçada na Figura 15, (BURTON, 2011) (adaptação). O eixo vertical relaciona a densidade de probabilidades, já o horizontal traz a velocidade dos ventos. As linhas apresentam, cada uma, um fator de forma distinto, tornando possível verificar que o decréscimo de  $k$  propicia aumento na variabilidade presumida para a velocidade dos ventos.

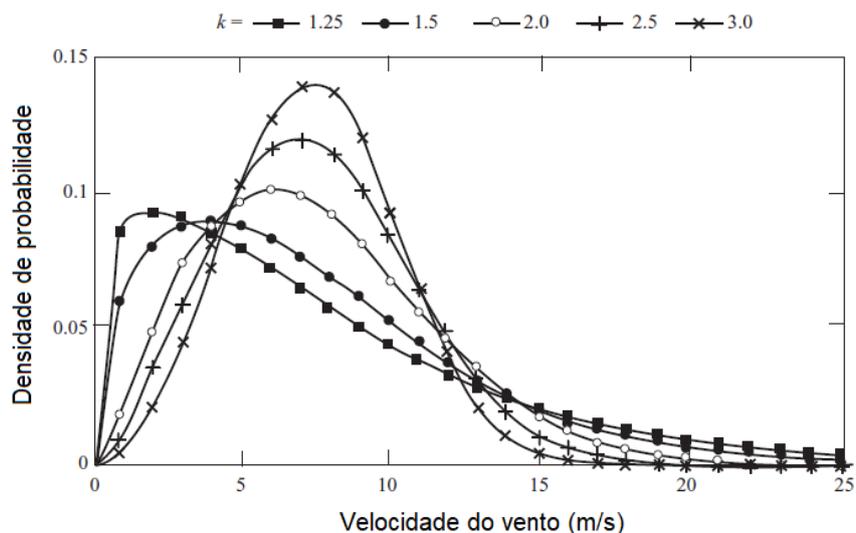


Figura 15 – Exemplificação do comportamento da distribuição de probabilidades de Weibull.

Fonte: (BURTON, 2011).

Como supracitado, o vento se comporta de forma distinta tanto no tempo quanto no espaço, e, ademais, tanto na vertical quanto na horizontal. Em faixas que se aproximam do solo a velocidade tende a ser menor, crescendo com o ganho de altitude, até que um limite é atingido, criando-se um perfil representativo para as velocidades, análogo ao que se apresenta na Figura 16, (WAGNER, 2013) (adaptação).

As características rugosas relativas ao terreno e à ocorrência de estruturas que bloqueiem a livre circulação também são consideradas para se analisar o potencial eólico, tendo em vista que são capazes de perturbar a velocidade do vento.

O comprimento de rugosidade é considerado como a altitude em que o vento assume como zero seu valor (LIRA, MOITA NETO, *et al.*, 2017).

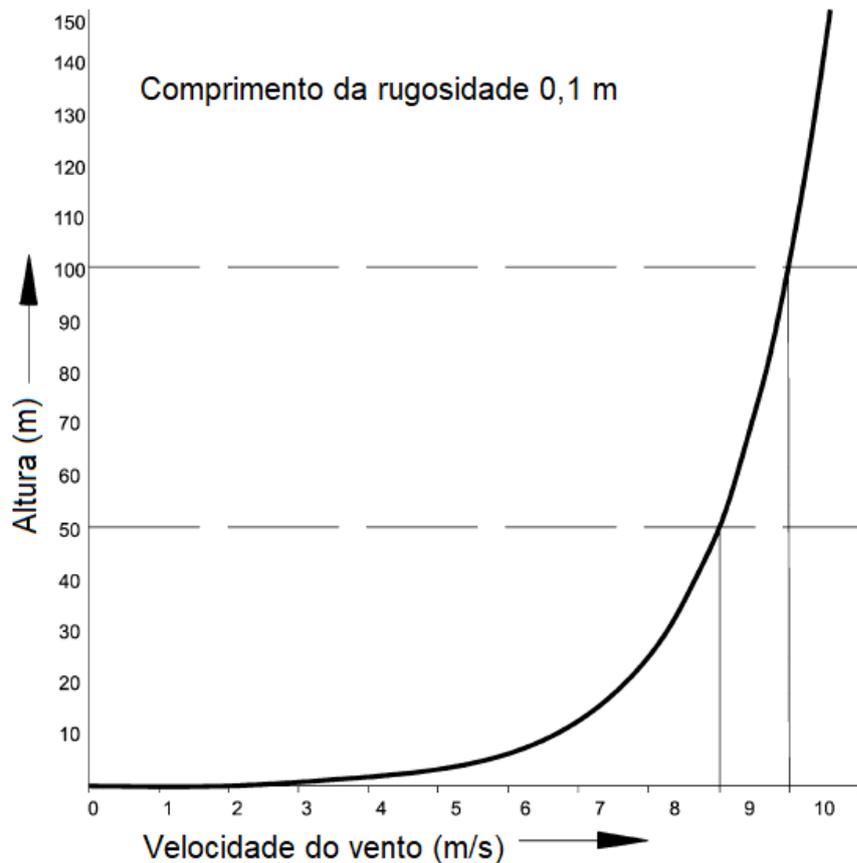


Figura 16 – Exemplificação da curva de variação da velocidade dos ventos distribuída em uma vertical.

Fonte: (WAGNER, 2013) (adaptação).

Uma estimativa da velocidade para um aerogerador posicionado a determinada altitude H pode ser obtida com a aplicação de dados obtidos em uma série de altitudes distintas relativas ao solo por meio da lei da potência. Dessa maneira, julga-se que a velocidade do vento obedeça 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 do vento na altitude em que se deseja operar (m/s); v<sub>0</sub> é a velocidade do vento na altitude referencial (m/s); H é a altitude em que se deseja operar (m); H<sub>0</sub> é a altitude em que foi realizada a medição (m); α é o coeficiente de fricção, variável com as características do terreno (adimensional).

### 3.3 Sistemas Híbridos compostos por matrizes energéticas renováveis e não renováveis

#### 3.3.1 Elucidação

Em muitas áreas remotas, a concessão energética exercida pela rede elétrica convencional pode não existir, dadas as dificuldades de acesso e os dispêndios grandiosos relacionados com a elaboração de subestações e de longos circuitos de transmissão e distribuição, que somente atenderão uma pequena demanda pontual, ou algumas poucas unidades consumidoras (PINHO, 2008). Por isso, uma alternativa consciente para o atendimento dessas cargas isoladas, sejam elas pequenas comunidades ou aplicações especiais (sistemas de telecomunicações, bombeamento e dessalinização de água, irrigação, entre outros), é com sistemas híbridos, preferencialmente compostos por matrizes energéticas de caráter renovável.

No mundo, os conjuntos que relacionavam mais de uma matriz energética começaram a ser instalados nos anos 70. Já em território nacional, o pioneiro foi instalado em Fernando de Noronha, implantado nos anos 80. O componente muito contribuiu no sentido de fornecer energia aos habitantes, se aproveitando de recursos eólicos e diesel (FEITOSA, PEREIRA e ROSAS, 2002).

A eletricidade é provida com a administração de duas ou mais fontes que trabalham de maneira conjunta. O emprego associado propicia segurança no sistema no caso de descontinuação do funcionamento por falta de algum dos recursos; dessa forma é interessante trabalhar com matrizes que se complementem entre si. Além do que, a formatação pode passar por otimizações, buscando diminuir custos para operar e instalar os equipamentos, controlando-os de modo que propiciem maior eficiência. Sistemas híbridos baseados em recursos que se renovam naturalmente possuem o potencial para solução de problemas relacionados à incapacidade do poder público de assegurar a chegada da eletricidade a regiões afastadas dos grandes centros urbanos. Um exemplo são localidades isoladas da região Amazônica, ricas em recursos, mas que em alguns pontos carecem da existência de linhas de transmissão. Pelo isolamento, alguns pontos não possuem tampouco a expectativa de comprar combustíveis de origem fóssil para realizar combustão (PINHO, 2008). Dessa forma, incluir alternativas renováveis nesses locais ganha força gradualmente por apresentar viabilidade financeira, social e ambiental.

### 3.3.2 Complementaridade entre as matrizes energéticas em um conjunto/sistema híbrido

Conforme (BELUCO, SOUZA e KRENZINGER, 2003) a complementaridade (relação de complementação mútua) no tempo pode existir quando as disponibilidades energéticas de duas ou mais fontes apresentam períodos em que ocorre temporalmente a complementaridade em uma mesma região. Para abastecer de forma regular o público, as fontes determinadas devem possuir disponibilidade e um grau satisfatório de complemento entre si, tanto espacialmente quanto temporalmente.

Em um conjunto que trabalha na relação eólico-hídrica, exemplificando, a energia propiciada por uma PCH (pequena central hidrelétrica) pode auxiliar em algum momento de dificuldade se a intensidade dos ventos não possuir magnitude satisfatória para gerar energia, desde que se verifiquem mutuamente complementares. Para se enquadrarem como energias mutuamente complementares de maneira perfeita, a taxa com que os recursos variam haverá de ser periódica e seus máximos e mínimos individuais deverão ocorrer com separação de meio período (fora de fase) temporalmente. Ademais, a quantidade em média das disponibilidades deverá ser a mesma (BELUCO, SOUZA e KRENZINGER, 2008).

Em um estudo que versa sobre a complementaridade entre as matrizes eólica e solar gaúchas (PIANEZZOLA, 2006), constatou-se superior complementaridade nos meses que englobam os meses mais frios (inverno) e os mais quentes (verão) (Figura 17), sendo que o quadro formado pela região norte/noroeste do estado possui estimativas otimistas, fator positivo para viabilizar a operação de um conjunto/sistema que partilhe recursos eólicos e solares nessas regiões.

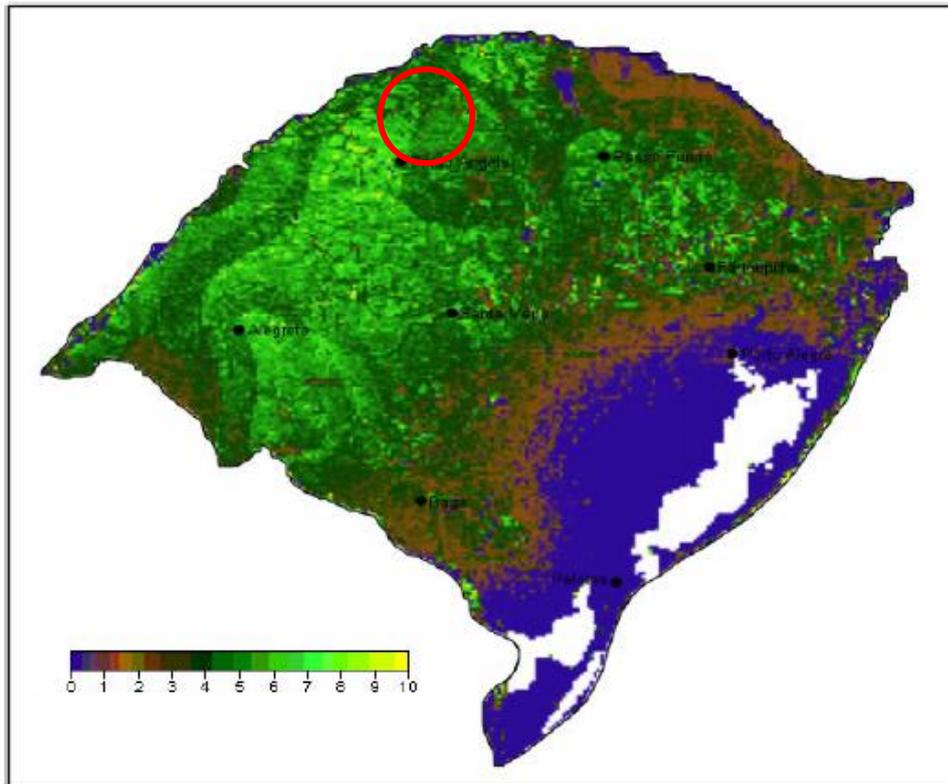


Figura 17 – Índice de complementaridade (eólico-fotovoltaica) entre as estações de inverno e verão no Rio Grande do Sul.

Fonte - (PIANEZZOLA, 2006).

A localidade ostenta, também, uma complementaridade de amplitude com valores discretos, como elucidada a Figura 18.

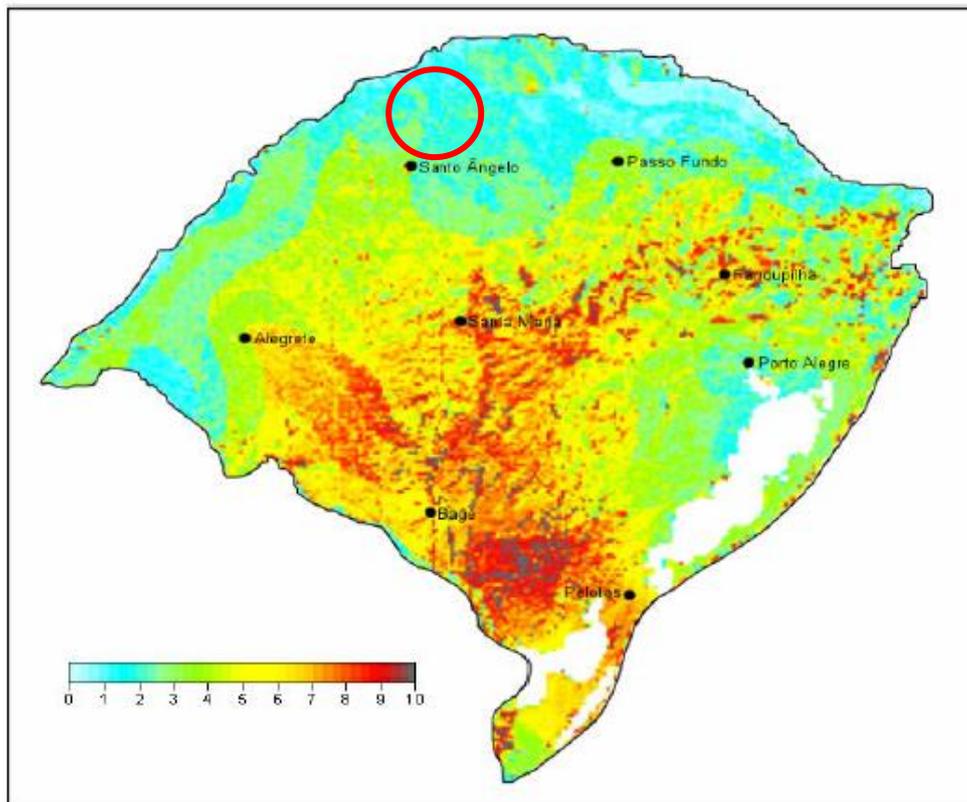


Figura 18 – Índice de complementaridade de amplitude.

Fonte - (PIANEZZOLA, 2006).

### 3.3.3 Equipamentos que constituem os conjuntos/sistemas híbridos

Os principais componentes que constituem os conjuntos/sistemas híbridos podem ser considerados as unidades geradoras. Módulos fotovoltaicos, aerogeradores, geradores a diesel e pequenas centrais hidrelétricas são rotineiramente os mais empregados.

O diesel, parte atuante das configurações propostas, é definido como um combustível líquido cuja principal característica é permitir sua queima à alta taxa de compressão no interior da câmara de combustão. Em geral, quanto maior a taxa de compressão, maior será a eficiência na conversão da energia térmica em energia cinética. Essa característica, em conjunto à baixa velocidade de combustão permite, a ignição. A simplicidade e a confiabilidade, seu regime de baixas rotações (queima lenta) e sua alta compressão (peças internas mais robustas) permitem seu emprego em aplicações pesadas, como furgões, ônibus, caminhões, embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias (geradores elétricos, por exemplo). A evolução dos projetos possibilitou seu funcionamento em rotações maiores e a utilização

de peças mais leves, adequando sua utilização também aos automóveis (carros de passeio). No Brasil, essa aplicação do diesel não é permitida, por não ser "autossuficiente em óleo diesel", muito menos autossuficiente em petróleo. O petróleo brasileiro possui, em condições médias, um baixo grau API (escala arbitrária que mede a densidade dos líquidos derivados do petróleo criada pelo *American Petroleum Institute* - API, juntamente com a *National Bureau of Standards* e utilizada para medir a densidade relativa de líquidos), o que resulta em uma menor produção de diesel em comparação ao petróleo de alto grau API (comum no Oriente Médio). O emprego de gasóleo apresenta maior segurança na prevenção de incêndios em decorrência de ser inflamável somente sob altíssimas temperaturas e/ou pressões.

Os conjuntos híbridos também podem incluir células (pilhas) de combustível, que possuem uma célula eletroquímica, em que se consome continuamente um agente redutor (combustível) e um agente oxidante (comburente); ou então geradores que funcionam com a manipulação de biomassa, utilizada para obtenção energética por meio de processos como a combustão de material orgânico produzido e acumulado em um ecossistema; entretanto, nem toda a produção primária passa a incrementar a biomassa vegetal do ecossistema. Parte dessa energia acumulada é empregada pelo ecossistema para sua própria manutenção. Suas vantagens são o baixo custo, renovabilidade, reaproveitamento de resíduos e menor grau poluente.

Há a alternativa de se incluir no sistema equipamentos que se destinam ao armazenamento, usualmente baterias, que possuem a incumbência de armazenar a eletricidade excedente quando se consumir menos do que se produzir, utilizando-a em outro momento, quando a condição se inverter. Portanto, baterias propiciam a mitigação do desperdício no sistema. Uma bateria é um aparelho ou dispositivo (célula eletroquímica) que transforma em corrente elétrica a energia desenvolvida numa reação química. Cada célula de uma bateria contém um terminal positivo (cátodo) e um terminal negativo (ânodo). O processo químico de troca de elétrons é conhecido como oxirredução e o potencial nominal totalizado se dá pela soma do valor individual das baterias. Geralmente são utilizadas na configuração chumbo-ácido, com proeminência de 12 V, costumeiramente empregadas em automóveis, podem ser empregadas de maneira análoga em sistemas híbridos, como o estudo propõe. A estimativa que se faz para a vida das baterias tem relação direta com o ambiente em que ela é operada e a estratégia de uso empregada (SAUER, 2011).

Destacam-se dois conceitos importantes: o *state of charge* (SOC), responsável por representar o montante de carga disponível (100% em carga completa), e o *depth of discharge* (DOD), responsável por representar a parcela sem carga (0% quando totalmente carregada).

Painéis fotovoltaicos, baterias e grande parte dos aerogeradores trabalham em corrente contínua (CC); porém, geralmente, precisa-se de corrente alternada (CA) nos processos associados. Corrente contínua é o fluxo ordenado de elétrons sempre em uma direção. Essa variedade de corrente é fornecida por baterias de automóveis ou de motos (6, 12 ou 24V), pequenas baterias (geralmente de 9V), pilhas (1,2V e 1,5V), dínamos, células solares e fontes de alimentação de várias tecnologias, que retificam a corrente alternada para produzir corrente contínua. É normalmente empregada com o intuito de alimentar aparelhos eletrônicos (entre 1,2V e 24V) e os circuitos digitais de equipamento de informática (computadores, modems, hubs, etc.). Além disso, pode-se utilizar para transmitir eletricidade por grandes distâncias, em circunstâncias muito específicas. Esse tipo de circuito possui um polo negativo e outro positivo (ou seja, é polarizado). Já a corrente alternada é uma categoria cujo sentido varia no tempo, em contrapartida à corrente contínua, cujo sentido permanece constante temporalmente. A forma de onda usual em um circuito de potência CA é senoidal. Por ser mais eficiente, normalmente a CA é o tipo de corrente que chega nas residências. Entretanto, em certas aplicações, diferentes formas de ondas são utilizadas, tais como ondas triangulares ou quadradas. Enquanto a fonte de corrente contínua é constituída pelos polos positivo e negativo, a de corrente alternada se compõe por fases (e, muitas vezes, pelo fio neutro).

Para realizar essa transformação entre os tipos de corrente, afim de disponibilizá-la ao público de maneira viável para uso, são utilizados inversores. Semelhantemente, havendo a indispensabilidade de conversão entre alternada e contínua, recorre-se a um retificador, que possui funcionamento contrário ao do inversor, circunstância recorrente em sistemas híbridos que operam com aerogeradores ou geradores a diesel que trabalham em CA com armazenamento posterior da energia. Conjuntos/sistemas híbridos têm a possibilidade de ser *off-grid*: quando são desconectados do “*grid*” (rede), agem de forma autônoma e isolada, satisfazendo uma carga; ou, então, *on-grid*, quando conectados ao “*grid*” (rede). Quando localizados a distâncias relevantes da linha de transmissão, os sistemas tendem a ser isolados, e o investimento para conexão somado à demanda irrisória torna o processo inviável. Esse panorama se verifica principalmente em localidades isoladas, zonas rurais, zonas de conservação ambiental e territórios indígenas. Em

contrapartida, vincular-se à rede faz ser possível dispensar o emprego de baterias, além de possibilitar que o usufrutuário de micro ou minigeração se agregue ao sistema interligado de geração distribuída.

Em se tratando de conjuntos fotovoltaicos interligados à rede, rotineiramente detêm maior eficiência e são mais econômicos e geralmente se apresentam 40% mais baratos, além de possuírem maior durabilidade se comparados aos autônomos, por não haver necessidade de armazenamento. Uma ferramenta chamada “medidor bidimensional de energia elétrica” (*smart meter*) permite que o usuário se agregue à geração distribuída, podendo mensurar seu consumo e geração, possibilitando o cálculo dos créditos de compensação realizados pela empresa que concede eletricidade.

As configurações provenientes de um conjunto/sistema híbrido podem ter centenas de combinações; para apoiar a seleção da melhor alternativa entre elas, alguns programas foram relacionados na elaboração de uma revisão (SINHA e CHANDEL, 2014) listando os mais relevantes a que se tem acesso. Entre eles: HOMER, Hybrid 2, RETScreen e Ares. O HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) se destaca como o *software* de maior emprego por possibilitar a otimização, estimar a viabilidade e analisar a sensibilidade para um número extenso de componentes.

#### 3.4 Impactos comumente associados a ambientes de exploração energética baseada em matrizes energéticas renováveis

Apesar de a utilização das energias de origem eólica e solar apresentarem benefícios ao meio ambiente quando contrapostas a fontes convencionais, declarar que existem fontes completamente eximidas de impactos ambientais desfavoráveis ainda não é praticável. As definições comumente encontradas para fontes renováveis dizem respeito à não utilização de combustíveis de origem fóssil, assim como não emissão de gases de efeito estufa. Outro ponto é a não geração de matéria residual ou subproduto nos processos que envolvem a produção energética; entretanto, aerogeradores e painéis fotovoltaicos são constituídos por elementos responsáveis por causar poluição associada no decorrer dos procedimentos realizados para sua confecção, assim como na extração ou obtenção do material necessário para seus equipamentos, formando uma temática que necessita ser controlada com afinco. Aspectos como esses impedem que surjam fontes integralmente renováveis para extração energética.

O descarte de aerogeradores e placas fotovoltaicas acontece quando finda sua vida útil prevista, o que torna indispensável o planejamento de uma reciclagem praticável para seus equipamentos e, não havendo essa hipótese, o descarte consciente dos equipamentos.

Apesar de a energia eólica poder ajudar a reduzir as poluições do ar substituindo as fontes atuais de energia convencional, parques eólicos de grande magnitude também acabam por gerar impactos negativos no meio ambiente. É perceptível a ação na fauna regional, além de poluição sonora ocasionada pelo fluxo de correntes aéreas e pela movimentação dos aparatos, contendo a possibilidade de ser mitigada no período em que ocorre o delineamento das características do aerogerador (SAIDUR, RAHIM, *et al.*, 2011), além de o impacto visual e de a eventualidade da estrutura ser atingida por raios. Alguns outros impactos comumente associados incluem a interferência em sinal de radar ou na recepção de televisores; esse efeito se deve a forças magnéticas geradas pela turbina eólica.

É de suma importância reiterar que os impactos ambientais descritos detêm maior expressividade para instalações de maior magnitude, tendo em vista que a escala dos sistemas híbridos torna as adversidades menos expressivas. A matéria que se torna mais preocupante diz respeito aos dispositivos de armazenamento energético. Baterias podem provocar desgaste mais intenso ao ambiente, tanto em sua concepção quanto em função de descarte incorreto e sem planejamento. A Resolução CONAMA 401/2008 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2008) versa acerca do descarte destes dispositivos no território brasileiro. Comerciantes de baterias recebem a incumbência de providenciar locais responsáveis por coletar os dispositivos para descarte; contudo, fica a cargo de quem os fabrica ou os importa para o território brasileiro a responsabilidade de executar um desfecho ambientalmente consciente aos produtos.

### 3.5 Estações de bombeamento de esgoto e a importância do serviço prestado

As estações de bombeamento no âmbito da coleta de esgoto são normalmente projetadas para lidar com o esgoto bruto que é alimentado por encanamentos de gravidade subterrânea (tubos que são inclinados de modo que um líquido possa fluir em uma direção sob gravidade). Normalmente, o esgoto é alimentado e armazenado em um poço subterrâneo. O poço é equipado com instrumentação elétrica para detectar o nível de esgoto presente. Quando o nível de esgoto se eleva a um ponto predeterminado, uma

bomba será iniciada para elevar o esgoto para cima utilizando-se de tubulação pressurizada, se o esgoto for transportado a uma distância significativa.

A estação de bombeamento pode ser chamada de estação elevatória se a bomba apenas descarregar em um poço de inspeção próximo. Em seguida, o ciclo recomeça até que o esgoto atinja seu ponto de destino - geralmente uma usina de tratamento. Por esse método, estações de bombeamento são usadas para mover resíduos para altitudes mais elevadas, ganhando cota. No caso de altos fluxos no poço (por exemplo, durante períodos de pico de fluxo e tempo úmido), bombas adicionais podem ser necessárias. Se isso for insuficiente, ou se suceder-se alguma falha, pode ocorrer transbordamento de esgoto sanitário e, no pior dos casos, ser responsável por ocasionar uma descarga de esgoto bruto no meio ambiente.

A origem do esgoto pode ser, além de doméstica, pluvial (água das chuvas) e industrial (água utilizada nos processos industriais). Se não passar por processos de tratamento adequados, o esgoto pode causar enormes prejuízos à saúde pública por meio de difusão de doenças. Esses resíduos podem, ainda, poluir rios e fontes, afetando os recursos hídricos e a vida vegetal e animal.

## 4 METODOLOGIA

Nessa seção, estão detalhados os métodos que foram primordiais para a tomada de decisões na realização da atividade proposta.

### 4.1 Informações acerca da região estudada

Como base para o estudo de viabilidade para funcionamento do sistema híbrido apoiado em energias renováveis e não renováveis, optou-se por utilizar uma estação localizada na cidade de Santa Rosa (coordenadas 27°52'35,02''S / 54°29'49,31''O), situada no norte do estado do Rio Grande do Sul.

A região era primitivamente habitada por indígenas do grupo Tapes, e, com a chegada dos jesuítas e espanhóis, começando em 1626, iniciou-se o processo de catequização.

Santa Rosa integrava o território dos Sete Povos das Missões, fundados pelos jesuítas e pertenceu, sucessivamente, a Porto Alegre, Rio Pardo e Santo Ângelo. Em 1876, o município de Santo Ângelo foi subdividido, criando-se o Distrito de Santa Rosa. Contudo, a efetiva colonização começou a ocorrer em 1915, quando entrou em execução um vasto plano de loteamento de terras para assentar os nacionais que já habitavam a região.

No ano anterior, Quintino Zanella e mais alguns companheiros, ergueram o acampamento no local onde hoje está construído o Colégio Santa Rosa de Lima. Assim, estava fundada a Colônia 14 de Julho. Os primeiros povoadores foram os próprios funcionários do serviço de agrimensura. Mais tarde, ocorreu a colonização propriamente dita, quando afluíram descendentes de alemães e italianos, e outras etnias em menor escala.

As famílias se instalavam nas proximidades do acampamento, derrubavam matas, construía casas e faziam lavouras. A ocupação dessas terras aconteceu rapidamente, sendo que em 1920 a Colônia já contava com 11.215 habitantes. A eletricidade chegou à cidade em 1922. José Pittas era o dono do gerador.

A ideia da emancipação surgiu em 1927, quando a Colônia já estava com 35.000 pessoas e uma boa arrecadação. Em 1929, a luta pela emancipação crescia rapidamente e o maior argumento dos emancipacionistas era a crescente arrecadação da Colônia. Durante a campanha, uma comissão foi até a capital do Estado a fim de apressarem a

emancipação. O jornal “A Serra” foi fundado para divulgar a campanha emancipacionista da Colônia. Assim, no dia 1º de julho de 1931, o general José Antônio Flores da Cunha (Interventor do Estado) assinava o decreto de emancipação do município de Santa Rosa. A solenidade de instalação da cidade de Santa Rosa aconteceu no dia 10 de agosto de 1931. Nos dias de hoje a população estimada é de 72.504 pessoas e a extensão territorial compreende 419 km<sup>2</sup>.

#### 4.2 Empreendimento e estimativa do consumo energético

Estações de bombeamento de esgoto são parcelas integrantes e imprescindíveis no sistema nacional de tratamento de esgotos e são parte atuante de uma porção representativa dos sistemas coletivos.

A escolha desse empreendimento em específico se deu pela existência de relatos sobre a estação operar com problemas relacionados a quedas de energia. A Figura 19 traz uma imagem de satélite destacando o terreno ao redor da estação.



Figura 19 – Estação de Bombeamento de Esgoto localizada no município de Santa Rosa e eleita para realização do estudo.

Fonte: Google Earth.

A estação de bombeamento dispõe de uma bomba dotada de potência mecânica disponibilizada pelo motor de 50 CV, possuindo rendimento percentual de 50%. Com auxílio da Equação 4, foi possível estimar o consumo energético da bomba em 73,6 kWh a cada hora em que houver operação. O estudo proposto buscará atender esse montante durante dez horas diárias, que é relatado como o pior caso para a estação, estabelecidas para uso do programa como sendo das 7 até 17 horas, totalizando 736 kW por dia.

$$C = \left( \frac{P \times 0,736}{\text{Rendimento \%}} \right) * 100 \quad (4)$$

Onde C é o consumo do motor em uma hora de operação (kWh); P é a potência mecânica fornecida pelo motor (CV); Rendimento % é o rendimento percentual do motor.

#### 4.2 Estudo sobre o conjunto/sistema híbrido

A seguir serão abordados os tópicos estudados para dimensionar e configurar o sistema híbrido sugerido para operar na EBE (estação elevatória de esgoto). O *software* eleito para assistir na escolha da alternativa mais indicada foi o HOMER.

##### 4.2.1 Aplicabilidade do *Software - Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*

Como supracitado, *software* HOMER (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) Legacy foi eleito para o estudo, em sua versão “2.68 beta” de acesso liberado.

Segundo os desenvolvedores, o foco da HOMER Energy está associado à otimização econômica e à engenharia de micro redes por mais de 25 anos. Existem, também, preocupações coletivas, no sentido de capacitar as pessoas ao redor do mundo com ferramentas, serviços e informações para acelerar a adoção de fontes de energia renováveis e distribuídas.

A HOMER Energy oferece, também, serviços adicionais, como treinamentos à distância e presenciais, além de assistência no uso dos *softwares*. Também é possível personalizar o software para novos problemas ou tipos de equipamentos. Além disso, é fornecida uma gama de serviços de consultoria relacionada à política, economia e tecnologias que incitam renovabilidade.

Desde o seu lançamento, o HOMER foi baixado por mais de 150.000 pessoas em 193 países, se tornando uma comunidade global de profissionais pioneiros. A fim de aproveitar a sabedoria coletiva desse grupo, a HOMER Energy também criou uma comunidade on-line com fóruns de discussão, em que os usuários podem se envolver, trocar e acumular suas experiências.

A opção por esse programa se deu com a intenção de verificar a viabilidade do sistema e comparar distintas configurações que o conjunto possa ter. Como dito, o HOMER atua na otimização de microcentrais de energia. Esse modelo simplifica a tarefa de avaliação de projetos (conectados à rede ou não) para uma variedade de aplicações.

O HOMER é, portanto, um modelo computacional concebido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) para assessorar no desenho de sistemas de microgeração e simplificar técnicas comparativas entre tecnologias distintas destinadas à geração de energia (LAMBERT, GILMAN e LILIENTHAL, 2005).

Para utilização do HOMER, deve-se disponibilizar ao software os dados de entrada (informações sobre cargas, componentes e recursos), para que, então, sejam calculados e exibidos os resultados, cabendo ao usuário examinar a resolução, as tabelas e os gráficos concebidos. A utilização é um processo iterativo. É possível começar com estimativas dos valores de entrada, verificar os resultados, melhorar suas estimativas e repetir o processo para encontrar valores razoáveis para as entradas.

A operação do *software* torna possível a sustentação de um comparativo de sensibilidade, tornando viável quantificar as prováveis consequências ocasionadas por imprecisões ou incertezas na apuração do arranjo excelente, que advém de sucessivas simulações que buscam otimizar o sistema. No decorrer das simulações, são fornecidos pareceres com combinações fisicamente possíveis que os mecanismos possam portar, respeitando a demanda pré-estabelecida. De forma análoga, são suprimidos os cenários considerados inviáveis. As análises ocorrem por um balanço energético horário, comparando entradas e saídas de cada hora do ano. Os cenários viáveis são dispostos a partir do critério do valor presente líquido (Equações 5, 6 e 7), sendo a condição excelente ou ótima a que obter a menor projeção seguindo esse critério.

O programa examina e calcula o custo total no intervalo temporal que o usuário determinar, levando em consideração a estimativa da vida dos equipamentos, abrangendo o montante que deverá ser dispendido, que inclui aquisição e implementação dos dispositivos, além dos custos relacionados à operação, manutenção e reposição durante a faixa de tempo estimada para a vida útil do conjunto. A moeda utilizada para considerar

os custos é o dólar americano (US\$), que precisa ser convertido antes de ser adicionado ao programa.

#### 4.2.2 Metodologia de determinação dos investimentos associados

O valor presente líquido (VPL), é a fórmula matemático-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial. Basicamente, é o cálculo de quanto os futuros pagamentos somados a um custo inicial estariam valendo atualmente. É preciso considerar o conceito de valor do dinheiro no tempo, pois, exemplificando, R\$ 1 milhão hoje não valeriam R\$ 1 milhão daqui a um ano, devido à despesa de oportunidade se colocar, por exemplo, tal montante de dinheiro na poupança para render juros. É um método padrão em setores como contabilidade gerencial e finanças. Na contabilidade gerencial, para a conversão de balanços e conciliar efeitos da inflação e das oscilações do câmbio. É, de maneira similar, um dos métodos para o cálculo do *Goodwill*, quando, então, se usa o demonstrativo conhecido como fluxo de caixa descontado. Já nas finanças, é rotineiramente empregado para verificação do orçamento de capitais - planejamento de investimentos a longo prazo. Usando o método VPL, um projeto de investimento potencial deve ser empreendido se as entradas de caixa descontadas das saídas forem maiores que zero. Se o VPL for igual a zero, o investimento é indiferente; se o VPL for menor do que zero, significa que o investimento não é economicamente atrativo, já que o valor presente das entradas de caixa é inferior ao das saídas de caixa.

Para o estudo proposto, o VPL pode ser definido conceitualmente como um recurso que traz um método de compilar gastos realizados no início de um investimento ( $R_0$ ) e dispêndios periódicos distribuídos em uma faixa de tempo ( $P$ ) em apenas uma cifra, unindo de forma coesa a soma dos investimentos para o que se considerar tempo presente. Esse agrupamento se dá através do emprego de uma taxa de juros. A apuração do VPL, analogamente ao realizado pelo *software* HOMER, é citado por (MASTERS, 2004) em conformidade com o que evidenciam as Equações 5 e 6.

$$VPL = R_0 + P \quad (5)$$

$$P = A \times PVF(i, n) \quad (6)$$

Onde P é o valor presente líquido do que se considera custo total do sistema; A é o que se considera para o custo anual do sistema; PVF é definido como a função do valor presente considerando uma taxa de juros anual e o período da vida útil considerado para o sistema.

O PVF é estimado através da Equação 7:

$$P = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (7)$$

Onde i é o valor considerado para taxa de juros anual (%); n é o estimado para tempo de vida útil do sistema (ano).

#### 4.2.3 Ajuste e dimensionamento do conjunto/sistema híbrido

A utilização do HOMER é praticável para simular um sistema energético, otimizar as opções de projeto para que sejam viáveis e rentáveis, ou para realizar uma análise de sensibilidade sobre fatores como o nível de disponibilidade de recursos e custos estimados para o sistema, bem como a busca de uma disposição ótima para o empreendimento.

As informações presentes no banco do programa permitem que sejam escolhidos modelos de equipamento, incluindo aerogeradores, placas fotovoltaicas, gerador a diesel, conversores e baterias, entre uma enorme gama de opções. É recomendado optar por maquinário semelhante, ou próximo, a dispositivos comercializados no mercado nacional. Dessa forma, diversas disposições de sistemas híbridos podem ser montadas, relacionando os equipamentos que se deseja incluir nas simulações.

#### 4.3 Potencial energético dos recursos propostos

O estudo de viabilidade proposto possui inserção de aerogeradores e módulos fotovoltaicos. Dessa forma, conhecer a real disponibilidade dos recursos se torna relevante.

### 4.3.1 Potencial do recurso solar

O Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA, 2017) apresenta representações que informam a radiação direta (Figura 20) e também a que incide no plano inclinado na latitude que atinge o solo (Figura 21). A soma desses componentes gera um mapa da média anual da irradiação solar global no plano horizontal para o Brasil (Figura 22). As representações mencionadas estão presentes a seguir.

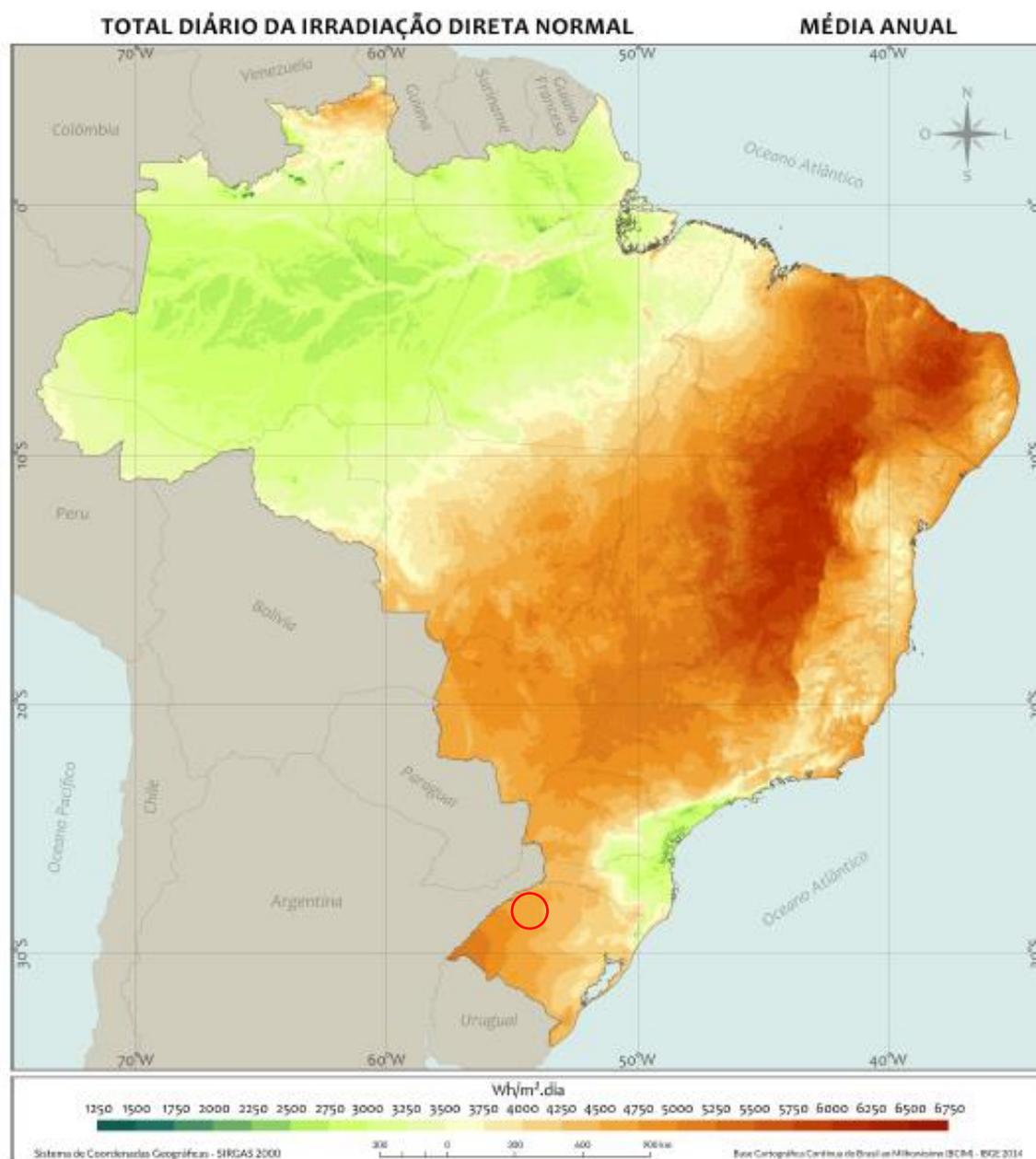


Figura 20 – Irradiação direta para o território brasileiro.

Fonte: (PEREIRA, 2017).

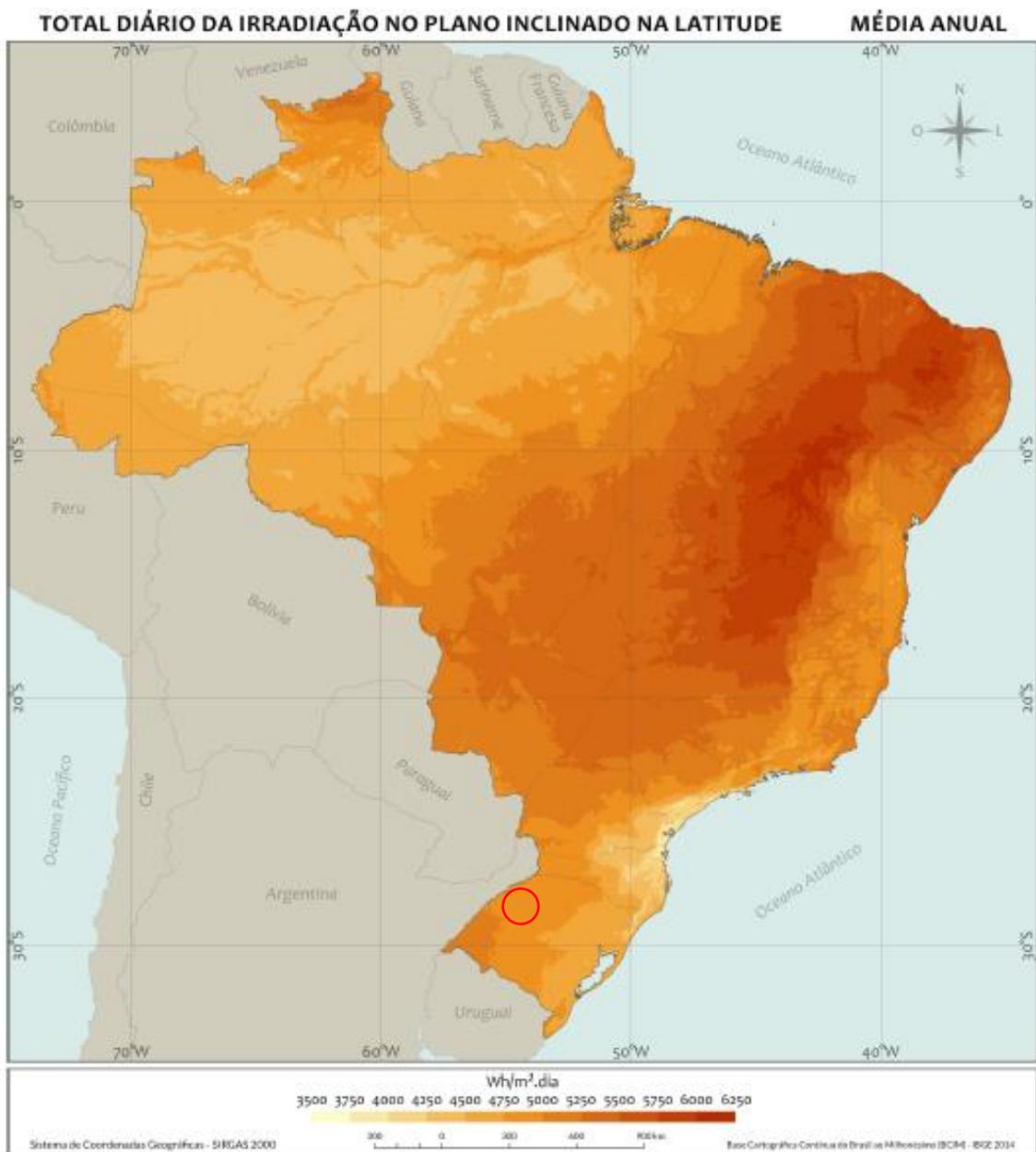
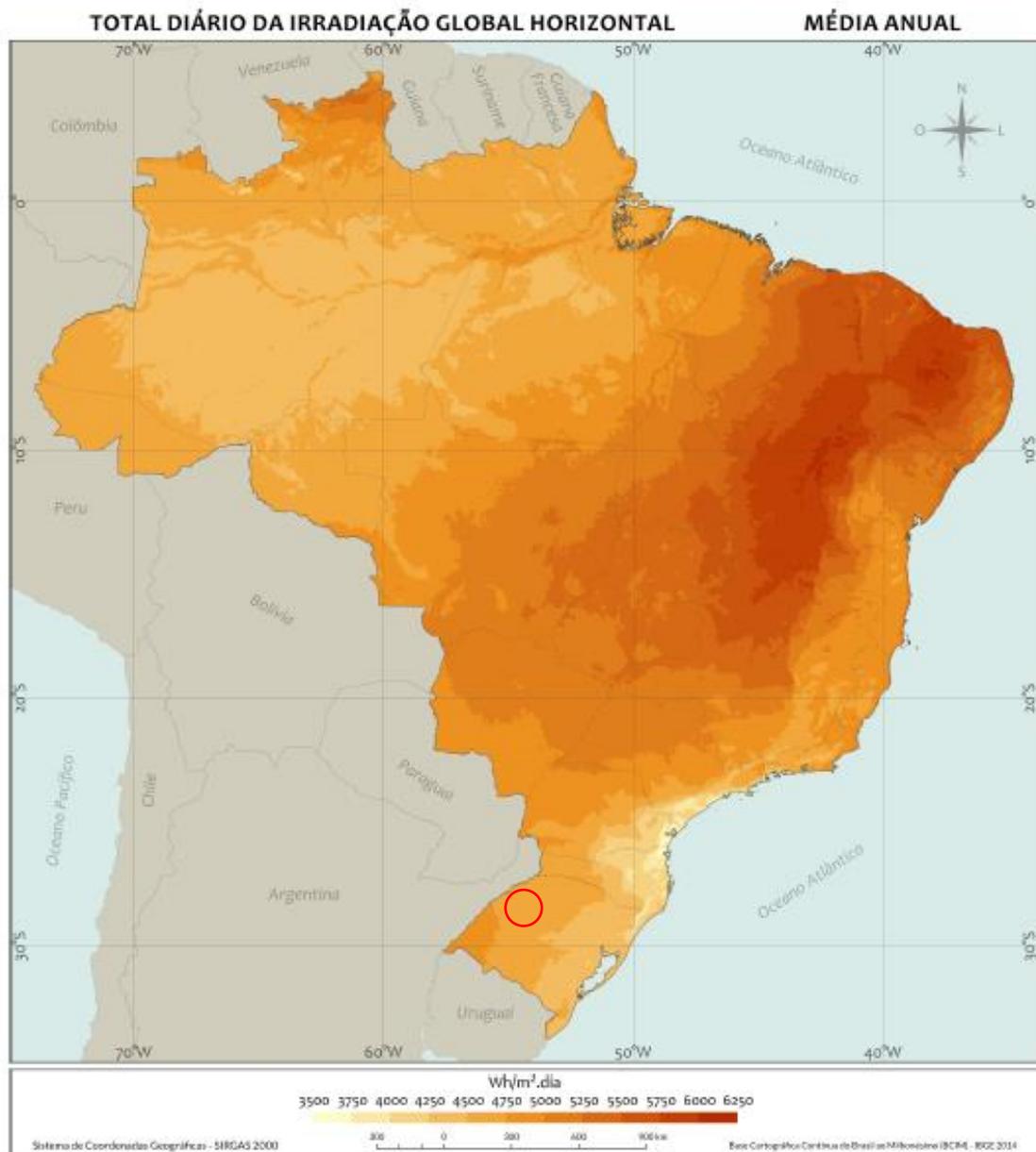


Figura 21 – Irradiação no plano inclinado para o território brasileiro.

Fonte: (PEREIRA, 2017).



36

Figura 22 – Irradiação solar horizontal para o território brasileiro.

Fonte: (PEREIRA, 2017).

A localidade se encontra em uma região com valores de irradiação solar média anual na faixa de 4500 a 4750 Wh/m<sup>2</sup>dia. Números dessa magnitude indicam elevado potencial para exploração na localidade.

Por meio do *software* HOMER, é possível utilizar a base de dados dos satélites do NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) e da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Desta forma se consegue ter acesso a medições de irradiação solar entrando com coordenadas geográficas da estação de bombeamento. A Figura 23,

extraída do HOMER, traz os dados anuais de irradiação discretizados para cada mês e o índice de claridade no plano horizontal representado pela linha em vermelho. Os números apresentados demonstram coerência com a irradiação média anual esperada para a área. É possível verificar que a insolação máxima se dá no mês de dezembro (verão) e a mínima em junho (inverno), o que corresponde ao começo das estações.

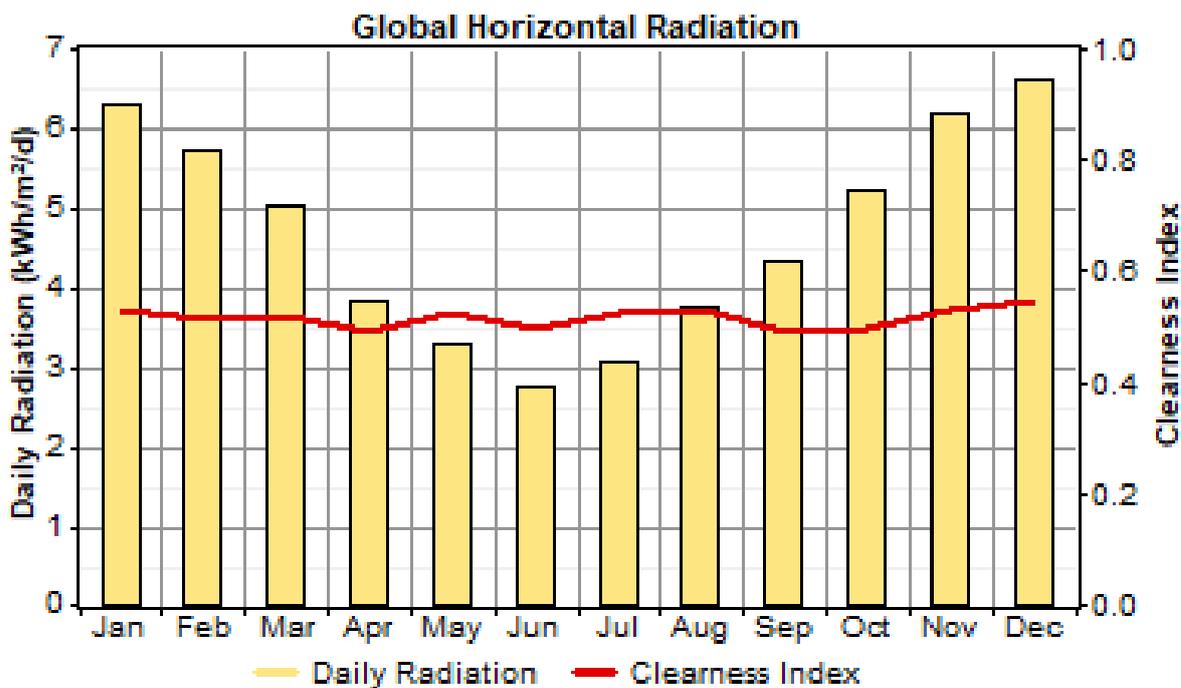


Figura 23 – Irradiação no plano horizontal e índice de claridade para a região estudada.

Fonte: HOMER Legacy.

#### 4.3.2 Potencial do recurso eólico

É fundamental ter conhecimento do potencial eólico para corroborar na tomada de decisões na identificação de áreas adequadas para aproveitamentos eólico-elétricos. A Figura 24 traz o mapa relacionando o potencial eólico brasileiro, com destaque para o grande potencial presente da região sul.

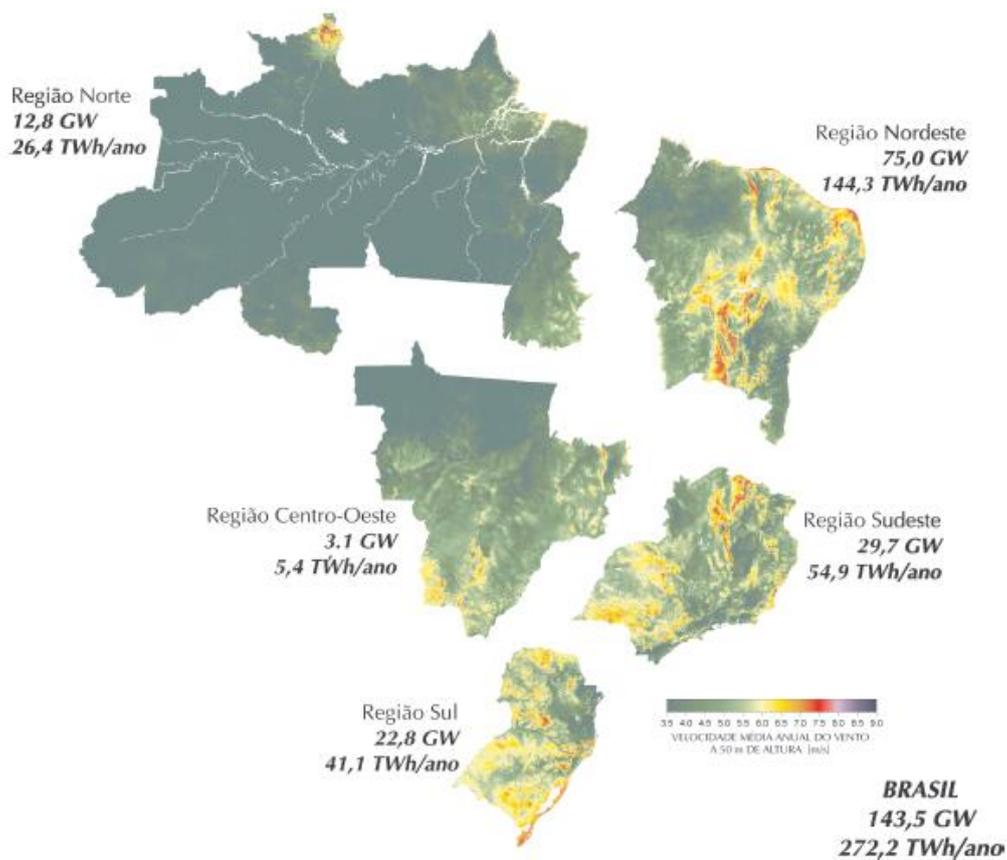


Figura 24 – Relação distribuída regionalmente para o potencial de exploração de energia eólica no Brasil.

Fonte - (AMARANTE, 2001).

A Figura 25 exibe estimativas de velocidade média anual de vento. Para a concepção dessa representação, é realizada uma série de medições a uma altitude de 50 metros do solo. Os pontos são interpolados e, então, são informadas as estimativas das velocidades. A relação (AMARANTE, 2001) foi extraída do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Se verifica que as velocidades que se espera que o vento atinja na região de Santa Rosa giram em torno do valor de 7 metros por segundo, evidentemente, para a altitude de 50 metros. Dessa forma se obtém uma estimativa para a potencialidade de se explorar o recurso localmente. Entretanto, consoante a Figura 16, exibida previamente, ocorre um decaimento conforme se verificam menores alturas. Logo, para aplicação desejada de microgeração energética, tanto a altitude quanto a velocidade esperada são relativamente inferiores, tendo em vista que as turbinas operariam em uma posição mais próxima do chão e seriam, por conseguinte, influenciadas de maneira superior pela rugosidade.

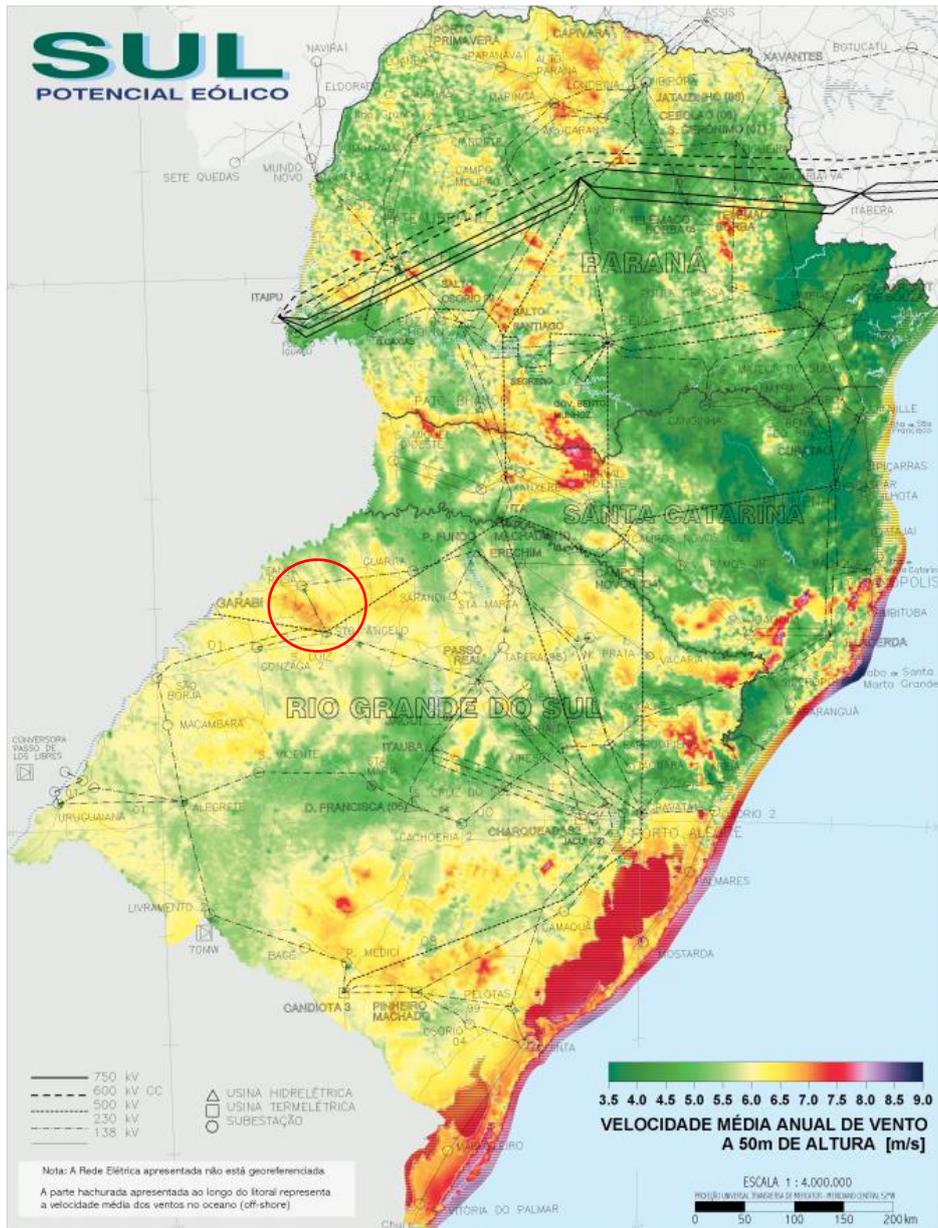


Figura 25 – Relação de velocidades de vento esperadas para Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.

Fonte: (AMARANTE, 2001).

O programa HOMER necessita ser abastecido com dados relacionados ao meio eólico para lograr a mensuração de sistemas compostos por aerogeradores. Foram incorporados valores para as velocidades médias mensais na localidade (RIO GRANDE DO SUL, 2014), gerando-se um diagrama de variabilidade sintético por intermédio da distribuição estatística de Weibull, relacionada na Equação 2, proporcionando dados representativos de velocidade dos ventos discretizados mensalmente para o decorrer de um ano qualquer. A Figura 26 discretiza os ventos gaúchos em cada estação.

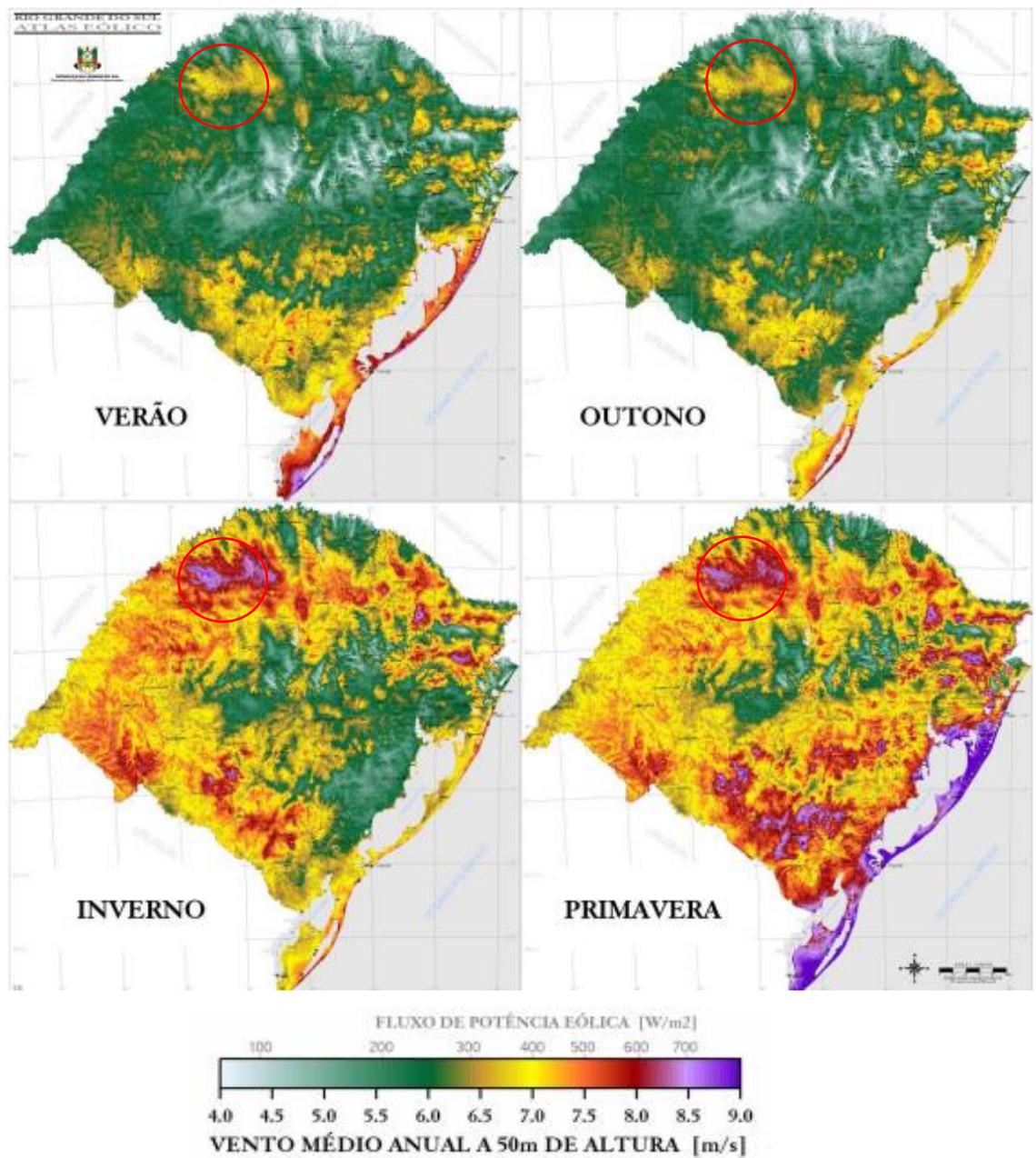


Figura 26 – Regime dos ventos por estação do ano.

O gráfico que relaciona a variabilidade dos ventos para a região é apresentado na Figura 27, logo em seguida.

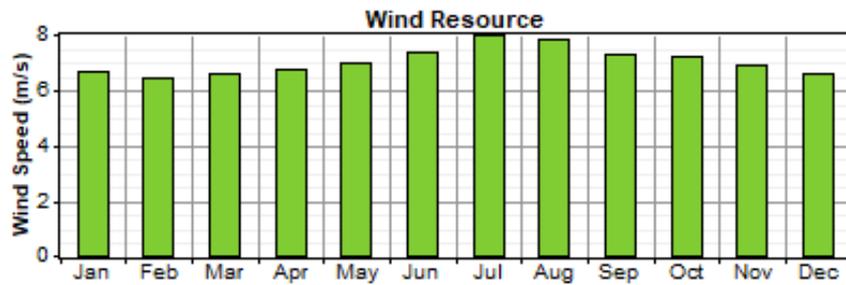


Figura 27 – Variação esperada para o recurso eólico na localidade de estudo.

Fonte: HOMER Legacy.

Com essa variabilidade, é gerado um *box plot* que apresenta medidas médias de velocidade do vento (m/s) discretizadas mensalmente, também sendo consideradas as suas variabilidades esperadas. Como dito acima, a série é disponibilizada pela medição com anemômetros a 50 metros de altitude, porém o rotor se encontraria em uma posição verticalmente inferior. Dessa forma, a lei da potência expressa na Equação 3 é aplicada pelo HOMER em suas rotinas de cálculo afim de obter a velocidade que de fato alcança o rotor acoplado ao aerogerador.

Dessa maneira, é gerada a estimativa para a variabilidade típica dos ventos encontrada no local para a mesma altitude, representada na Figura 28. A velocidade média anual gira em torno de 7 m/s.

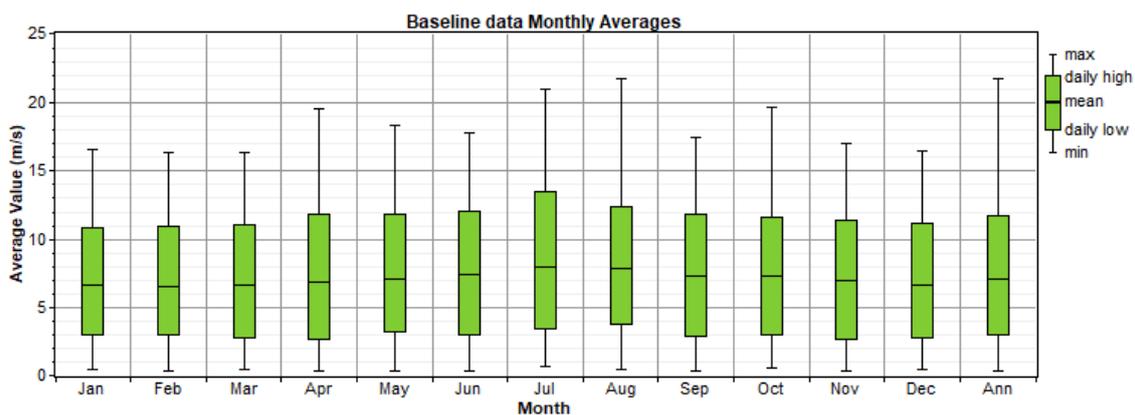


Figura 28 – Variabilidade em torno da taxa de variação média para o recurso eólico na localidade.

Fonte: HOMER Legacy.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Nessa etapa constarão a análise do sistema híbrido sugerido, assim como os meios como foi configurado. Buscar-se-á compreender as variáveis que implicam em sua instalação no contexto de uma estação responsável por bombear esgoto, buscando o melhor cenário possível e apresentando os resultados verificados.

### 5.1 Simulações realizadas com as rotinas do HOMER Legacy

Com base nos componentes disponíveis, levando-se em consideração a mínima viabilidade e a disponibilidade para comercialização em território nacional, dois cenários de conjuntos/sistemas híbridos se estabeleceram no *software*, ambos contendo aerogeradores, placas fotovoltaicas, geradores movidos a diesel e dispositivos de armazenamento (baterias), sendo considerada a alternativa de conversão de corrente. O caso primeiramente proposto se baseia em um sistema interligado à rede de distribuição; já no cenário de número 2, esse vínculo foi retirado, tornando-se isolado. Os cenários se dispuseram dessa forma para que se contemplasse mais possibilidades de funcionamento, buscando atingir a formatação mais indicada para sustentar o empreendimento e contar com condições de conversão energética no local.

Na Figura 29, logo abaixo, no lado AC, que se refere à corrente alternada, se dispõem o aerogerador “BWC Excel R-AC”, o gerador a diesel “Generator 1” e o ícone que indica que o sistema está conectado à rede (Grid); enquanto na ala DC, referente à corrente contínua, são dispostos os painéis fotovoltaicos (PV) e as células de armazenamento (baterias), denominadas por seu modelo. Unindo as duas extremidades, ao centro, se encontram a quantidade de energia requerida (Equipment), retratada por um ícone contendo uma lâmpada, e o conversor, unindo-se aos dois lados, pelo fato de ocorrer conversão entre as correntes neste componente.

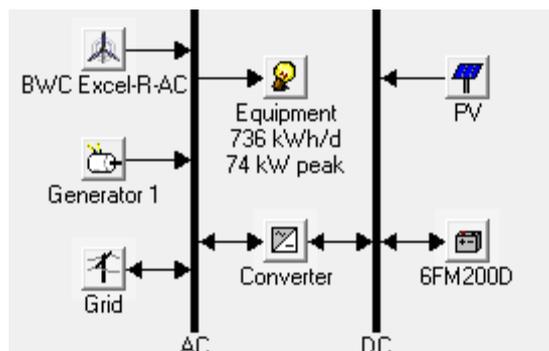


Figura 29 – Esboço do sistema *on grid* para o Cenário 1 (*Software HOMER*).

O cenário de número 2 das simulações não contém ligação à rede, ou seja, trata-se de um sistema considerado isolado, como demonstra a Figura 30, abaixo:

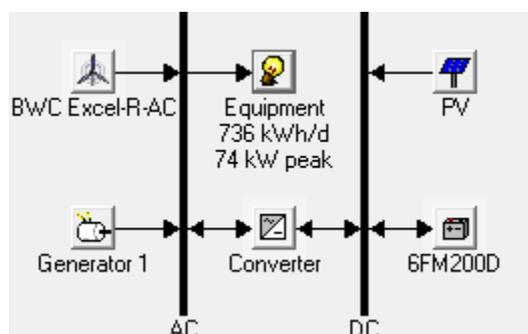


Figura 30 - Esboço do sistema *off grid* para o Cenário 2 (*Software HOMER*).

Com base nas duas configurações propostas acima, o *software HOMER* começou a simular a partir dos cenários pré-dispostos.

No Cenário 1, situação que propõe conexão do sistema, viabilizando-se comercializar a energia sobressalente que se gerar, considerando como variável de entrada o diesel com o valor variando em torno de US\$ 1,00 e em torno de 7 m/s para a velocidade de deslocamento médio do vento, 8 configurações praticáveis foram apontadas, atrelando diversos arranjos executáveis para a potência individual dos equipamentos. Um dos sistemas listados é destacado como “ótimo”; a configuração apresenta dois aerogeradores, 8 kW em painéis fotovoltaicos, 32 baterias, um gerador a diesel de 40 kW e, como foi estipulado previamente, conexão à rede de distribuição local. O sistema opera em CA e CC, então é necessário realizar conversão de corrente; para tal, também foi incluído um conversor de 20 kW. Para o início, é esperado um investimento para aquisição dos equipamentos de US\$ 108.580 e o *net present cost* da configuração

ótima proposta, no decorrer de 25 anos, é de cerca de US\$ 1.285.25, com o valor da energia orçado em kWh em US\$ 0,374.

Na faixa temporal simulada, o excedente energético foi comercializado com a rede para abater uma fração dos custos. Isso se deu pelo fato de a produção realizada por fontes renováveis não ter sido totalmente consumida ou armazenada nas baterias durante todo o tempo que se simulou. Anualmente, estima-se a venda de 21034 kWh. A Figura 31 traz a divisão dos componentes com seu valor ao longo dos 25 anos de funcionamento; a cor amarela, representa os painéis fotovoltaicos; a verde, o aerogerador; a preta, o gerador a diesel; a roxa, a rede de eletricidade; a azul, as baterias e a vermelha, o conversor.

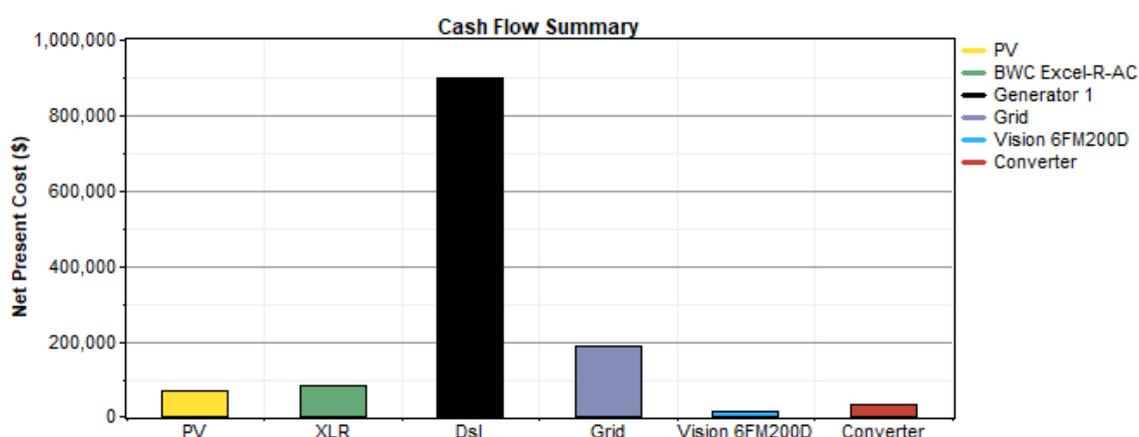


Figura 31 - Relação de custo por componente para o sistema 1 (*Software HOMER*).

Nesse cenário, destaca-se que 4% da energia consumida foi produzida pelos painéis solares, 17% pelas turbinas eólicas, 42% pelo gerador a diesel e 37% pela rede. Verifica-se uma redução de 63% no consumo que, atualmente, vem da rede e que conta com problemas de disponibilidade. Verifica-se também que os dispêndios com diesel somam cerca dois terços do valor total, US\$ 848.548 dos US\$ 1.285.259 totais. A Figura 32, abaixo, apresenta os dados da análise discorrida acima.

Production	kWh/yr	%
PV array	11,550	4
Wind turbines	50,344	17
Generator 1	122,194	42
Grid purchases	109,500	37
Total	293,587	100

Figura 32 – Porcentagem de cada fonte na produção energética para o Cenário 1 (*Software HOMER*).

A Figura 33 traz a potência média gerada discretizada para cada componente, em cada mês do ano.

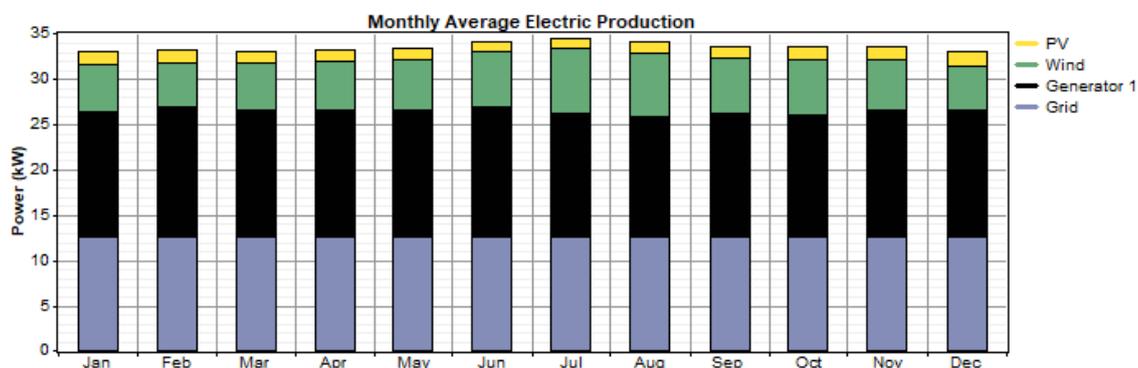


Figura 33 – Relação mensal da potência por cada recurso no sistema *on grid* (Software HOMER).

A Figura 34 exhibe, para o aerogerador, o montante energético concebido no Cenário 1; a Figura 35 diz respeito aos painéis fotovoltaicos e a Figura 36 representa o gerador a diesel. O eixo x (horizontal) representa os meses do ano, ao passo que no eixo y (vertical) são exibidas as horas do dia, à esquerda do gráfico, e a produção energética em kW à direita. Pela legenda colorida à direita do gráfico, gerações energéticas superiores, acercando-se da potência nominal do equipamento, são representadas por cores mais quentes, como amarela, laranja e vermelha. Em momentos em que o equipamento não está em funcionamento, a cor preta indica que não houve geração. Entende-se, dessa forma, que a parcela da demanda compreendida pelo gerador a diesel possui maior relevância no decorrer do horário de pico para aquisição de eletricidade da rede, que pode se interpor ao período em que as células fotovoltaicas produzam menos energia. Durante essa faixa de tempo, o valor dispendido para se utilizar do combustível é viável, mesmo que a aquisição energética da distribuidora possua valor mais elevado. Assim, a geração eólica é complementada pelo diesel.

O ajuste excelente para o primeiro cenário contou com o emprego de células de armazenamento (baterias) por se mostrar uma opção benéfica economicamente, tendo em vista o excedente energético em determinado período pode se conservar e ser utilizada em uma circunstância de maior custo energético.

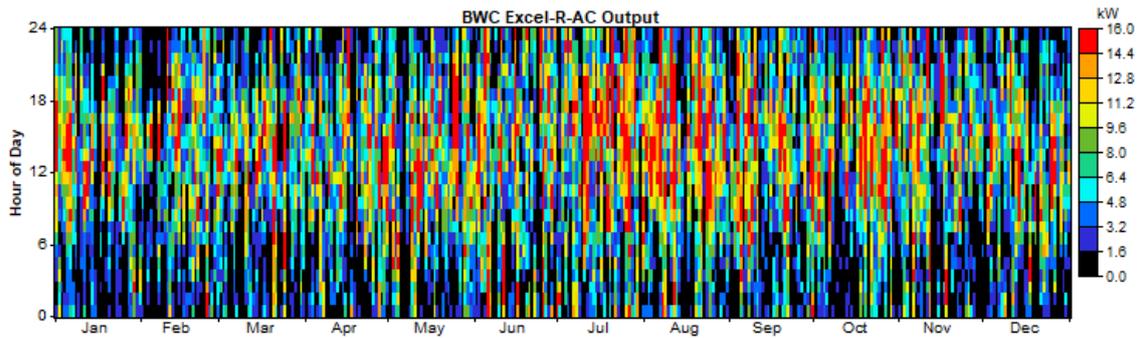


Figura 34 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os aerogeradores atendem no sistema *on grid* (Software HOMER).

Evidencia-se, com a Figura 34, a grande distribuição do uso do aerogerador ao longo do dia e do ano.

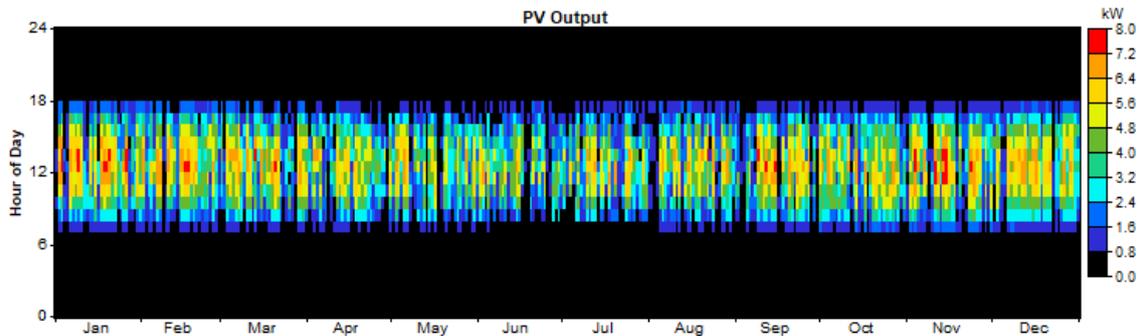


Figura 35 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os painéis solares atendem no sistema *on grid* (Software HOMER).

A Figura 35 demonstra que painéis fotovoltaicos têm sua utilização concentrada no período diário em que ocorre efetivamente luminosidade solar, com destaque para horários próximos ao zênite, compreendido na faixa de tempo que permeia o meio dia solar.

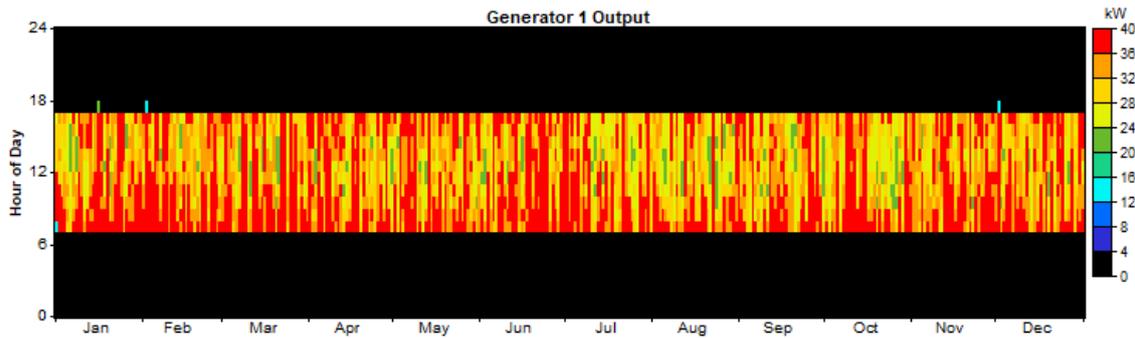


Figura 36 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os geradores a diesel atendem no sistema *on grid* (Software HOMER).

O gerador a diesel é ativado somente nas horas de trabalho das bombas, que foram estabelecidas como sendo das 7 até as 17 horas diariamente, levando em consideração que no pior dos casos a usina trabalha durante 10 horas diárias. Fica evidenciado na Figura 36 que a utilização dos painéis fotovoltaicos reduz um pouco o uso do gerador a diesel no decorrer da faixa diária que possui maior iluminação solar, mas sua utilização é massiva nos demais horários, principalmente nas faixas de maior custo energético.

Há de se salientar que a conformação ótima tende a sofrer alterações se diferentes valores para a comercialização energética se estabelecerem ou se limitações distintas para essas operações forem estipuladas. Menores movimentações no vento acarretam uma diminuição no benefício de se investir em aerogeradores, assim como variações no preço do diesel acarretam modificações na configuração ideal. Essas relações de interdependências são ilustradas na Figura 37, em que o eixo x (abscissas) diz respeito a velocidade dos ventos e o eixo y (ordenadas) representa o valor comercial do diesel.

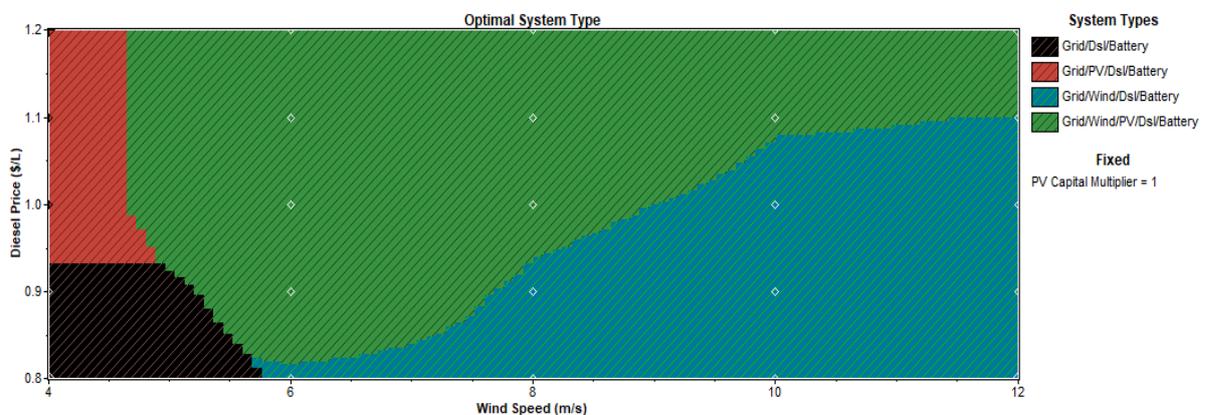


Figura 37 – Análise de sensibilidade que permeia o Cenário 1 ótimo (Software HOMER).

Mantendo-se as demais variáveis, um decréscimo do valor de mercado do diesel para US\$ 0,80 já seria capaz de propiciar uma redução no VPL de cerca de US\$ 180.000 para o Cenário 1 considerado ótimo. Simples modificações nos parâmetros são capazes de provocar alterações de ordem significativa nos investimentos necessários.

A Figura 38 traz a estimativa do funcionamento das baterias no que tange seu estado horário médio de carga mensal para a faixa de tempo de um ano. A relação evidencia que as baterias permanecem praticamente carregadas em significativa parcela do ano, excluindo-se alguns momentos específicos. O comportamento tende a ser verificado pelas matrizes propostas se complementarem menos nesses meses, com associação de quantias mais discretas quando comparados com o tempo remanescente, o que poderia resultar em um número maior de casos em que a utilização superaria a produção energética, o que levaria à inevitabilidade de se utilizar da carga retida nas baterias.

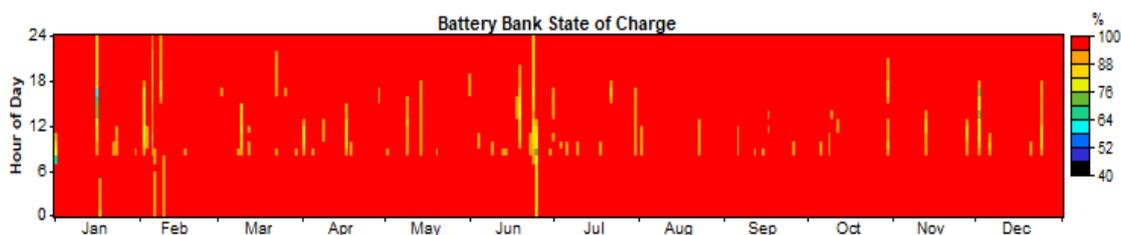


Figura 38 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a carga das baterias no sistema *on grid* (Software HOMER).

Para o Cenário 2, no qual é proposta desconexão da rede, não existindo alternativa de comercialização de energia, também foi considerado como variável de entrada o valor de mercado do diesel variando em torno de US\$ 1,00 e em torno de 7 m/s para movimentação do vento. Para essa conjuntura, 4 configurações executáveis foram apontadas, atrelando diversos arranjos viáveis para a potência individual dos equipamentos. Um dos conjuntos é destacado como “ótimo”; a configuração apresenta dois aerogeradores, 8 kW de painéis fotovoltaicos, 32 baterias e um gerador a diesel de 70 kW. O funcionamento se dá em CA e CC, então é necessário realizar conversão de corrente, para tal, também foi adicionado ao conjunto um conversor de 20 kW. O investimento inicial gira em torno de US\$ 117.580 e o *net present cost* no decorrer de 25 anos é de US\$ 1.945.668, com custo energético em kWh estimado em US\$ 0,567.

O VPL teve um incremento se comparado ao primeiro cenário, em que havia conectividade com a transmissora; portanto, alternativa de comercialização energética. A Figura 39 traz a divisão dos componentes do sistema, referentes ao cenário 2, em função de seu valor ao longo dos 25 anos de funcionamento, a cor amarela representa os painéis fotovoltaicos; a verde, o aerogerador; a preta, o gerador a diesel; a azul, as baterias e a vermelha, o conversor.

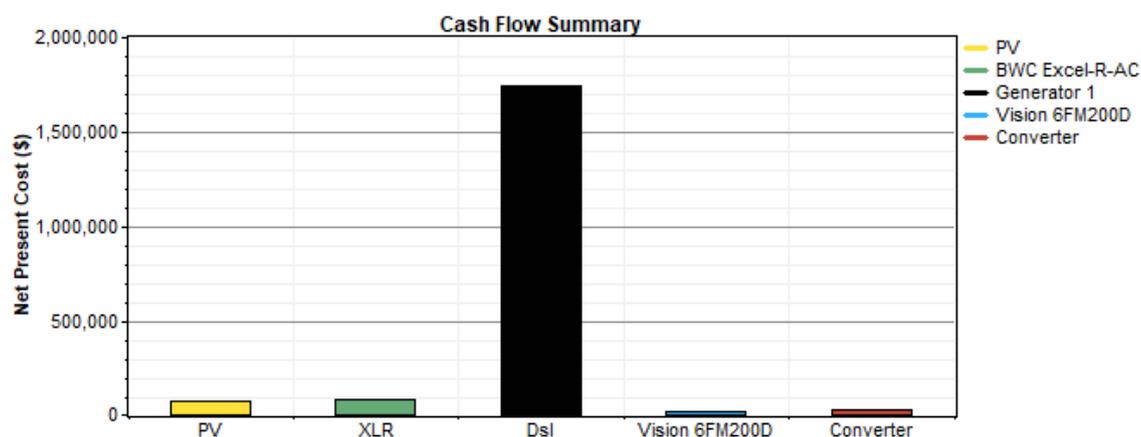


Figura 39 - Relação de custo por componente para o sistema 2 (*Software HOMER*).

Para esse cenário, de maneira análoga ao primeiro, destaca-se que 4% da energia consumida foi produzida pelos painéis solares e 9%, pelas turbinas eólicas; entretanto, 87% da energia é provida pelo gerador a diesel, fato que é, muito provavelmente, reflexo da incapacidade de comercialização energética com a distribuidora. Verifica-se também que o montante dispendido com diesel soma US\$ 1.656.812 dos US\$ 1.945.668 totais. A Figura 40, abaixo, representa a análise discorrida acima.

Production	kWh/yr	%
PV array	11,550	4
Wind turbines	25,887	9
Generator 1	244,277	87
Total	281,713	100

Figura 40 – Porcentagem de cada fonte na produção energética para o Cenário 2 (*Software HOMER*).

A Figura 41 traz a potência média gerada discretizada para cada componente, anualmente e dividida para cada mês, para o cenário de número 2. Fica evidente a dependência do diesel para o funcionamento do sistema.

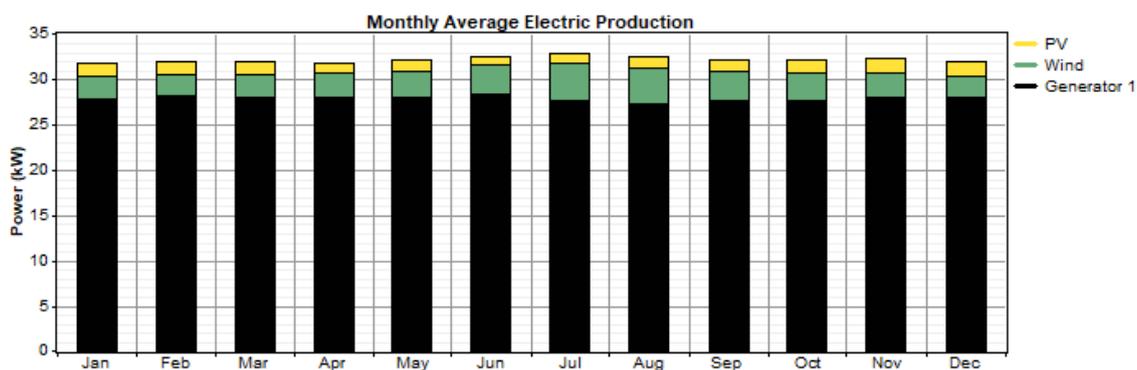


Figura 41 – Relação mensal da potência por cada recurso no sistema *off grid* (Software HOMER).

A Figura 42 traz o funcionamento do aerogerador e sua geração para o Cenário 2, a Figura 43 diz respeito aos painéis fotovoltaicos e a Figura 44 representa o gerador a diesel. Assim como nas imagens referentes ao primeiro cenário, o eixo x (horizontal) se refere a cada mês, ao passo que no eixo y (vertical) são dispostas as horas, à esquerda do gráfico, e a produção energética em kW, à direita. Pela legenda colorida à direita do gráfico, gerações energéticas superiores, acercando-se da potência nominal do equipamento, são representadas por cores mais quentes, como amarela, laranja e vermelha. Em momentos de não funcionamento do equipamento, a cor preta indica que não se está gerando nada. Entende-se, dessa forma, que a parcela da demanda compreendida pelo gerador a diesel possui maior relevância no decorrer do horário de pico para aquisição energética da distribuidora, que pode se interpor ao período em que as células fotovoltaicas produzam menos energia. Durante essa faixa de tempo, o valor dispendido para se utilizar do combustível é viável, mesmo que a aquisição energética da distribuidora possua valor mais elevado. Assim, o gerador eólico é complementado pelo diesel.

No ajuste ótimo desse cenário, é fundamental contar com o emprego de células de armazenamento (baterias), tendo em vista que o excedente energético em determinado período pode ser conservado e utilizado em uma circunstância de maior custo energético.

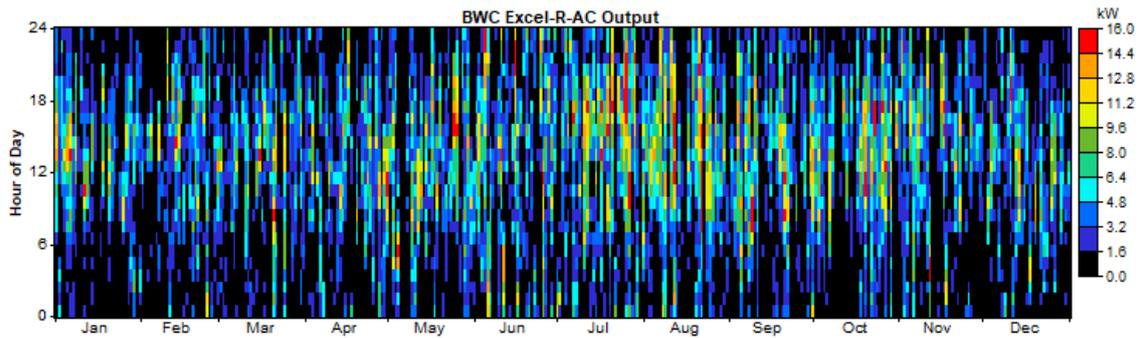


Figura 42 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os aerogeradores atendem no sistema *off grid* (Software HOMER).

Evidencia-se, com a Figura 42, a grande distribuição do uso do aerogerador no decorrer do dia e do ano, quando opera em complemento com os painéis fotovoltaicos nas horas de iluminação solar e com diesel em praticamente todos os momentos.

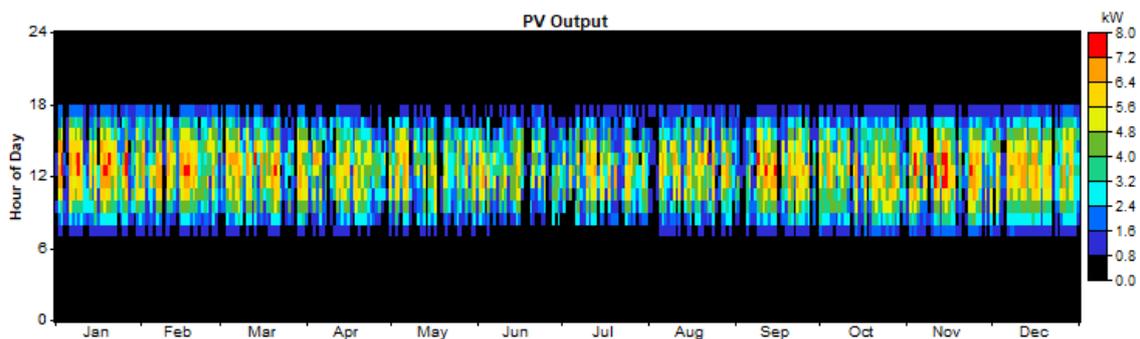


Figura 43 – Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os painéis solares atendem no sistema *off grid* (Software HOMER).

A Figura 43 demonstra que painéis fotovoltaicos têm sua utilização concentrada no período diário em que se sucede efetivamente luminosidade solar, com destaque para horários próximos ao zênite, compreendido na faixa de tempo que permeia o meio dia solar, como já foi verificado com o cenário 1. A potência se acerca da nominal do módulo justamente nas proximidades do meio do dia, período de ocorrência de alta irradiação solar, excluindo-se momentos do inverno, que possuem potência de inferior magnitude. Os módulos fotovoltaicos trabalham por cerca de 4000 horas por ano, o que retrata cerca de 50% do tempo que operam, de forma estimada, os aerogeradores em um mesmo cenário. Esse comportamento já era esperado, tendo em vista que a exploração fotovoltaica se dá por cerca de onze horas diárias, ao passo que os aerogeradores, em um cenário otimista, atingem praticamente 24 horas diárias de funcionamento.

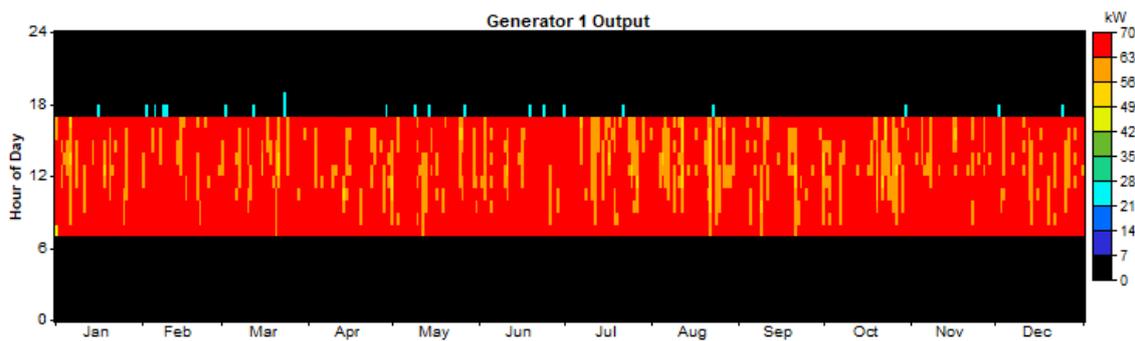


Figura 44 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a demanda que os geradores a diesel atendem no sistema *off grid* (Software HOMER).

O gerador a diesel é ativado somente nas horas de trabalho das bombas, que foram estabelecidas como sendo das 7 até as 17 horas diariamente, levando em consideração que, no pior dos casos, a usina trabalha durante 10 horas diárias. Fica evidenciado na Figura 44 que a utilização dos painéis fotovoltaicos freia um pouco o uso do gerador a diesel na faixa temporal de maior presença de luz solar, mas sua utilização é massiva nos demais horários, principalmente nas faixas de maior custo energético.

Há de se salientar que o melhor arranjo proposto pode sofrer alterações se forem estipuladas limitações distintas para os parâmetros, principalmente o cenário de número 2, que não conta com a alternativa de comercializar com a distribuidora no momento de aquisição mais barata. Menores potências para o vento acarretam uma diminuição no benefício de se investir em aerogeradores, assim como variações no custo do diesel acarretam modificações na configuração ideal. Essas relações de interdependência são ilustradas na Figura 45, em que o eixo x (abscissas) esboça a velocidade dos ventos e o eixo y (ordenadas) representa o valor comercial do diesel.

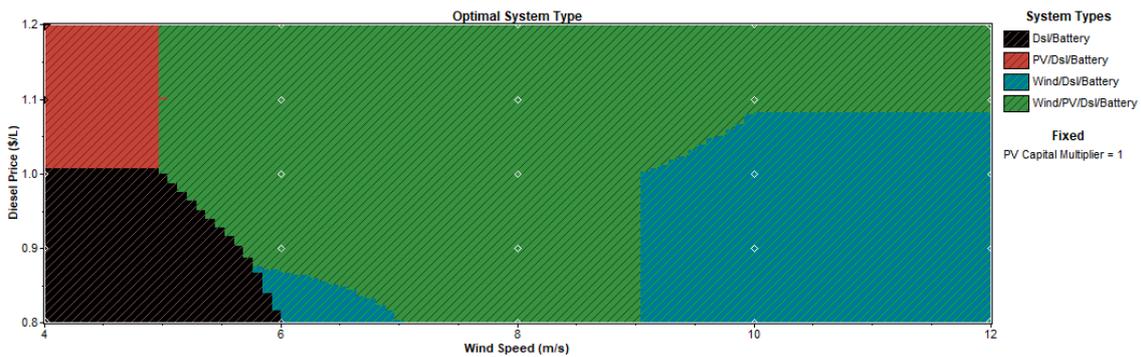


Figura 45 – Análise de sensibilidade que permeia o Cenário 2 ótimo (*Software HOMER*).

Mantendo-se as demais variáveis de entrada, o decréscimo do valor de mercado estimado do diesel para US\$ 0,80 já seria capaz de propiciar uma redução no VPL de cerca de US\$ 300.000 para o Cenário 2 considerado ótimo, o que evidencia novamente a grande influência que o diesel carrega para esse sistema.

A Figura 46 traz a estimativa do funcionamento das baterias no que tange a seu estado horário médio de carga mensal discretizado para um ciclo anual. A relação evidencia que as baterias permanecem praticamente carregadas em significativa parcela do ano, excluindo-se alguns momentos. O comportamento tende a ser verificado, pois as matrizes propostas se complementam menos nesses meses, com associação de quantias mais discretas quando comparadas com o tempo remanescente, o que poderia resultar em um número maior de casos em que a utilização superaria a produção energética, o que levaria à inevitabilidade de se utilizar a carga retida nas baterias.

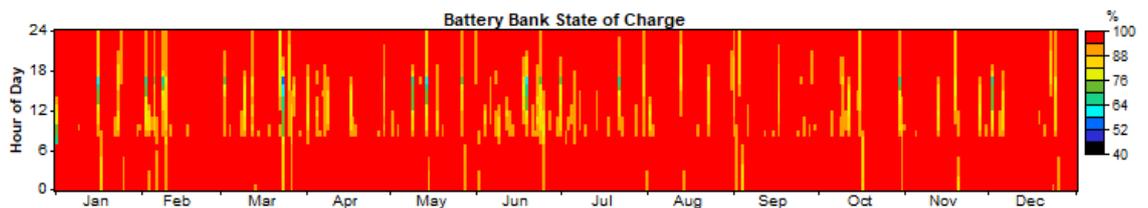


Figura 46 - Arranjo para cada hora distribuída mensalmente para a carga das baterias no sistema *off grid* (*Software HOMER*).

Verifica-se para ambos os cenários, principalmente no segundo, uma dependência do diesel para a produção energética. Isso se dá muito em razão da falta de espaço físico para implementação de uma maior quantidade de aerogeradores, tendo em vista que a produção energética para sustentar a estação de bombeamento é relativamente alta, e o

estudo se concentrou em respeitar as possibilidades físicas para o emprego de matrizes renováveis. Uma rápida análise comparativa do fluxo de caixa pode demonstrar de forma mais eficaz a dependência do diesel no segundo cenário, principalmente se comparado ao primeiro, como mostram a Figura 47 e a Figura 48.

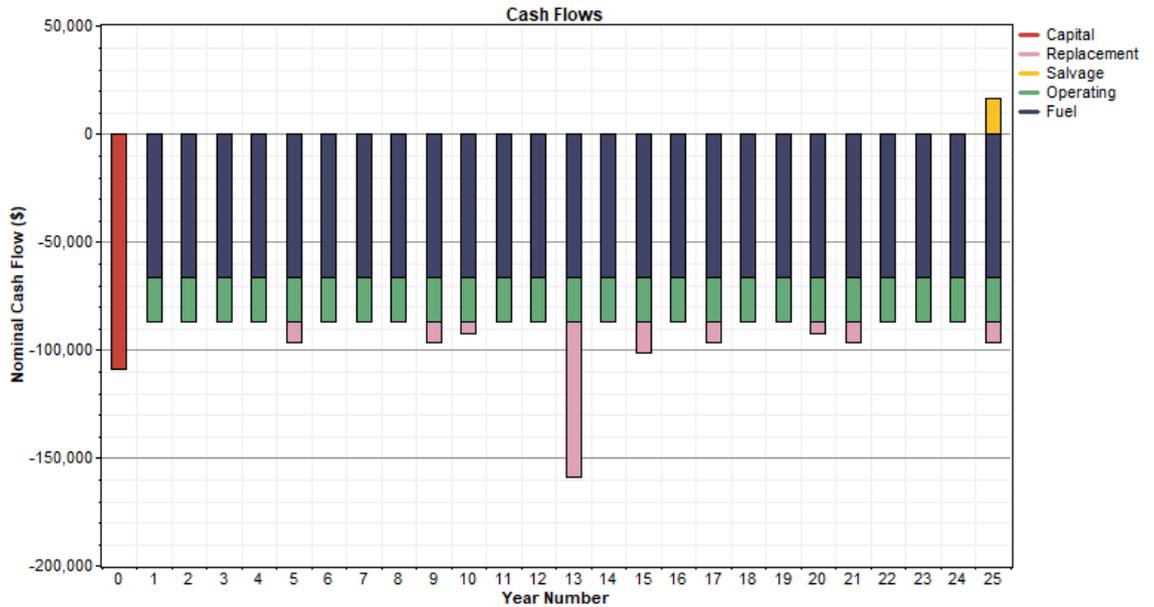


Figura 47 – Fluxo de Caixa para o sistema 1; *on grid* (Software HOMER).

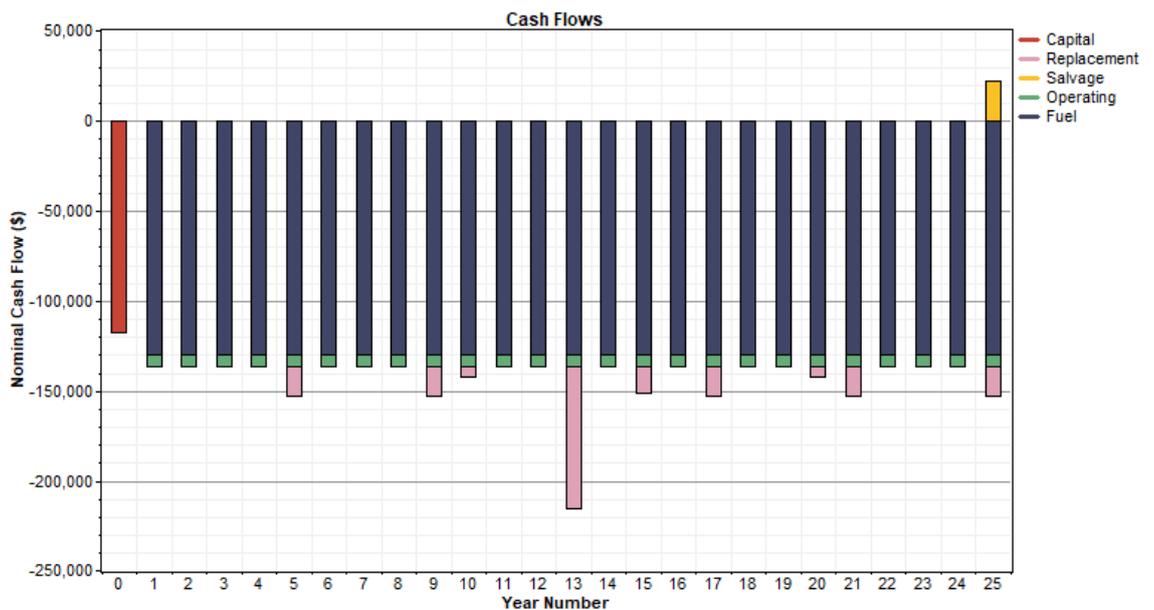


Figura 48 - Fluxo de Caixa para o sistema 2; *off grid* (Software HOMER).

A visualização espacializada dos investimentos no decorrer dos 25 anos em análise mostra que, como já era esperado para ambos os cenários, os dispêndios com diesel são expressivamente altos, destacadamente no segundo cenário, seguido dos investimentos iniciais e da despesa de operação e manutenção, que é relativamente baixa.

A tabela abaixo traz as relações de custos de aquisição, VPL, despesas com energia e composição considerada, para cada um dos cenários.

Cenário	Custo Inicial de Aquisição (US\$)	Custo de Energia (US\$ por kWh)	Valor Presente Líquido (US\$)	Composição
Primeiro	108.580	0,374	1.285.258	Conectado à rede
Segundo	117.580	0,567	1.945.668	Desconectado da rede

Quadro 1 – Comparativo econômico dos Cenários.

## 6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Finalizando a jornada, diversas conclusões podem ser obtidas com base no estudo proposto e resultantes da experiência vivenciada em sua elaboração. Por definição, sistemas híbridos se beneficiam concomitantemente de fontes energéticas distintas e as convertem em eletricidade, tendo sua utilização potencializada se aliados a energias renováveis complementares entre si, pelo fato de reduzir a probabilidade de que a energia deixe de ser fornecida em determinados instantes, além de proporcionarem ao sistema um acréscimo em sua estimativa de eficiência, pelo fato de pluralizarem suas matrizes energéticas.

O progresso que atividades econômicas são capazes de propiciar depende diretamente da capacidade de se ofertar energia para abastecimento de forma contínua, com valores que fomentem investimentos e não comprometam o bem-estar social. Países como a China e os Estados Unidos da América produzem cerca de 7 a 11 vezes mais energia, anualmente, do que o Brasil. O espaço para diversificação e expansão são claros e é determinante que sejam tratados como prioridade pelas autoridades brasileiras. A expectativa é de que, daqui para frente, precisemos de ainda mais esforços no setor; entende-se que a procura por energia tenda a crescer de forma acelerada, com perspectiva de revigoração da indústria, e, por exemplo, com a entrada definitiva de automóveis elétricos no mercado brasileiro, que pode ser, inclusive, antecipada, como resultado da tendência de inflação no valor dos combustíveis fósseis, consumidos a uma velocidade infinitamente superior à que são gerados pela natureza, necessitando de alternativas viáveis para que sua escassez não seja acelerada.

Dessa forma, o abastecimento elétrico pode retratar parte representativa dos gastos em muitos setores, com destaque ao de saneamento. Partindo dessa constatação, o presente estudo focou na viabilização do emprego de um sistema híbrido de energias renováveis, em conjunto com diesel, para satisfazer uma estação de bombeamento de esgoto em Santa Rosa, no Rio Grande do Sul, buscando uma produção sustentável e contínua de energia. O software de que se fez uso foi o HOMER. Ferramentas do tipo já foram utilizadas em diversos projetos similares ao redor do mundo, incluindo-se no setor de saneamento e bombeamento.

Em um estudo recente, (GOPAL, MOHANRAJ, *et al.*, 2013), relata-se que embora o uso de sistemas fotovoltaicos já seja amplo para bombeamento de água, a combinação em sistemas híbridos não tem vasto número de execuções sucedidas. A

aplicação é vista em poucas localidades, dando-se destaque para uma usina de bombeamento em Fortaleza, em regiões agropecuárias texanas, em sistemas *off-grid* na Líbia que visaram substituir emergencialmente redes de distribuição destruídas em virtude de confrontos bélicos, em irrigação para agricultura na Argélia e regiões recém estabelecidas às margens egípcias do rio Nilo, além de protótipos para tratamento e bombeamento de esgoto em Portugal e na Alemanha. O emprego de conjuntos híbridos em regiões subsaarianas africanas já é considerado um avanço imprescindível para que se mitigue a miséria em regiões que não possuem distribuição de eletricidade suficiente para propiciar tratamento e disponibilização de água, o que historicamente causa conflitos na região e em outras localidades do globo.

Mesmo com a tecnologia emergindo, o avanço no saneamento brasileiro acontece de forma extremamente lenta. Apenas 45% do esgoto produzido passa por tratamento. Isso quer dizer que os outros 55% são despejados diretamente na natureza, o que corresponde a 5,2 bilhões de metros cúbicos por ano. Um relatório do Instituto Trata Brasil, elaborado com base nos dados mais recentes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), indica que 83,3% da população é abastecida com água potável, o que quer dizer que os outros 16,7% - 35 milhões de brasileiros - ainda não possuem acesso ao serviço. Em 2011, o índice de atendimento era de 82,4%. A evolução foi de 0,9 ponto percentual. Quanto à coleta de esgoto, 51,9% da população têm acesso ao serviço. Já 48,1%, ou mais de 100 milhões de pessoas, utilizam medidas alternativas para lidar com os dejetos – seja através de uma fossa, seja jogando o esgoto diretamente em cursos hídricos. Em 2011, o percentual de atendimento era de 48,1% — um avanço de 3,8 pontos percentuais. Apenas 44,9% do esgoto é de fato tratado. Em 2011, o índice era de 37,5% — uma evolução de 7,4 pontos percentuais. Historicamente, os números de esgoto são piores que os de água no país por conta da falta de prioridade nas políticas públicas, maior custo de investimento e de dificuldade nas obras. O ritmo lento ainda vai de encontro a compromissos assumidos pelo país tanto em políticas públicas nacionais, como no Plano Nacional de Saneamento Básico, e internacionais, a exemplo dos assinados na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, em 2015. O país se comprometeu a, até 2030, universalizar o acesso a água potável e alcançar o acesso a saneamento e higiene adequados e equitativos para todos. O estudo do Trata Brasil destaca, ainda, o desempenho das 100 maiores cidades do país no comparativo com a média nacional. As cidades grandes deveriam alavancar o crescimento do país, já que possuem estruturas

públicas e privadas mais bem desenvolvidas e abrangem cerca de 40% da população do Brasil.

As diferenças entre os índices nacionais e os dessas cidades, porém, são poucas. O índice de perda de água é de 39,1%, contra os 38,1% nacionais. Quanto ao tratamento de esgoto, a situação é melhor (54,3% do esgoto tratado, contra 45%), mas o ritmo foi semelhante (aumento de 7,7 pontos percentuais, contra 7,4). A diminuição nos investimentos públicos é um dos motivos para os avanços pouco significativos no setor. De 2015 para 2016, os investimentos em água e esgoto no país caíram de R\$ 13,26 bilhões para R\$ 11,51 bilhões. Já, entre as maiores cidades, o valor caiu de R\$ 7,11 bilhões para R\$ 6,6 bilhões. Ademais, desses R\$ 11,51 bilhões de investimento, cerca de R\$ 4 bilhões são do estado de São Paulo. Ou seja, esse valor oculta uma realidade, que é a concentração grande de investimento onde a situação já é melhor. Considerando as 100 maiores cidades do país, uma comparação entre as 20 melhores e as 20 piores escancara essas desigualdades. O investimento médio anual por habitante nas melhores foi de R\$ 84,55; já nas piores, foi de R\$ 29,31. O estudo ainda aponta que menos de um quarto dos recursos arrecadados com saneamento foi reinvestido no setor. São considerados não apenas os investimentos realizados pela prestadora do serviço, mas também os feitos pelo poder público. Consoante o ranking do saneamento do Instituto Trata Brasil, que engloba as 100 maiores cidades brasileiras, Porto Alegre é a cidade gaúcha melhor colocada, em uma modesta 31ª posição, (G1, 2018).

Em 2018, o governo adiou, pela terceira vez, o prazo limite para que os municípios apresentem seus planos municipais de saneamento básico. Com isso, são cinco anos de adiamento da data, que, originalmente, era dezembro de 2014, passando para 2015, 2017 e, finalmente, para o final de 2019 (Diário do Comércio, Indústria e Serviços, 2018). A obrigatoriedade dos planos de saneamento está prevista na Lei do Saneamento (11.445/2007). Dados do Panorama dos Planos Municipais de Saneamento Básico, do Ministério das Cidades, no início do ano passado, relatam que só 30% das prefeituras possuíam planos de saneamento, outros 38% estavam elaborando o programa, 2% apresentaram informações inconsistentes e 30% simplesmente não enviaram dados. Ainda de acordo com a GO Associados, parceria do governo de São Paulo com os 164 municípios paulistas que não tinham planos de saneamento, permitiu que o estado fosse o primeiro do País com todas as prefeituras com planos aprovados, conforme a lei.

Companhias responsáveis pelo saneamento já parecem se ater à possibilidade de disponibilizar verba para empregar matrizes renováveis para subsidiar suas instalações e

umentar sua produtividade. A SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná), a CORSAN (Companhia Rio-grandense de Saneamento) e a SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) são exemplos concretos.

Um estudo piloto de viabilidade, com uso do HOMER, para utilização conjunta de energia eólica, fotovoltaica e combustível fóssil, atendendo 540 kWh, foi realizado no Rio Grande do Sul, (DARONCO e BELUCO, 2015), dimensionado com junção à linha para produzir capacidade para o bombeamento e uso de instrumentos de aeração de uma usina de tratamento de efluentes.

Para o projeto proposto nesse trabalho, na região de Santa Rosa, analisando-se as simulações realizadas para o cenário idealizado, nota-se que a opção conectada à rede se torna muito interessante por trazer a alternativa de comercialização, sobretudo em momentos de pico (maior valor), fazendo com que haja a possibilidade de abater uma parcela dos dispêndios em operação e manutenção, terminando por diminuir o custo de energia por kW estimado. No caso do sistema isolado, constata-se que é plenamente apto a conceber a quantidade estipulada, embora baseie-se majoritariamente na utilização de diesel. As matrizes solar e eólica ostentam grandezas propícias para aproveitamento na região, dessa forma, seria adequada a operação com recursos dessa natureza para microgeração na situação proposta. Entretanto, há de se ressaltar que o valor de investimento ainda seria relativamente alto, principalmente no tocante a despesas com aquisição de maquinário e de óleo diesel.

Dessa forma, vislumbra-se que, futuramente, surjam novos fomentos do governo para incentivar métodos mais sustentáveis, assim como adoção de penalização pela emissão de agentes poluidores, ação que teria capacidade de servir de suporte para que sejam reduzidos os valores necessários para investir-se em causas desse tipo, e como consequência, para colocá-las em prateleiras mais competitivas no mercado. Investimento na otimização da operação e a elaboração de tecnologias inovadoras com acréscimo de eficiência, para equipamentos de geração e armazenagem, são pautas que fortalecem a ascensão do segmento.

Focando especificamente na situação estudada, a implementação de um ou mais aerogeradores de potência nominal inferior, porém detentores de uma curva de potência que se enquadrasse de forma mais plena às características da região, poderia cooperar para a retenção dos investimentos totais. Há de se destacar, igualmente, que o decaimento nos valores associados a painéis fotovoltaicos é um cenário esperado para um futuro

próximo, ocorrendo de forma gradual e fortalecendo a esperança de que o valor da exploração de energia solar caia em ritmo análogo.

Há também de se ressaltar a potencialidade do software HOMER, que, de forma simples e objetiva, auxiliou na seleção do sistema de maior excelência para a conjuntura proposta, utilizando-se de um diagnóstico dos investimentos, com interface elucidativa e contendo modelos pré-elaborados de equipamentos, muito similares aos disponíveis para aquisição no mercado.

Reforçando a importância do conhecimento dos impactos ambientais associados, mesmo que muito inferiores aos propiciados pela geração convencional de energia, é fundamental se atentar, principalmente, aos impactos mais consideráveis, decorrentes de um eminente descarte inapropriado das células de armazenamento ao término de seu funcionamento. Impactos dessa natureza podem ser mitigados pela reciclagem e correto destino dos equipamentos.

O estudo realizado para compreensão das relações de complementação regionais entre as matrizes eólica e solar pode colaborar para melhorar a percepção e dar clareza no que tange à capacidade contida em Santa Rosa para projetos similares. No que compete ao dimensionamento dos sistemas, a adição de um terceiro conjunto compondo um cenário restrito a matrizes limpas, mas ligado à linha de transmissão, portanto, viabilizando a comercialização energética, pode ser de grande viabilidade para aplicação em regiões em que as usinas existentes possam já estar ligadas à rede, geralmente áreas urbanas, eliminando despesas com a transmissão na instalação do sistema híbrido. Estações que demandem quantidades levemente inferiores de energia ou que possuam áreas mais vastas para inserção de equipamentos também podem se beneficiar desse modelo, pois a dependência da compra energética (e/ou diesel) tenderia a decrescer. Como a realidade observada para o estudo efetuado era a de sucessivas quedas energéticas, qualquer diminuição na parcela de energia comprada das companhias de distribuição é avaliada positivamente. Visualizou-se, no cenário *on grid*, redução de 63% no consumo de energia elétrica da rede. O sistema atingiu vendas de até 21034 kWh de energia, anualmente, com sua operação. Estimou-se um custo inicial de US\$ 108.580, investimento total de US\$ 1.285.258 e o valor para produção de energia em US\$ 0,374 por kWh. Já no cenário *off grid*, ocorreu redução de 13% no consumo de energia elétrica da rede. Estimou-se um custo inicial de US\$ 117.580, investimento total de US\$ 1.945.668 e o valor estimado para produção de energia em US\$ 0,567 por kWh.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ANDRADE SOBRINHO, R.; CAMPOS BORJA, P. 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**, v. 21, n. 4, out/dez 2016.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 38 - 40. 2008. (Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>).

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2015. (Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>).

AUTO Esporte, 2018. Disponível em: <https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2018/08/frota-mundial-de-carros-eletricos-cresce-55-em-um-ano.html>. Acesso em: 7 Novembro 2018.

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

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n° 401 de 4 de novembro de 2008. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2008. Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA\\_RES\\_CONS\\_2008\\_401.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_2008_401.pdf)>. Acesso em: 05 junho 2018.

DARONCO, G.; BELUCO, A. **A wind PV hybrid system for power supply of a sewage treatment plant in a small town in southern Brazil**. [S.l.]. 2015.

DIÁRIO do Comércio, Indústria e Serviços, 2018. Disponível em: <<https://www.dci.com.br/servicos/planos-de-saneamento-adiados-mais-uma-vez-1.675787>>. Acesso em: 12 Novembro 2018.

DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Lei n° 9433 de 8 de janeiro de 1997**. Brasil. Brasília, DF. 1997. (Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/19433.htm)).

DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Lei n° 10.438 de 26 de abril de 2002**. Brasil. Brasília, DF. 2002. (Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)).

DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Lei n° 10.762 de 11 de novembro de 2003**. Brasil. Brasília, DF. 2003. (Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2003/L10.762.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/L10.762.htm)).

DIÁRIO OFICIAL DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Lei nº 12187 de 29 de dezembro de 2009**. Brasil. Brasília, DF. 2009. (Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm)).

EPE & MME. **Anuário estatístico de energia elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética & Ministério de Minas e Energia. [S.l.]. 2016. (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**. World Wind Energy Conference, Berlim, Alemanha. 2002.

G1 , 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/saneamento-avanca-mas-brasil-ainda-joga-55-do-esgoto-que-coleta-na-natureza-diz-estudo.ghtml>>. Acesso em: 7 Novembro 2018.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind Report, 2017.

GOPAL, C. et al. **Renewable energy source water pumping systems – a literature review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 25, p.351-370. 2013.

GRUPO WEG. **Modelos de Aerogeradores**, 2018. Disponível em: <[http://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/c/GLOBAL\\_WINDTURBINE](http://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Aerogeradores/c/GLOBAL_WINDTURBINE)>. Acesso em: 05 junho 2018.

IEA - PVPS. **Trends 2014 in Photovoltaic Applications - Report International Energy Agency - Photovoltaic Power Systems**. [S.l.]. 2014.

IEA. **Key World Energy Statistics**. International Energy Agency. [S.l.], p. 32 - 33. 2017.

JINKO SOLAR. **Módulos solares**, 2018. Disponível em: <[https://www.jinkosolar.com/product\\_56.html?lan=sp](https://www.jinkosolar.com/product_56.html?lan=sp)>. Acesso em: 05 Junho 2018.

KALDELLIS, J.; ZAFIRAKIS, D. **The wind energy (r)evolution: A short review of a long history**. [S.l.]. 2011.

LAMBERT, T. W.; GILMAN, P.; LILIENTHAL, P. D. **Micropower system modeling with HOMER**. [S.l.]. 2005.

LIRA, M. A. T. et al. **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. E. A. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, ed. 2. 2017.

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

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

REN21. **Renewables 2015 - Global Status Report**. [S.l.]. 2015.

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

SAIDUR, R. et al. **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.

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

SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. [S.l.]. 2016.

TOLMASQUIM, M. T. **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. [S.l.]. 2006.

UOL Economia, 2017. Disponível em: <<https://economia.uol.com.br/noticias/bloomberg/2017/07/06/demanda-energetica-de-carros-eletricos-se-multiplicara-por-300.htm>>. Acesso em: 7 Novembro 2018.

VALOR Econômico, 2016. Disponível em: <<https://www.valor.com.br/empresas/4810687/exxonmobil-estima-aumento-de-25-na-demanda-energetica-global-ate-2040>>. Acesso em: 07 Novembro 2018.

WAGNER, H. J. **Introduction to Wind Energy Systems**. Energy Systems and Energy Economics, Ruhr-University Bochum. 2013.