

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS ARARANGUÁ

THAÍS DOLL LUZ

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA**

ARARANGUÁ

2015

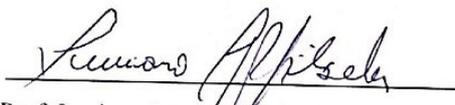
THAÍS DOLL LUZ

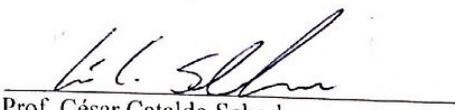
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina-Campus Araranguá

Aprovado em: / /

Banca examinadora:


Prof. Luciano Lopes Pfitscher (Orientador)


Prof. César Cataldo Scharlau


Prof. Giuliano Arns Rampinelli

TECNOLOGIA RENOVÁVEL DE MICRO GERAÇÃO DISTRIBUÍDA PARA APLICAÇÕES CONECTADAS À REDE EM COMUNIDADES DE BAIXA RENDA PARA A CIDADE DE ARARANGUÁ

Thaís Doll Luz

RESUMO

A geração de energia elétrica está diretamente conectada com o desenvolvimento econômico de um país. Além disto, os índices de desenvolvimento humano são relacionados com o percentual da população que têm acesso à eletricidade e às comodidades que este acesso traz. Com isto, o governo brasileiro tem investido em programas para expandir o acesso à eletricidade no Brasil, com programas como o Luz para Todos, por exemplo, e o Programa de Eficiência Energética da ANEEL que investe em projetos que comprovem o custo benefício em propostas de melhoria de eficiência energética e em geração com fontes alternativas de energia, tendo muitas vezes os consumidores de baixa renda como público alvo. Neste trabalho, utilizou-se a ferramenta computacional HOMER para projetar um sistema de micro geração com fontes incentivadas para um bairro de baixa renda na cidade de Araranguá, Santa Catarina. Sete configurações de sistemas foram simuladas, comparando-se as suas frações de energias renováveis, custos de eletricidade e emissão de dióxido de carbono, de modo a escolher um sistema que fosse viável economicamente e ecologicamente. A configuração de sistema escolhida trabalha com geração fotovoltaica, possuindo alta fração renovável e apresentando custo de eletricidade relativamente baixo.

Palavras chave: micro geração, fontes incentivadas, HOMER, Araranguá.

1. INTRODUÇÃO

Mesmo nos dias atuais muitas pessoas não possuem acesso à eletricidade. Desta forma, a eletrificação de áreas rurais vem sendo abordada como uma meta para os países em desenvolvimento. No Brasil, o programa do governo federal chamado Luz para Todos possui

a intenção de fornecer eletricidade para pequenas comunidades isoladas. Muitos projetos adotando micro sistemas de geração de energia já foram implementados na Região Amazônica [1].

Além de fornecer eletricidade para comunidades isoladas, o governo brasileiro tem demonstrado interesse em investir em geração de eletricidade com fontes renováveis e em melhorias de eficiência energética. O Programa de Eficiência Energética (PEE) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é um exemplo disto. Milhões de reais são investidos anualmente em projetos que promovam o uso eficiente de energia elétrica em todos os setores da economia, comprovando a viabilidade econômica de ações que reduzam o desperdício e que melhorem a eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia [2].

O PEE vem sendo executado pela ANEEL desde o ano de 2000 investindo em programas de eficiência energética e contando com um orçamento da ordem de R\$ 400 milhões. 60% deste investimento é destinado a projetos que atendem consumidores de baixa renda [3]. Isto se dá pelo fato de que se estima que o potencial de contribuição com eficiência energética no Brasil seria de 53,2 TWh/ano, totalizando 8% da matriz elétrica brasileira. Segundo a ANEEL, o investimento em políticas de eficiência energética reduz em 49,5% os custos com transmissão e distribuição de energia. Em Santa Catarina, a concessionária CELESC desenvolve a maior parte dos projetos de eficiência energética do estado, tendo investido neste ano 50% do capital de R\$ 10 milhões em projetos que contemplem fontes incentivadas de energia.

Antes de desenvolver um projeto de eficiência energética, principalmente no que se diz respeito ao uso de fontes alternativas de energia, é necessário conhecer as características climáticas da região de interesse de modo a verificar o potencial do projeto. Segundo o Atlas de Potencial Solar do Brasil [4], a região sul de Santa Catarina possui potencial de geração solar menos competitivo se comparado com outras regiões do país. Isto se deve principalmente por causa da baixa incidência solar nos meses de inverno, sendo que há razoável incidência nos meses de verão. Contudo, esta região é bastante promissora para o desenvolvimento de projetos de geração eólica de eletricidade [5].

Dado o alto potencial eólico da Região Sul de Santa Catarina e a alta incidência solar nos meses de verão, que coincide com os períodos de baixa densidade de ventos [4],[5], torna-se interessante elaborar projetos de geração com o uso de fontes renováveis para a região. O crescente interesse em investir em políticas de eficiência energética, sendo que a maior parte dos investimentos anuais nestes projetos é destinada para consumidores de baixa renda, corrobora para atrair o interesse no desenvolvimento de um sistema de micro geração para

comunidades carentes na cidade de Araranguá, localizada no litoral sul do estado de Santa Catarina. Esta cidade possui 62.308 habitantes e uma área de 303,91 km² [6]. Conhecida como a “Cidade das Avenidas”, Araranguá está localizada bem próxima da BR-101, possuindo comércio intenso e agricultura centrada principalmente nas culturas de arroz irrigado, fumo e milho.

No que diz respeito à viabilidade econômica do projeto, deve-se ter em mente que as energias renováveis ainda não podem competir economicamente com as plantas de geração de energia que utilizam combustíveis fósseis. No entanto, há uma crescente relevância no emprego destas tecnologias, devido principalmente a preocupações ambientais [7]. Em se tratando da eletrificação de comunidades isoladas, muitas vezes é preferível produzir eletricidade localmente ao invés de expandir a rede. Sistemas não conectados à rede devem ser projetados de uma maneira ótima para garantir a qualidade do fornecimento de energia e a confiabilidade do sistema [8]

Preocupações com o desempenho técnico do sistema devem ser levadas em consideração durante a elaboração do projeto. Ao projetar um sistema de geração é indispensável fazê-lo de forma que a demanda seja sempre atendida, porém também observando que o sistema não seja superdimensionado, levando também em consideração os aspectos econômicos do projeto. O emprego de sistemas híbridos aumenta a sua confiabilidade e reduz a necessidade do uso de baterias [9]. Mesmo que não esteja se trabalhando com uma comunidade isolada e que Araranguá já seja uma cidade eletrificada conectada à rede elétrica nacional, estes fatores de projeto são importantes de serem levados em consideração, pois podem reduzir o consumo de energia nos horários de ponta e os custos com transmissão e distribuição, por exemplo.

Diversas metodologias para dimensionar os equipamentos para sistemas de geração de energia levam em consideração dados sobre os recursos naturais no local enquanto atendem à demanda de carga e aperfeiçoam os aspectos econômicos do projeto. Para a elaboração deste projeto, optou-se por realizar simulações com o uso do *Hybrid Renewable and Distributed Generation System Design Software* (HOMER). O HOMER é a ferramenta mais amplamente utilizada para microssistemas, sendo implementado tanto para configurações conectadas como não conectadas à rede [10]. Esta ferramenta computacional simula e compara tanto o desempenho como o custo do ciclo de vida dos sistemas de potência. O comportamento do sistema é simulado para cada hora em um ano inteiro e após sua simulação processos de otimização são realizados para escolher a melhor configuração do sistema em aspectos econômicos [11].

Este trabalho consiste no projeto de um micro sistema de geração para um bairro de baixa renda na cidade de Araranguá considerando aspectos do edital do PEE da CELESC, justificado pelo recente interesse em investir em projetos de fontes incentivadas de energia. A ferramenta HOMER será utilizada para auxiliar no dimensionamento e seleção das melhores configurações de sistema para a localidade abordada. Este artigo será dividido em cinco seções. Na Seção 1 uma introdução sobre a cidade de Araranguá e sistemas híbridos foi apresentada. A Seção 2 consistirá em uma revisão bibliográfica sobre a modelagem e a implementação de micro sistemas de geração de eletricidade. A Seção 3 descreverá o processo experimental e a metodologia seguida para simular o sistema e calcular resultados de viabilidade econômica do projeto, enquanto a Seção 4 apresentará os resultados e os discutirá. A Seção 5 concluirá o trabalho, apresentando a configuração de sistema escolhida para a cidade de Araranguá.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será feita uma revisão bibliográfica sobre sistemas de micro geração de energia. Diferenças entre sistemas híbridos e sistemas que utilizam uma única fonte de geração são explicadas brevemente. Após, discutem-se técnicas de modelagem de sistemas de geração de energia elétrica, apresentando estudos de caso de suas aplicações e fazendo comparações entre algumas ferramentas computacionais utilizadas para modelar e dimensionar micro sistemas de geração. Estudos de casos aplicando o HOMER são apresentados no final desta seção com o intuito de ilustrar sua alta aplicabilidade e justificar a escolha deste programa para a realização deste trabalho.

2.1 Sistemas híbridos de geração comparados com sistemas de geração de fonte única

O uso de tecnologias renováveis para gerar eletricidade localmente e isoladamente frequentemente foca no emprego de uma única fonte de geração, ocasionando muitas vezes problemas com a confiabilidade do sistema devido à intermitência das energias renováveis e dos seus recursos limitados. Com o objetivo de superar problemas de confiabilidade, sistemas com fontes únicas são geralmente superdimensionados de forma a apresentarem um maior capital de investimento. Sistemas híbridos podem apresentar uma solução viável para superar os problemas de intermitência da geração renovável de eletricidade, contudo este tipo de sistemas não recebe muita atenção devido à sua alta complexidade de modelagem [12].

Tucker e Negnevitsky [13] também comentam que combinar mais de uma tecnologia de geração de energia tende a ajudar nos problemas de confiabilidade do sistema. Uma combinação comum para sistemas não conectados à rede é a mistura de geração solar e eólica, já que as turbinas eólicas, ou *Wind Turbine Generators* (WTG), tendem a gerar mais eletricidade nos horários noturnos enquanto os módulos fotovoltaicos (PV) apenas produzem eletricidade durante o dia. Em sistemas isolados, para garantir a confiabilidade do sistema também pode ser necessário fazer uso de um sistema de geração reserva. A Figura 1 mostra o esquema de um sistema híbrido que foi utilizado na referência [14], ilustrando que a geração PV e eólica seria feita em nível contínuo (DC) de energia, assim como as baterias forneceriam e consumiriam a eletricidade excedente ou faltante em DC. Um conversor converteria potência de DC para AC e vice-versa conforme necessário. A geração diesel aconteceria em nível alternado (AC), assim como o consumo da carga.

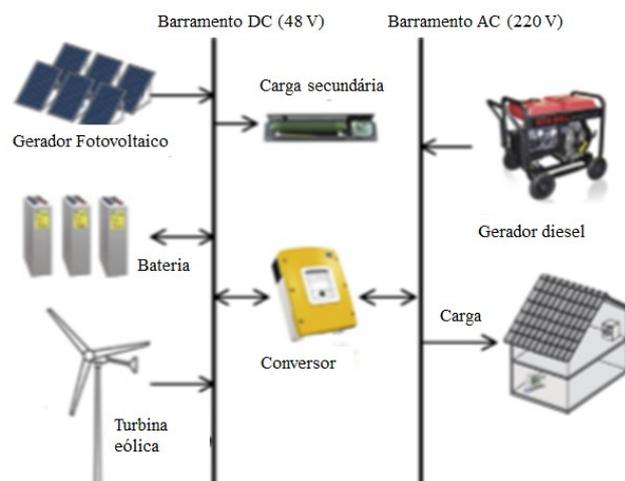


Figura 1 - Sistema híbrido de micro geração de energia. Fonte: Adaptado de [14]

2.2 Modelagem de micro sistemas de geração

Após obter informações sobre os recursos naturais do local escolhido para o projeto, a modelagem e dimensionamento do equipamento se torna uma etapa importante para o desenvolvimento de um sistema de geração de energia. Deshmukh & Deshmukh [9] apresentam uma revisão bibliográfica sobre a modelagem de sistemas renováveis de geração. A modelagem de sistemas híbridos é geralmente feita de modo que cada componente do sistema seja modelado individualmente e então seu comportamento conjunto pode ser avaliado de modo que a demanda seja fornecida. Este critério para a seleção de sistemas híbridos é feito em uma abordagem que assegura que a demanda seja atendida. Aspectos econômicos e de confiabilidade do fornecimento de energia devem ser avaliados. A

Confiabilidade é avaliada através da Probabilidade de Perda de Carga (PPC), onde um sistema que possui um baixo PPC significa que investimentos maiores deverão ser feitos para garantir a segurança do sistema, aumentando o seu custo. Ao dimensionar um sistema de geração, propõe-se avaliar o comportamento de cada componente separadamente, para então considerar seu efeito conjunto. Modelos matemáticos para turbinas eólicas, módulos fotovoltaicos, geradores diesel e sistemas de baterias são apresentados neste artigo. A Equação 1 apresenta o cálculo de PPC.

$$PPC = \frac{\sum_{i=1}^n \text{horas}(I_{\text{fornecida}}(t) < I_{\text{demanda}}(t))}{n} \quad (1)$$

Onde ,

$$I_{\text{demanda}} = \frac{L(t) - P_w(t) - P_{PV}(t)}{V_{LI}} \eta(I_{\text{bateria}}(t)) \quad (2)$$

I_{demanda} , calculada através da equação 2, é a corrente requerida pela carga em uma hora t , $I_{\text{fornecida}}$ é a corrente fornecida pelo sistema de energia renovável na mesma hora e n é o número de amostras. V_L é a tensão nominal requerida pelo sistema e $L(t)$ é a carga necessária na hora t , P_w é a potência gerada pela turbina eólica, P_{PV} é a potência gerada pelo sistema PV e η é a eficiência do sistema. Estes modelos matemáticos são resolvidos por métodos iterativos, enquanto abordagens determinísticas ou probabilísticas são utilizadas para determinar o desempenho dos componentes do sistema. Apesar de muito informativo, este artigo não apresenta um estudo de caso para testar a aplicação da metodologia sugerida, o que consistiria em um trabalho mais interessante para ser estudado.

Katti & Khedkar [15] apresentam um modelo para dimensionar os componentes de um sistema de geração eólico/ PV/ bateria para ser aplicado em localidades remotas. A metodologia é utilizada para um estudo de caso na cidade de Sukhalai na Índia. De acordo com os autores, selecionar e combinar o equipamento com a carga através do uso de dados sobre as características climáticas e consumo de carga é um procedimento confiável que pode resultar em vantagens econômicas. As informações técnicas sobre os componentes do sistema fornecidos pelos fabricantes possuem uma importância substancial no processo de dimensionamento de equipamentos e auxiliam no cálculo da potência produzida por cada componente ao longo do dia. Além disto, algoritmos numéricos podem ajudar no dimensionamento dos equipamentos de forma a garantir que a demanda seja sempre atendida. O número de módulos PV para atender a demanda seria dimensionado para diferentes

quantidades de turbinas eólicas. Para o estudo de caso, o número de módulos fotovoltaicos para atender a demanda caso nenhuma turbina eólica fosse utilizada seria 136, em uma configuração PV-eólica com duas turbinas eólicas são usados 48 painéis e para geração com apenas turbinas eólicas de 1,6 kW seriam utilizadas 3 turbinas. Este trabalho considerou módulos fotovoltaicos de 75 Wp, contudo hoje em dia já existem comercialmente módulos com potência de saída entre 220 e 250 Wp.

Além dos modelos matemáticos apresentados até então, também é possível modelar os sistemas com o auxílio do MATLAB/Simulink, como é feito por Tucker et al. em [13]. Para uma comunidade isolada, foi proposto um sistema que combina geração eólica, solar fotovoltaica e uma célula combustível *Proton Exchange Membrane* (PEM). Para garantir a confiabilidade do sistema pode ser necessário utilizar uma fonte de geração de reserva. O sistema proposto foi projetado para operar de modo que quando a potência gerada atende a demanda apenas a matriz fotovoltaica e os geradores eólicos estariam funcionando. Quando a geração é maior do que a demanda, o eletrolisador produziria hidrogênio e no caso da demanda ser maior do que a geração, a célula combustível consumiria o hidrogênio para gerar eletricidade. Dois testes foram feitos, um demonstrando como um aumento repentino na carga afeta o sistema e outro mostrando os efeitos na redução da carga. Uma mudança repentina nas condições de carga acarreta em uma pequena flutuação de 2,5% no pior caso na tensão RMS da carga. Modelos em escala das turbinas eólicas, célula combustível e matriz fotovoltaica foram testados para comparar seus resultados com os das simulações. Contudo, o artigo não descreve os testes de laboratório empregados nos componentes em escala e nem os resultados.

Nelson et al. realiza o dimensionamento e simulação de um sistema de geração eólico/fotovoltaico para uma residência típica no Noroeste Pacífico utilizando o MATLAB/Simulink [16]. O sistema é simulado para duas opções de armazenamento de energia, baterias e células combustível, tendo suas análises de custo comparadas para escolher a melhor configuração do sistema. A Figura 2 apresenta um esquema da configuração de sistema utilizando a célula combustível como opção de armazenamento. Este sistema opera de forma semelhante ao proposto em [13], quando há mais potência sendo produzida do que consumida o eletrolisador será ativado produzindo hidrogênio que será armazenado e consumido para produzir eletricidade na célula combustível quando a demanda for maior do que a geração. O uso da técnica de Probabilidade de Perda de Fornecimento de Potência (PPFP) é feito para calcular o número de módulos fotovoltaicos ao coincidir a geração de energia com a carga. O *Graphical User Interface* (GUI) no modelo do Simulink é utilizado para aplicar estas técnicas. Com a simulação foi descoberto que o sistema tradicional eólico/

fotovoltaico/ bateria é mais econômico do que fazer uso da célula combustível como opção de armazenamento de energia. Se houver desenvolvimento na relação entre eficiência e desempenho do conjunto célula combustível / eletrolisador existe possibilidade de que no futuro sistemas utilizando armazenamento de hidrogênio se tornem viáveis economicamente.

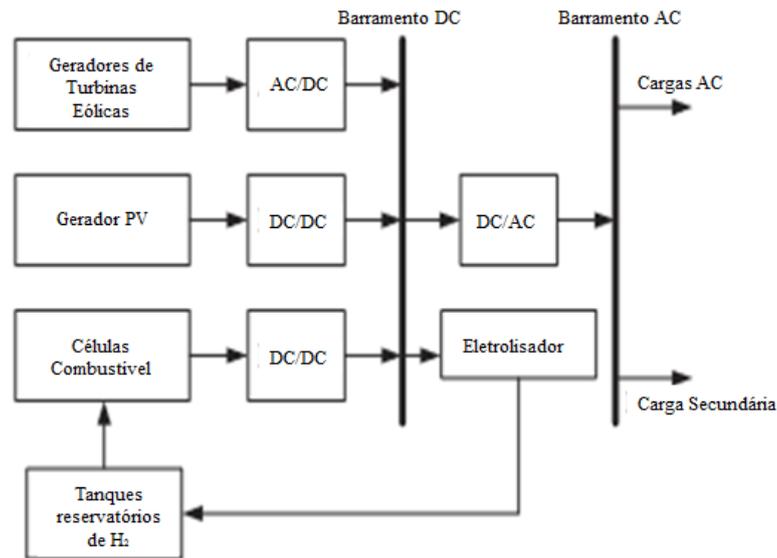


Figura 2 - Modelo de sistema utilizando uma célula combustível como fonte de armazenamento no *Graphical User Interface* no Simulink. Fonte: Adaptado de [13]

Metodologias novas e diferentes têm sido apresentadas nos últimos anos para modelar sistemas de geração de eletricidade. Um modelo probabilístico para geração fotovoltaica e eólica é apresentado em [16] utilizando a cidade de Ginostra na Itália como um estudo de caso. Em métodos probabilísticos, todas as variáveis são tratadas como variáveis aleatórias e os resultados são obtidos desenvolvendo-se as funções de distribuição entre elas. Um balanço de energia é feito utilizando valores médios mensais para as simulações. Uma desvantagem deste método é que ele não considera a variação dos valores ao longo do tempo. Distribuição da velocidade de vento para a localidade e as características de potência fornecida pelas turbinas eólicas são necessárias. A Distribuição Weibull é usada para escalonar os parâmetros dos dados da velocidade de vento e a função de densidade de probabilidade da velocidade de vento é calculada. A potência produzida pela turbina eólica dependerá desta função. Para a geração fotovoltaica, um índice de claridade horário é calculado e também a função de densidade de probabilidade. A potência gerada pela radiação solar dependerá de ambos fatores e da inclinação do módulo fotovoltaico. Uma comparação entre esta metodologia e

uma abordagem utilizando o MATLAB/Simulink foi feita, resultando em diferenças menores do que 2% entre os resultados, validando este modelo.

Em [17], Koutroulis desenvolve a modelagem e o dimensionamento de um sistema de geração híbrido com o auxílio de algoritmo genético, aplicando-o em um estudo de caso em Creta, para uma residência típica. O algoritmo genético consiste em alimentar o programa com dados técnicos sobre as tecnologias comercialmente disponíveis. Conceitos genéticos de biologia são aplicados para elaborar o algoritmo, considerando as variáveis do sistema como cromossomos. A combinação e interação entre os cromossomos são avaliadas. O dimensionamento ótimo do sistema é então calculado ao achar a quantidade correta de equipamentos do sistema para fornecer a demanda de carga. Dados sobre radiação solar, velocidade do vento e carga são necessários para este procedimento. Após isto, o Algoritmo Genético é empregado para descobrir a solução com o menor custo. Esta metodologia possui a vantagem, se comparada com outras, de ser simples e de realizar os cálculos computacionalmente para encontrar a opção mais econômica.

Nenhuma das metodologias previamente mencionadas considera o desenvolvimento social e ambiental da comunidade onde o sistema será instalado. Henao discute uma abordagem em [18] com múltiplos critérios para ajudar durante o processo de tomada de decisões para a geração de energia sustentável em áreas rurais. O uso da Abordagem de Meios de Vida Sustentável consiste no uso de um pentágono com cinco características (humana, física, financeira, natural e social), uma em cada um dos vértices, como mostrado na Figura 3. Um pentágono ideal terá cada um dos seus vértices a uma distância 1 do seu centro. Valores entre 0 e 1 para cada uma dessas características da comunidade analisada são determinados, sendo “zero” o pior caso possível e “um” o melhor, de modo que um pentágono representando a realidade da comunidade será criado. Para cada opção energética analisada um novo pentágono será construído. A solução energética com o pentágono mais similar ao pentágono ideal será a melhor opção a ser instaurada na comunidade analisada. A análise de robustez refina e auxilia a basear o processo de tomada de decisão. Ela consiste em um teste de interdependência, um teste de entropia e um teste que evita soluções inviáveis.

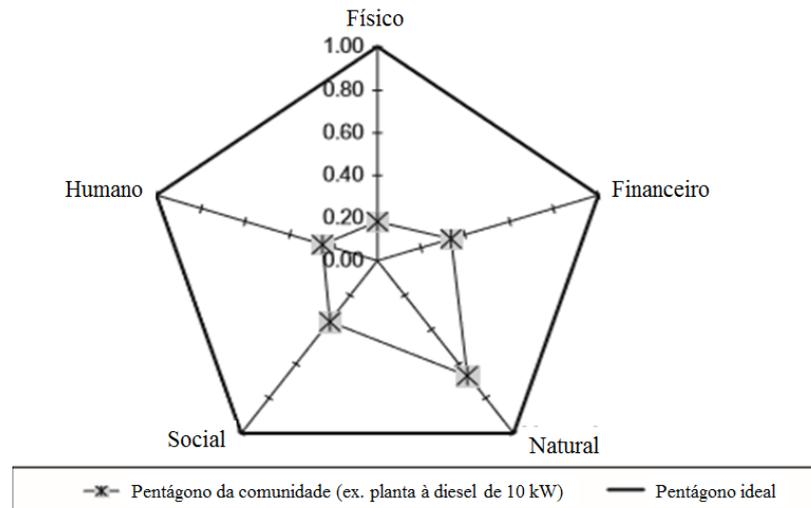


Figura 3 - Pentágonos ideal e real da abordagem de múltiplos critérios para modelagem de sistemas de micro geração. Fonte: [19]

2.3 Comparação entre as metodologias e ferramentas de simulação

Há uma vasta gama de metodologias para dimensionar e modelar sistemas de geração renovável de energia. Em [20], é apresentada a comparação entre quatro metodologias justapondo os resultados obtidos com cada um destes métodos para as simulações de um sistema combinando a geração de eletricidade com módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas e células combustível para Alora na Espanha. O primeiro método, chamado Dimensionamento Básico utiliza equações básicas para dimensionar os componentes do sistema. O segundo método consiste em utilizar a ferramenta *Simulink Design Optimization* (SDO) para analisar o modelo do sistema criado no MATLAB/Simulink. O método 3 consiste na simulação e otimização econômica com o HOMER. O método 4 consiste em utilizar uma ferramenta de simulação diferente para sistemas renováveis, chamada HOGA. O método de Dimensionamento Básico obteve resultados similares comparados ao HOMER, contudo o HOMER apresentou uma quantidade menor de módulos fotovoltaicos e um número maior de baterias, sendo uma opção mais econômica do que a obtida com o método 1. A simulação feita utilizando o Simulink fez uso de um algoritmo genérico para definir as restrições do sistema e foi o método que alcançou os melhores resultados, sendo a opção mais econômica das quatro. A simulação com o HOMER obteve o segundo resultado mais econômico, enquanto a simulação com o HOGA obteve o resultado mais caro com a maior capacidade de baterias instaladas.

É possível concluir que a ferramenta HOMER alcança resultados bastante satisfatórios. Em [11] é afirmado que o HOMER é a ferramenta de simulação mais difundida

mundialmente para a modelagem e otimização de sistemas híbridos. O HOMER simula tanto a operação quanto os custos do sistema para cada hora em um período de tempo de um ano, assumindo que todos os anos seguintes da vida útil do sistema apresentarão o mesmo comportamento. Mudanças ao longo do tempo, como o aumento de carga consumida, não são contempladas. O programa considera a configuração ótima do sistema como sendo aquela que apresenta o menor custo de ciclo de vida enquanto satisfaz as restrições especificadas pelo usuário. O HOMER é o programa computacional mais amplamente utilizado para este propósito. Mesmo não sendo a ferramenta com a lógica de simulação mais precisa existente, ele ainda é mais preciso do que métodos estatísticos. Contudo, neste trabalho as limitações do software não são descritas.

O HOMER é novamente descrito em [21] por Sinha e Chandel, onde uma revisão bibliográfica sobre 19 diferentes ferramentas de simulação para sistemas híbridos é apresentada. Novamente, é comentado que o HOMER é o programa de simulação mais amplamente utilizado para microssistemas, seguido pelo RETScreen, HOGA, HYBRID 2, TRNSYS e ARES. O HOMER simula o comportamento do sistema para as 8760 horas do ano. Como limitações estão o fato de que o HOMER classifica os sistemas apenas pelo seu Custo Atual Líquido (CAL) não levando em consideração o Custo da Eletricidade (CDE); ele também não considera a profundidade de descarga (PDD) das baterias, que é um aspecto importante uma vez que a vida-útil das baterias depende disto. O HOMER também não é capaz de avaliar o comportamento do sistema em períodos de tempo entre as horas. Outras ferramentas de simulação são descritas neste artigo, como o HYBRID 2, que utiliza métodos estatísticos para levar em consideração variações entre as etapas da simulação. Os seus intervalos de simulações pode variar entre 10 minutos e 1 hora. Como limitações deste programa estão o fato de que ele possui poucos parâmetros e é inflexível. Afirma-se que o RETScreen possui uma base de dados climáticos global, apresentando como limitações o fato de não considerar a influência da temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos e não suportar cálculos mais avançados, além de apresentar problemas no compartilhamento de dados. As outras ferramentas descritas parecem estar ainda em fase muito inicial de desenvolvimento se comparadas com estas mencionadas, possuindo muito mais aspectos negativos do que positivos no seu uso. No estudo de caso de um sistema PV/bateria foi mostrado que o HOMER apresentou um excesso de geração solar que não é visto no RETScreen. O RETScreen utiliza o modelo Evan Electrical, tendo dados sobre o material do módulo fotovoltaico e considerando temperatura ambiente média mensal, enquanto o HOMER utiliza o modelo básico de relação.

2.4 Estudos de caso utilizando o HOMER

Um trabalho aplicando tecnologias de geração de energia renovável em Palari na Índia com o uso do HOMER foi desenvolvido por Sem e Bhattacharya em [11]. O principal objetivo deste trabalho era garantir a confiabilidade do fornecimento de eletricidade considerando quatro tecnologias de energia: micro hídrica, fotovoltaica, eólica e biodiesel. Através das simulações feitas no HOMER foi possível concluir que a combinação ótima de tecnologias de geração renováveis de energia para Palari é: matriz fotovoltaica de 20 kW, 30 kW de micro hidro geração, um gerador a biodiesel de 10 kW, 40 baterias 6CS25P, um inversor de 20 kW e um retificador de 20 kW. Nenhuma turbina eólica é escolhida uma vez que a média de velocidade de vento na região é baixa, sendo 3,5 m/s. O CDE deste sistema é menor do que se a rede tivesse sido expandida até a cidade. Esta configuração impediria que 33.832 kg/ano de CO₂ fossem liberados na atmosfera se comparado com uma estação central de geração de energia. Foi mostrado através da simulação que sistemas sem a geração hídrica tendem a ser menos viáveis economicamente. A confiabilidade do sistema não pode ser garantida a não ser que alguma outra tecnologia renovável seja utilizada durante o inverno devido às estações de secas.

Um estudo de caso empregando o HOMER no Brasil foi desenvolvido por Silva em [22] onde se simulou e modelou um sistema para verificar a viabilidade de instalação de um sistema de geração fotovoltaico com células combustíveis e baterias como sistemas de armazenamento para o Centro de Pesquisa de Cangussu em Tocantins. O melhor resultado obtido com a simulação usando o sistema de armazenamento de hidrogênio é atingido quando o sistema possui as seguintes características: 878 kWp de fotovoltaica, 1 kW de célula combustível PEM, 2 kW de eletrolisador e 4 baterias. Contudo, o melhor resultado ótimo é obtido com 6,82 kW de geração fotovoltaica e 16 baterias. O custo da eletricidade é 105,56% mais alto no sistema híbrido se comparado com o sistema fotovoltaico – bateria. É possível determinar que o uso de hidrogênio para armazenar energia não é economicamente atrativo na região. Neste artigo foi um conceito interessante utilizar o abundante recurso solar da região para gerar eletricidade durante os horários diurnos através de módulos fotovoltaicos e armazenar a energia não sendo consumida no momento da geração para então, através da eletrólise da água do Rio Amazonas produzir hidrogênio. Quando a produção de energia não é suficiente para atender a demanda, o hidrogênio seria utilizado para alimentar as células combustíveis, produzindo eletricidade como necessário. Contudo, o aspecto econômico desta ideia não é favorável, uma vez que a aplicação de células combustível é muito cara no Brasil.

Almeida et al. apresentam outro estudo de caso utilizando o HOMER no Brasil em [22], onde é proposto utilizar um sistema de geração de energia renovável para fornecer eletricidade para o Hospital das clínicas de Campinas da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Um sistema híbrido contendo geração diesel – eólica foi a melhor configuração encontrada para este hospital. O custo da eletricidade desta configuração representa um custo menor de eletricidade se a energia for comprada diretamente da rede, significando que esta configuração é economicamente viável a longo prazo. O retorno do investimento se daria em um período de oito anos, considerado um período relativamente curto pelos autores. Mesmo que este artigo pareça um pouco superficial, pode ser utilizado para confirmar a ampla aplicabilidade do HOMER e também que há interesse no Brasil de pesquisar e fazer uso de sistemas híbridos.

2.5 Projeto de Eficiência Energética (PEE) CELESC

Segundo o manual Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE) da ANEEL [2], este programa tem como objetivo promover o uso racional e eficiente de eletricidade em todos os setores da economia. Seus projetos devem comprovar a viabilidade econômica dos atos que reduzem o desperdício e melhoram a eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de eletricidade. Através de um Plano de Gestão que estabelece o objetivo, fontes de recursos e ações permitidas, as distribuidoras de energia recebem condições para gerir os recursos empregados e determinar o êxito das ações realizadas.

Os projetos contemplados neste programa são divididos em dez categorias descritas no Capítulo 4 do documento:

- Industrial,
- Comércio e Serviços,
- Poder Público,
- Serviços Públicos,
- Rural, Residencial,
- Baixa Renda,
- Gestão Energética Municipal,
- Educacional e
- Iluminação Pública.

Os Projetos de Baixa Renda têm como objetivo impulsionar o uso eficiência de energia nessas comunidades. Diversas ações podem ser realizadas, dentre elas destacam-se a substituição de equipamentos por equipamentos com melhor eficiência, ações educacionais, instalações de aquecedores solares de água e geração por fontes incentivadas. Com a intenção de avaliar a eficiência do proposto, projetos com fontes incentivadas devem apresentar quantidade de energia economizada e redução da demanda de energia em horário de ponta. Além disso, uma análise da viabilidade econômica do projeto deve ser apresentada.

A Chamada Pública da CELESC para o Programa de Eficiência Energética (PEE) de 2015 [24] descreve o formato em que os projetos da região de Santa Catarina devem estar para participarem do programa. 50% dos R\$ 10 milhões investidos foram investidos em projetos que contemplem fontes incentivadas de energia, fato sem antecedentes até então. Exemplos de projetos contemplados pelo PEE da CELESC são o Projeto Banho de Sol, que efetuou instalações de aquecimento solar para 182 instituições filantrópicas, economizando 1158 MWh/ano de energia e reduzindo 2,4 MW da demanda de ponta; e o projeto Energia do Bem que beneficiou mais de 53 mil famílias ao efetuar palestras educacionais e substituir equipamentos domésticos antigos por mais eficientes. Neste segundo projeto a Energia Economizada foi de 37,040 MWh/ano, reduzindo 16,4 MW de consumo no horário de ponta [3].

3. METODOLOGIA

Nas próximas seções serão explicados os procedimentos e dados utilizados para realizar a simulação de um sistema de micro geração para um bairro de baixa renda na cidade de Araranguá com o uso do HOMER, seguidas para a elaboração deste trabalho.

3.1 HOMER e os dados necessários para a simulação

A ferramenta computacional HOMER previamente mencionada simula e compara tanto o desempenho quanto o custo de ciclo de vida sistemas de geração de energia. Três tarefas são executadas por esta ferramenta: simulação, otimização e análise de sensibilidade. Mais informações sobre isto podem ser encontradas em [11].

Para realizar as simulações, informações sobre as características de demanda e carga e sobre os recursos energéticos da região devem ser alimentadas ao HOMER. Os dados de radiação solar podem ser alimentados no HOMER em três formatos possíveis: média horária

da radiação solar em uma superfície horizontal (kW/m^2), média mensal da radiação solar em uma superfície horizontal (kWh/m^2) ou média mensal do índice de claridade. As informações sobre os recursos eólicos devem ser apresentadas como dados da velocidade horária do vento ao longo de um ano. Na versão 3 do HOMER Pro é possível acessar esses dados para a localidade analisada diretamente através do programa, que acessa os dados através de informações de satélites disponíveis na internet. Os dados, considerações e procedimentos utilizados ao longo da elaboração deste projeto e simulação serão explicados nas seções a seguir.

3.2 Considerações para a Determinação de Demanda

Ao iniciar o modelo de simulação no HOMER informações sobre as características de demanda da região analisada devem ser fornecidas. O HOMER possui uma curva modelo de média diária de carga para uma comunidade, considerando-se um conjunto de habitações, que apresenta um comportamento característico para um período de tempo de um dia e de um ano, como mostrado na Figura 4.

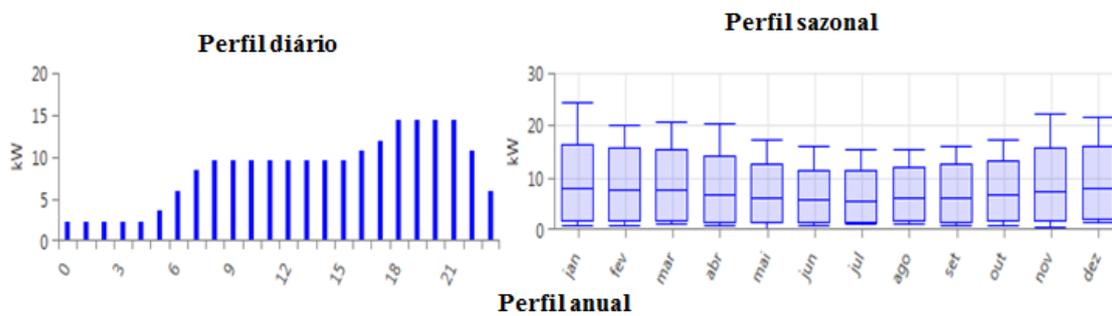


Figura 4 - Perfil de carga diário e anual de base fornecido pelo HOMER para uma comunidade com mês de pico de consumo em janeiro.

Através da Figura 4 é possível analisar que a demanda diária de eletricidade apresenta valores baixos nos período que vai da meia-noite até às 6 horas da manhã. O horário de pico ocorre entre as 18 e 21 horas. Analisando-se o perfil anual da média diária de carga, nota-se que os meses com maior consumo de energia seriam de novembro a janeiro, os meses de verão no Brasil. Uma vez que não se tem informações sobre o consumo real na cidade de Araranguá, considera-se uma opção razoável utilizar a curva de carga característica fornecida pelo programa, alterando-se apenas a escala da curva.

A escala da curva de demanda para o bairro de baixa renda da cidade de Araranguá é estimada através de uma suposição sobre quais aparelhos elétricos uma residência típica com 4 habitantes apresenta, suas potências e o tempo médio de uso por dia. Estes dados são apresentados na Tabela 1 e foram adaptados de [25].

Tabela 1 - Dados utilizados para o cálculo de carga de uma residência de baixa renda. Fonte [25]

Equipamento	Quantidade	Potência Média (W)	Dias de uso (por mês)	Utilização média por dia (horas)	Consumo médio (kWh/unidade)	Consumo total (kWh/mês)
Lâmpada	5	20	30	5	3,0	15,0
Refrigerador	1	130	30	24	93,6	93,6
Televisor 20"	1	70	30	5	10,5	10,5
Pequeno ventilador	2	60	30	8	14,4	28,8
Chuveiro Elétrico	1	3300	30	0,5	49,5	49,5
Total						197,4

Deste modo uma residência de baixa renda consumiria 197,4 kWh por mês de eletricidade. Multiplicando-se este resultado por 40 residências e dividindo-se o resultado pelos 30 dias do mês, obtêm-se a carga total consumida pelo bairro de 263,2 kWh/dia.

3.3 Simulação no HOMER

Como a cidade de Araranguá já é conectada à rede e este projeto tem como intuito aumentar a geração de energias renováveis na região, optou-se por projetar um sistema que combine geração eólica, solar fotovoltaica, baterias, conversor AC/DC e DC/AC, a carga e a rede. A Figura 5 apresenta o esquema do sistema montado no HOMER.

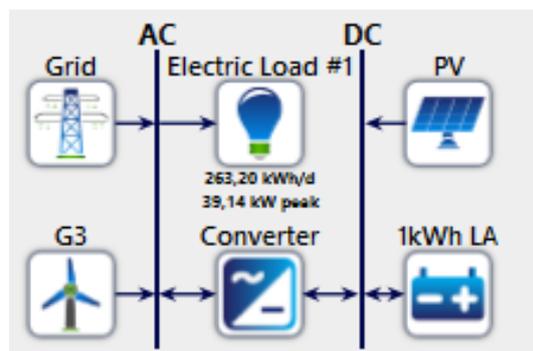


Figura 5 - Sistema modelado no HOMER para a cidade de Araranguá.

A estratégia de despacho econômico escolhida para as simulações é chamada *Cycle Charging*. Isto quer dizer que sempre se dará prioridade em consumir a eletricidade que está sendo gerada ao invés de comprar da rede para carregar as baterias ou alimentar a carga. Sempre que se estiver gerando mais eletricidade do que o consumido, esta eletricidade excedente será destinada a alimentar as baterias, caso estas não estiverem com a carga máxima de armazenamento. Caso a geração seja inferior à demanda necessária, será dada prioridade ao consumo de eletricidade das baterias. Uma vez que as baterias estejam descarregadas, compra-se eletricidade da rede [26].

3.3.1 Carga Elétrica

Como explicado previamente, para determinar a carga elétrica do projeto se fez uso de um comportamento padrão fornecido pelo HOMER, ajustando apenas a escala da carga do bairro para a realidade local. A Figura 6 apresenta as informações sobre a carga elétrica quando a média anual de 263,4 kWh/d da seção 3.1 foi utilizada para escalonar a carga.

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/d)	165,24	263,2
Average (kW)	6,88	10,97
Peak (kW)	24,57	39,14
Load Factor	,28	,28

Load Type: AC DC

Figura 6 - Informações sobre a carga elétrica do bairro de Araranguá fornecidas pelo HOMER após escalonamento da curva de carga utilizada como base.

Assim, os valores de média diária de energia consumida passam a ser 263,4 kWh/d, a potência média é 10,97 kW, a potência de pico do bairro é 39,14 kW e o fator de carga é 0,28.

3.3.2 A rede elétrica

Considerando-se que a o bairro já está conectado na rede de distribuição da CELESC, isto também foi feito na simulação. Assim, o sistema é conectado a uma rede elétrica cujo preço do kWh é de R\$ 0,524. A questão da venda de eletricidade para a rede não será contabilizada, usando-se um preço de venda de R\$ 0,000 por kWh para a simulação.

3.3.3 Turbina Eólica

Os dados de potencial eólico para a cidade de Araranguá foram adquiridos diretamente através do HOMER. Os dados são adquiridos da base de dados de energia solar e eólica da NASA.

Duas simulações com dois tamanhos de turbinas eólicas foram feitas, uma utilizando turbinas de 3 kW e outra de 10 kW, para efeito de comparação. As informações fornecidas ao HOMER sobre os custos das turbinas eólicas com diferentes capacidades de geração são apresentada na Tabela 2, onde O&M se refere aos custos com operação e manutenção.

Tabela 2 - Informações sobre potência e custos das turbinas eólicas utilizadas na simulação. Fonte: [27]

Potência (kW)	Investimento (R\$)	Substituição (R\$)	O&M (R\$)
2,4	49.900,00	49.900,00	2.499,00
10,0	425.000,00	425.000,00	21.250,00

A Tabela 3 apresenta as informações sobre a curva de potência da turbina de 2,4 kW e a Tabela 4 exibe a curva de potência para a turbina eólica de 10 kW. Estes dados foram retirados de fichas técnicas de turbinas eólicas disponíveis no mercado e fornecidos ao HOMER de modo a melhorar a confiabilidade da simulação. Considerou-se uma vida-útil de 20 anos para as turbinas eólicas.

3.3.4 Sistema Fotovoltaico

Os dados de radiação solar para a região de Araranguá foram obtidos diretamente da base de dados de energia solar e eólica da NASA pelo HOMER. Diferentes custos para sistemas com diferentes capacidades foram inseridos ao programa de modo a criar uma curva capacidade de geração – preço. Estas informações são apresentadas na Tabela 5.

Uma vida-útil de 25 anos e um fator de degradação de 20% foram utilizados na simulação para este sistema.

Tabela 3 - Potência de uma turbina eólica de 2,4 kW. Fonte: [27]

Velocidade do Vento (m/s)	Potência de Saída (kW)
0,0	0,00
3,0	0,00
4,0	0,00
5,0	0,25
6,0	0,50
7,5	1,00
8,5	1,50
10,0	2,00
12,0	2,50
13,0	2,75
14,0	2,75
15,0	2,75
16,0	2,50
17,5	2,20
18,0	2,20
19,0	2,20
20,0	2,20
24,0	2,20
25,0	1,75

Tabela 4 - Potência de uma turbina eólica de 10 kW. Fonte: [27]

Velocidade do Vento (m/s)	Potência de Saída (kW)
0,0	0,00
3,0	0,00
4,0	0,19
5,0	0,19
6,0	0,19
10,0	1,00
15,0	2,00
20,0	6,00
24,0	10,00
29,0	10,00

Tabela 5 – Relação entre os custos de sistemas de geração fotovoltaica e suas respectivas potências. Fonte [27]

Potência (kW)	Investimento (R\$)	Substituição (R\$)	O&M (R\$)
1,5	16.590,00	16.590,00	829,50
2,0	17.880,00	17.880,00	894,00
2,5	20.075,00	20.075,00	1003,75
3,0	22.420,00	22.420,00	1121,00
3,6	26.900,00	26.900,00	1345,00

3.3.5 Conversor

Os custos informados para diferentes capacidades de conversores são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre as capacidades e os custos de inversores. Fonte [27]

Potência (kW)	Investimento (R\$)	Substituição (R\$)	O&M (R\$)
0,7	609,00	609,00	31,00
1,0	1629,00	1629,00	83,00
1,5	2190,00	2190,00	110,00
3,0	5090,00	5090,00	255,00

O conversor deve apresentar uma eficiência de 90% e uma vida-útil de 15 anos.

3.3.6 Baterias

A Tabela 7 apresenta as informações de custo e capacidade das baterias.

Tabela 7 - Relação entre custos e capacidades de baterias chumbo-ácido. Fonte [27]

Potência (kW)	Investimento (R\$)	Substituição (R\$)	O&M (R\$)
1,80	921,00	921,00	0,00
2,64	1217,00	1217,00	0,00

3.3.7 Análise de Sensibilidade

Na análise de sensibilidade diferentes configurações do sistema foram simuladas e seus resultados comparados de modo a escolher a melhor configuração para a cidade de Araranguá. As configurações foram as seguintes:

- PV/Rede;
- PV/Bateria/Rede;

- PV/ 3 kW eólica /Bateria/Rede;
- PV/ 3 kW eólica //Rede;
- 3 kW eólica /Bateria/Rede;
- 10 kW eólica/ Bateria/ Rede;
- 3 kW eólica /Rede.

Um valor médio do CDE dos sistemas foi calculado para diferentes valores percentuais de fração renovável do sistema.

As confiabilidades dos sistemas também foram avaliadas e comparadas. O HOMER fornece informações sobre a Carga Não Fornecida ao longo de um ano. Apesar de não fornecer o PPC dos sistemas, é possível calculá-lo através da Equação 1 ao saber por quantas horas ao longo do ano a carga não foi atingida e dividindo este número pelas 8760 horas analisadas. Desse modo, é possível calcular o PPC de cada sistema para verificar qual é o mais confiável.

O HOMER também faz uma estimativa de emissões de dióxido de carbono (CO₂) para cada sistema. Uma vez que o PEE da Celesc se interessa em saber a quantidade de emissões de CO₂ que são evitadas com a implementação de seus projetos, é possível fazer uma estimativa para cada configuração de sistema proposto. Obtém-se o resultado de emissões de dióxido de carbono para uma simulação do sistema apenas com a carga conectada à rede e deste valor é reduzida as emissões dos sistemas propostos, de modo a se fazer uma estimativa da quantidade de gás carbônico que deixaria de ser liberada, por ano na atmosfera, com a implementação destes projetos.

A próxima seção apresentará e discutirá os resultados encontrados com as simulações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As próximas subseções apresentarão os resultados obtidos com as simulações no HOMER. Comparações entre os resultados das várias configurações de sistemas foram feitas com o intuito de auxiliar na escolha do sistema que será mais bem empregado para a cidade de Araranguá.

4.1 Relações entre os Custos de Eletricidade (CDE) e as Frações Renováveis de cada configuração de sistema

Esta seção exibirá a reação dos CDE médio dos sistemas para diferentes valores de frações renováveis.

4.1.1 Eólica 2,4 kW / Rede

A Figura 7 apresenta o comportamento do custo da eletricidade (CDE) com a variação de fração renovável na rede com um sistema de geração contendo até quarenta turbinas eólicas de 2,4 kW conectadas à rede de distribuição. Os pontos azuis apresentam os dados de CDE médios encontrados com a simulação realizada no HOMER, e a linha preta contínua é a linha de tendência deste comportamento.

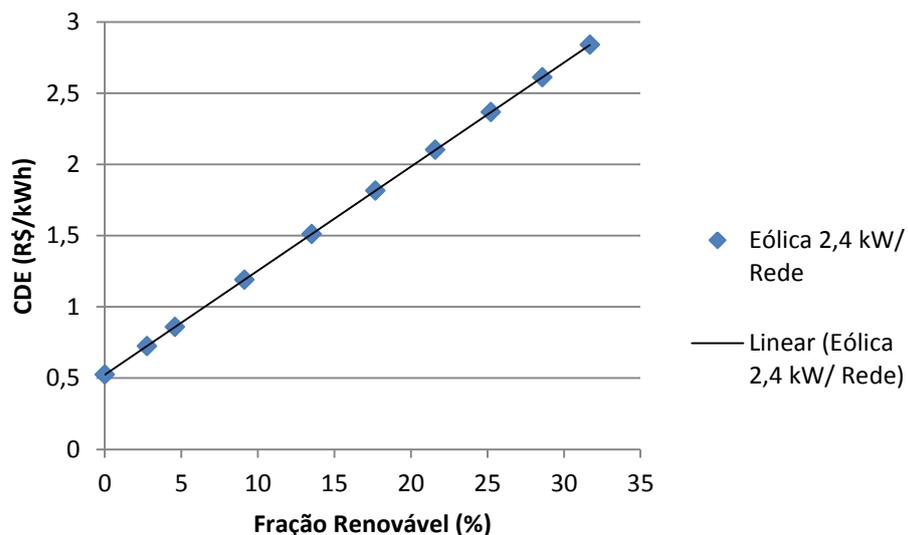


Figura 7 - Relação entre o CDE e a fração renovável de um sistema com geradores eólicos de 2,4 kW conectado à rede.

Nota-se que para este sistema há um crescimento linear do custo da eletricidade com o aumento da fração renovável no sistema. Isto acontece, pois, uma vez que não se possui armazenamento de eletricidade, para aumentar a fração renovável deve-se que aumentar o número de geradores eólicos no sistema, fazendo com que a fração renovável do sistema seja diretamente proporcional com o custo da eletricidade, ou seja, com o investimento em turbinas eólicas.

O custo mais baixo de eletricidade desta configuração de sistema se dá em 0% de fração renovável, quando toda a energia elétrica é comprada diretamente da rede, e apresenta o valor de R\$ 0,5239. O valor mais alto encontrado para este sistema foi de R\$ 2,8385, para

um percentual de energia renovável de 32%. Com o espaço amostral utilizado para geradores eólicos nesta simulação de até 40 turbinas eólicas de 2,4 kW, supondo-se que cada uma das 40 residências teria uma turbina instalada, a penetração máxima de energia renovável nesta rede seria de 32%.

4.1.2 Eólica 2,4 kW/ Bateria/ Rede

A Figura 8 ilustra o comportamento de um micro sistema de geração com turbinas eólicas de 2,4 kW, baterias e conectado à rede.

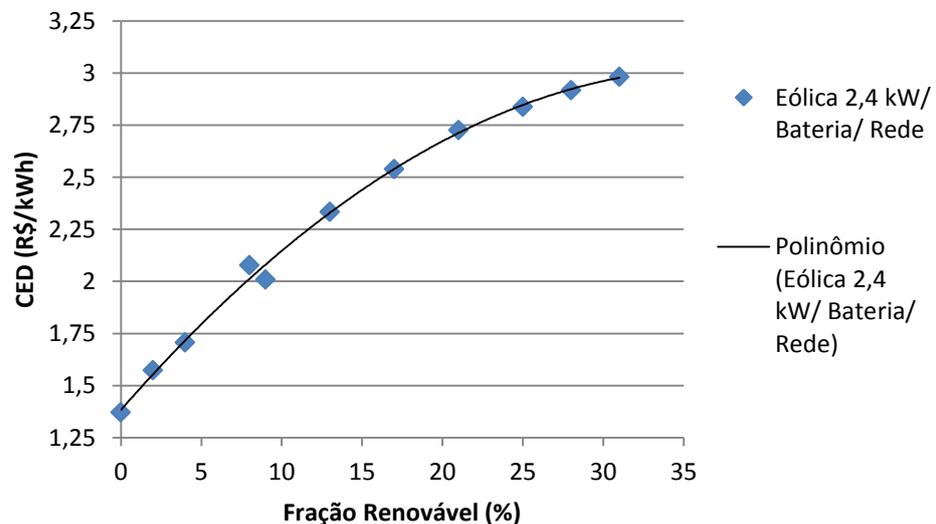


Figura 8 - Relação entre o CDE e a fração renovável de um sistema com geradores eólicos de 2,4 kW e baterias conectado à rede.

Nesta configuração de sistema que mistura geração eólica e armazenamento de energia, há um crescimento do CDE com a penetração de energia renovável no sistema. Neste caso o crescimento do custo não é diretamente proporcional ao aumento da fração renovável. Desta forma, para se aumentar a fração renovável pode-se investir tanto no aumento do potencial de geração quanto no de armazenamento de energia, sendo que baterias oferecem custos menores do que geradores eólicos.

Possuindo um espaço amostral de até quarenta turbinas eólicas, a máxima geração renovável alcançada neste sistema é de 31%. O valor mínimo do custo de eletricidade deste sistema acontece com fração renovável de 0% e é R\$ 1,3724. O valor máximo de CDE encontrado foi de R\$ 2,9818 com a geração renovável de 31%.

4.1.3 Eólica 2,4 kW/ PV/Rede

A Figura 9 ilustra o comportamento do custo de eletricidade de um sistema contendo geração eólica com turbinas de 2,4 kW, módulos fotovoltaicos e conectado à rede. Os pontos bordô apresentam o comportamento dos custos de eletricidade médios obtidos para cada fração renovável com a simulação no HOMER. A linha preta contínua é a linha de tendência da função composta por estes dados.

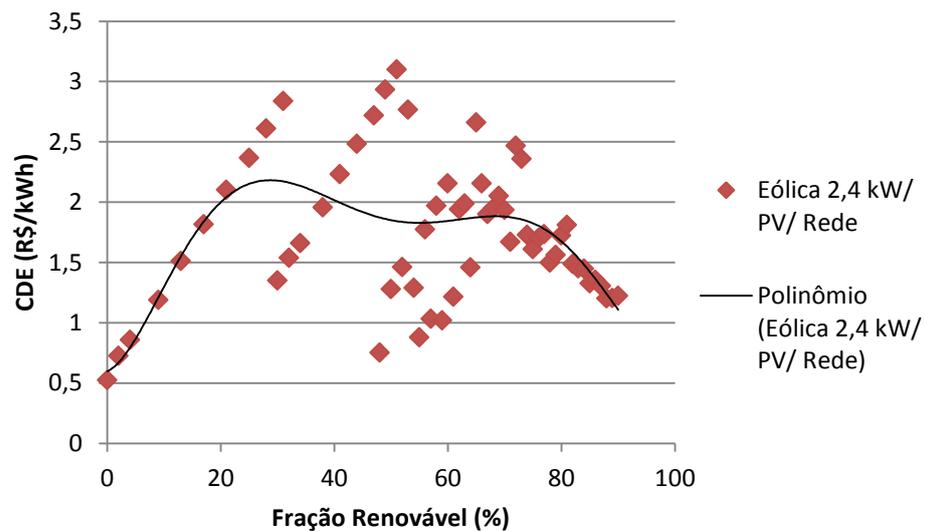


Figura 9 - Relação entre o CDE e a fração renovável de um sistema com geradores eólicos de 2,4 kW e painéis fotovoltaicos conectado à rede.

É possível observar que há um aumento no custo da eletricidade do sistema com o aumento da penetração de energia renovável no sistema de 0% até 31%, onde o sistema atinge seu CDE médio máximo de R\$ 2,8385. Após isto há uma tendência do custo da eletricidade diminuir até aproximadamente 50%. Isto pode acontecer, pois um alto investimento teve que ser feito até aproximadamente 30% para haver geração renovável, contudo sem que o sistema operasse na sua capacidade máxima de geração. A partir deste ponto, as frações renováveis podem aumentar sem que mais investimentos sejam feitos, de modo que o sistema está gerando eletricidade sem custos adicionais reduzindo, então, o CDE para estas frações mais elevadas. Em aproximadamente 50% de penetração renovável o sistema atingiu sua capacidade máxima, de modo que novos investimentos precisam ser feitos para que a geração de energia renovável seja aumentada, aumentando novamente o CDE. Isto acontece até aproximadamente 70% de fração renovável, quando o sistema novamente produz eletricidade renovável sem custos adicionais.

Esta configuração de sistema permite penetração de energias renováveis na rede de até 90%, quando atinge seu CDE mais baixo de R\$ 1,2245. Uma vez que a partir de 70% de geração renovável o custo da eletricidade decai continuamente até 90%, esta é uma configuração de sistema interessante de se trabalhar quando houver interesse em apresentar grandes penetrações renováveis de energia na rede.

4.1.4 Eólica 2,4 kW/ PV/ Bateria/ Rede

A Figura 10 ilustra o comportamento do CDE de um sistema que combina geração de até quarenta turbinas eólicas de 2,4 kW, geração fotovoltaica, baterias e é conectado à rede. Os pontos bordô apresentam o comportamento dos dados de CDE médios obtidos através da simulação com o HOMER, e a linha preta contínua apresenta a linha de tendência da função de comportamento do CDE com o aumento da fração renovável.

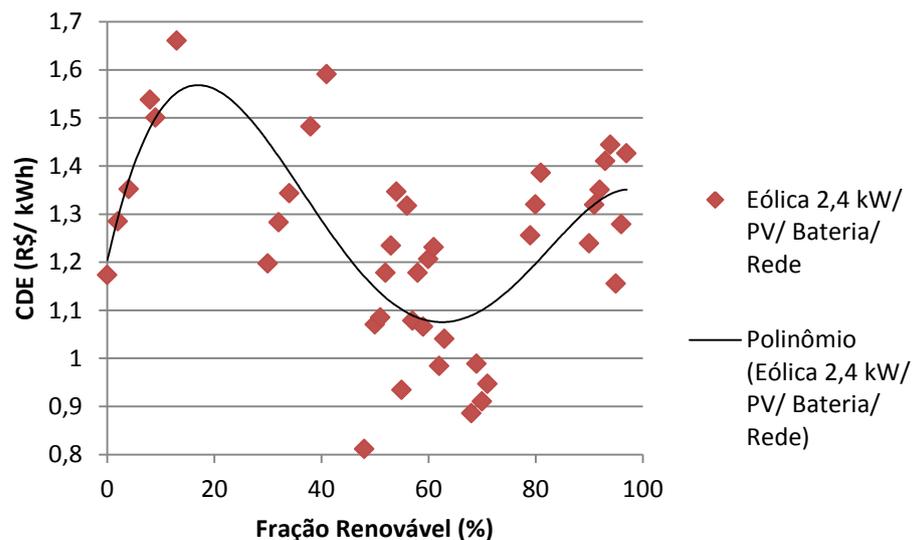


Figura 10 - Relação entre o CDE e a fração renovável de um sistema com geradores eólicos de 2,4 kW, painéis fotovoltaicos e baterias conectado à rede.

Constata-se através da linha de tendência deste sistema que inicialmente deve-se haver um alto investimento para aumentar a fração renovável, até que ela atinja aproximadamente 20%. A partir deste ponto, o sistema consegue aumentar sua fração renovável sem novos investimentos, de modo que o custo da eletricidade tem seu valor continuamente reduzido até aproximadamente 60%, quando a média do custo de eletricidade está em aproximadamente R\$ 1,1. A partir deste ponto, novos investimentos devem ser feitos para aumentar a geração renovável.

Dos custos médios obtidos através da simulação, o valor máximo foi atingido com fração renovável de 13% sendo R\$ 1,6605, e o seu valor mínimo é R\$ 0,8116 com 48% de penetração renovável.

4.1.5 Eólica 10 kW/ PV/ Bateria/ Rede

A Figura 11 ilustra o comportamento do CDE com o aumento da fração renovável para um sistema que possui até quarenta turbinas eólicas de 10 kW, geração fotovoltaica, baterias e é conectado à rede. Os pontos roxos apresentam o comportamento dos dados de CDE médio obtidos através da simulação. A linha contínua preta ilustra a tendência de comportamento desta função com o aumento da fração renovável.

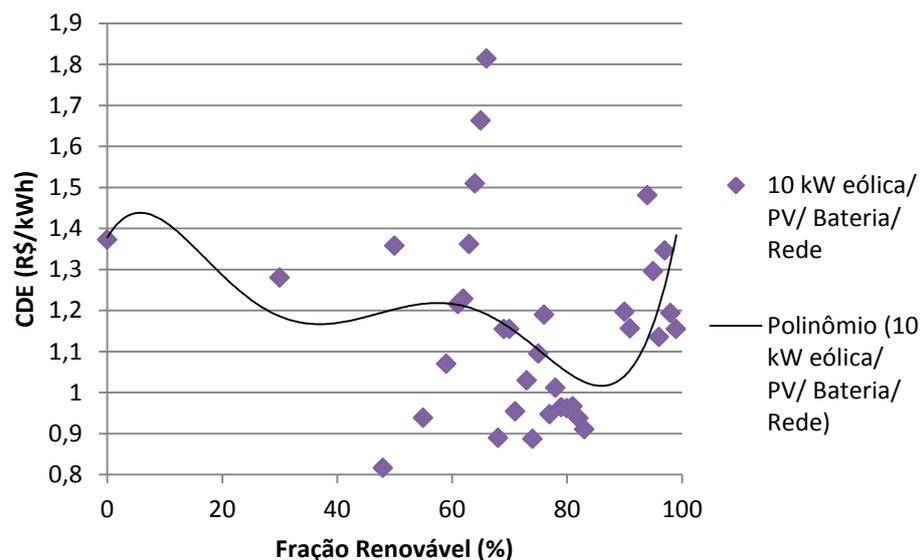


Figura 11 - Relação entre o CDE e a fração renovável de um sistema com geradores eólicos de 10 kW, painéis fotovoltaicos e baterias conectado à rede.

De acordo com a análise da linha de tendência da Figura 11, um investimento inicial deve ser feito para que a fração renovável seja aumentada até aproximadamente 10%, apresentando custo em média de R\$ 1,45 neste ponto. A partir de então, o CDE começa a decair até aproximadamente 40%, pois o sistema tem sua geração renovável aumentada sem custos extras. A partir deste ponto, os custos de eletricidade aumentam novamente até aproximadamente 60% de fração renovável, decaindo novamente até 90% quando o CDE novamente começa a aumentar. De acordo com a linha de tendência o sistema fica mais economicamente viável para operar com frações renováveis entre 70 e 90%, apresentando custos médios de eletricidade aproximadamente na faixa de R\$ 1,00 e R\$ 1,2.

O CDE médio mais baixo encontrado com o HOMER ocorreu com uma fração renovável de 48% apresentando um valor de R\$ 0,8160. Já o CDE mais elevado foi encontrado para a razão renovável de 66% valendo R\$1,8133.

4.1.6 PV/ Rede

A Figura 12 apresenta o comportamento do custo de eletricidade de um micro sistema de geração que contém painéis fotovoltaicos conectados diretamente à rede. Os pontos verdes ilustram o comportamento do CDE médio encontrado nas simulações com a variação da fração renovável. A linha preta contínua apresenta linha de tendência deste comportamento.

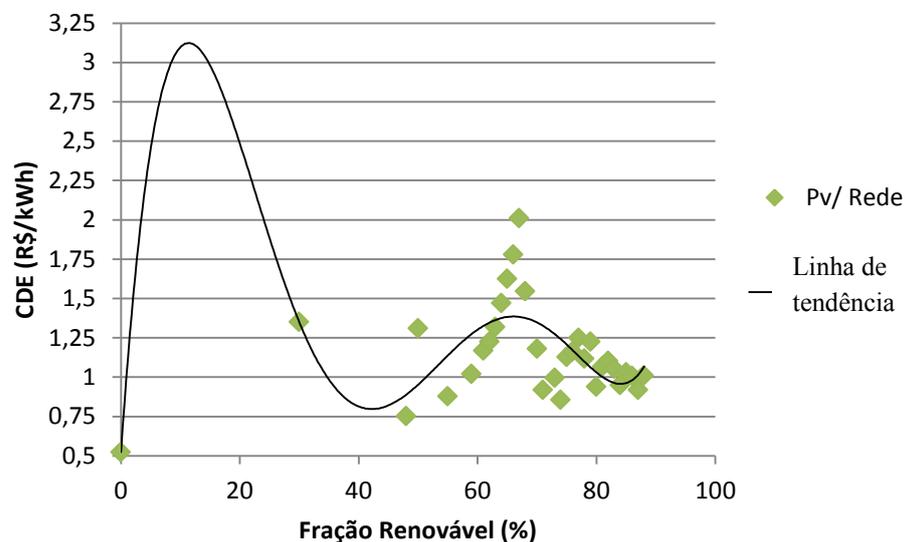


Figura 12 - Relação entre o CDE e a fração renovável de um sistema com painéis fotovoltaicos, conectado à rede.

Em uma primeira avaliação da linha de tendência é notório o fato que, para aumentar a fração renovável, um alto investimento inicial no sistema de painéis fotovoltaicos é necessário. Ao atingir aproximadamente 15% de fração renovável, o CDE começa a diminuir porque é possível aumentar a geração renovável do sistema sem novos investimentos. Esta redução nos valores médios de CDE acontecem até aproximadamente 40%; faixa de valores de fração renovável onde o CDE apresenta seus melhores valores, custando aproximadamente R\$ 0,75. Para aumentar a penetração renovável de 40% para 65%, novos painéis devem ser instalados e o sistema tem seu custo aumentado. Após 65% o CDE novamente decai até aproximadamente 90%, sendo este decaimento não tão significativo quanto o que acontece nas faixas de 15 a 40% de geração renovável. Assim, para este sistema seria mais

economicamente viável utilizar uma configuração que apresente cerca de 40% de fração renovável.

O CDE mínimo apresentado pelo sistema acontece em uma fração renovável de 0%, sendo R\$ 0,5239, seguido por R\$ 0,8548 em 74% de geração renovável. O custo médio mais alto de eletricidade encontrado foi de R\$ 1,7788 em 66% de fração renovável.

4.1.7 PV/ Bateria/ Rede

AS Figura 13 apresenta o comportamento do custo de eletricidade de um sistema que combina geração fotovoltaica, baterias e conectado à rede. As linhas tracejadas verdes indicam os CDE médios encontrados na simulação no HOMER para cada fração renovável. A linha contínua preta apresenta a linha de tendência desta função de custo de eletricidade com fração renovável.

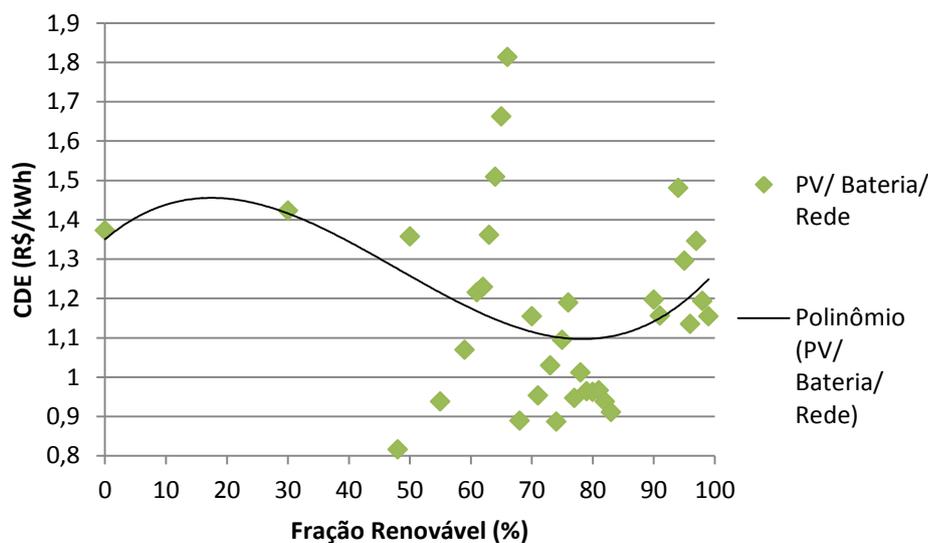


Figura 13 - Relação entre o CDE e a fração renovável de um sistema com painéis fotovoltaicos e baterias conectado à rede.

Segundo a linha de tendência da Figura 13, o CDE é maior para menores frações renováveis em um sistema que mistura painéis fotovoltaicos, armazenamento de energia e é conectado à rede. Um investimento inicial no sistema fotovoltaico deve ser feito para haver geração renovável de energia até um valor de 20% de penetração renovável. A partir deste ponto imagina-se que mais investimentos em bancos de baterias sejam feitos, cujo custo é menor do que o do sistema fotovoltaico. O sistema tem sua fração renovável aumentada sem maiores investimentos a partir de 20%, de modo que o CDE decai até aproximadamente 80%,

apresentando valores médios na faixa de R\$ 1,1. Após 80% o custo de eletricidade começa novamente a aumentar.

O menor custo médio de eletricidade encontrado com a simulação foi de R\$ 0,8160 com fração renovável de 48%. Já o maior custo ocorreu em 66%, valendo R\$ 1,8133.

4.2 Comparações entre o comportamento dos CDE dos diferentes sistemas com o aumento da Fração Renovável

Esta seção apresentará comparações relevantes sobre o como o custo da eletricidade varia com o aumento da fração renovável do sistema em diferentes sistemas.

4.2.1 Eólica de 2,4 kW de potência ou 10 kW

A Figura 14 apresenta um comparativo entre os custos de eletricidade para dois sistemas híbridos, um utilizando até quarenta turbinas eólicas de 2,4 kW de potência e outro com o mesmo número de turbinas eólicas, porém estas de 10 kW. A linha contínua apresenta o comportamento de CDE para as turbinas de pequeno porte e a linha tracejada representa o comportamento do CDE para as turbinas de 10 kW.

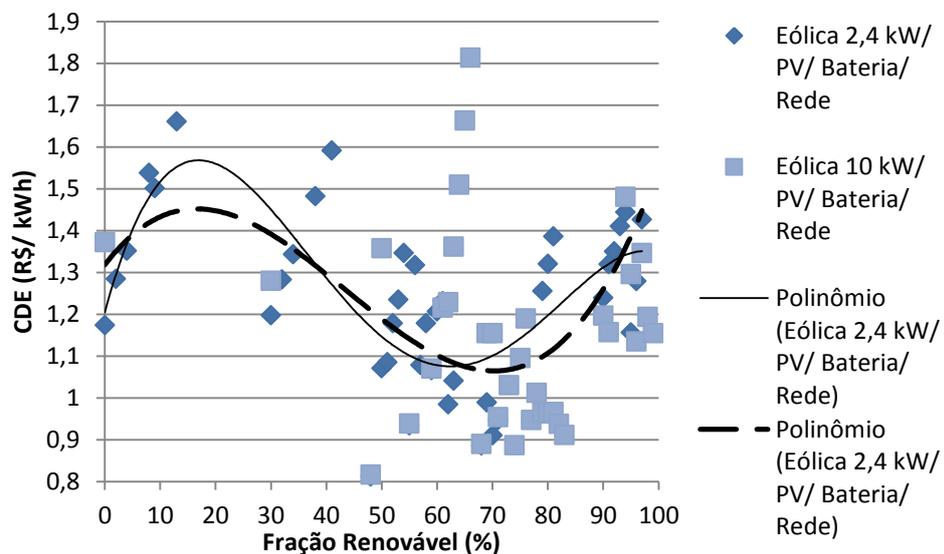


Figura 14 - Custos de eletricidade para os sistemas híbridos contendo turbinas eólicas de 2,4 kW e 10 kW.

Observa-se que o sistema contendo turbinas de 10 kW possuem, em geral, um custo com eletricidade menor do que o sistema com turbinas de 2,4 kW. As exceções são para frações renováveis menores do que 5%, onde imagina-se que o investimento inicial com as turbinas de 10 kW seja maior do que aquele com as de 2,4 kW, e para a faixa entre 45 e 65%.

Isto ocorre, pois nesta faixa aparentemente o sistema com turbinas de 2,4 kW está aumentando sua fração renovável sem custos adicionais, de modo que seu CDE está sendo reduzido a uma taxa mais acentuada do que para o sistema de 10 kW.

A geração de energia com turbinas eólicas com maior capacidade são mais efetivas economicamente porque essas turbinas eólicas de 10 kW apresentam uma maior capacidade de potência por turbina, sendo deste modo mais econômicas do que as de 2,4 kW. Este aspecto justifica o fato de que a geração de energia eólica é mais efetiva economicamente se feita de forma centralizada ao invés de distribuída.

Além disto, o sistema com turbinas eólicas de 2,4 kW apresentam maior viabilidade econômica para operarem com uma fração renovável entre 55% e 70%, enquanto que o sistema com turbinas eólicas de 10 kW apresenta maior viabilidade econômica para percentuais renováveis entre 65% e 80%. Deste modo, para atingir maiores frações renováveis é mais aconselhável o uso de geração centralizada de energia eólica.

4.2.2 Sistemas com e sem armazenamento de baterias

A Figura 15 exibe a comparação para o sistema de geração com turbinas eólicas de 2,4 kW conectado à rede quando há e quando não há o uso de baterias.

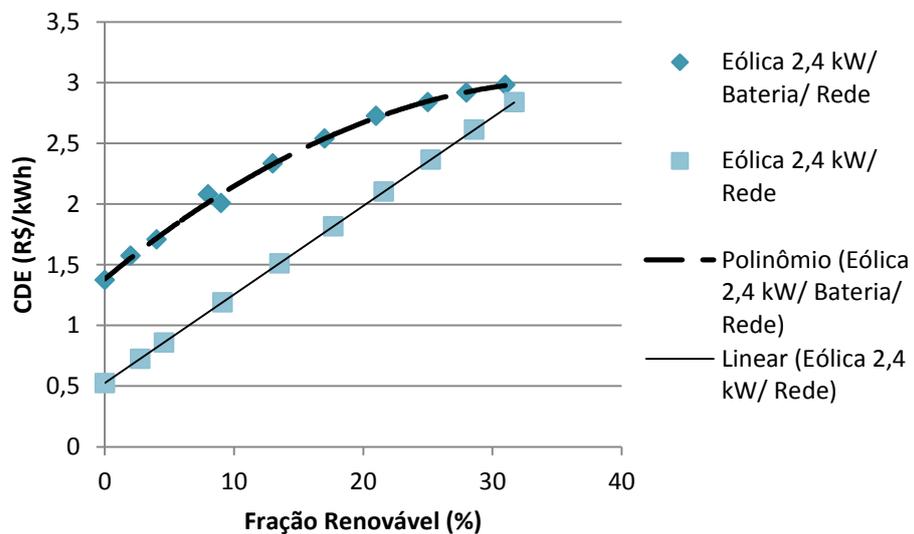


Figura 15 - Custos de eletricidade para sistema eólico com e sem armazenamento de energia.

Analisando a Figura 15 é notório que o sistema que não possui armazenamento de energia é mais economicamente viável do que aquele que utiliza baterias. Contudo, para a quantidade máxima de quarenta turbinas eólicas utilizadas na simulação, é possível atingir

apenas uma fração renovável de aproximadamente 30% com estes sistemas. O crescimento do CDE para o sistema sem armazenamento de energia ocorre de forma linear, enquanto que para o sistema com baterias não; o CDE cresce em ritmo menor do que o custo de eletricidade.

Pode-se supor então que para sistemas com maiores quantidades de turbinas e maiores frações renováveis de energia, o sistema com armazenamento de energia será mais efetivo economicamente do que o outro. Contudo, para a realidade do bairro de baixa renda estudado em Araranguá, que possui quarenta residências, seria mais interessante economicamente não utilizar baterias caso se escolha o sistema eólico de geração de energia.

A Figura 16 apresenta o mesmo comparativo entre o uso ou não de sistema de armazenamento para um sistema híbrido de geração; com até quarenta turbinas eólicas de 2,4 kW, painéis fotovoltaicos e conectado à rede. A linha contínua representa a linha de tendência para o sistema híbrido sem o armazenamento de energia, e a linha tracejada ilustra a linha de tendência do comportamento de CDE para o sistema que possui baterias.

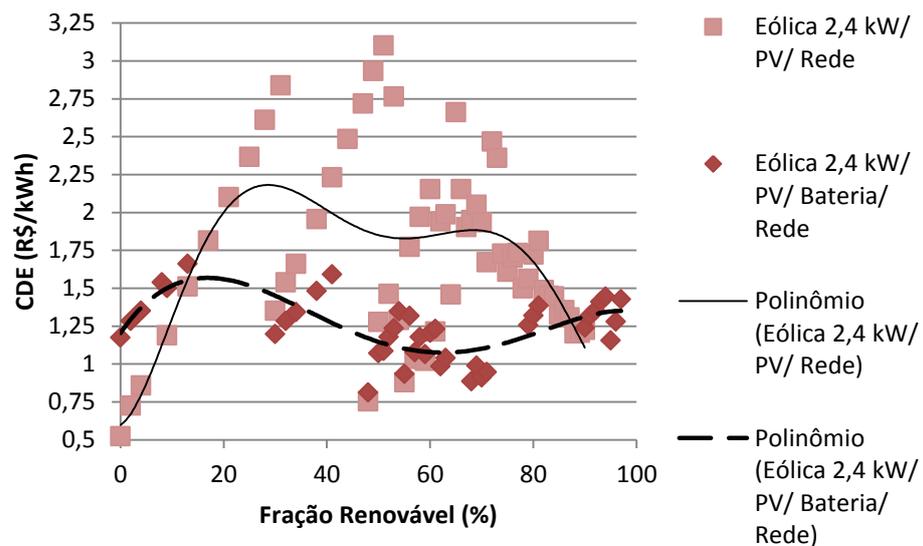


Figura 16 - Custos de eletricidade para os sistemas híbridos com e sem armazenamento de energia.

A análise da Figura 16 leva à conclusão de que para baixos valores de fração renovável é mais economicamente viável utilizar o sistema de geração híbrido sem armazenamento de baterias. Contudo, a partir de uma fração renovável de aproximadamente 15% fica mais interessante economicamente fazer uso de baterias.

Um aspecto observável da figura é que o CDE possui uma faixa de variação muito maior para o sistema sem armazenamento de energia e possui maiores oscilações. Isto acontece, pois quando não há armazenamento a fração renovável só pode ser acrescida com investimento em módulos fotovoltaicos e turbinas eólicas. Já com armazenamento de energia, é possível aumentar a fração renovável com o aumento da capacidade de armazenamento.

Uma vez que as baterias custam menos do que os geradores eólicos e fotovoltaicos, há uma maior estabilidade no custo da energia elétrica para o sistema que possui armazenamento.

A Figura 17 faz um comparativo entre o uso e não uso de sistema de armazenamento de energia para um sistema de geração fotovoltaico conectado à rede. A linha contínua representa a linha de tendência para o sistema sem armazenamento, e a linha tracejada ilustra o comportamento do CDE para o sistema com armazenamento de eletricidade.

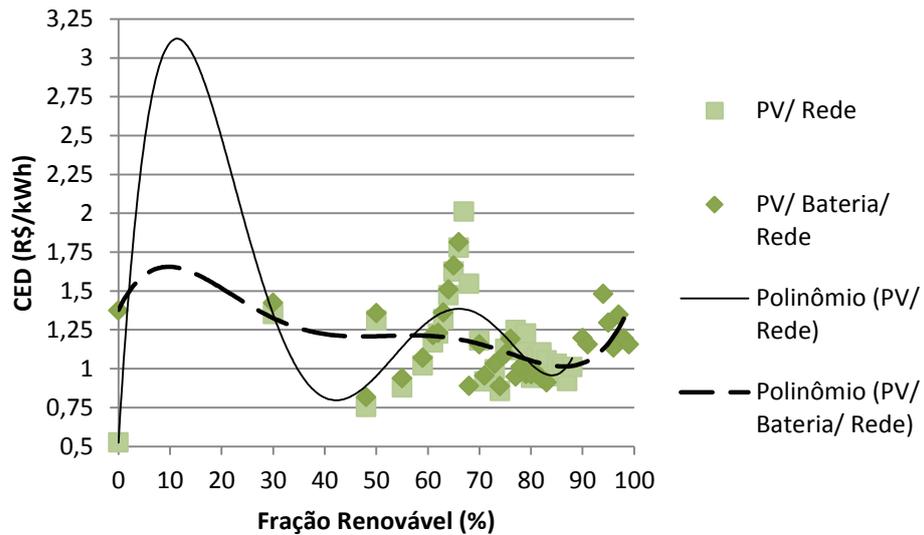


Figura 17 - Custos de eletricidade para os sistemas de geração fotovoltaica com e sem armazenamento de energia.

Primeiramente é possível perceber que é possível atingir uma maior fração renovável com o uso de baterias para um mesmo sistema, que apresenta uma fração renovável máxima de 90% sem baterias e de 99% no sistema com baterias. Outro comportamento interessante deste sistema é que para pequenas frações renováveis o sistema com bateria é menos interessante economicamente do que o sistema que não utiliza armazenamento. A partir de 5% todavia, um grande investimento deve ser feito para aumentar a fração renovável do sistema sem armazenamento de energia, encarecendo o seu CDE. Já para o sistema que faz uso de baterias este investimento é reduzido, de modo que o seu CDE se apresenta menor do que o do sistema sem baterias até uma fração renovável de 35%. Como a redução do custo de eletricidade para o sistema que não possui armazenamento de eletricidade é mais brusca, entre 35% e 60% de fração renovável acaba sendo mais viável utilizar sistema sem baterias. Entre 60 e 80% de fração renovável, novamente se torna mais interessante economicamente fazer uso do sistema com armazenamento de energia.

É notório que a variação do custo de eletricidade para o sistema com baterias é menor do que do que para o que não possui armazenamento, explicando os pontos em que o CDE do sistema sem armazenamento se torna mais viável economicamente.

4.2.3 Sistema de geração com tecnologia única e sistema híbrido

A Figura 18 exibe a comparação entre três sistemas de geração de energia, fotovoltaico, eólico com turbinas de 2,4 kW e híbrido, conectados à rede e com armazenamento de energia. A contínua representa a linha de tendência do CDE do sistema eólico, a linha tracejada o CDE do sistema híbrido e a linha pontilhada a linha de tendência do CDE do sistema fotovoltaico.

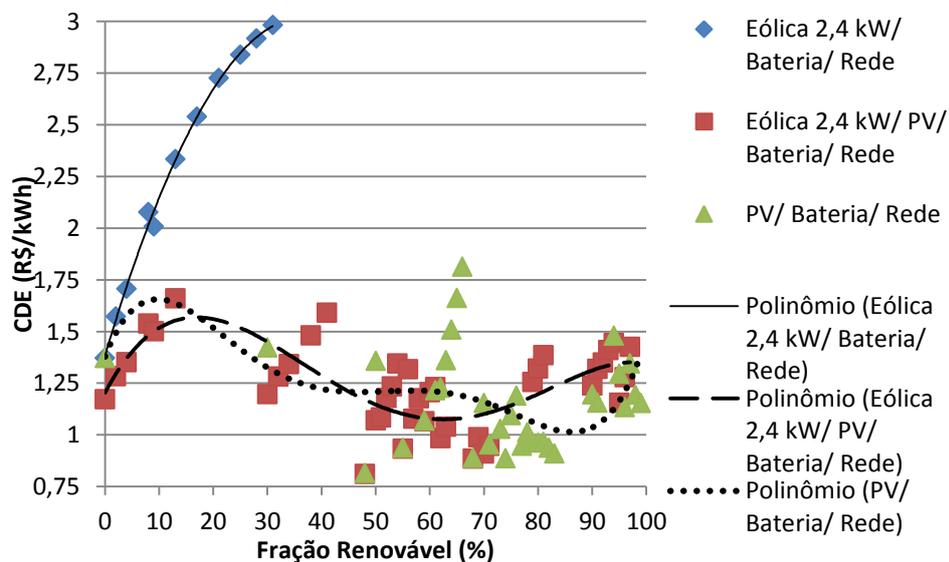


Figura 18 - Comparação entre os custos de eletricidade com fração renovável para as três configurações de sistemas: eólica, fotovoltaica e híbrida.

Com a análise da Figura 18 verifica-se que utilizar geração eólica com turbinas de 2,4 kW na cidade de Araranguá não seria economicamente viável, principalmente uma vez que se tem interesse em elaborar um sistema que trabalhe com maiores frações renováveis de energia. O sistema híbrido e o fotovoltaico apresentam comportamentos semelhantes de CDE com a variação da fração renovável. Dependendo da faixa de fração renovável com que se queira trabalhar, um ou outro sistema apresenta melhor viabilidade econômica. Neste caso, deve-se analisar caso a caso as soluções oferecidas pelo HOMER para estas configurações de sistemas até encontrar uma que satisfaça os objetivos do projeto.

4.3 Comparações entre os resultados ótimos encontrados para cada configuração de sistema

Esta seção apresentará um comparativo entre as soluções ótimas encontradas pelo HOMER para cada configuração de sistema simulado. Comparações de CDE, fração renovável e emissões de dióxido de carbono que deixam de ser feitas com a implementação do projeto escolhido serão feitas. Como o HOMER considera que os sistemas conectados à rede têm a mesma estabilidade da rede em si, não foi possível fazer um comparativo entre a estabilidade, demanda não atendida e PPE dos diferentes sistemas.

4.3.1 Comparações de CDE para as soluções ótimas

A Figura 19 apresenta um comparativo entre os custos de eletricidade dos sistemas ótimos encontrados pelo HOMER.

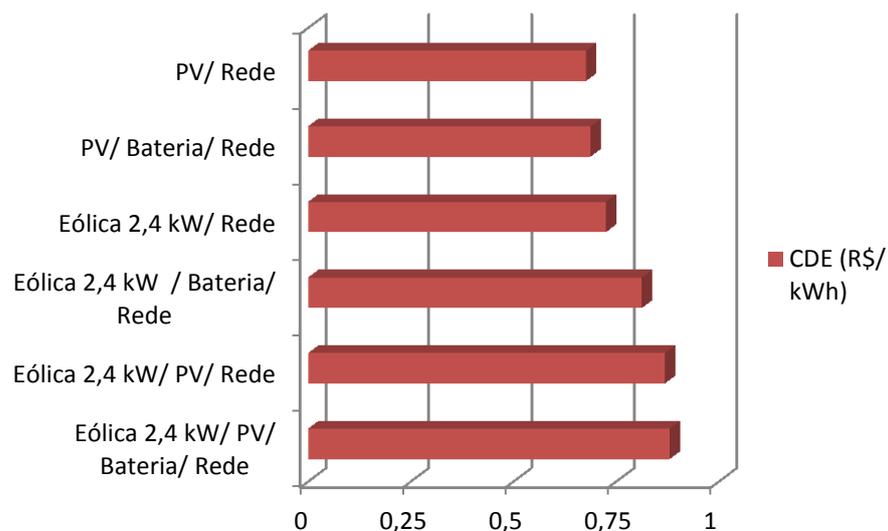


Figura 19 - Custos de eletricidade das soluções ótimas encontradas pelo HOMER.

A configuração ótima de sistema com menor custo de eletricidade encontrada foi para o sistema fotovoltaico conectado à rede, com um CDE de R\$0,677. Aplicar geração fotovoltaica com baterias conectado à rede aumenta um pouco o custo de eletricidade para R\$ 0,688. A terceira melhor solução encontrada foi a de geração eólica, com CDE R\$0,725. A quarta melhor solução encontrada foi a de geração eólica com baterias, apresentando um CDE de 0,813. Por fim, o sistema híbrido é aquele que apresenta os resultados menos interessantes em aspectos econômicos. O sistema híbrido de geração sem o uso de baterias apresenta um CDE de R\$ 0,869 e o com armazenamento de energia de R\$ 0,8804.

4.3.2 Comparação entre as frações renováveis das soluções ótimas

A Figura 20 apresenta um comparativo entre as frações renováveis das soluções ótimas encontradas para cada configuração de sistema.

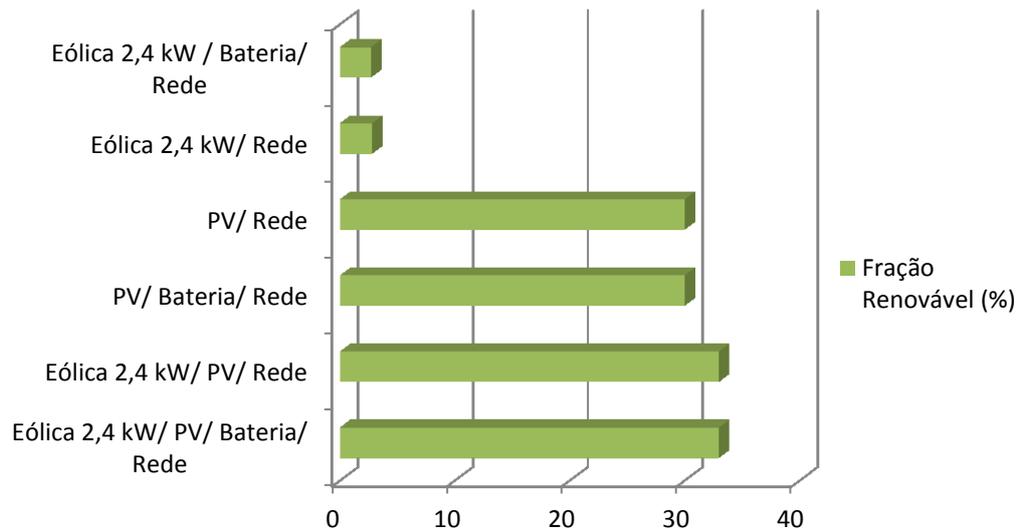


Figura 20 - Frações renováveis das soluções ótimas encontradas pelo HOMER.

Os sistemas híbridos de geração de energia são os melhores em termos de fração renovável, apresentando ambos o sistema com armazenamento de energia e sem armazenamento, frações renováveis de 33%. Em segundo lugar ficam os sistemas de geração fotovoltaica, ambos com 30% de fração renovável. Os sistemas eólicos de geração de energia acrescentam pouca fração renovável, sendo esta de apenas 3%, comprando a maior parte da energia da rede.

4.3.3 Comparação entre dióxido de carbono que deixa de ser emitido com a implementação das soluções ótimas

A Figura 21 apresenta a comparação entre a quantidade de dióxido de carbono que deixaria de ser emitida caso as soluções ótimas encontradas pelo HOMER fossem aplicadas.

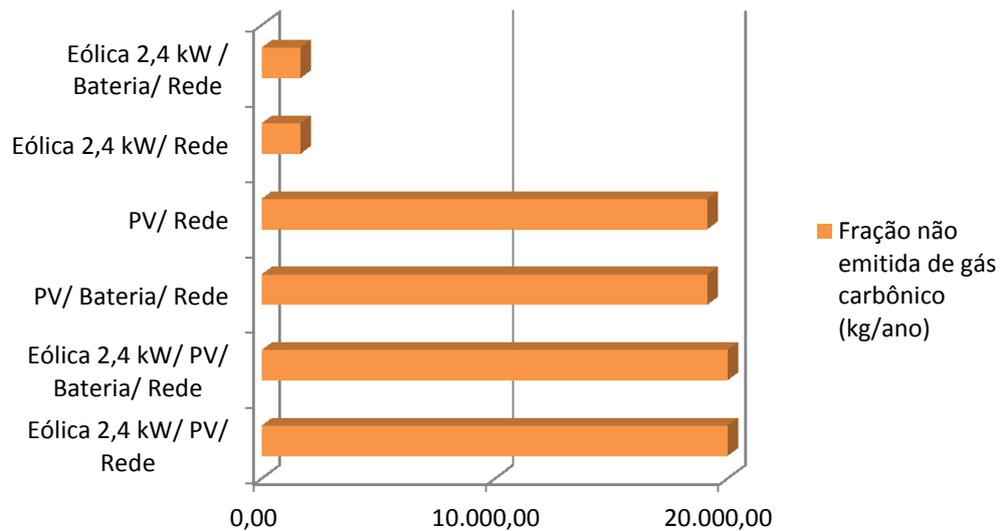


Figura 21 - Quantidades não emitidas de dióxido de carbono das soluções ótimas encontradas pelo HOMER.

Ambos os sistemas híbridos apresentam os melhores resultados em termos de dióxido de carbono não emitido, sendo que o sistema que não usa armazenamento de energia deixa de emitir 20.805,00 kg/ano de gás carbônico e a sua versão com armazenamento de eletricidade evita a emissão de 20.797,00 kg/ano. Em terceiro e quarto lugares estão os sistemas de geração fotovoltaica. O sistema fotovoltaico com baterias evita a emissão de 19.134,00 kg/ano de dióxido de carbono, e o sistema que não utiliza armazenamento evita 20.805,00 kg/ano. Por fim, as soluções menos ecológicas seriam as de geração eólica. A eólica sem bateria evita que 1.670 kg/ano de gás carbônico sejam emitidos na atmosfera, enquanto que o sistema com turbinas eólicas de 2,4 kW e baterias evita 1.662,00kg/ano.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo, simulações com sete diferentes configurações de sistemas foram feitas para alimentar um bairro de baixa renda com 40 unidades consumidoras na cidade de Araranguá. A análise dos resultados leva a concluir que a geração eólica distribuída é menos efetiva economicamente à medida que o porte da turbina diminui. Ainda assim, como o intuito é trabalhar com geração distribuída em pequena escala, optou-se por analisar sistemas que utilizassem turbinas de 2,4 kW.

Os sistemas de geração fotovoltaica acabam sendo os mais economicamente viáveis para a região, seguidos pelos sistemas híbridos e, por fim, pela geração eólica. A análise da curva de potência das turbinas eólicas justifica o emprego destas turbinas para geração distribuída não ser competitivo com a geração fotovoltaica. Isto se deve ao fato de que as

potências nominais das turbinas só seriam atingidas com velocidades de vento bem elevadas, dificilmente atingidas na cidade de Araranguá. Por exemplo, para a turbina de 2,4 kW gerar 2,00 kW de potência, uma velocidade de vento de 10 m/s seria necessária, enquanto que para de 10 kW uma velocidade de 15 m/s é requerida.

Em geral, o uso de sistemas de armazenamento de energia quando o sistema de geração distribuída é conectado à rede encarece o custo da eletricidade e não aumenta muito a fração renovável do sistema, apesar de que as variações no CDE de sistemas com armazenamento de energia são mais constantes. O armazenamento de energia também não afetou muito as quantidades de dióxido de carbono que deixam de ser emitidas pelo sistema, quando se compara as melhores soluções encontradas pelo HOMER. Para sistemas conectados à rede não é possível avaliar a confiabilidade do sistema através de simulações com o HOMER, que considera que a confiabilidade do sistema de geração será a mesma da rede, independente do sistema de geração.

A análise de resultados leva a concluir que o sistema fotovoltaico ainda é a solução mais viável economicamente para a cidade de Araranguá. Contudo, o sistema escolhido pelo HOMER apresenta uma fração renovável baixa, de 30%, quando a intenção é justamente tornar a geração de energia mais amigável para o meio ambiente e melhorar a eficiência energética no contexto do PEE da Celesc.

Um exame mais profundo dos resultados fornecidos pelo HOMER leva à escolha de um sistema de geração fotovoltaico, sem uso de baterias, e que apresenta uma fração renovável de 62%. Este sistema apresenta um CDE de R\$ 0,797 por kWh, possui 75 kW de painéis fotovoltaicos instalados e um conversor de 50 kW. O capital inicial deste sistema é de R\$ 655.977,00. Com a implantação deste sistema, 4.182,00 kg/ano de gás carbônico deixariam de ser emitidos. Um aumento de fração renovável significa que menos eletricidade é consumida da rede, de modo que a eletricidade viaja distâncias menores para abastecer a comunidade, resultando em menores perdas com transmissão e distribuição de energia. Além disto, este sistema vende 47.604 kWh de eletricidade para a rede ao longo do ano. Esta geração excedente pode ser utilizada para abastecer outros bairros da cidade de Araranguá, reduzindo novamente as perdas com transmissão e distribuição de energia e aumentando a eficiência energética da rede.

Outra opção para aumentar a eficiência energética do sistema seria optar por alternativas que façam uso de armazenamento de energia que ajudaria a suprir a demanda de pico. Contudo, apenas grandes capacidades de armazenamento seriam úteis para este fim, encarecendo o CDE.

RENEWABLE TECHNOLOGY OF DISTRIBUTED MICRO GENERATION FOR GRID CONNECTED APPLICATIONS IN LOW INCOME COMMUNITIES IN THE TOWN OF ARARANGUÁ

ABSTRACT

The electrical power generation is directly connected with the economic development of a country. Besides, the human development indexes are related with the fraction of the population that possess access to electricity supply and the commodities that electricity brings. Because of that, the Brazilian government has been investing in programs to expand the access to electricity in Brazil, such as the Light for All (Luz para Todos), for example, and the Energy Efficiency Program of ANEEL, which invests in projects that prove the cost benefits in energy efficiency improvements proposals and in power generation with alternative sources, focusing many cases in low-income consumers. In this context, the computational tool HOMER was used to design a micro generation power system with subsidized sources for a low income community in the town of Araranguá, Santa Catarina. Seven system configurations were simulated, comparing their renewable energy fractions, cost of electricity and carbon dioxide emissions, with the intention to choose a system that is both economically and ecologically viable. The chosen system configuration Works with PV generation, possessing a high renewable fraction and presenting relatively economical cost of electricity.

Keywords: micro generation, renewable power generation, HOMER, Araranguá.

REFERÊNCIAS

- [1] SÁNCHEZ, AS; TORRES, E A; KALID, R A. Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Salvador, v. 49, p.278-290, Mai 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.075>>. Acesso em: 26 Out 2015.
- [2] ANEEL. **Procedimentos do Programa de Eficiência Energética Regulado pela ANEEL**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/073/documento/propee_rpo_18-09-2012.pdf>. Acesso em: 27 set. 2015.

- [3] CELESC. **Eficiência Energética e a Nova Regulamentação do PEE ANEEL**. Disponível em: <http://www.celesc.com.br/peecelesc/images/arquivos/ChamadaPublica2014/IWorkshop/Painel_1_-_Eficiência_Energética_e_a_Nova_Regulamentação_do_PEE_ANEEL_-_Marco_Aurélio_Gianesini.pdf>. Acesso em: 27 set. 2015.
- [4] AMÉRICA DO SOL. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/atlas-solar/>>. Acesso em: 02 jun. 2015.
- [5] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2001. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=1>>. Acesso em: 02 jun. 2015.
- [6] Município de Araranguá. **Araranguá, o paraíso do Sul**. Disponível em: <<http://gpm.fecam.org.br/ararangua/municipio/index/codMapaItem/4493>>. Acesso em: 27 set. 2015.
- [7] NEMA, Pragma; NEMA, R. K; RANGNEKAR, Saroj. A current and future state of art development of hybrid energy systems using wind and PV- solar: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p.2096-2103. 2009.
- [8] DAI, Ran; MESBAHI, Mehran. Optimal power generation and load management for off-grid hybrid power systems with renewable sources via mixed-integer programming. **Energy Conversion And Management**, v. 73, p.234-244, 2013.
- [9] DESHMUKH, M. K. Modelling of hybrid renewable energy systems. **Renewable And Sustainable Energy Reviews: S.S Deshmukh**, v. 12, p.235-249, 2008.
- [10] SINHA, Sunanda; CHANDEL, S. S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p.192-205, 2014
- [11] LAMBERT, Tom; GILMAN, Paul; LILIENTHAL, Peter. **Micropower System Modelling with Homer**. Disponível em: <<http://homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2015
- [12] SEN, Rohit; BHATTACHARYYA, Subhes C. Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. **Renewable Energy**, v. 62, p.388-398, 2014
- [13] TUCKER, Samuel; NEGNEVITSKY, Michael. **Renewable Energy Micro-grid Power systems for Isolated communities**. In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 21^o, 2011, Australásia. AUPEC, 2011. p. 1 - 7.
- [14] MA, Tao; YANG, Hongxing; LU, Lin. Study on stand-alone power supply options for an isolated community. **Electrical Power And Energy Systems**, v. 65, p.1-11, 2015.

- [15] KATTI, Pradeep K.; KHEDKAR, Mohan K. Alternative energy facilities based on site matching and generation unit sizing for remote area power supply. **Renewable Energy**, v. 32, p.1346-1362, 2007
- [16] NELSON, D.B.; NEHRIR, M. H.; WANG, C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/ PV/ fuel cell power generation systems. **Renewable Energy**,v. 31, p.1641-1656, 2006
- [17] TINA, G.; GAGLIANO, S.; RAITI, S.. Hybrid solar/Wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. **Solar Energy**, v. 80, p.578-588, 2006
- [18] KOUTROULIS, Eftichios et al. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. **Solar Energy**, v. 80, p.1072-1088, 2006
- [19] HENAO, Felipe et al. A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor. **European Journal Of Operational Research**, v. 218, p.801-809, 2012
- [20] CANO, Antonio et al. Optimal sizing of stand-alone hybrid systems based on PV/WT/FC by using several methodologies. **Journal Of Energy Institute**, v. 87, p.330-340, 2014.
- [21] SINHA, Sunanda; CHANDEL, S. S.. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. **Renewable Ans Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p.192-205, 2014.
- [22] SILVA, S.b.; SEVERINO, M.M; OLIVEIRA, M.A.G. de. A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: a case study of Tocantins, Brazil. **Renewable Energy**, v. 57, p.384-389, 2013.
- [23] ALMEIDA, Silvio Carlos Anibal de; FREIRE, Raphael Lopes. **Geração de Energia Elétrica Através de um sistema híbrido diesel-eólico para um hospital**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7, 2008, Fortaleza. Fortaleza: Agrener Gd, 2008. p. 1 - 11.
- [24] CELESC. **Chamada Pública PEE CELESC nº 001/2015**. Disponível em: <http://www.celesc.com.br/peecelesc/images/arquivos/ChamadaPublica2015/Edital_CHAMADA_PUBLICA_PEE_CELESC_001-2015_versão_final.pdf>. Acesso em: 02 out. 2015.
- [25] UNESP. **Consumo de Energia dos Aparelhos Elétricos**. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/comsupervig/tabela_consumo.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2015.

- [26] ENERGY, Homer. **Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources**. Disponível em: <<http://www.homerenergy.com/>>. Acesso em: 11 maio 2015.
- [27] PURA, Energia. **Venda e Instalação de Energia solar fotovoltaica e Eólica para Casas e Negócios**. Disponível em: <<https://www.energiapura.com/>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina pelo acesso às bases de dados. Ao professor Luciano Lopes Pfitscher pela paciência, cooperação e disponibilidade para me orientar durante este período conturbado. A minha mãe Adriana e ao meu tio Milton por serem os exemplos que sempre me nortearam e pelo apoio incondicional ao longo destes anos.