

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA INTEGRAÇÃO DE
FONTES RENOVÁVEIS AO MODELO IEEE 14 BARRAS¹
STUDY OF TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF THE
INTEGRATION OF RENEWABLE SOURCES TO THE IEEE 14-BUSES
MODEL**

**Diomar Adonis Copetti Lima², Joelson Lopes Da Paixão³, Mauro Fonseca
Rodrigues⁴, Alzenira Da Rosa Abaide⁵**

¹ Pesquisa desenvolvida no programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFSM, no Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP)

² Doutorando em Engenharia Elétrica - UFSM

³ Doutorando em Engenharia Elétrica - UFSM

⁴ Doutorando em Engenharia Elétrica - UFSM

⁵ Doutora em Engenharia Elétrica - UFSM

Resumo - Neste trabalho propomos a realização de uma análise técnica e financeira da implantação de Geração Distribuída a partir de fontes renováveis como forma de ajudar a suprir a demanda de energia no sistema IEEE 14 barras. Inicialmente foram traçadas as curvas típicas de carga para o sistema analisado, considerando dados reais de distribuidora no RS. Após isso foi criado um cenário de simulação com custos reais para fontes renováveis também nessa região, compondo um sistema híbrido, ligado à rede elétrica de distribuição, com as fontes fotovoltaica, eólica e biomassa, com acumuladores de energia para armazenamento local. Com isso, foi possível estruturar diferentes propostas de sistemas de Geração Distribuída para este caso particular, embora forçou-se o mesmo a ter 50% da energia de fonte renovável, onde, pelo menos, 20% seria de eólica ou 25% de fotovoltaica, de acordo com a melhor estruturação financeira. Os dados característicos, tais como: temperatura média, velocidade de ventos, radiação solar e características específicas de cada sistema de geração de energia foram importados de fontes confiáveis e aplicados ao *software* HOMER, utilizado como ferramenta para realização das análises iniciais de percentual de geração a partir das restrições impostas. Esta primeira resposta indicou um sistema híbrido composto basicamente por geração eólica (80%), biomassa (1%), fotovoltaica (9%) e rede elétrica (10%) como o mais vantajoso, apresentando a estimativa de custo total para implementação e o detalhamento de características técnicas e econômicas de cada tipo de geração envolvida.

Abstract - In this work we propose to perform a technical and financial analysis of the implementation of Distributed Generation from renewable sources as a way to help supply the energy demand in the IEEE 14-buses system. Initially, the typical load curves for the analyzed system were drawn, considering actual data from the distributor in RS. After that, a simulation scenario with real costs for renewable sources was created in this region, composing a hybrid system, connected to the distribution grid, with photovoltaic, wind and biomass sources, with local energy storage. With this, it was possible to structure different proposals of Distributed

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Generation systems for this particular case, although it forced the same to have 50% of the energy of renewable source, where at least 20% would be wind or 25% of fotovoltaic, according to the best financial structuring. Characteristic data, such as: mean temperature, wind velocity, solar radiation and specific characteristics of each power generation system were imported from reliable sources and applied to the HOMER software, used as a tool to perform the initial analyzes of percentage of generation a restrictions. This first response indicated a hybrid system composed basically of wind power (80%), biomass (1%), fotovoltaic (9%) and power grid (10%) as the most advantageous, presenting the total cost estimate for implementation and detailing the technical and economic characteristics of each type of generation involved.

Palavras Chave - Sistemas Elétricos Híbridos, Geração Distribuída, Otimização de Fontes, IEEE 14 barras.

Keywords - Hybrid Electrical Systems, Distributed Generation, Source Optimization, IEEE 14-buses.

I - INTRODUÇÃO

Inserida na sociedade em meados do século XIX, a distribuição da energia elétrica que inicialmente era em corrente contínua, evoluiu para sistemas maiores baseados em corrente alternada. Dessa maneira, surgiram os primeiros sistemas elétricos de potência que atualmente se consolidaram sob a mesma estrutura primordial básica [1]. Esses sistemas, de modo sucinto, em maioria correspondem a grandes blocos de geração centralizados, nos quais a energia gerada é transmitida por longas linhas de transmissão em alta tensão até os centros de carga. Nesses, a tensão é rebaixada para a média e a baixa tensão, e a energia elétrica chega aos consumidores pelos Sistemas Elétricos de Distribuição (SED). A topologia do sistema elétrico de potência se manteve a mesma no decorrer dos anos, embora gradativamente houvesse a inserção de novas tecnologias e a automação de muitos processos [2].

Com a adequação da legislação do setor elétrico, visando facilitar a inserção de novas fontes de geração, os sistemas elétricos de potência (SEP) começaram a passar por transformações mais acentuadas. A conjuntura do sistema elétrico, que até então consistia em grandes gerações centralizadas, começa a dividir espaço com a entrada de pequenos sistemas de Geração Distribuída (GD). O fluxo de potência que era apenas em sentido unidirecional, da fonte para as cargas, passa a circular de modo bidirecional, das cargas para a fonte, e há diversificação da matriz energética [3]. O Brasil, por exemplo, possui uma matriz baseada em geração hidráulica e térmica, cuja atual expansão do sistema de geração vem agregando novas fontes de energia, de caráter limpo e renovável, tais como: a eólica, biomassa, biocombustíveis, fotovoltaica, entre outras [4]. Na Figura 1 é apresentado o percentual de participação de cada fonte na geração de energia elétrica.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

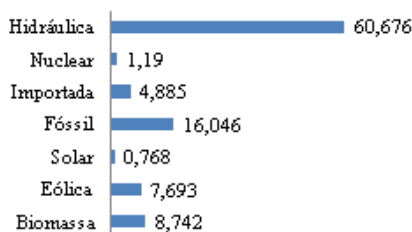


Figura 1: Participação percentual das fontes na matriz energética brasileira [5].

A geração proveniente de fontes hídricas, embora seja limpa e renovável, apresenta alguns impactos ambientais e sociais grandes, como o alagamento de grandes áreas e a remoção de famílias das áreas de construção da barragem. Além dos impactos causados durante a construção das hidrelétricas, tem-se também que geralmente estes empreendimentos são distantes dos centros de carga e assim demandam longas linhas de transmissão para o transporte da energia [6].

Tanto no Brasil quanto no exterior, políticas e incentivos estão sendo desenvolvidos para reduzir a participação de fontes poluentes na matriz energética, facilitar e viabilizar a integração da GD de pequeno e médio porte, além de promover uma automação inteligente das redes. Um dos países, a nível mundial, que atualmente é destaque e modelo na implantação destes novos conceitos é a Alemanha, a qual já possui boa parte de sua geração baseada em fontes fotovoltaicas [7].

Nesse contexto, é necessário ressaltar que o SEP está em constante modificação, adequando-se às condições de demanda, entrada e saída de consumidores, bem como geradores. Neste momento a entrada de fontes renováveis de energia através de Geração Distribuída (GD) vem criando um cenário diferente a cada nova ativação, podendo gerar novas características/problemas à rede de distribuição de energia elétrica. A partir da simulação computacional no modelo IEEE 14 barras disponibilizado pelo CEPEL, é possível analisar os efeitos e consequências da entrada dos blocos de GD quanto à tensão e fluxo de potência, após sua otimização financeira e restritiva efetuada com o Homer.

II - FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A GD é uma forma de aproveitamento de pequenos potenciais elétricos, que pode ser entendida como a geração descentralizada de energia elétrica a partir de fontes diversas, tais como: vento, biomassa, luz solar e o biodiesel. Atualmente, essa forma de geração de eletricidade vem ganhando espaço considerável em diversos países, uma vez que ela apresenta muitos benefícios à população e ao meio ambiente [8]. Ao descentralizar a geração de energia, a GD pode postergar ou tornar desnecessária a construção de grandes e onerosos empreendimentos de expansão.

O crescimento da implantação de sistemas de GD no Brasil tem sido significativo nos últimos anos. Os sistemas de GD começaram a ganhar espaços no Brasil a partir da Resolução Normativa

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

482/2012, a qual tinha o propósito de reduzir as barreiras para a instalação da GD de pequeno porte. Essa resolução foi um dos primeiros passos para garantir que fontes renováveis de energia possam ser conectadas aos sistemas de distribuição, a partir do estabelecimento de faixas de potência instalada correspondentes a cada modalidade, além de definir concomitantemente as regras sobre o sistema de compensação de energia [9]. A base desta resolução não mudou, mas as classes de potência instalada e os prazos para a compensação dos créditos, gerados pela energia excedente injetada na rede, foram alterados pela resolução normativa nº 687/2015 [10].

Nas mudanças apresentadas, foi criada uma nova classificação por faixa de potência das unidades consumidoras com GD, assim, classifica-se como microgeração unidades geradoras com potência instalada de até 75 kW; compreendem a minigeração aquelas unidades consumidoras com potência instalada maior que 75 kW e menor ou igual que 3 MW para geração hídrica, e menor ou igual que 5 MW para as demais formas de geração [10]. A seguir será feita uma breve explanação a cerca das três fontes utilizadas na GD, abordadas nesse artigo.

A. Sistemas Eólicos

São sistemas de geração de eletricidade a partir da cinética dos ventos. Como os dados sobre velocidade do vento, medida em vários pontos do país, são disponibilizados no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com discretização horária, pode-se abordar a geração eólica a partir da velocidade do vento. A relação entre a potência gerada P e a velocidade do vento v é graficamente representada na curva de potência ilustrada na Figura 2, a conversão de energia eólica em energia elétrica se dá a partir de uma velocidade mínima, denominada velocidade de partida v_p . A potência da turbina é limitada ao valor de P_n à velocidade nominal v_n . Para as velocidades entre v_p e v_n , a potência elétrica P gerada pela turbina eólica cresce com o cubo da velocidade do vento v transversal à área A varrida pelo rotor, conforme a equação (1) [11].

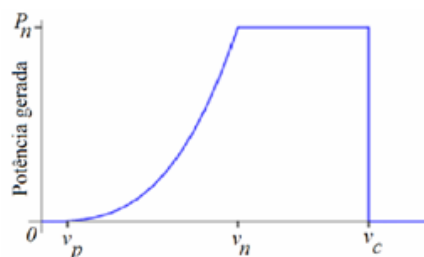


Figura 2: Curva de potência típica de uma turbina eólica [2].

$$P = 0,5 \cdot C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1)$$

Onde: η_m é o rendimento mecânico da caixa de transmissão; η_g é o rendimento do gerador; ρ é a densidade do ar; C_p é o coeficiente de potência da turbina, que expressa a parcela (%) da potência disponível de vento que é extraída pela turbina.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

A partir da velocidade nominal, o controle de velocidade de turbina mantém a potência gerada constante até que, para velocidades superiores a velocidade de corte v_c , a turbina é retirada da operação para preservá-la de esforços mecânicos excessivos. A Equação (1) mostra que para prever a potência eólica gerada pode-se começar pela previsão de velocidade de vento [11].

B. Sistemas Fotovoltaicos (SFVs)

O aproveitamento da radiação solar como fonte de energia é bastante antigo e por muito tempo a fonte tem sido utilizada no aquecimento de água. Apenas em 1839 que foi observado o efeito fotovoltaico pela primeira vez. A descoberta é atribuída ao físico francês, Edmond Becquerel, que verificou que placas metálicas de platina ou prata, mergulhadas em eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz [12].

Desde os primeiros experimentos, evolução da tecnologia para o uso de junções com semicondutores, até chegar aos modelos de células fotovoltaicas comercializadas atualmente; houve grande evolução na tecnologia, no que tange aos processos de fabricação, materiais empregados e no rendimento da conversão da radiação solar em eletricidade. O aprimoramento nas tecnologias aplicadas no desenvolvimento dos painéis fotovoltaicos permitiu que estes se tornassem economicamente viáveis e começassem a ganhar representatividade no mercado da geração de eletricidade [13].

Os principais tipos de SFVs existentes são: os sistemas isolados (*off-grid*), os sistemas híbridos e os sistemas interligados à rede (*on-grid*). Os sistemas isolados correspondem àqueles instalados para alimentação de cargas isoladas ou em regiões em que ainda é difícil o acesso à eletricidade, como regiões despovoadas, desertas ou interiores do país.

De maneira geral, um SFV é composto por um conjunto gerador, um bloco condicionador da potência e, opcionalmente, um bloco armazenador. Os elementos necessários para a instalação de um SFV são dependentes da configuração do sistema e das demais aplicabilidades que se deseja ter. Para SFVs conectados à rede elétrica os principais componentes são: os módulos fotovoltaicos, os condutores, os inversor(es) e os dispositivos de proteção, seccionamento e medição [13]. Em termos de energia gerada, tem-se que a estimativa da geração fotovoltaica média é dada por (2) [14].

$$E = A * r * H * PR \quad (2)$$

em que: E = Energia (kWh); A = Área total dos MFVs (m^2); r = Rendimento dos MFVs (%); H = Irradiação solar média por dia/mês/ano (kWh/m^2); PR = Taxa de desempenho do sistema (%).

C. Sistemas de geração a partir da Biomassa

O Brasil se destaca como um dos principais celeiros do planeta, apresentando um elevado potencial para geração de energia a partir da biomassa. O conceito de biomassa pode ser descrito

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

como qualquer matéria orgânica que pode passar por um processo de transformação para gerar energia mecânica, térmica ou elétrica [15]. De acordo com [16] o Brasil em 2017 teve uma contribuição de fontes de geração a partir de biomassa de 49.385 GWh, representando uma participação em torno de 8,4 % do cenário nacional. Segundo [17] a previsão para a ampliação do parque gerador a partir de usinas a biomassa é da ordem de 2600 MW em 2027. Os principais sistemas de geração a partir de biomassa no Brasil são formados pelas empresas de cultivo de cana-de-açúcar no Sudeste brasileiro, com potencial técnico excedente de 2.244,33 MW [5].

Estudos apontam uma nova possibilidade para o RS, onde o potencial de suinocultura, sobretudo na mesorregião Noroeste, apresenta um nível elevado de produção de biogás, chegando a um potencial técnico estimado superior a 13.000 (treze mil) m³/h. No entanto, essa energia que poderia ser convertida em até 37 MW ainda depende de fatores financeiros para sua viabilidade e a interligação dos pequenos produtores para concentrar o metano disponível em plantas de maior capacidade de conversão energética [18]. Outras regiões do RS, apresentam potencial elevado para uso da casca de arroz, com expectativa superior a 162 MW de potência. Neste tipo de insumo, predominam como alternativas eficientes: a combustão pirolítica e a queima em suspensão [19]. Onde a primeira apresenta viabilidade para pequena escala. Para obter o potencial de geração da casca de arroz, devemos considerar o seu Poder Calorífico Inferior (PCI) e o rendimento da alternativa adotada para a geração. Seu potencial pode ser obtido a partir da equação (3) [20].

$$E = \frac{[(TA * 0,3) * PCI * 0,15]}{860} + 8322 \quad (3)$$

em que: E = Energia (kWh/ano); TA = Toneladas de arroz; PCI = Poder Calorífico Inferior (3384 kcal/kg).

III - MODELAGEM DO SISTEMA ANALISADO E TECNOLOGIAS DE PROJETO

O *software* HOMER® é uma ferramenta para projeto e análise de sistemas híbridos de potência, que possibilita avaliar a viabilidade técnica e econômica para diversas combinações de tecnologias e disponibilidade de recursos de energia. O programa compreende recursos como geradores convencionais, turbinas eólicas, módulos fotovoltaicos, geração hidrelétrica, baterias, células combustíveis, biomassa, entre outras.

A. Considerações Iniciais

A premissa para este projeto, é que o sistema de geração distribuída deve suprir parte a energia requerida no modelo IEEE 14 barras. Dessa forma, pretende-se realizar o projeto de viabilidade técnica e econômica considerando os custos de implementação de diversas fontes em um sistema híbrido conectado a rede, considerando parâmetros como custos de operação, manutenção, características locais, entre outros. Para as simulações, utilizou-se de um sistema composto de: i)

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Painéis fotovoltaicos; ii) Turbinas eólicas; iii) Geradores à Biomassa; iv) Banco de Baterias e v) Inversores. A Figura 3 ilustra a estrutura do sistema utilizado nas simulações para o atendimento da carga.

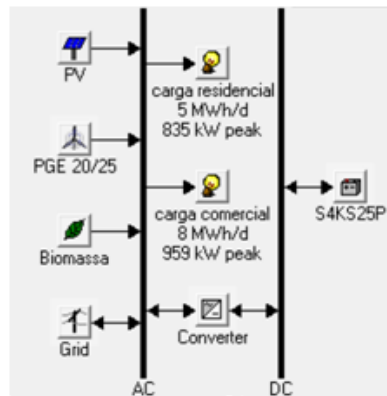


Figura 3: Representação do sistema híbrido para simulação.

As setas indicadas na Figura 3 representam o fluxo de corrente.

B. Modelagem da Carga

Cada fonte de geração foi modelada no *software* de acordo com suas especificidades, sendo necessário encontrar uma curva de geração para cada fonte. O perfil de carga considerado para a rede em que se deseja conectar o(s) sistema(s) de GD(s) é do tipo residencial e industrial. Assim, o perfil residencial é ilustrado na Figura 4, para dias úteis e na Figura 5 para finais de semana.

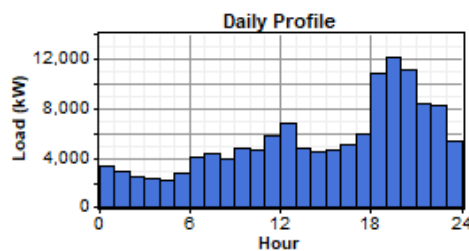


Figura 4: Perfil de carga residencial para dia de semana.

Pode-se verificar que o comportamento da carga durante o dia de semana apresenta uma concentração de demanda nos horários relativos ao final de tarde e início da noite e pequenas elevações entre 10 e 13 horas.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

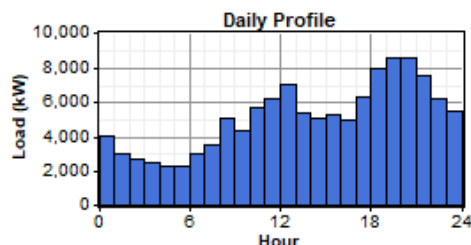


Figura 5: Perfil de carga residencial para final de semana.

Já o perfil industrial é ilustrado na Figura 4, para dias úteis e na Figura 5 para finais de semana.

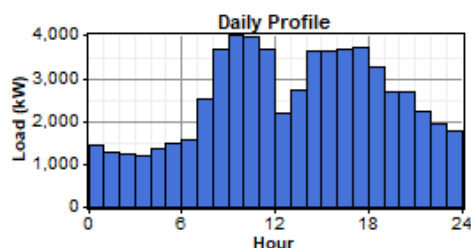


Figura 6: Perfil de carga industrial para dia de semana.

Na Figura 6 verifica-se que a carga industrial apresenta curva de carga praticamente constante durante o horário comercial, com alívios de carga durante o meio dia e a noite. Durante os finais de semana o comportamento da carga se altera em relação ao de dias de semana. Há redução na demanda em todos os períodos.

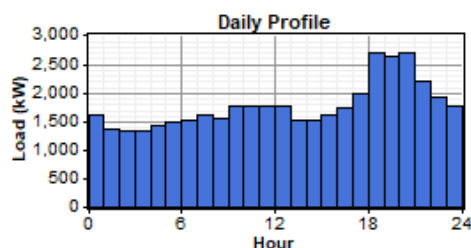


Figura 7: Perfil de carga industrial para final de semana.

C. Painéis Fotovoltaicos

Para o projeto de painéis fotovoltaicos é necessário determinar a radiação solar mensal ao longo de um ano, assim como a incidência média mensal de ventos para o local de instalação. Assim, utilizaram-se os dados disponíveis através do banco de dados do *Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA)*, inserindo a latitude, longitude e fuso horário da região sul do Rio Grande

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

do Sul. Os dados da radiação solar média mensal são ilustrados na Figura 8.

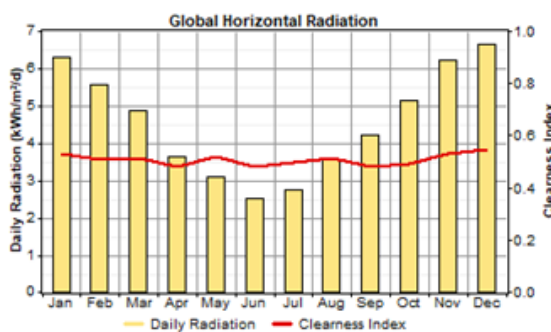


Figura 8: Perfil de radiação mensal ao longo do ano.

D. Turbinas Eólicas

Especificamente em relação a características dos geradores eólicos, têm-se três dados relevantes: curva de potência, vida útil do projeto e altura do eixo da turbina. O aerogerador adotado neste trabalho é do fabricante PGE por possuir o melhor desempenho devido às características de velocidades dos ventos estimadas na região, conforme já apresentado na Figura 9.

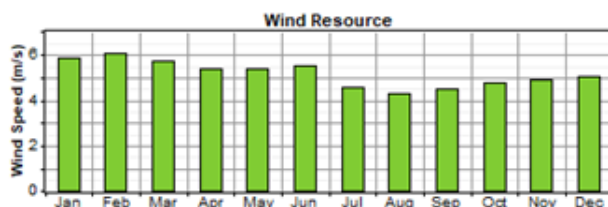


Figura 9: Perfil da velocidade média do vento ao longo do ano.

A potência nominal da turbina é de 25kW com potência média de 8 kW para ventos de 5 m/s e de 13,3kW a 6 m/s . A curva de potência gerada pela velocidade do vento da turbina eólica é ilustrada na Figura 10.

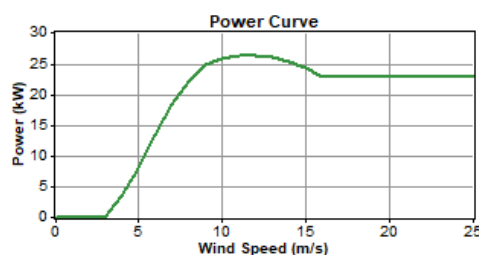


Figura 10: Curva de potência e velocidade do vento da turbina PGE 20/35.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

E. Geração à Biomassa.

O projeto para gerar energia elétrica a partir de biomassa depende do tipo de material combustível utilizado. A matéria prima faz um ciclo renovável a partir da sua troca de gás carbônico por oxigênio, Figura 11.

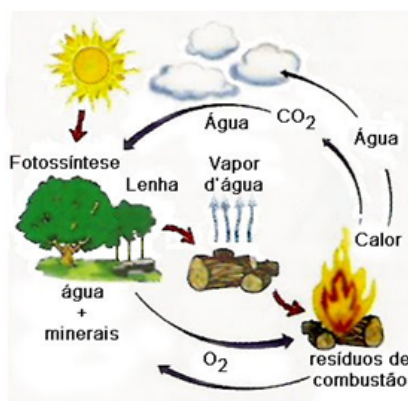


Figura 11: Ciclo da biomassa como energia renovável.

A partir da exploração da biomassa é necessário conhecer o poder calorífico dos materiais. A Figura 12 apresenta os processos de conversão energética [21].

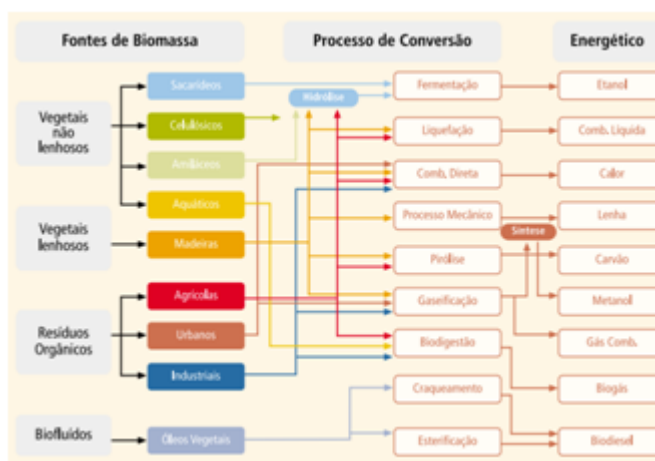


Figura 12: Diagrama esquemático da conversão energética da biomassa.

Tabela I - Poder calorífico inferior de materiais, bagaço e a palha da cana colhida, com 50% de umidade [22].

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

RESÍDUOS DAS CULTURAS	PODERES CALORÍFICOS INFERIORES (kcal/kg)
Bagaco de Cana-de-Açúcar	2130 ¹
Palha de Cana-de-Açúcar	3105 ¹
Casca do Arroz	3200
Palha do Arroz	3821
Capim-Elefante	4200
Palhada do milho	4227
Palha da Soja	3487

Em termos de potencial de geração o poder calorífico do material ainda depende de fatores de conversão para movimentação do gerador, requerendo estudos específicos para cada fonte. Alguns dos processos envolvidos são: termo-químico ou pirólise com caldeiras em altas temperaturas, físico-químico com combustão interna e bioquímica com hidrólise ou fermentação/destilação [16]. No modelo matemático aplicado ao software Homer, ele considera o volume de material e sua relação de poder calorífico na conversão de acordo com a curva disponibilizada pelo gerador escolhido, determinando o parâmetro de kg/h/kW de energia a ser transformada.

F. Banco de Baterias

O processo de armazenamento de energia para fontes renováveis obedece, conforme [23], o aproveitamento instantâneo, ou seja, ou se transforma a energia disponibilizada instantaneamente ou esta se perde. Os resíduos sólidos urbanos e biomassa, em geral, ainda podem ser armazenados enquanto materiais para suprir geradores posteriores, mas a radiação solar e a força dos ventos não podem ser simplesmente estocadas. Assim, as baterias, ou acumuladores de energia, surgem como uma alternativa para armazenamento de eletricidade e uso conforme a necessidade do usuário. No entanto, as baterias, acopladas em bancos acumuladores de energia, obedecem a ciclos de carga e descarga que determinam sua vida útil média, conforme a curva da Figura 13.

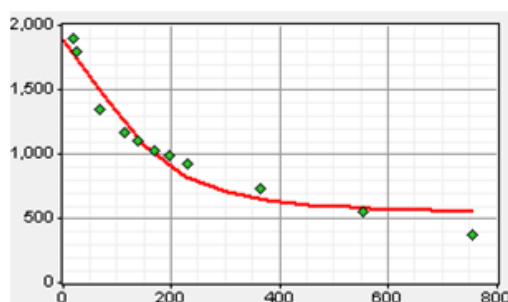


Figura 13: Curva Capacidade (Ah) X Corrente de descarga (A).

Além disso, quanto maior o número de eventos de carga e descarga e maior o percentual desses eventos, menor a vida útil das baterias. No entanto, para compor um sistema de geração a partir de fontes renováveis é importante prever acumuladores para poder disponibilizar essa energia nos

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

momentos que a carga efetivamente puder consumi-la, aumentando a eficiência do sistema.

IV - CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO E DOS CUSTOS DOS SISTEMAS DE GD

A. Sistema IEEE 14 Barras

A implantação cada vez mais presente de plantas de GD no sistema elétrico, a partir de microgeração nos sistemas de distribuição ou minigeração, levam à necessidade de se conhecer as possíveis contribuições destas plantas à geração da energia elétrica consumida do sistema. O cenário de estudo montado partiu da implementação do sistema IEEE 14 barras no *software* ANAREDE do Cepel, que apresenta as seguintes características:

- Uma barra de referência; Quatro barras PV (barra 02 - gerador síncrono, barra 03 - compensador síncrono de 40 MVar, barra 06 - compensador síncrono de 24 MVar e barra 08 - compensador síncrono de 24 MVar); Nove barras PQ; Vinte ramos (desesete linhas e três transformadores); Onze cargas (259 MW e 75 MVar); Um capacitor *shunt* (19 MVar);

Para o sistema IEEE 14 barras, definiu-se como interesse básico o suprimento de até 5% da carga total do sistema (até 13 MW) por fontes de geração renováveis. As fontes consideradas são: geração eólica, sistema a partir de biomassa, plantas fotovoltaicas, além da possibilidade de armazenamento de energia em baterias.

B. Custos e Considerações Técnicas

O HOMER possui um módulo de custos para cada fonte de geração. Sendo necessário digitar pelo menos um valor de capital. Por exemplo, se for um sistema fotovoltaico, deve ser incluído os custos associados ao sistema fotovoltaico como módulos de hardware e montagem da instalação. O programa sempre busca o sistema ideal, considerando a capacidade de geração das fontes indicadas. Já a quantidade e capacidade do sistema que se deseja verificar são informadas em outra tabela (espaço de busca). Assim, a Tabela II mostra os custos de sistemas fotovoltaicos, com o módulo conversor que consiste em um inversor CC/CA já incluso.

Tabela II: Sistema Fotovoltaico com Conversor CC/CA.

Descrição	Capacidade (kW)	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M (\$/ano)
SFV	1	4.050	4.050	100
SFV	500	2.025.000	2.025.000	5.000
SFV	1000	4.050.000	4.050.000	10.000

Para essa fonte de geração foi adotado o valor médio de \$ 4,05 por W_p instalado [24]. No espaço de busca, considerou-se que os sistemas fotovoltaicos poderiam ser de 5 kW até 1.000 kW. A Tabela III mostra os custos considerados para um banco de baterias chumbo ácido 4 V, 1900Ah (7,6 kWh) - modelo (Surrette 4KS25P). A vida útil da bateria foi considerada de 3 anos. Cada banco é

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

constituído de 3 baterias, formando um barramento de 12 V. O custo do banco depende da capacidade nominal da bateria, conforme Tabela III.

Tabela III - Banco de Baterias.

Descrição	Quantidade	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M (\$/ano)
Bateria 4KS25P	9	9.000	9.000	0

A Tabela IV refere-se a uma turbina eólica PGE 20/25, incluindo em capital os custos como: torre, controlador, condutores, instalação e manutenção. A altura do eixo da turbina foi considerada igual a 25 metros. O universo de busca adotado foi de 1 turbina até 75 turbinas. Tomou-se como premissa que o custo de O&M seria de 3% do custo inicial do sistema eólico ao ano.

Tabela IV - Turbina eólica PGE 20/25.

Descrição	Quantidade	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M (\$/ano)
Turbina PGE 20/25	1	150.000	125.000	4.500
Turbina PGE 20/25	75	11.250.000	11.250.000	337.000

A Tabela V ilustra o custo de 14 kW de potência para biomassa, proveniente de biodigestor. Os custos de operação e manutenção não consideram os custos de combustível, uma vez que o HOMER calcula os custos de combustível separadamente.

Tabela V - Biodigestor de 14 kW.

Descrição	Capacidade (kW)	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M (\$/hora)
Biodigestor	14	30.000	25.000	0,1

Para a geração de eletricidade a partir de um sistema biodigestor foi adotado apenas a possibilidade de haver ou não uma planta de 14 kW. O custo de operação e manutenção por ano do sistema, foi definido em 3% do custo inicial do sistema. Dessa forma o valor por hora ficou em \$ 0,1. Na Tabela VI são apresentados os custos dos inversores. O universo de busca foi delimitado de 1 kW a 100 kW. Não foram considerados custos de O&M. A vida útil do inversor é de 10 anos e a eficiência > 90%.

Tabela VI - Custos do conversor CC/CA.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Descrição	Capacidade (kW)	Capital (\$)	Substituição (\$)	O&M (\$/ano)
Conversor CC/CA	1	2.250	2.250	0
Conversor CC/CA	100	48.500	48.500	0

Quanto ao custo da tarifa de eletricidade comprada na rede (TUSD + TE), adotou-se o valor de R\$ 0,55 por kWh, que é o valor médio cobrado pelas distribuidoras no Brasil [25]. Não foram aplicadas tarifas diferenciadas para horários de ponta e/ou finais de semana. Para realizar a simulação foram adotadas as restrições de 25% de energia proveniente da fonte fotovoltaica ou 20% da eólica, com 50% renovável para o total da carga conectada, conforme Figura 3. Também foi definido que o tempo de vida do projeto seria de 25 anos.

V - SIMULAÇÃO E DISCUSSÃO

Para o cenário estipulado, o *software* Homer trouxe várias possibilidades de composição onde uma é apresentada na Figura 14 e detalhada na Tabela VII. Cabe comentar que o melhor resultado financeiro é proveniente da composição de eólica e rede elétrica, mas sem atender as restrições impostas. Assim, apenas uma estrutura atende todos os requisitos.

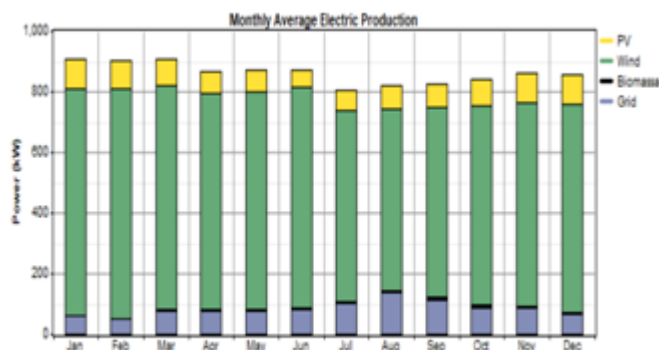


Figura 14: Composição energética do sistema em kW X mês do ano (Homer).

Tabela VII - Composição energética do sistema proposto para o Homer.

Componente	Produção (kWh/ano)	Fração (%)
Fotovoltaica	704.702	9
Eólica	6.034.591	80
Biomassa	51.745	1
Rede elétrica	747.777	10
Total	7.538.815	100

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

Foi considerada a melhor solução a que atende a demanda com o menor custo. O sistema híbrido da melhor solução é composto por turbinas eólicas, geração à biomassa, geração fotovoltaica, rede elétrica, banco de baterias e inversores. Através da análise financeira é possível perceber grande competitividade de fontes renováveis como energia eólica frente às tradicionais fontes de energia elétrica.

VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi realizada uma análise técnica e econômica de conexão de fontes de Geração Distribuída visando suprir parte da carga (5% ou 13 MW) do sistema IEEE 14 barras. A modelagem realizada no *software* HOMER indicou como melhor configuração um sistema híbrido composto por geradores eólicos, geração à biomassa, geração fotovoltaica, rede elétrica, banco de baterias e inversores, considerando aspectos financeiros e técnicos. A partir das restrições e características definidas, o sistema estimou em \$16.274.841 o custo de implementação do sistema.

De forma geral, o *software* HOMER mostrou ser uma ferramenta muito interessante para realização de análises de projetos relacionados a GD e fontes alternativas de energia, possibilitando a inserção de dados reais e específicos da região para a qual está sendo realizada a análise. Além disso, a possibilidade de restringir o uso de determinadas fontes, permite configurar sistemas híbridos que explorem da melhor forma possível os potenciais energéticos da região onde a GD será inserida, garantindo um melhor aproveitamento do capital investido e também uma maior eficiência do próprio sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] ABB Group. (2012) Tesla vs Edison: a guerra das correntes. [Online]. <http://www.abb.com/cawp/seitp202/31b6f1d9686553b1c12579880036eaaa.aspx>
- [2] Nelson Kagan, Carlos C. B. OLIVEIRA, and Ernesto J. ROBBA, *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.*, 2010.
- [3] CGEE, *Redes elétricas inteligentes: contexto nacional.*, 1st ed., Tatiana de Carvalho Pires, Ed. Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2012.
- [4] Laura Lisiane Santos, Luciane Canha, Daniel Bernardon, and Roberto Pressi, "Methodology for Long-Term Forecasting to Insertion of DG in Distribution Systems," *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, p. 6, 2015.
- [5] Aneel. (2018) Banco de Informação da Geração (BIG). [Online]. <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>
- [6] EPE, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica," Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2016.
- [7] Agmar Ferreira et al., "Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 181-191, março 2017.
- [8] Hassan Al Garni and Anjali Awasthi, "Techno-Economic Feasibility Analysis of a Solar PV Grid-Connected System with Different Tracking Using HOMER Software," *5th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering*, pp. 217-222, 2017.

Evento: XXIV Jornada de Pesquisa

- [9] ANEEL. (2012) Resolução Normativa Nº 482. [Online].
www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf
- [10] ANEEL. (2015, novembro) RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687. [Online].
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>
- [11] José Francisco Moreira Pessanha, Ilitch Vitali Gomes da Silva, and Reinaldo Castro Souza, "Previsão da velocidade do vento com sistema de inferência neuro-fuzzy adaptativo," *XIII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha*, pp. 1-12, agosto 2010.
- [12] António M. Vallêra and Miguel C. Brito, "Meio século de história fotovoltaica," *Gazeta da Física*, pp. 10-15, 2006.
- [13] Cepel and Cresesb. (2014) Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. [Online].
www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf
- [14] Henrique Fernandes Camilo, Miguel Edgar Morales Udaeta, André Luiz Veiga Gimenes, and Jose Aquiles Baesso Grimoni, "Assessment of photovoltaic distributed generation - Issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 71, pp. 712-719, 2017.
- [15] Alexandre Barin, "Seleção de sistemas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos: uma abordagem com a lógica difusa," Tese (Tese em Engenharia Elétrica) - UFSM, Santa Maria - RS, 2012.
- [16] EPE, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica," Brasília - DF, 2018.
- [17] MME and EPE, "Plano decenal de expansão da energia 2027," Brasília - DF, 2018.
- [18] G. H. DANIELSSON et al., "Potencial energético para uso de biodigestores no noroeste do estado do rio grande do sul e comparação com investimentos da usina hidrelétrica de Panambi," *Revista da Setrem*, no. 32, 2018.
- [19] Ronaldo Hoffmann, "Método avaliativo da geração regionalizada de energia, em potências inferiores a 1MW, a partir da gestão de resíduos de biomassa - o caso da casca de arroz," UFRGS, Porto Alegre, Tese de Doutorado 1999.
- [20] S. T. Coelho, M. B. Monteiro, and M. R. Karniol, "Atlas de energia do Brasil," São Paulo - SP, 2012.
- [21] MME, *Balanco Energético Nacional*. Brasília: ANEEL, 1982.
- [22] EPE, *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: MME, 2007.
- [23] Felix FARRET, *Pequenos Aproveitamentos de Energia Elétrica*. Santa Maria: UFSM, 2014.
- [24] Greener, "Modelos de negócio na geração distribuída Solar Fotovoltaica," São Paulo, 2019.
- [25] ANEEL. (2019, junho) Ranking das Tarifas. [Online].
<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>