

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENERGIA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Felipe Diogo João Bettioli

Análise e dimensionamento de sistema autônomo híbrido: integração de
geração de energia eólica, solar e combustão em residência

Araranguá

2023

Felipe Diogo João Bettioli

Análise e dimensionamento de sistema autônomo híbrido: integração de geração de energia eólica, solar e combustão em residência

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Engenheiro de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli.
Coorientadora: Profa. Dra. Leticia Toreti Scarabelot.

Araranguá

2023

Felipe Diogo João Bettioli

Análise e dimensionamento de sistema autônomo híbrido: integração de geração de energia eólica, solar e combustão em residência

O presente Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia de Energia, foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Leonardo Elizeire Bremermann, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

André Possamai Rosso, Me.
Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Profa. Elise Sommer Watzko, Dra.
Coordenadora em exercício do Curso de Graduação em Engenharia de Energia

Prof. Giuliano Arns Rampinelli, Dr.
Orientador

Profa. Letícia Toreti Scarabelot, Dra.
Coorientadora

Felipe Diogo João Bettioli
Autor

Araranguá, 04 de agosto de 2023.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bettioli, Felipe Diogo João

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO HÍBRIDO:
INTEGRAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA, SOLAR E COMBUSTÃO
EM RESIDÊNCIA / Felipe Diogo João Bettioli ; orientador,
Giuliano Arns Rampinelli, coorientadora, Leticia Toretí
Scarabelot, 2023.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Geração híbrida off grid. 3.
Sistemas isolados. 4. Geração de energia limpa. 5.
Residência independente. I. Rampinelli, Giuliano Arns .
II. Scarabelot, Leticia Toretí. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Energia. IV.
Título.

AGRADECIMENTOS

De forma geral, acredito que todos que tiveram contato comigo na minha vida tem uma participação no caminho que tomei para a escolha desse trabalho. Primeiramente gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli e Profa. Dra. Letícia Toreti Scarabelot por me auxiliar neste trabalho. Agradeço também a Profa. Dra. Carla de Abreu D'Aquino e o Prof. Dr. Felipe Pimenta, que forneceram os dados da estação meteorológica BOOA da plataforma no Balneário Arroio do Silva. E mais agradecimentos ao Eng. eletricitista Marcelo de Vila Oliveira que forneceu os dados de custo de instalações da CELESC, para realização da análise financeira.

Durante a minha vida acadêmica o suporte da instituição UFSC, foi a peça fundamental para culminar nessa conclusão de curso, sem o suporte financeiro, educacional, psicológico, suporte dos professores, Leandro Batirola Krott, Evy Augusto Salcedo Torres, Maurício Girardi, Rogério Gomes de Oliveira, Luciano Lopes Pfitscher, suporte dos servidores, e diversos outros suportes fornecidos pela UFSC, nada disso seria possível.

Além do agradecimento à instituição que mudou minha realidade, gostaria de agradecer aos meus colegas de graduação que me motivaram a continuar apesar das dificuldades, meus familiares que sempre torceram por mim, pela minha mãe que embora não faça parte da esfera acadêmica, sempre me inspirou a ser uma pessoa melhor, ao meu pai que embora tenha se juntado recentemente a minha jornada, já me fez amadurecer em muitos aspectos, aos meus padrinhos que desde meu nascimento me ajudaram e me incluíram no meio acadêmico, e principalmente, aos meus amigos de infância, André Grahl Pereira, Wellington Fernandes Silvano, Rafael Gonçalves Mota e Alexandre Assis Re que foram, e são, meu local de exemplo e de orientação.

“Even in the future, the sweet is never as sweet, without the sour...”

Cameron Crowe, 2002

RESUMO

Conforme os dados de 2022 do IBGE, constata-se que aproximadamente 400 mil residências brasileiras, representando 2,7% do total de domicílios rurais e 0,3% do total de domicílios urbanos, não possuem acesso à energia elétrica por meio da rede geral de distribuição. Mesmo com programas como o “Luz para Todos” do governo federal diminuindo esse percentual de residências sem energia, este número continua bem elevado para padrões de mundo moderno. Este problema ocorre, entre outros fatores, por causa do alto custo associado a distância de transmissão para as regiões mais remotas, e quando as residências rurais são de baixa renda, o ímpeto para investir na distribuição, se torna ainda menor. Estes fatos, mostram que se deve investir mais na independência da residência em relação à rede geral de distribuição, e apontar os esforços para a rede de geração distribuída e autônoma.

Este trabalho tem como objetivo, propor solução para residências isoladas da rede geral de distribuição através da integração de geração de energia, solar, eólica e combustão. Ao longo do trabalho foram analisados métodos de instalação, mercadorias e funcionamento de sistema fotovoltaico, de gerador eólico de pequeno porte, de gerador a combustão, e de banco de baterias. Além disso, foi analisado cuidados associados a qualidade da energia elétrica, para o bom funcionamento de eletrodomésticos e nos resultados, foi feita uma simulação de geração das fontes e constatado valores satisfatórios para o pleno atendimento da carga. E ao final foi comparado o custo de instalação do sistema com o custo de instalação de uma rede da concessionária de energia elétrica local, evidenciando que, em certas situações, é viável investir em sistemas *off-grid*.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico *off-grid*, Residência autônoma, Gerador eólico *off-grid*, Gerador a combustão *off-grid*, Sistema de geração híbrida.

ABSTRACT

According to the 2022 data from IBGE, it is evident that approximately 400 thousand Brazilian households, representing 2.7% of the total rural households and 0.3% of the total urban households, do not have access to electricity through the general distribution grid. Even with government programs like "Luz para Todos" (Light for All) reducing the percentage of households without electricity, this number remains quite high by modern world standards. This issue occurs due to various factors, including the high transmission costs to remote regions. In cases where rural households are low-income, the incentive to invest in distribution becomes even lower. These facts highlight the need for increased investment in residential independence from the general distribution grid, focusing efforts on distributed and autonomous power generation.

This work aims to propose a solution for isolated households from the general distribution grid by integrating solar, wind, and combustion energy generation. Throughout the study, methods of installation, equipment, and operation of photovoltaic systems, small-scale wind turbines, combustion generators, and battery banks were analyzed. Additionally, careful consideration was given to the quality of electric power to ensure the proper functioning of appliances. The results included a simulation of power generation from these sources, indicating satisfactory values for meeting the load demand. Finally, a comparison was made between the installation cost of the proposed system and the installation cost of a local electric utility network, demonstrating that investing in off-grid systems is efficient and cost-effective.

Keywords: Off-grid photovoltaic system, Autonomous residence, Off-grid wind generator, Off-grid combustion generator, Hybrid generation system.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	CARGA	13
2.2	DEMANDA	13
2.3	FATOR DE CARGA	14
2.4	GERADOR FOTOVOLTAICO NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i>	14
2.5	GERADOR EÓLICO NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i>	15
2.6	GERADOR À COMBUSTÃO NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i>	19
2.7	INVERSOR NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i>	21
2.8	BANCO DE BATERIAS NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i>	22
2.9	CONTROLADOR DE CARGA NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i>	24
2.10	RETIFICADOR NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i>	26
2.11	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL NO SISTEMA <i>OFF-GRID</i> ...	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	ANÁLISE DO PERFIL DE CONSUMO DA CARGA.....	29
3.1.1	A Residência	29
3.1.2	Demanda da Residência	30
3.1.3	Curva de Carga Diária	30
3.1.4	Potência Instalada	31
3.1.5	Fator de Carga	31
3.2	DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS	32
3.3	DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DE CARGA.....	35
3.4	DIMENSIONAMENTO DO GERADOR FOTOVOLTAICO	36
3.5	DIMENSIONAMENTO DO AEROGERADOR	40
3.6	DIMENSIONAMENTO DO GERADOR À COMBUSTÃO	44
4	RESULTADOS	46
4.1	ARRANJO DO SISTEMA HÍBRIDO	46
4.2	SISTEMAS DE GERAÇÃO DA RESIDÊNCIA	48
4.2.1	Discussão	52
4.2.2	Análise Financeira	54
5	CONCLUSÃO	58

5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Desde 2008 se há uma discussão política sobre a inserção de energia elétrica como um direito fundamental na constituição federal. O texto da constituição deixa em aberto a menção a energia elétrica como direito fundamental, mas inclui ela como um serviço indispensável nos quesitos de direito à greve, inclusive, desde 2017 está circulando a PEC 44/2017, para a inclusão do acesso à energia elétrica como um direito social (Fonte: Agência Senado). Essa incoerência se dá devido à suspensão de fornecimento por falta de pagamento da fatura. Assim, o texto constitucional garante a importância da energia elétrica sem se comprometer financeiramente pelos inadimplentes (PES; ROSA, 2016).

Para contornar este conflito o governo veio criando programas de suporte para atender esta necessidade fundamental e em 2003 foi lançado o programa Luz para Todos, que tinha como objetivo levar energia elétrica para as residências mais afastadas, foi um programa que continuou e ampliou o programa do governo anterior, Luz no Campo. Atualmente este programa está quase parado, com prazos que veem se estendendo e texto se modificando, em 2008, 2010, duas vezes em 2011, 2014 e uma última modificação em 2018. O último prazo para conclusão do programa tinha sido para 2022, e em 29 de junho de 2022 saiu o decreto Nº 11.111, que prorroga o programa até o ano de 2026 (ELETROBRÁS; 2021).

Segundo boletim da ANEEL de 2003, dados do Instituto mostram que, 2,5 milhões de domicílios brasileiros – cerca de 11 milhões de habitantes - não tinham acesso à energia elétrica. Em 2022, na última atualização do IBGE por meio do relatório de análise contínua, verificou-se que do total de 74,1 milhões de domicílios, 72,7 milhões já possuíam acesso em tempo integral à energia elétrica através da rede geral de distribuição, o que representa um percentual de 98,69%. Através do mesmo relatório de Análise Contínua, foi constatado que o número médio de moradores por domicílio é de 2,9. Com base nesses dados, verificou-se um total de moradores sem acesso contínuo à energia elétrica através da rede geral de distribuição de aproximadamente 2,82 milhões de pessoas, o que equivale a cerca de 1,31% da população do país.

Já no cenário rural, levantando os dados do censo agropecuário, pode-se obter outras informações relevantes sobre o fornecimento de energia através da rede geral, o IBGE revela que 16% dos estabelecimentos agropecuários não possuem

energia elétrica proveniente da rede geral, sendo este percentual distribuídos nas macrorregiões da seguinte forma: Norte 27%, Nordeste 20%, Sudeste 10%, Sul 8% e Centro-Oeste 9%. Estes dados refletem o interesse em levar energia para as regiões mais desenvolvidas, deixando de lado as regiões que possuem menos rentabilidade para retornar o valor investido na transmissão e distribuição de energia, criando assim um paradoxo, pois sem energia elétrica a região irá tender a não se tornar lucrativa.

Os problemas relacionados ao preço elevado da distribuição periférica, complexidade e perdas na transmissão, são uns dos motivadores deste trabalho, no intuito de trazer uma nova forma de “levar” energia elétrica às residências isoladas.

A tecnologia de geração de energia elétrica já está desenvolvida, a ponto de, em alguns casos, não precisarmos mais de um sistema de geração centralizada. Os avanços tecnológicos na geração de energia, levantam a problemática: “É viável, atualmente, montar um sistema independente a partir da combinação de geração solar, eólica e gerador à combustão?”.

O objetivo do presente trabalho é tornar o conhecimento para implementação de um sistema híbrido *off-grid* acessível e verificar sua viabilidade financeira. Na metodologia é demonstrado as relações de dimensionamento e opções para implementação do sistema de acordo com as tecnologias disponíveis no mercado. Na seção de resultados foi feito um estudo de caso fictício como exemplo.

Os tópicos abordados serão, energia solar fotovoltaica, geradores eólicos, geradores a combustão, inversores *off-grid*, baterias, controladores de carga, qualidade de energia elétrica, curvas de consumo e aplicação de cargas.

A fim de realizar a simulação de geração do estudo, será considerado um sistema situado no município de Balneário Arroio do Silva. Ao concluir o estudo, foi conduzida uma análise financeira comparativa entre o custo do projeto e o valor por quilômetro cobrado por uma distribuidora de energia elétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARGA

No tema de transmissão e distribuição de energia elétrica, o termo "carga" refere-se à quantidade de demanda ou consumo de energia elétrica por parte dos equipamentos e dispositivos conectados a uma rede elétrica em determinado local. No presente trabalho, a carga será definida como os consumidores de corrente elétrica do circuito.

2.2 DEMANDA

A demanda refere-se à quantidade de energia elétrica requerida por um consumidor em um determinado momento, expressa em kilowatts. É uma medida instantânea da potência máxima consumida em um ponto específico da rede elétrica. Ao contrário da carga elétrica, que representa a quantidade total de energia consumida em um período, a demanda foca na taxa na qual a energia é consumida. Os fornecedores de energia usam a medição da demanda para calcular os custos de fornecimento de energia, especialmente em ambientes comerciais e industriais, onde picos de demanda podem afetar as tarifas elétricas. Gerenciar a demanda eficientemente é essencial para evitar sobrecargas na rede, melhorar a eficiência energética e otimizar os custos de fornecimento de energia para os consumidores.

Em conformidade com as normas técnicas, define-se: "A demanda de uma instalação é a carga nos terminais receptores tomada em valor médio num determinado intervalo de tempo". Nessa definição entende-se por "carga" a aplicação que está sendo medida em termos de potência, aparente, ativa ou reativa, ou ainda, em termos do valor eficaz da intensidade de corrente, conforme a conveniência. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010, p. 24)

2.3 FATOR DE CARGA

O fator de carga é uma medida que indica a eficiência com que a energia elétrica é utilizada em um determinado período, geralmente expresso como uma porcentagem. Esse fator está relacionado à relação entre a carga elétrica média (ou demanda média) e a carga elétrica máxima que um consumidor ou sistema elétrico registra durante o mesmo período.

Define-se fator de carga de um sistema, ou de parte de um sistema, como sendo a relação entre as demandas média e máxima do sistema, correspondentes a um período de tempo τ (tau). O fator de carga, que é adimensional, é sempre não maior que um. Observa-se que para fator de carga unitário corresponde um sistema que está operando, durante o período de tempo τ (tau), com demanda constante. (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010, p. 32)

Se o fator de carga for menor do que 1, isso indica que a demanda média é menor que a demanda máxima. Nesse caso, a eficiência do consumo de energia pode ser baixa, e a infraestrutura elétrica pode estar operando abaixo de sua capacidade máxima. Um alto fator de carga é desejável para o fornecimento eficiente de energia, pois indica que a capacidade dos equipamentos e instalações está sendo bem aproveitada, evitando desperdício de energia e otimizando o uso da infraestrutura elétrica disponível.

2.4 GERADOR FOTOVOLTAICO NO SISTEMA *OFF-GRID*

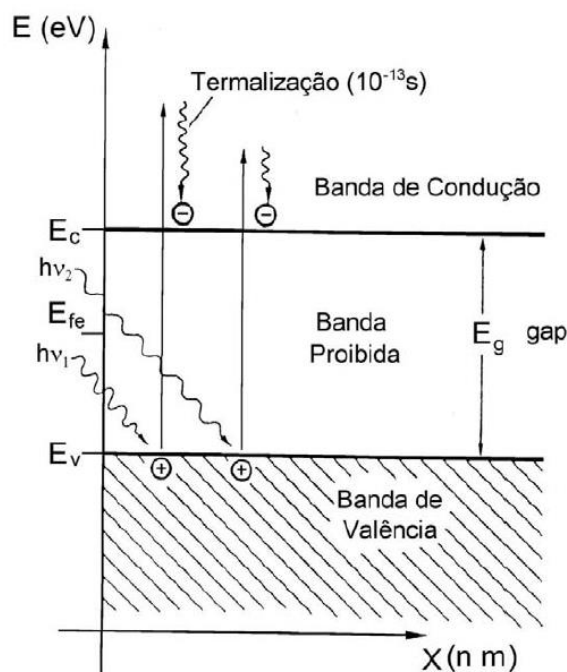
O Brasil tem grande período e intensidade de irradiação solar em quase todo seu território, isto faz dos geradores fotovoltaicos uma excelente escolha para integrar um sistema de geração híbrido *off-grid*. Além disso, a tecnologia dos módulos fotovoltaicos já é conhecida, dominada e o mercado produz melhoramentos contínuos.

A geração de corrente através dos módulos se dá devido a característica do material de ter seus elétrons excitados pelos fótons emitidos pelo sol, ao bater no material semicondutor, o fóton faz com que os elétrons saltem da banda de valência para banda de condução, gerando assim um potencial elétrico (PINHO; GALDINO, 2014). Em um sistema fotovoltaico, a diferença de potencial causada pelo efeito

fotovoltaico, irá gerar uma corrente, essa corrente irá para o inversor, e esse inversor irá jogar essa energia na rede elétrica residencial, ou em um banco de baterias.

Embora a literatura (PINHO; GALDINO, 2014) indique que os módulos mais eficientes, cerca de 42%, sejam os de células com Concentradores Multijunção, os quais utilizam os semicondutores dos grupos III e V da tabela periódica, na atualidade os módulos mais difundidos comercialmente no Brasil são os de silício monocristalino.

Figura 1 – Esquema do efeito fotoelétrico na eletrosfera



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014)

Na figura um pode-se observar a geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semicondutor, chamado efeito fotocondutivo: E_c – nível inferior de energia da banda de condução; E_v – nível máximo de energia na banda de valência; E_{fe} – Nível de Fermi; E_g – valor da energia do gap ($E_g = E_c - E_v$)

2.5 GERADOR EÓLICO NO SISTEMA *OFF-GRID*

Os primeiros moinhos foram utilizados pelos homens desde tempos muito remotos, dos quais não são possíveis de se datarem especificamente, este, foi utilizada conversão da energia mecânica dos ventos para moer insumos.

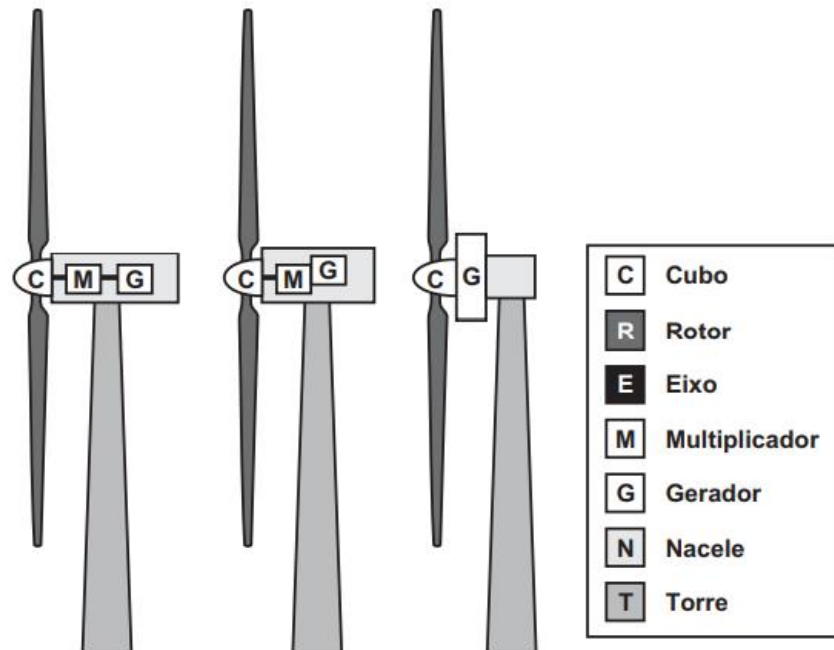
Ao longo do desenvolvimento humano, os moinhos foram se desenvolvendo, e estudos científicos por volta deste são datadas em 1759 com o engenheiro civil inglês John Smeaton. Já a participação de aerogeradores elétricos na história teve início em 1887 na cidade de Glasgow na Escócia pelo professor e engenheiro eletricitista James Blyth (PINTO, 2014).

Após isso, os aerogeradores vieram sendo aperfeiçoados por diversos países, Alemanha, Estados Unidos, França, Holanda, Dinamarca, Espanha, e com a crise do petróleo em 1970, o governo norte americano fez um investimento considerável nesta fonte de geração de energia elétrica, trazendo ainda mais melhorias em designs, eficiência e capacidade instalada para a exploração dessa fonte de energia limpa e renovável (PINTO, 2014).

As turbinas eólicas são compostas de sete peças fundamentais e diversas outras que servem como controladores, e estarão presentes de acordo com o tipo e modelo de aerogerador, as partes fundamentais são, hélice, cubo, rotor, eixo, multiplicador, gerador, nacelle e torre. Os aerogeradores absorvem parte da energia cinética do vento e através de um gerador acoplado, convertem essa energia absorvida em energia elétrica da seguinte maneira. A massa de ar se desloca devida uma diferença de pressão, essa diferença de pressão gera uma energia potencial, que no seu deslocamento, bate na hélice, a hélice gira o cubo que está no centro das hélices, o cubo é conectado a um multiplicador através de um eixo, esse multiplicador vai aumentar a velocidade de rotação do gerador através de um segundo eixo, esse gerador é conectado a um inversor, o qual jogará a energia na rede, ou em um banco de baterias no caso de um sistema *off-grid* (DUTRA, 2008).

A Figura 2 apresenta um esquema de 3 geradores com os diferentes componentes mencionados.

Figura 2 - Esquema visual de componentes de aerogeradores



Fonte: Dutra (2008)

Atualmente a indústria eólica tem excelentes materiais, para aumentar sua eficiência, não só no aproveitamento das pás, mas como rolamentos, freios, controladores de medição, sistemas de sensores, transformadores e sistemas de sensores de telecomunicações.

Segundo os relatórios de 2014 a 2021 do Conselho Global de Energia Eólica (GWEC), há um grande interesse na exploração na geração de energia elétrica através de aerogeradores, na Tabela 1 vemos os principais países e suas potências instaladas com valores em GW.

Tabela 1 - Evolução das potências eólicas instaladas dos principais países em GW

País	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
China	45,10	168,69	188,23	211,39	236,32	281,99	328,97
União Europeia	27,21	138,06	148,96	157,21	167,23	177,06	187,50
Estados Unidos	74,47	82,18	89,08	96,67	105,47	117,74	132,74
Alemanha	44,95	50,02	56,13	59,31	61,36	62,18	63,76
Índia	27,15	28,67	32,85	35,13	37,51	38,56	40,07
Espanha	13,03	23,08	23,17	23,49	25,81	27,09	27,50
Reino Unido	13,60	15,03	18,87	20,97	23,52	24,67	27,13
Brasil	8,72	10,74	12,76	14,71	15,45	17,20	21,16

Fonte: adaptado do *Global Wind Report (2015-2021)*

A análise da Tabela 1, revela que nos últimos 7 anos, há um aumento expressivo na potência instalada de todos os países, mostrando que esse é um mercado altamente interessante, viável e rentável em diferentes regiões econômicas, geográficas e culturais. As projeções futuras, são ainda mais promissoras segundo o relatório do GWEC (Global Wind Energy Council), de 2019 para 2020 houve um crescimento 53% maior que de 2019, sendo, China, EUA, Brasil, Holanda e Alemanha, o top 5 nessa participação, com uma contribuição de 80,6%.

O mercado de aerogeradores é um mercado já estabelecido e em constante expansão, novas tecnologias e soluções para problemas encontrados, surgem todos os meses. Há para comercialização, aerogeradores *on* e *off-grid*, com diferentes tamanhos de rotor, até mesmo aerogeradores com rotor de 147 metros construídos pela WEG, também através de lojas chinesas as aquisições estão bem acessíveis. Para a posterior análise de geração para os três tipos de residências, foi escolhido um aerogerador *off-grid*, AVATAR™ -I, de um fornecedor indiano, na Tabela 2 encontram-se suas especificações.

Tabela 2 - Tabela de dados do Datasheet do Aerogerador

Modelo e Marca	AVATAR™ -I; Avant Garde
Capacidade	1 kW equivalente, MultiFase, MultiTensão
Tensões	24/48 V, 230 V
Eixo	Horizontal
Potência Pico	1000 W
Velocidade inicial do vento	1.4 m/s
Velocidade de vento mínima de geração	1.9 m/s
Velocidade de sobrevivência do vento	60 m/s
Geração diária com média de 5.5 m/s	5 kWh
Material da hélice e número de hélices	Polímero reforçado com fibra de vidro e 3 hélices
Diâmetro do Rotor	3 metros
Preço	USD 1.175; R\$ 5.886,75 (06/2023)

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a escolha do aerogerador é preciso verificar o regime de ventos da região. A seleção apropriada de aerogeradores requer a consideração da faixa de velocidade de vento na qual eles foram projetados para operar. Portanto, é necessário verificar os valores mínimos, médios e máximos de velocidade de vento na região para determinar a escolha ideal (PINTO, 2014).

No Brasil, a coleta de dados de vento, ainda é muito escassa, e o registro de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), em Araranguá, é de uma estação meteorológica rural de 2 metros de altura e 10 quilômetros de distância da região costeira que vamos fazer a simulação. Além dos dados do INMET, foi utilizado o REANALYSIS, que é uma plataforma mundial que visa preencher as lacunas de dados que se tem dentre regiões e anos, através de inferência estatística de dados fornecidos por estações coletoras de dados meteorológicos espalhadas pelo mundo. Para o REANALYSIS, a média de vento na região litoral dos últimos 10 anos, à 30 metros de altura, foi de aproximadamente 6 metros por segundo, e de 2,7 metros por segundo na superfície. Já os dados do INMET dos últimos 10 anos, e a altura de 2 metros, foi de uma média de 2,04 metros por segundo. Então para este intervalo nebuloso, pôde-se escolher um aerogerador de velocidade de vento mínima de 1,9 e máxima de 60, metros por segundo. Ao se determinar a altura de instalação do aerogerador, considera-se o incremento da velocidade do vento de acordo com a elevação em relação à superfície e o torque exercido na base da torre em relação ao solo. Idealmente, busca-se uma maior altura, contudo, a estabilidade da torre deve ser criteriosamente avaliada para evitar qualquer ocorrência de vibrações indesejadas. Para a região específica de Arroio do Silva uma altura aproximada de 10 metros, é recomendada em virtude das características do relevo local.

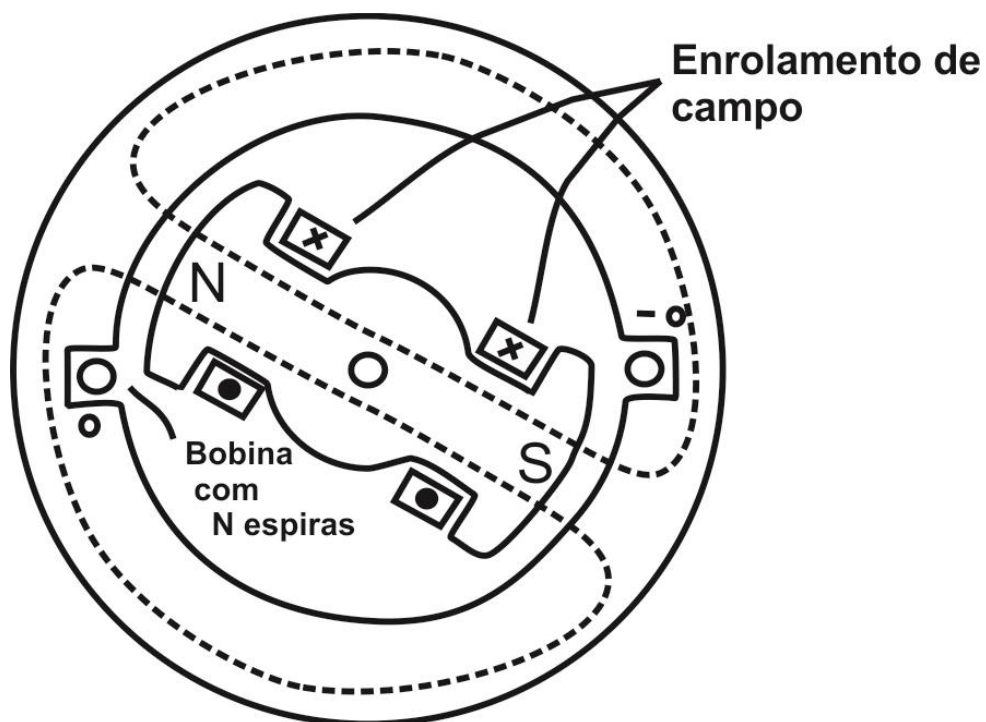
2.6 GERADOR À COMBUSTÃO NO SISTEMA *OFF-GRID*

Em 1831, na Inglaterra, Michael Faraday inventou o primeiro motor elementar. A máquina consistia basicamente em um eletroímã acoplado interiormente a uma espira, que ao se movimentar produzia uma *f.e.m.* Essa *f.e.m.* gerava uma tensão e produzia corrente elétrica e assim, foi convertida energia mecânica em energia elétrica (GALDINO, 2011).

Os geradores a combustão são, em sua grande maioria, motores a combustão acoplados a máquinas síncronas que de modo geral, dependendo da linha de produção, possuem três partes básicas: o estator, responsável por circular a energia gerada, o rotor, que fica interno ao estator e comporta o enrolamento de campo, excitatriz, que tem a função de manter as condições de carga e tensão, e alguns fabricantes possuem outros dispositivos para o seu melhor funcionamento (GALDINO, 2011).

Os geradores síncronos são equipamentos de dupla excitação, onde no estator circulam correntes alternadas equilibradas que formam um campo girante. Já o rotor é excitado por corrente contínua, formando um eletroímã. Os dois campos devem girar na mesma velocidade para formar um conjugado médio não nulo. A velocidade de giro, é proporcional a frequência da rede e quando o rotor gira, acionado por um órgão primário, o fluxo magnético através da bobina vai variar e será induzida uma tensão na armadura (GALDINO, 2011).

Figura 3 - Gerador síncrono elementar.



Fonte: Galdino (2011)

Para aumentar a rotação de um gerador síncrono é adicionado mais rolamentos ao rotor, chamados de polos, essa relação é de $\frac{1}{2}$ do número de polos. Há máquinas de dois polos, quatro polos e multipolos.

O ambiente ao qual o gerador será inserido, é de extrema importância para seu bom funcionamento, a temperatura ambiente não deve ser superior a 40 graus celsius pois acima disso os rolamentos podem atingir temperaturas prejudiciais a sua isolamento, e não podem ser inferiores a -20 graus celsius pois pode apresentar formação de gelo nos mancais, provocando o endurecimento das graxas comuns. Em relação a altitude, deve-se evitar alturas maiores que 1000 metros acima do mar, a partir desta altitude o gerador apresenta problemas de aquecimento causados pela

rarefação do ar. Além das características do ambiente, outros fatores devem ser atentados, como o nível de vibração do gerador, sistema de ventilação, proteção contra poeira, umidade, nível de abertura da carcaça, sobrecargas e subcargas além das permitidas pelo fabricante, curto-circuito na carga, dentre outros (GALDINO, 2011).

Uma peça fundamental dos geradores a combustão, é o motor de combustão. Motores são máquinas responsáveis por promover a rotação do gerador, eles convertem energia química do combustível, em energia mecânica, os ciclos termodinâmicos mais utilizados são o ciclo Otto em motores à gasolina e ciclo diesel em motores à diesel, embora aja geradores com outros ciclos de combustão. Os geradores atuais residenciais, vem com dispositivos para queimar a quantidade de combustível necessária para atender a demanda da carga, facilitando sua operação, atentando-se para sua operação não ser muito abaixo da sua potência nominal, pois isso causaria danos ao gerador e diminuiria sua vida útil (GALDINO, 2011).

Além das condições ambientes mencionadas acima, para a escolha do motor, precisa-se levar em consideração o consumo da carga. Dada a natureza emergencial da posição da utilização do gerador no dimensionamento, ou seja, ele será acionado somente quando a carga precisar de uma potência necessária menor que a potência gerada pelas fontes renováveis, ele precisará ser dimensionado para suprir esses momentos. No presente trabalho temos três diferentes tipos de cargas, residência de baixo consumo com pico de consumo diário de aproximadamente 4 kW, residência de médio consumo com pico de aproximadamente 6 kW e residência de alto consumo com pico de aproximadamente 25kW. Nesses casos, precisaremos de 3 geradores diferentes.

2.7 INVERSOR NO SISTEMA OFF-GRID

Inversores são aparelho que servem para converter a corrente contínua vinda dos módulos em corrente alternada para a carga através de um chaveamento entre transistores e mosfets, dentre outros componentes. Além disso, o inversor opera com tensões de 12 V, 24 V, 48 V e 120 V, e sua tensão de saída fica por volta de 220 V, para cargas que necessitam 220 (VERA, 2009).

O inversor pode ser utilizado em sistemas conectados à rede jogando energia nas cargas para serem consumidas instantaneamente, e em momentos de

excedentes, jogar essa energia na rede de distribuição. Mas também, os inversores podem ser utilizados em sistemas *off-grid*, conectados à banco de baterias, fazendo a ponte entre geração e carga, de maneira a não danificar nenhum dos lados (VERA, 2009).

Há três tipos de inversores, os de onda quadrada que faz somente a conversão CC para CA, e mantem a onda quadrada do lado CC, os de onda modificada que ajustam a onda quadrada para uma onda menos “quebrada”, e os de onda senoidal pura, que convertem a onda quadrada para uma senoide, através da tecnologia PWM, o que é necessário para atender cargas com característica ondulatória, como micro-ondas, geladeiras, liquidificadores dentre outros (GALDINO, 2014).

A geração das fontes solares e eólica, tem caráter intermitente, ou seja, sua potência vai variando ao longo do dia, para fazer essa conversão, o inversor precisa ser devidamente dimensionado, tendo o melhor aproveitamento da fonte de geração aos seus MPPTs - *maximum power point tracking* – não trabalhando em sobrecargas ou subcargas (LUQUE, HEGEDUS; 2003).

Em um sistema *on-grid* com gerador a diesel, o inversor é posicionado entre o quadro geral e o gerador, já em um sistema *off-grid*, o inversor precisa ser posicionado entre o gerador e as cargas, atentando-se para não haver sobre carga levando corrente de retorno ao gerador e assim o danificando (OVELHA, 2017).

Atualmente, alguns fabricantes, como a Solar Edge e a PHB, produzem inversores *off-grid* com controladores de cargas embutidos, com as características particulares para atender cada sistema, controlando saídas para cargas, desativando geradores, desconectando a carga, controlando a carga do banco de baterias evitando sobrecargas e descarga profunda, fazendo o devido controle sem deixar que os componentes do sistema se danifiquem.

2.8 BANCO DE BATERIAS NO SISTEMA OFF-GRID

As primeiras baterias, possuem referências em anotações de Benjamin Franklin em 1748, após isso a ciência trabalhou de forma contínua ao longo dos séculos. Em 1800 foram criadas a pilhas voltaicas, por Alessandro Volta para executar experimentos de bancada, em 1836 chegaram as pilhas de Daniell feitas com folha de zinco imersas em sulfato de zinco, essas pilhas foram utilizadas até 1960. Além

destas, a ciência desenvolveu as pilhas de Grove em 1844, as pilhas de Leclanché em 1866, as pilhas de Zinco-Carbono em 1886, pilhas de Níquel-Cádmio em 1899, baterias de Lítion-Íon em 1970 e dentre muitas outras. E por fim, em 1859 foram criadas as primeiras baterias recarregáveis de Chumbo-Ácido, após isso essas baterias vieram sofrendo melhorias, e, embora não sejam as mais eficientes, são as mais utilizadas hoje (NISENBAUM, 2017).

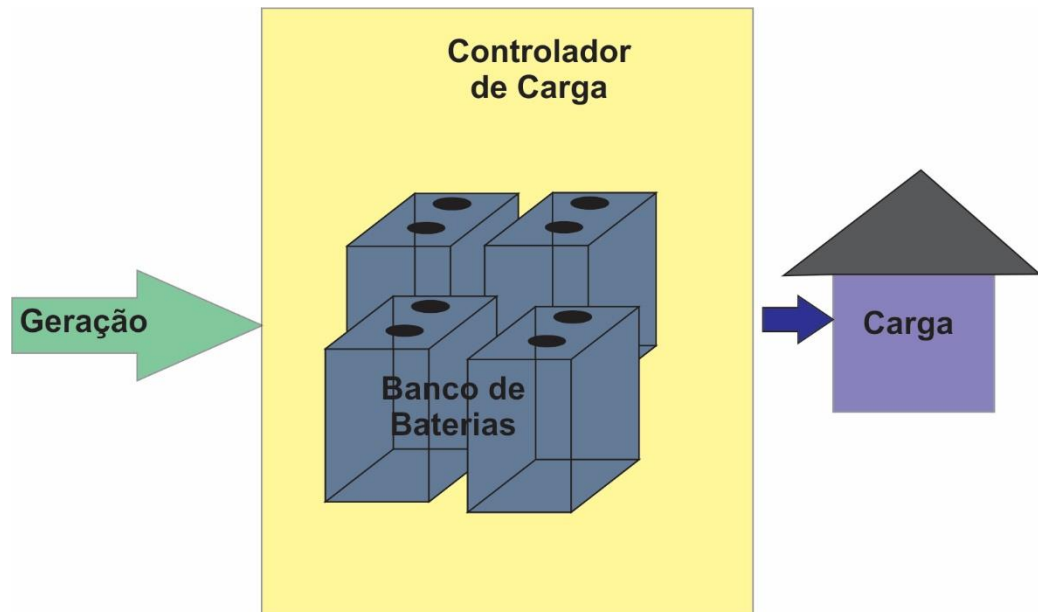
Baterias são dispositivos responsáveis por armazenar energia através de reações químicas de redução e oxidação. Há diversas formas de armazenar energia de como, supercapacitores, indutores com supercondutores, ar etc., mas devida sua relação de economia, eficiência e facilidade de acesso, um banco de baterias, se torna a forma mais atrativa (PINHO; GALDINO, 2014).

Em um sistema *off-grid*, as baterias são de extrema importância, pois o sistema dependerá delas quando não houver geração o suficiente para atender a carga. Para atender as necessidades do sistema, as baterias podem ser ligadas em combinações de série e paralelo para controlar a tensão e corrente para situações desejadas (PINHO; GALDINO, 2014).

Como o banco de baterias pode custar em torno de 50% do valor de um projeto fotovoltaico *off-grid*, é de extrema importância que seja postergada sua degradação o máximo possível, para minimizar trocas. Para prolongar a vida de uma bateria alguns cuidados precisam ser tomados, deve-se não deixar haver sobrecargas e subcargas no carregamento, correntes altas de descarregamento, evitar o superaquecimento no local de instalação e diminuir o número de vezes que ela é recarregada (PINHO; GALDINO, 2014).

No sistema *off-grid*, o banco de baterias precisa ser posicionado entre a geração e o inversor (figura 4), através de um controlador de carga e com conexão entre a carga e o banco de baterias, para que o dispositivo que entrega energia para a carga, possa saber o nível de carga do banco de baterias, e ative o gerador (OVELHA, 2017).

Figura 4 – Posição do banco de baterias no sistema *off-grid*



Fonte: Elaborado pelo autor

As melhores opções de bateria do mercado atualmente, são as de tecnologia de lítio, devido a sua eficiência de carregamento, densidade de carga, profundidade de descarga, maior número de ciclos de vida, dentre outras vantagens, mas seu preço é muito elevado, as vezes custando até 10 vezes mais que uma de chumbo-ácido, fazendo as baterias de chumbo-ácido se tornarem mais atraentes de acordo com o orçamento inicial do projeto. As baterias estacionárias de chumbo-carbono, são próprias para sistemas *off-grid* e possuem uma relação de custo-benefício aceitável.

2.9 CONTROLADOR DE CARGA NO SISTEMA OFF-GRID

Controladores de carga são dispositivos eletrônicos que em um sistema *off-grid* tem como objetivo principal fazer controle de tensão e corrente de entrada e saída do banco de baterias. Através de chaveamentos de mosfets, shunts, e uma placa eletrônica, ele faz o monitoramento da corrente e os chaveamentos necessários para manter os parâmetros da bateria saudáveis (MAESTRI, 2018).

Existem dois tipos de controladores de carga utilizados em sistemas *off-grid*, controladores do tipo PWM (Pulse Width Modulation), e os controladores tipo MPPT (Maximum Power Point Tracking). Os controladores PWM são mais simples e baratos, as vezes custando até metade de um controlador MPPT, ele funciona de forma a carregar as baterias através de pulsos em alta frequência, mas na hora de passar a

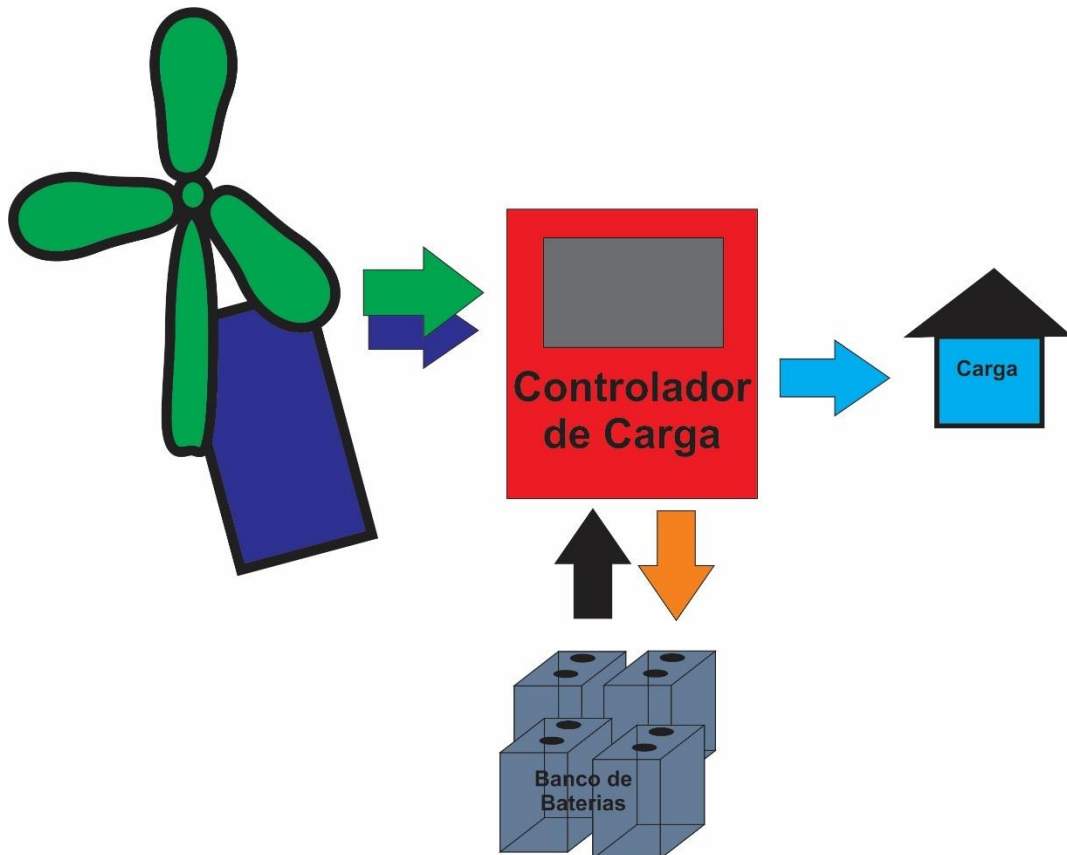
energia para a bateria, ele abaixa a tensão dos geradores e mantém a corrente, desperdiçando boa parte da sua potência. Os controladores MPPT são mais eficientes e mais caros, eles funcionam com rastreadores que ficam atualizando o ponto de máxima corrente dos geradores, e quando passam a energia para as baterias, eles abaixam a tensão dos geradores para a tensão do banco de baterias e aumentam a corrente, mantendo a potência (PINHO; GALDINO, 2014).

Como visto na seção 2.8, a vida útil de uma bateria está fortemente ligada à sua boa manutenção, tais como, controle ideal para sua temperatura, velocidade de corrente de descarga, monitoramento de descarga profunda. O controlador de carga faz todos esses tipos de controle, e alguns controladores mais recentes possuem outras funções, como o rastreamento do MPPT dos módulos solares através de um banco de capacitores e indutores internos ao controlador (PINHO; GALDINO, 2014).

Como as especificações do banco de bateria mudam de acordo com a necessidade do projeto e preferências do projetista, o controlador de carga deve ser escolhido e programado de acordo com cada situação, um tipo para baterias chumbo-ácido, outro tipo para baterias lítio-íon, com tensão de saída dentro da faixa de tensão do banco de baterias, percentual de descarga profunda, velocidades máximas de corrente de descarga e temperatura (PINHO; GALDINO, 2014).

Em um sistema *off-grid*, o controlador de carga fica entre o ponto triplo de conexão, gerador eólico e solar, banco de baterias, e inversor (Figura 5). Em algumas configurações de layout de geração híbrida com gerador a combustão, os controladores de carga recebem uma conexão adicional ao gerador para informar ao gerador o estado de sua carga, fazendo o gerador assumir o consumo da carga e assim evitando sua descarga profunda (MAESTRI, 2018).

Figura 5 – Ponto triplo de conexão do controlador de carga

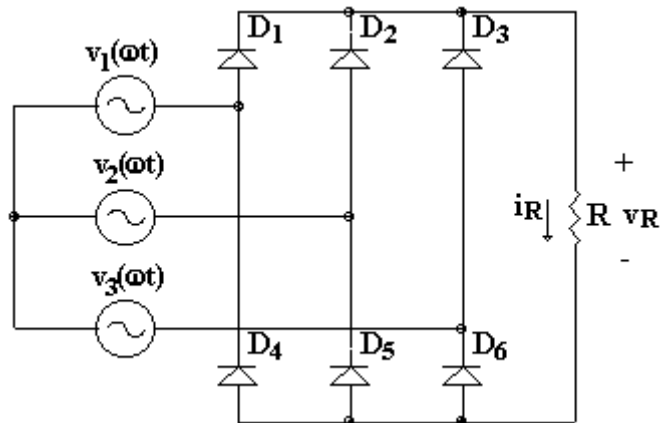


Fonte: Elaborado pelo autor

2.10 RETIFICADOR NO SISTEMA *OFF-GRID*

Retificadores são componentes que através de chaveamentos de microcircuitos, convertem CA-CC. O funcionamento desse dispositivo se baseia em um circuito que utiliza fontes de corrente alternada conectadas a uma carga por meio de diodos. Os diodos são chaveados de forma a garantir que a corrente flua em uma única direção, como mostrado na figura 6. No sistema de geração eólica *off-grid*, eles são essenciais, pois o aerogerador, dependendo do modelo, pode produzir energia em CA, e o banco de baterias recebe energia em CC, por isso os retificadores são indispensáveis para o funcionamento do sistema, somente através dessa conversão CA-CC, o banco de bateria vai poder armazenar a energia eólica gerada. Alguns modelos de controlador de carga, já possuem retificadores embutidos (ROBERTS, 2012).

Figura 6 – Circuito de ponte trifásica completa a diodos – Ponte de Graetz.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 7 apresenta um modelo simples de retificador trifásico. Eles são resistentes, robustos e de fácil acesso.

Figura 7 - Exemplo de um retificador trifásico modelo MDS100A



Fonte: Fabricante MDS (2023)

2.11 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL NO SISTEMA *OFF-GRID*

Em sistemas geradores mais complexos, onde há geração de energia de fontes diferentes, e variações nas cargas de geração e armazenamento, se faz necessário a supervisão e controle do sistema. Esse controle e supervisão é feito através de controladores lógico programáveis (CLP), eles analisam valores de tensão, corrente, frequência e fases, para poder fazer devidos ajustes de sincronização de diferentes das fontes geradoras, mantendo os padrões definidos através de programação, para garantir a qualidade da energia para a carga. No mercado há

diversos tipos de CLPs, e eles devem ser escolhidos de acordo com a necessidade do sistema a ser implementado (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 8 ilustra um controlador de carga que possui a capacidade de alinhar as fases de diferentes fontes geradoras. A programação deste modelo é feita em C++ e não vem programado de fábrica, embora a fabricante disponibilize diversos materiais de suporte ao consumidor em sua plataforma.

Figura 8 – Exemplo de um controlador lógico programável modelo DSE 8610 MKII



Fonte: Fabricante Deep Sea Eletronics (2023)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, será apresentado os passos de análise de consumo e perfil de carga das residências, cálculo de banco de baterias, cálculo de potência da geração fotovoltaica, cálculo de potência da geração eólica, cálculo da potência do gerador à combustão, dimensionamento de controladores de carga, materiais utilizados e análise de custos.

3.1 ANÁLISE DO PERFIL DE CONSUMO DA CARGA

O primeiro passo para o dimensionamento do sistema, é conhecer a carga que se pretende atender. A partir do consumo e perfil de consumo diário pode-se dimensionar o tamanho do sistema de geração e armazenamento.

3.1.1 A Residência

Para a residência fictícia em análise, será considerado o consumo de 130,18kWh por mês e os eletrodomésticos listados na tabela 3:

Tabela 3 - Eletrodomésticos considerados para residência.

	Potência Nominal (W)	Potência Média (W)	Horas de uso Mensal	Consumo Mensal (kWh)
Geladeira Consul 280L	85,00	41,67	720,00	30,00
Televisor Cinescópio Philco 21'	77,00	44,00	270,00	11,88
Chuveiro Hydra 3 Temperaturas	5400,00	3600,00	22,50	81,00
Bomba d'água Ferrari 0,5HP	372,85	372,85	7,50	2,80
5 Lâmpadas LED Tashibra 6W	30,00	30,00	150,00	4,50

Fonte: Inmetro (2022)

Após análise dos eletrodomésticos, foi suposto certo hábito de consumo diário e extraídos alguns parâmetros, para fazer comparações e estabelecer limiares no

dimensionamento das fontes fornecedoras de energia. Tais como, Demanda, Curva de Carga Diária, Potência instalada, Fator de carga, e Fator de utilização.

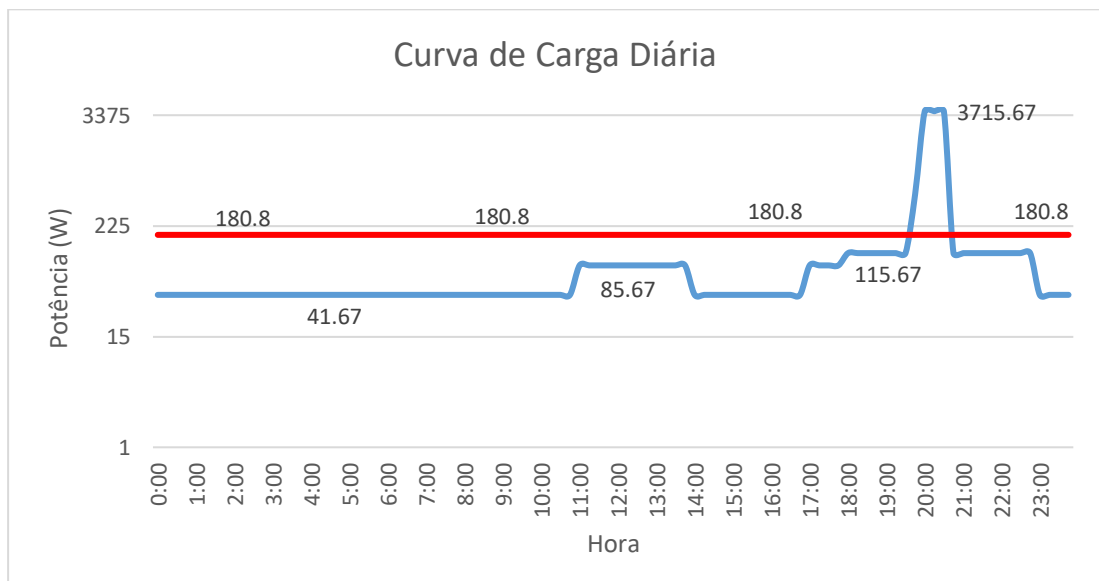
3.1.2 Demanda da Residência

Para ponto de partida foi considerado pelo autor um hábito de consumo fictício, onde a geladeira ficou ligada 24 h/dia, o televisor 9 h/dia, o chuveiro 45 min/dia, a bomba d'água 15 min/dia e as lâmpadas 5 h/dia.

3.1.3 Curva de Carga Diária

A Figura 9 representa o hábito de consumo fictício considerado pelo autor. O refrigerador tem seu acionamento intercalado de acordo com sua utilização e consome uma média aproximada de 41,67 Wh, às 11 h o televisor é ligado, subindo o consumo total para 85,7 Wh até as 14 h, depois o televisor volta a ser utilizado das 17 h às 23 h, o consumo máximo de 3716 Wh ocorre das 20 h às 20:45 h, quando ocorre o uso da bomba d'água, do televisor, do chuveiro, da geladeira e das lâmpadas. Esse pico é importante, para o sistema não ficar subdimensionando derrubando a rede ao exceder a potência fornecida pelo sistema de geração e conversão. Em vermelho, tem-se a demanda média diária.

Figura 9 - Curva de Carga Diária fictícia da residência, em escala logarítmica.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.4 Potência Instalada

A potência total instalada, é a soma das potências nominais de todos os eletrodomésticos. Para residência de estudo a potência total instalada é de 5,96 kW.

3.1.5 Fator de Carga

O fator de carga é um parâmetro crucial para avaliar a eficiência e desempenho de um sistema de geração ou consumo de energia. Ele representa a relação entre a carga real utilizada e a capacidade máxima disponível do sistema ao longo de um período específico.

O Fator de carga para residência em análise será:

$$Fator\ de\ Carga = \frac{Demanda\ média\ diária}{Demanda\ máxima\ diária} = \frac{180,8}{3716} = 0,0487$$

Para obter a demanda média diária, o autor dividiu um dia de 24 h em intervalos de 15 minutos, para cada intervalo de 15 minutos foi relacionado o consumo do equipamento ligado naquele intervalo. Depois foi somado esses valores de consumo e dividido pela quantidade de intervalos de 15 minutos chegando ao valor de 180,8 W.

Através deste indicador e observando a Figura 8 de curva de carga diária, pode-se concluir que a demanda média diária é muito menor que a demanda máxima, resultando em um fator de carga baixo.

O dimensionamento das fontes geradoras e do armazenamento de energia elétrica é diretamente impactado por esse pico de corrente, pois o sistema precisa ser dimensionado para lidar com essa demanda máxima. Esse pico de corrente agrega valor monetário ao sistema, o qual requer um dimensionamento adequado das fontes geradoras, armazenamento e equipamentos para suportá-lo.

Depois de estabelecido o perfil de consumo, foi extraído algumas informações importantes dele, como o consumo mensal, consumo diário, e o pico de potência diário. Na residência de estudo, chegou-se em um consumo mensal de 130,18 kWh e um pico diário de 3,716 kW entre as 20 h e as 20:45 h.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS

Após adquiridos alguns dados do consumo e do perfil da carga, para fazer o dimensionamento do banco de baterias, precisa-se decidir quantos dias de autonomia o sistema terá, ou seja, quantos dias o sistema irá conseguir se manter sem nenhuma geração. O recomendado pela literatura, é de 2 a 4 dias no Brasil e de 5 a 7 para cargas críticas. Em casos em que o local não possui dados experimentais para decidir os dias de autonomia, utiliza-se a equação 1 (PINHO; GALDINO, 2014). Para a região de estudo de Balneário Arroio do Silva, em que se tem HSP_{min} de 3,28, a autonomia será 3 dias.

$$N = -0,48 * HSP_{min} + 4,58 \quad (1)$$

O primeiro passo é verificar o consumo diário da residência. Para o caso de estudo, o consumo diário é de 4,34 kWh.

Depois, como a conversão das fontes de energia não são perfeitas e tem perdas, pega-se o consumo diário e divide pela eficiência de conversão do inversor e do rendimento de armazenamento das baterias, essa eficiência e rendimento serão adquiridas no *Datasheet* do fabricante delas.

Para decidir a tensão do banco de baterias do projeto, precisamos entender alguns aspectos. Quanto maior a tensão do banco de baterias, menor a corrente de descarregamento total do banco, o que é mais saudável para as baterias, mas maior terá que ser a tensão para o carregamento. As baterias devem ser associadas em configurações em série (ajustar a tensão), e paralelo (ajustar a corrente) para atender as características do sistema, como a configuração de tensão dos módulos e aerogerador, as faixas de operação do controlador de carga e um inversor que consiga receber essa tensão DC de entrada do banco. Ressaltando que a tensão de alimentação dos módulos e aerogerador, precisa ser maior que a tensão do banco de baterias (PINHO; GALDINO, 2014).

Após serem estabelecidos o consumo diário, os dias de autonomia, o rendimento do inversor e das baterias, a tensão do banco de baterias e a profundidade de descarga recomendada pelo fabricante para preservar a saúde das baterias, pode-se utilizar a Equação 2 para calcular a quantidade necessária de baterias.

Futuramente no estudo de caso, será considerado a profundidade de descarga de 30%.

$$Ec(kW) = \frac{Cd(kW) * n}{Rb * Ri} \quad (2)$$

A energia consumida (E_c) em n dias, será obtida multiplicando os n dias de autonomia pelo consumo diário (C_d) e dividindo esse valor pelo rendimento da bateria (R_b) e pelo rendimento do inversor (R_i).

Ao considerar a energia consumida durante os dias de autonomia, ou seja, o período em que o sistema pode não gerar energia, é possível realizar o cálculo da energia a ser armazenada.

$$Ea(Wh) = \frac{Ec(Wh)}{Pf} \quad (3)$$

Energia total armazenada (E_a), será obtida através da razão entre a energia consumida nos n dias (E_c) e a profundidade de descarga (P_f).

O próximo passo é converter para ampere hora, para saber a capacidade total do banco de baterias. Para isso são utilizadas a energia armazenada e a tensão do banco. Essas são decididas de acordo com as necessidades do projeto, sendo que tensões menores são mais fáceis de carregar pois exigem tensões menores das fontes geradoras, e tensões maiores são mais difíceis, mas possuem uma corrente de descarga menor, o que aumenta a longevidade da bateria.

$$Cb(Ah) = \frac{Ea(Wh)}{Tv(V)} \quad (4)$$

Dividindo a energia total armazenada (E_a) pela tensão do banco de baterias, se obtém a capacidade total do banco em ampere-hora.

Em seguida, com a equação 5 será determinado o número de baterias a serem conectadas em série.

$$Ns = \frac{Tv(V)}{Te(V)} \quad (5)$$

Dividindo a tensão do banco de baterias (T_v) pela tensão da bateria escolhida (T_e), se chega ao número de baterias em série necessárias para o banco de baterias.

Para determinar o número de baterias em paralelo, é necessário avaliar a capacidade necessária para o respectivo descarregamento. Essa informação pode ser obtida junto ao fabricante da bateria, onde geralmente é observado que quanto mais rápido for o descarregamento, menor será a capacidade total da bateria.

$$N_p = \frac{C_v (Ah)}{C_e (Ah)} \quad (6)$$

Como visto na equação 6, simplesmente se divide a capacidade do banco (C_v) pela capacidade da bateria escolhida (C_e).

E por final para chegar no total de baterias (T), se multiplica o número de baterias em série pelo número de baterias em paralelo.

$$T = N_s \cdot N_p \quad (7)$$

Para a simulação será considerado baterias de chumbo-carbono da moura, modelo 12MS234, de 12V e 200Ah em descarga C20. Na Tabela 4 encontra-se sua ficha técnica.

Tabela 4 - Dados do datasheet do fabricante com diferentes velocidades de descarga.

MODELO	12MS234		
TENSÃO NOMINAL	12V		
NÚMERO DE CICLOS	450		
CAPACIDADE NOMINAL	200Ah		
TECNOLOGIA	Chumbo-Carbono		
PESO	57,35kg		
DESCARGA EM CORRENTE CONSTANTE (A)	DESCARGA EM POTÊNCIA CONSTANTE (W)		
MODELO 12MS234	MODELO 12MS234		
C1	131	C1	1207
C2	78,9	C2	738
C3	55,6	C3	408
C4	43,5	C4	487
C5	35,9	C5	408
C8	24	C8	287
C10	20	C10	249
C20	11	C20	151
C24	9,5	C24	116
C100	2,42	C100	31,3
C120	2,04	C120	25,6

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DE CARGA

O controlador de carga controla o carregamento e descarregamento do banco de baterias, para especificar um controlador de carga para o projeto é necessário saber qual é a corrente e tensão em máxima potência dos módulos que serão ligados em série e paralelo, depois é necessário saber qual a tensão do banco de baterias e a corrente máxima da carga. A tensão do banco de baterias e da associação em série dos módulos irá indicar a tensão de funcionamento do controlador de carga, e a corrente da associação em paralelo dos módulos exigida pela carga, irá determinar a corrente do controlador, sabendo as duas, se escolhe a maior, acresce 25% de seu valor como faixa de segurança e se determina a corrente do controlador de carga (PINHO; GALDINO, 2014). As equações 8 e 9 demonstram o descrito.

$$TC_{min} \geq 1,25 * TM_{máx} \text{ ou } TC_{min} \geq 1,25 * Tv \quad (8)$$

A tensão máxima que vem dos módulos e do aerogerador ($TM_{\text{máx}}$), será a soma da tensão máxima de operação dos módulos em série e esse valor multiplicado à 1,25 para margem de erro resultará na tensão mínima de operação do controlador de carga respectivo ao gerador (TC_{min}). Os valores de tensão dos módulos e dos aerogeradores são encontrados no datasheet dos respectivos fabricantes. A T_v é a tensão do banco de baterias.

$$I_{C_{\text{min}}} \geq 1,25 * I_{M_{\text{máx}}} \text{ ou } 1,25 * I_{B_{\text{máx}}} \quad (9)$$

$IM_{\text{máx}}$ é a soma das correntes máximas de operação em paralelo dos módulos com a corrente que vem do aerogerador. $IB_{\text{máx}}$ é a corrente máxima de carregamento suportada pelo banco de baterias.

O controlador de carga MPPT é mais eficiente que o controlador PWM, mas em um projeto deve-se levar em consideração outros fatores, como custo do projeto e a disponibilidade física, e as vezes, pela diferença de preço do controlador MPPT e PWM, é possível instalar mais módulos obtendo um valor maior de corrente com um controlador PWM.

Um outro fator muito importante para a dimensionamento do controlador, é que alguns fabricantes não trabalham com algumas marcas de inversores (PINHO; GALDINO, 2014).

3.4 DIMENSIONAMENTO DO GERADOR FOTOVOLTAICO

Todo dimensionamento de sistema fotovoltaico é baseado no consumo das cargas e eletrônicos do lado CC, primeiro se analisa o consumo, depois se analisa a região de instalação, seu sombreamento, e variação azimutal do sol ao longo do ano, depois se pega o consumo anual, e se calcula o consumo ajustado com as perdas de conversão do inversor e de armazenamento das baterias, assim pode-se obter o quanto de geração precisa para atender o consumo, após obtidos dados confiáveis de radiação anual do local de instalação, se escolhe uma potência de módulo e a quantidade necessária para atender a demanda, cruzando os dados de radiação, com a potência dos módulos. Há diversos métodos de geração solar, desde métodos analíticos, como o método do mês crítico até métodos por simulação em softwares

como o RETScreen, PVSOL e o HOMER, que já faz a geração integrada de fontes de energia solar, eólica e gerador a combustão (PINHO; GALDINO, 2014).

Equação 10 mostra a geração fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014):

$$EM1 = \frac{Q_{cc}}{R_b} + \frac{Q_{ca}}{R_b \cdot R_i} \quad (10)$$

A energia necessária no mês 1 (EM1), será a soma das cargas no circuito de corrente alternada (Qca) com as cargas no circuito de corrente contínua (Qcc), divididos pelos rendimentos do banco de baterias (Rb) e do inversor (Ri).

$$PM1 = \frac{EM1}{IM1 \cdot N_m \cdot N_{fc}} \quad (11)$$

A potência de geração fotovoltaico do mês 1, será a Energia ativa do mês 1 dividida pelo produto da radiação solar do mês 1 (IM1), eficiência dos módulos (Nm) e rendimento da fiação e do controlador (Nfc).

Os coeficientes de redução, incluindo os valores de degradação dos módulos, sujeira, degradação física e eficiências, são obtidos através da consulta dos datasheets dos respectivos fabricantes. As perdas por fiação são determinadas com base no comprimento da fiação, desde o ponto de geração até o ponto de consumo. No contexto desta pesquisa, serão adotados os seguintes rendimentos para a simulação de geração: 0,8 para a bateria, 0,7 para os módulos e 0,98 para o inversor. Quanto à carga utilizada na simulação apresentada na seção de resultados, ela foi mantida constante ao longo de todos os meses do ano.

Depois, é repetida a potência de geração dos 12 meses do ano, e somado. Após decidida a potência de geração do sistema, precisamos saber a potência de geração diária. Para conseguir é só dividir a potência total pela quantidade de dias no ano, com isso chegamos na quantidade de módulos diária, dividindo a potência diária pela quantidade de módulos diária em kW como mostra a fórmula 12.

$$Mn = \frac{Pd (kW)}{Pm (kW)} \quad (12)$$

Para saber a quantidade de módulos necessários (M_n), se divide a potência de geração fotovoltaica diária pela potência do módulo escolhido (P_m).

Para o cálculo de geração, será considerado o módulo Jinko Solar JKM550M-72HL4, com potência de 550 Wp, por ser comercial, acessível e com credibilidade no mercado. Na tabela 5 encontram-se suas especificações.

Tabela 5 - Dados do datasheet do módulo solar.

Modelo	JKM550M-72HL4	
	Condições Padrão de Teste	Temperatura nominal da célula em operação
Potência Máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	550 Wp	409 Wp
Tensão Máxima (V_{mp})	40.90 V	38.42 V
Corrente Máxima (I_{mp})	13.45 A	10.65 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	49.62 V	46,84 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	14.03 A	11,33 A
Eficiência do Módulo (%)	21.29%	
Preço	R\$ 1.140,00 (06/2023)	

Fonte: Elaborado pelo autor

Para realizar a geração é necessário ter uma fonte de dados confiável. No Brasil tem-se algumas fontes confiáveis, dentre elas temos, o CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica), o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), e de caráter local em Santa Catarina temos o EPAGRI/CIRAM (EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina) e (CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidro meteorologia de Santa Catarina). Para o presente trabalho os dados solares foram retirados do software disponibilizado pelo LABSOL (Laboratório de Energia Solar) da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), o RADIASOL, sua base de dados é do Atlas Solar Brasileiro. Na Tabela 6, encontram-se os dados de irradiação média mensal para orientação norte e para sete inclinações diferentes.

Para a simulação de geração neste estudo, foi considerada uma residência situada no município de Balneário Arroio do Silva. Os dados utilizados para a simulação de geração eólica foram obtidos por meio de medições de vento realizadas na plataforma de pesca, da estação BOA/UFSC localizada a uma altura de 10 metros. Quanto aos dados de geração solar, foram utilizadas informações provenientes do RADIASOL, relativas ao município de Florianópolis. A escolha de empregar os

mesmos dados para a simulação de geração decorre da proximidade geográfica entre a cidade de Florianópolis e o município em estudo.

Tabela 6 - Dados de irradiação média mensal da cidade de Florianópolis, retirados do RADIASOL

IRRADIAÇÃO kW/m ² /dia		Inclinação					
NORTE	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
Mês							
Jan	5,88	5,82	5,68	5,5	5,34	5,01	4,84
Fev	5,66	5,67	5,66	5,46	5,41	5,26	5,1
Mar	5,32	5,36	5,37	5,37	5,34	5,24	5,14
Abr	4,61	4,74	4,84	4,91	4,96	4,98	4,98
Mai	3,91	4,1	4,21	4,36	4,44	4,55	4,57
Jun	3,52	3,68	3,86	3,99	4,14	4,19	4,26
Jul	3,54	3,73	3,84	3,99	4,07	4,19	4,23
Ago	4,12	4,26	4,38	4,46	4,55	4,59	4,64
Set	4,52	4,63	4,69	4,73	4,68	4,66	4,67
Out	5,17	5,19	5,15	5,14	5,04	4,84	4,75
Nov	5,74	5,68	5,58	5,36	5,21	5,12	4,81
Dez	6,03	5,9	5,68	5,52	5,31	5,16	4,79
MEDIA	4,89	4,965	4,995	5,025	5	4,91	4,77

Fonte: Elaborado pelo autor

Devido ao movimento aparente do sol em relação a superfície terrestre e inclinação sazonal, são observados diferentes níveis de irradiação para variados ângulos de inclinação e orientação dos módulos. Inclusive, estes variam de acordo com a estação do ano.

A tabela 6 apresenta que, em casos de menor inclinação, ocorre uma maior variação anual da irradiação incidente nos módulos. Valores maiores durante o verão e menores durante o inverno. Por outro lado, em casos de maior inclinação, essa variação anual é reduzida. Valores menores durante o verão e maiores durante o inverno. Observa-se ainda que a variação de irradiação atinge um ponto máximo por volta de 30 graus. O cálculo do valor máximo é realizado mediante a consideração da média anual para cada inclinação.

3.5 DIMENSIONAMENTO DO AEROGERADOR

Para dimensionar o aerogerador, segue-se um processo semelhante ao utilizado para o gerador fotovoltaico. Primeiramente, realiza-se uma análise do consumo energético e, em seguida, divide-se esse consumo pelas eficiências e rendimentos dos dispositivos envolvidos, desde a geração até a carga. Esses dispositivos incluem o inversor, o banco de baterias, o controlador de carga, o inversor CA/CC e o próprio aerogerador. Esse cálculo permitirá determinar o consumo necessário a ser suprido pelo aerogerador, considerando todas as perdas associadas.

No caso de um aerogerador off-grid, é necessário instalar um inversor CA/CC, uma vez que o aerogerador gera energia em corrente alternada (CA) enquanto o banco de baterias opera em corrente contínua (CC). Essa configuração possibilita o adequado armazenamento e utilização da energia gerada pelo aerogerador (PINTO, 2014).

Para estimar o potencial eólico de um aerogerador, se leva em consideração a densidade absoluta do ar, a velocidade do vento e a área que a hélice do aerogerador cobre, com este dado e a eficiência de conversão da turbina obtida com o fabricante, se estima a geração total, como mostra a equação 13 (PINTO, 2014).

$$PA = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot V^3}{8} \quad (13)$$

O potencial de geração do aerogerador (PA) em watts, é calculado com o produto da constante pi, densidade absoluta do ar na pressão e temperatura de interesse (ρ) em quilograma por metro cúbico, quadrado do diâmetro da hélice (D) em metros e o cubo da velocidade do vento (V) em metros por segundo.

$$G = Pa \cdot Na \cdot h \quad (14)$$

Já a geração do aerogerador (G) em watts-hora, se obtém multiplicando a potência (Pa) em watts, eficiência do aerogerador (Na) e o número de horas desejado (h).

Após feito o modelo de geração eólica é necessário lidar com os dados de vento. A primeira informação relevante é a de que o vento varia de acordo com a sua altitude. Na teoria, quanto maior for a altura de instalação da turbina, maior será a

velocidade de vento. Como as estações meteorológicas não registram o vento em diversas alturas, pode-se utilizar um modelo matemático proposto por (MANWELL, MCGOWAN, ROGERS, 2006), para calcular a velocidade do vento na altura de interesse. Equação 15.

$$V_{rot} = V_{ref} \left(\frac{Z_{rot}}{Z_{ref}} \right)^a \quad (15)$$

Na equação 15 se tem: a velocidade do vento à altura do rotor (V_{rot}), a velocidade do vento à altura de referência da medição (V_{ref}), a altura do rotor (Z_{rot}), a altura de referência da medição (Z_{ref}) e o expoente de Hellman que irá depender da rugosidade do terreno.

No presente trabalho, será considerado uma torre eólica de aproximadamente 20 metros, então a altura da torre será a mesma da medição de vento e não será utilizada a equação 15.

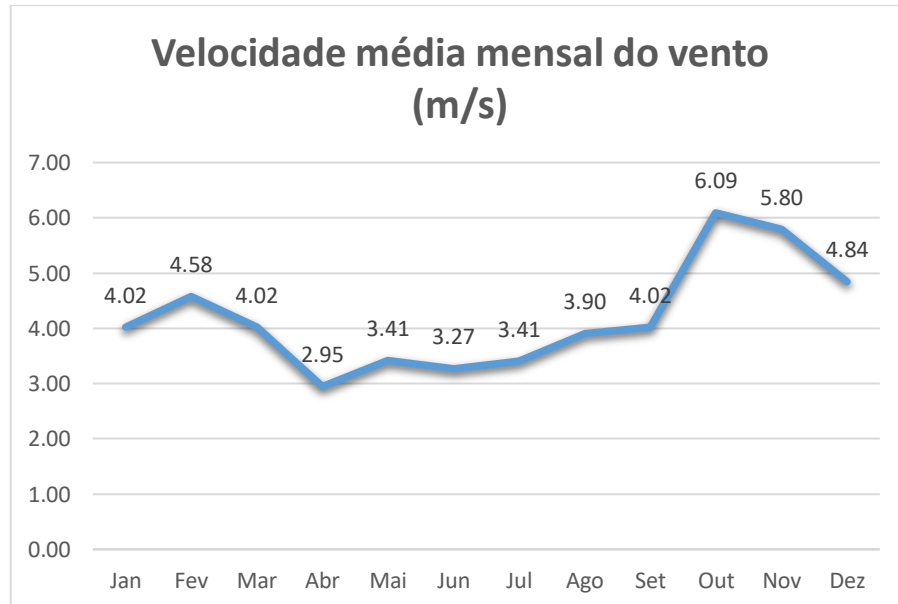
Para a simulação de geração eólica, é comum utilizar a maior quantidade possível de dados de vento do local em questão. No presente estudo, foram utilizados os dados de um ano provenientes da estação meteorológica da UFSC em parceria com o CIRAM. Essa estação está localizada na plataforma de pesca no município de Balneário Arroio do Silva, a uma altitude de 20 metros. Na figura 5, são apresentados os dados de velocidade do vento em metros por segundo, bem como a direção e a frequência correspondentes, abrangendo o período de fevereiro de 2018 a janeiro de 2019. As figuras 5 e 6, que exibem a distribuição e a frequência dos dados, foram geradas utilizando o software WRPLOT. Os dados da estação BOOA/UFSC foram gentilmente fornecidos pela Profa. Dra. Carla de Abreu D'Aquino em colaboração com o Prof. Dr. Felipe Pimenta.

Figura 10 - Imagens da estação BOOA/UFSC, na plataforma de pesca.



Fonte: Disponível no WEBSITE BOOA/UFSC (2023)

Figura 11 - Velocidade de vento média mensal da Estação Arroio do Silva localizada à 20m de altura

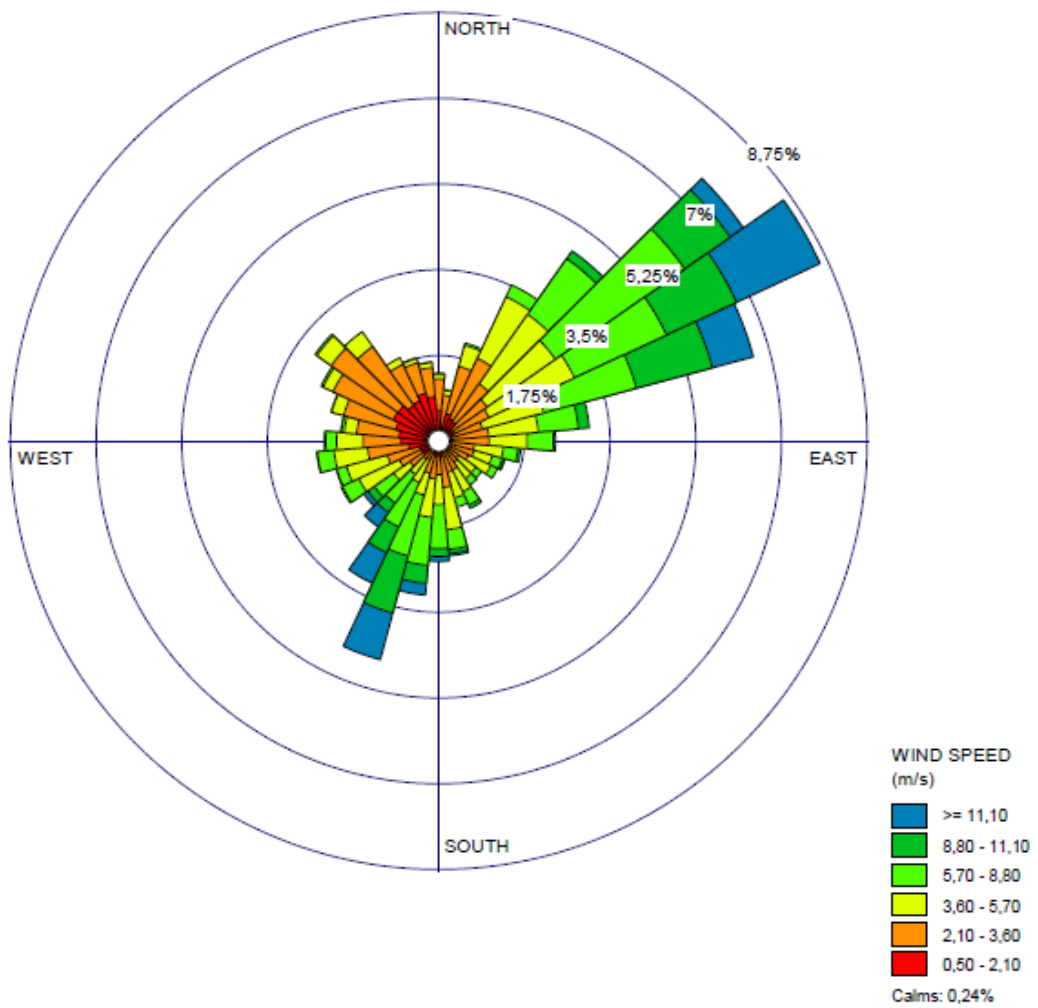


Fonte: Elaborada pelo autor

Com base nos dados apresentados na Figura 11, é possível selecionar um gerador adequado para operar dentro desse intervalo e utilizar essas mesmas informações para realizar a simulação de geração de energia.

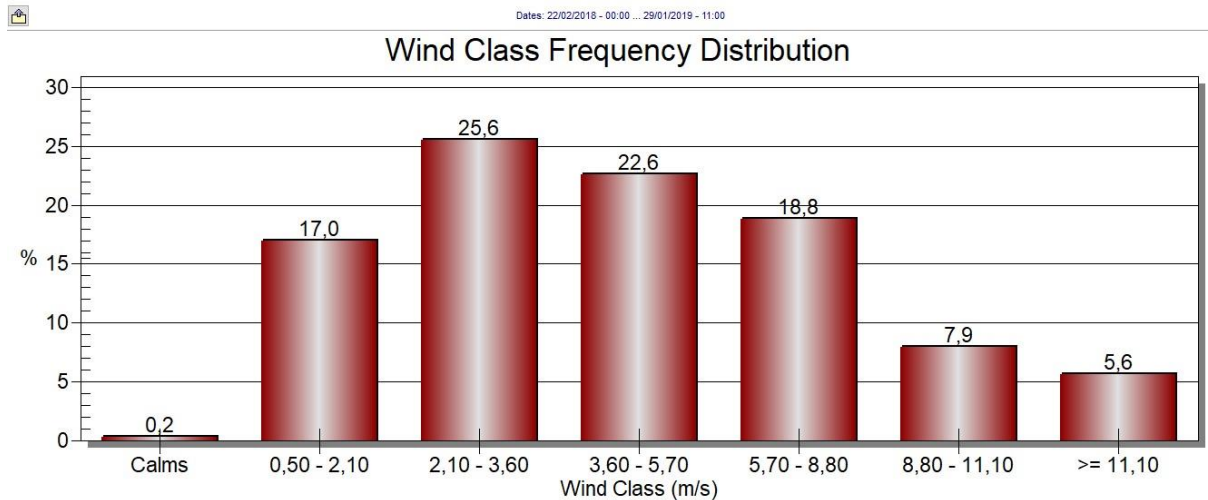
O regime de vento na região de Balneário Arroio do Silva, em Santa Catarina, é caracterizado por ser influenciado pelo clima litorâneo e pelas condições geográficas locais. Como se trata de uma área costeira, a presença do mar tem um papel significativo na determinação do padrão de ventos. Como pode-se verificar nas figuras 12.

Figura 12 - Orientação e intensidade de vento anual da cidade de Balneário Arroio do Silva



Fonte: Elaborada pelo autor com auxílio do software WRPLOT (2023)

Figura 13 - Distribuição de ocorrência de vento de acordo com sua intensidade, na cidade de Balneário Arroio do Silva



Fonte: Elaborada pelo autor com auxílio do software WRPLOT (2023)

Após verificar os dados de vento das figuras 11, 12 e 13, pode-se escolher um modelo de aerogerador, atentando-se para a velocidade mínima de geração e máxima de segurança encontradas na ficha técnica do aerogerador, e distribuição de ocorrência da figura 13. É importante escolher um aerogerador que tenha velocidade inicial de geração abaixo da velocidade média do local, e velocidade máxima de segurança abaixo da velocidade máxima registrada no local. Em modelos antigos, a orientação de instalação também era fundamental, mas a maioria dos modelos atuais de aerogeradores, rotacionam junto com a orientação do vento. Caso um modelo que rotacione não seja uma opção, deve-se levar em conta a direção da maior ocorrência de ventos registrada, na região de estudo que será instalado o aerogerador. Na região de Balneário Arroio do Silva, essa maior ocorrência acontece para o nordeste.

3.6 DIMENSIONAMENTO DO GERADOR À COMBUSTÃO

Para dimensionar um gerador a combustão é necessário calcular a carga total da residência, listando todos os equipamentos. No cálculo da carga total é importante levar em consideração a corrente de partida de certos equipamentos, como geladeiras, bombas d'água, micro-ondas e outros que possuem a corrente de partida maior do que a nominal. Esse dado de corrente de partida se encontra disponível no manual do mesmo, alguns equipamentos utilizam valores de 4 à 12 vezes maior que a corrente nominal.

Sabendo a carga total da residência, pode se escolher a potência do gerador. Para a simulação foi obtido uma potência de equipamentos total de 5,9 kW e foi escolhido um gerador monofásico a gasolina de 6,5kW com frequência de 60 hertz e tensão bivolt de 115V e 230V. Para a automatização do mesmo, é necessária a instalação de um painel de transferência automática, fornecido pelo próprio fabricante do gerador, este painel vai acionar o gerador quando receber o sinal do CLP.

4 RESULTADOS

Na seção de resultados, serão apresentados e discutidos três aspectos fundamentais: o arranjo de instalação, a geração de energia na residência e a análise de custos. O arranjo de instalação descreverá a disposição dos componentes do sistema, como painéis solares, aerogeradores e geradores a combustão, destacando sua eficiência e integração. Em seguida, será detalhada a geração de energia na residência considerando o desempenho dos diferentes sistemas e fontes energéticas utilizadas. Por fim, será realizada uma análise dos custos envolvidos, comparando o investimento inicial, os custos operacionais e os benefícios obtidos com a implementação dessas soluções. Essa seção fornecerá informações cruciais para avaliar a viabilidade e eficácia do sistema de geração de energia elétrica adotado.

4.1 ARRANJO DO SISTEMA HÍBRIDO

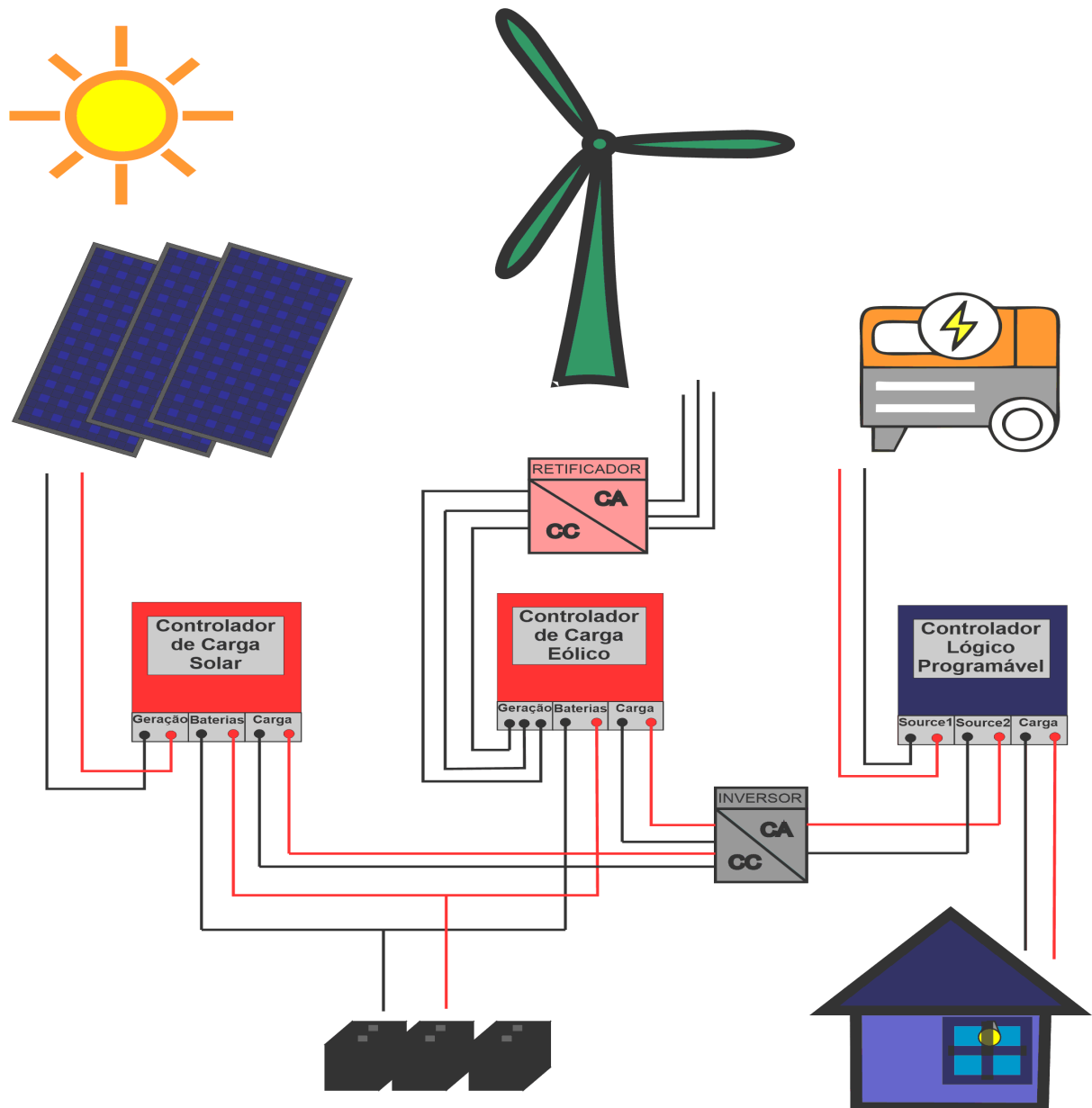
Há diversas formas de se montar um layout de instalação híbrida, cada um vai de acordo com as necessidades do consumidor, dos objetivos da instalação e das limitações físicas do espaço e dos equipamentos. Embora já se encontre no mercado equipamentos automatizados como, inversores híbridos *off-grid* com controlador de carga e controlador lógico programável embutidos, com entradas para gerador solar, eólica e diesel, no presente trabalho será levado em consideração um layout de instalação um pouco mais complexo com seus componentes separados. Objetivando assim, explicar suas funcionalidades ao mesmo tempo que mantém a carga sempre com energia elétrica.

Um dos maiores problemas de se ter duas fontes geradoras de energia diferentes em paralelo, é o problema de sincronismo. Para manter a integridade da carga e do gerador síncrono as fontes geradoras precisam acertar suas fases de tensão e frequência (LORA, 2006).

O layout de instalação será: Gerador fotovoltaico conectado ao banco de baterias por um controlador de carga, o aerogerador é conectado ao mesmo banco de baterias por um retificador CA/CC e um segundo controlador de carga. Os controladores de carga estarão em paralelo, suas primeiras saídas alimentarão o banco de baterias e suas saídas de carga alimentaram MPPTs diferentes de um inversor CC/CA, que se conectará à um controlador lógico programável e levará

energia CA para a residência. Junto a saída desse inversor, será conectado o gerador à combustão síncrono, ao mesmo controlador, para acertar as fases de tensão e frequência que são provenientes do inversor e do gerador síncrono. No mercado há diversas marcas de controladores, com função de sincronizar geradores, como o “Deep Sea”. A operação do mesmo é definida por estabelecer uma fonte primária, de onde serão retirados os dados padrões de tensão e frequência, e uma secundária, que se ajustará ao sistema primário. No circuito do trabalho, a primária, será a fonte renovável que vem do inversor. A Figura 14 apresenta um esquema do layout.

Figura 14 - Layout de instalação do sistema de geração híbrida



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

No layout da Figura 14 se tem a energia CC vindo dos módulos, passa pelo controlador de carga que efetua o controle de carregamento do banco de baterias e de envio para o mppt 1 do inversor. Em paralelo a esse sistema, se tem o gerador eólico trifásico, a energia vem em CA, passa pelo retificador que converte para CC, e entra no controlador trifásico eólico, este faz o carregamento em paralelo do banco de bateria junto ao gerador solar e sua saída de carga vai para o mppt 2 do inversor.

Alguns parâmetros devem ser atentados para o funcionamento do sistema, a tensão de entrada das fontes geradoras deve estar dentro da faixa de operação do controlador, e a corrente que vem dos módulos e do aerogerador não deve extrapolar 10% da corrente máxima de carregamento do banco de bateria, para manter a integridade e longevidade do mesmo. A peça fundamental para o funcionamento deste sistema, é o controlador lógico programável, ele é o cérebro do sistema, ele será ajustado para manter a tensão e frequência do sistema através de programação interna, o inversor se ajustará aos seus padrões e o gerador síncrono irá entrar na fase que vem do inversor.

A energia que vem das fontes renováveis será dimensionada para manter a carga sempre alimentada na tensão e frequência dos aparelhos da residência, em momentos de emergência, em escassez de recurso ou em momentos em que o pico de potência for muito alto, a tensão vai diminuir, isso acionará o CLP, e o CLP acionará o gerador síncrono. Assim, a residência terá sempre energia elétrica.

4.2 SISTEMAS DE GERAÇÃO DA RESIDÊNCIA

A base de cálculo de dimensionamento do sistema é o consumo, através deste será estabelecido todos os outros parâmetros. O consumo da residência de baixo consumo é de 130,18 Wh/mês. O segundo passo é estabelecer quantidade de dias de autonomia para o seu sistema, para o trabalho será adotado 3 dias de autonomia. O terceiro passo é multiplicar o rendimento das baterias, do inversor, do controlador de carga, do CLP e as perdas por fiação. Para o cálculo de rendimento total do projeto tem-se 0,7 de razão de performance dos módulos, 0,8 de eficiência das baterias, 0,97 de eficiência do inversor, 0,95 do controlador de carga, 0,98 do CLP e 0,98 de perdas por fiação, as eficiências são encontradas no datasheet dos equipamentos. Multiplicando esses valores tem-se o resultado da eficiência total de 0,4987, essa é uma perda considerável para um sistema de geração de energia, isso

são devido ao alto número de equipamentos no sistema, essa eficiência pode ser melhorada significativamente pela adesão de equipamentos automatizados que façam as funções em um só ponto, como inversores com função de controladores, ou controladores com função eólica e solar integrada, dentre outros equipamentos disponíveis no mercado.

Para saber a geração necessária para atender a residência, divide-se o consumo mensal pela eficiência total do sistema, dando o valor de 261,05 kWh/mês. Utilizando as fórmulas da seção 3.4 se chega a uma quantidade necessária de 6 módulos de 550 Wp (equação 16), mas como parte da demanda será atendida pelo aerogerador de 1 kW, considera-se 3 módulos para a simulação de geração. No quadro 1 e na Figura 15 encontram-se os dados e da geração do sistema solar e eólico para atender a demanda. O consumo total é de 3132,62 kWh e a produção total é de 3197,97 kWh, dando um abatimento de 102,09%.

$$N = \frac{3500 \text{ W (potência média diária)}}{550 \text{ Wp}} = 6,36 \quad (15)$$

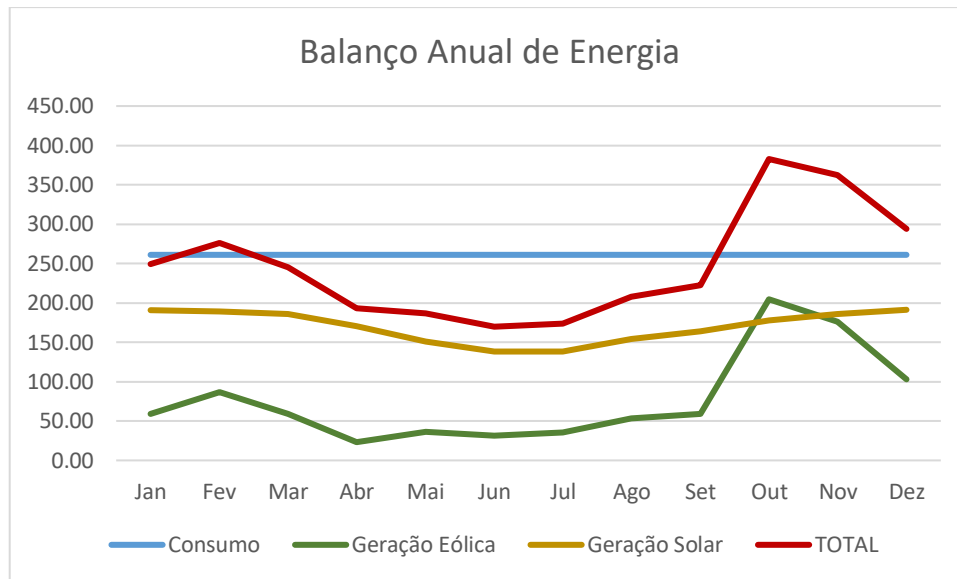
Quadro 1 - Dados de consumo e geração da residência

Mês	Consumo	Geração Eólica	Geração Solar	TOTAL
Jan	261,05 kWh	58,78 kWh	190,58 kWh	249,35 kWh
Fev	261,05 kWh	86,82 kWh	189,19 kWh	276,00 kWh
Mar	261,05 kWh	58,78 kWh	186,07 kWh	244,84 kWh
Abr	261,05 kWh	23,19 kWh	170,13 kWh	193,32 kWh
Mai	261,05 kWh	36,00 kWh	151,07 kWh	187,07 kWh
Jun	261,05 kWh	31,54 kWh	138,25 kWh	169,80 kWh
Jul	261,05 kWh	35,84 kWh	138,25 kWh	174,09 kWh
Ago	261,05 kWh	53,71 kWh	154,54 kWh	208,25 kWh
Set	261,05 kWh	58,80 kWh	163,90 kWh	222,69 kWh
Out	261,05 kWh	204,61 kWh	178,01 kWh	382,71 kWh
Nov	261,05 kWh	176,29 kWh	185,72 kWh	362,02 kWh
Dez	261,05 kWh	102,78 kWh	191,27 kWh	294,05 kWh
MÉDIA	261,05 kWh	58,78 kWh	174,12 kWh	233,77 kWh
TOTAL	3132,62 kWh	927,13 kWh	2037,07 kWh	3197,97 kWh

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A partir dos dados de consumo e geração, foi gerado a figura 15 para representar o balanço anual de energia elétrica.

Figura 15 - Balanço anual de consumo e geração de energia



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O próximo passo, será a escolha dos controladores de carga. No mercado há opções de controladores de carga solar, eólico e híbrido. No trabalho será considerado dois controladores de carga, um para o sistema solar e um para o sistema eólico. O primeiro fator que se deve atentar para escolha do controlador de carga, são os valores de corrente máxima dos módulos e do aerogerador.

Para a parte solar, são utilizados 4 módulos de 550 Wp, cada um com corrente máxima de 13,45 A e tensão máxima de 40,9 V. Isso permite a utilização do controlador de carga MPPT Epever XTRA 4415N. O controlador trabalha com tensões de saída para a bateria de 12 V/24 V/36 V/48 V, suportando uma corrente máxima de 40 A. Na entrada, o controlador aceita uma tensão máxima de 150 V. Com essa configuração, é possível conectar 2 módulos em série e 2 em paralelo, resultando em uma tensão máxima de 81,8 V e corrente máxima de 26,9 A.

Para a parte eólica, são utilizados três valores de tensão fixa fornecidos pelo aerogerador: 24 V, 48 V e 230 V, com correntes máximas de 41,6 A, 20,83 A e 4,35 A, respectivamente. No entanto, antes de chegar ao controlador de carga, é necessário realizar a conversão da corrente CA para CC utilizando um retificador trifásico. O retificador selecionado para este projeto é o modelo MDS100-16 121521 da marca MDS, com limites máximos de 1,6 kV e 100 A. Após a etapa de retificação, o próximo componente é o controlador de carga, existindo diversas opções de marcas com características diferentes disponíveis no mercado. No caso deste projeto, foi

escolhido o controlador de carga Ecopower, modelo FW-10-24, que suporta uma corrente de saída máxima de 27 A e opera na tensão de 24 V.

Em seguida, será realizada a seleção do gerador a combustão, levando em consideração a potência máxima instalada. Para atender a demanda de um sistema de backup, é necessário escolher um gerador que possa suprir completamente a carga em caso de falha total do sistema. Com base na potência total instalada de 5,971 kW, foi escolhido um gerador a gasolina com capacidade de 6 kVA. Além disso, será utilizado um painel de transferência automático, que aciona o gerador automaticamente quando a tensão atinge níveis pré-estabelecidos pelo projetista, garantindo um fornecimento contínuo de energia para a carga.

Para a escolha do inversor, leva-se em consideração dois fatores, a potência total fornecida pelas fontes geradoras eólica e solar, e a potência instalada na residência. A soma das potências totais de geração solar e eólica é de 2650 kW e a potência instalada é de 5,971 kW, então o inversor escolhido precisa conseguir oferecer essa potência para a residência, para evitar o acionamento do gerador a gasolina. Além do fator de potência, deve se atentar para as tensões de operação, frequência e tipo de onda do inversor. O inversor escolhido é o Inversor de Tensão de Onda Pura de 6000W da FLACH. Ele tem tensão de entrada de 12 V, tensão de saída de 220 V e frequência de 60 Hz.

Para a escolha do controlador lógico programável, foi primeiramente, estabelecido a função do controlador no sistema. No mercado existem diversos tipos de controladores, nós precisamos de um com a função de sincronização de geradores distintos. Atualmente no Brasil, a marca Deep Sea e a K30 dominam o mercado desses tipos de controladores, através deles, pode-se escolher uma configuração padrão, e respostas diferentes de acordo com as oscilações do sistema. O nível de tensão e frequência da carga será de 220 V e 60 Hz, a saída do inversor também está para 220 V e 60 Hz, logo na programação do CLP, essa será o padrão. Já a energia elétrica que vem do gerador a gasolina, vem em 220 V e 60 Hz, mas precisará ter ajuste de fase, para entrar em sincronia de acordo com as fases e forma de onda que vem do inversor.

E por último será montado o banco de baterias. As baterias escolhidas para o projeto, são as baterias estacionárias Moura Solar 12MS234, elas são baterias de 12 V e com profundidade de descarga recomendada de 30%. As tensões de saída dos controladores estabelecidos acima, são de 24 V, e precisaremos ligar duas baterias

em série e 6 em paralelo, dando o total de 12 baterias, de acordo com as equações da seção 3.2.

Não será considerada dimensionamento de fiação, pois o projeto é fictício e não possui metragem espacial para considerar a devida fiação. Deixando claro o fato de que o dimensionamento de condutores de um projeto real, deve ser feito segundo a NBR-5410.

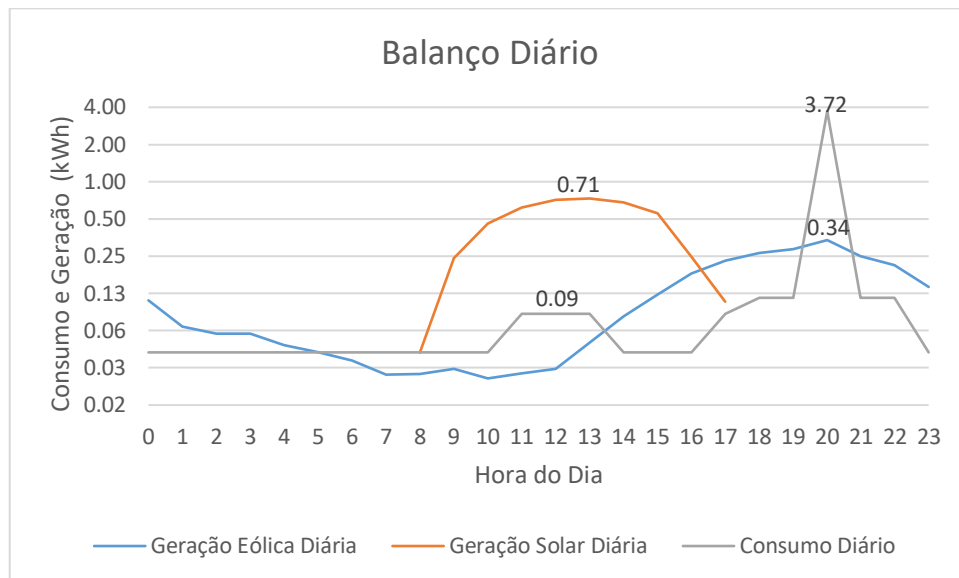
4.2.1 Discussão

Os sistemas híbridos *off-grid*, são sistemas mais complexos, e com isso, tornam-se mais difíceis de implementar e mais caros. Atualmente as soluções mais encontradas para levar energia para residências isoladas, são geradores, à gasolina e à diesel, que pelo custo inicial de investimento, se tornam mais atraentes.

O primeiro fato que será levantado acerca do sistema, será sua eficiência total. Por demandar vários dispositivos de conversão de potência, o sistema degrada muita energia, no caso proposto, foi de 51,13% de energia perdida nas conversões e armazenamento. Para contornar este problema, pode-se utilizar os inversores híbridos fornecidos pelo mercado, eles possuem dispositivos integrados para fazer o controle da bateria e controle de acionamento do gerador a combustão, dentre outras funções. Com estes dispositivos pode-se chegar em eficiências próximas de 90%, reduzindo consideravelmente a energia elétrica perdida.

Com o sistema proposto para atender uma residência com consumo aproximado de 130 kWh/mês, a carga será sempre atendida, em alguns momentos demandando mais potência e em outros menos. Para montagem da Figura 16 de balanço energético diário foi feito uma média horária dos dados de vento da estação BOOA/UFSC da plataforma do Balneário Arroio do Silva, e para os dados de irradiação diária, foi utilizado o balanço do dia 20 de maio de 2023, fornecido pelo site da EPAGRI/CIRAM. Na Figura 16 encontram-se o balanço diário das fontes geradoras e do consumo fictício estabelecido na seção 2.1.

Figura 16 - Balanço diário de consumo e geração de energia elétrica, em escala logarítmica



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Ao analisar a Figura 16 de geração e consumo, é possível constatar os períodos de máxima geração solar, ocorrendo aproximadamente ao meio-dia, e de máxima geração eólica, em torno das 20 horas. Além disso, nota-se que o ponto de máximo consumo também ocorre por volta das 20 horas. Entre a meia-noite e as 5 horas, o consumo é totalmente suprido pelo sistema eólico. Já das 5 às 8 horas, o banco de baterias assume a alimentação do consumo que não pode ser atendido integralmente pelo sistema eólico. Às 8 horas, a geração solar começa a fornecer energia para suprir a demanda, e quando o sol se põe, a geração eólica aumenta novamente.

Durante o período noturno, entre as 20 horas, ocorre o horário de pico de carga, com acionamento de chuveiro e bomba d'água. Para atender a essa carga, é necessário utilizar o banco de baterias em conjunto com a fonte eólica. O pico de demanda de potência exigido pelo chuveiro acarreta um aumento considerável na corrente exigida pelo inversor durante esses horários, o que tem um impacto direto na escolha do inversor e do gerador a combustão, elevando o valor total do projeto.

Uma solução para contornar esse problema seria remover o chuveiro elétrico e substituí-lo por um sistema a gás ou por aquecimento solar por serpentina. Somente com essa modificação, o consumo mensal diminuiria para 49,179 kWh e a potência máxima diária para 489 W, o que reduziria o número de módulos necessários, o

tamanho do inversor, a potência do gerador e a quantidade de baterias, tornando o projeto mais acessível.

4.2.2 Análise Financeira

Atualmente o custo da CELESC de novos pontos de acesso isolados, é de aproximadamente R\$ 150 mil por km para ligação trifásica e R\$ 100 mil por km para ligação monofásica, este valor inclui fiação, postes, transformadores, instalação etc. Deste valor 100% são repassados para clientes que não se encaixam em programas sociais de baixa renda. Para clientes rurais, o primeiro ponto monofásico é gratuito. E devido a lei 6.766 de 1979, os loteamentos registrados antes de dezembro de 1979, também tem isenção total de instalação.

Tabela 7 - Lista de equipamento com seus respectivos valores. Pesquisa de preço realizada em junho de 2023. (AUTOR, 2023)

Lista de equipamentos	Qnt	Preço	Total
Módulo Solar JINKO JKM550M-72HL4	3	1.140,00	R\$3.420,00
Aérogador AVATAR™ -I; Avant Garde	1	5.886,75	R\$5.886,75
Gerador à Gasolina TG6500CXR 4T 6kVA	1	3.499,90	R\$3.499,90
Painel de Transferência Automático Monofásico	1	1.639,90	R\$1.639,90
Bateria Estacionária Moura Solar 12MS234	12	1.799,00	R\$21.588,00
Controlador de Carga MPPT 40A 12/24V - Epever XTRA 4210N	1	769,00	R\$769,00
Controlador de Carga Eólico Ecopower FW10-24	1	863,10	R\$863,10
Ponte Retificadora Trifásica MDS100-16 121521	1	105,00	R\$105,00
CONTROLADOR GERADOR DEEP SEA DSE 5220	1	2.253,79	R\$2.253,79
Inversor De Tensão Onda Pura 6000W FLACH	1	5.699,00	R\$5.699,00
		TOTAL	R\$45.724,44

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Sendo que, o custo total de instalação deste trabalho é de R\$ 45.724,44. E considerando uma ligação monofásica. A partir de 457,24 m, o valor inicial do investimento seria menor em um sistema autônomo *off-grid*, do que na ligação de uma concessionária. Agora, levando em conta a degradação do sistema, precisamos saber a vida útil do banco de baterias. Para a bateria escolhida, o fabricante apresenta um gráfico de número de ciclos por profundidade de descarga, e para a profundidade de descarga do projeto, de 30% o número de ciclos é de 600 ciclos. Ou seja, o banco de baterias deste sistema precisará ser trocado a cada 4 anos e 11 meses,

aproximadamente. Agregando ao sistema um valor mensal de R\$ 364,80 para a manutenção do banco de baterias. Esse valor, pode ser contornado pela substituição de baterias de lítio, que possuem valor inicial perto de 9 vezes maior, mas apresentam maior eficiência, densidade de energia e uma vida útil, aproximadamente, 3 vezes maior. Além dessa opção, temos a linha MFV da Moura. A fabricante de baterias Moura, produz duas linhas de bateria para sistemas *off-grid*, a linha MS destinada à sistemas de pequeno porte e a linha MFV que é destinada para sistemas de médio grande porte, essas baterias também são de chumbo-carbono como as MS, mas possuem uma vida útil aproximadamente 7 vezes maior.

Outra análise fundamental, será em relação ao valor do gasto mensal. A tarifa com encargos do mês de junho de 2023 na concessionária CELESC foi de 0,7636 R\$/kWh. Multiplicando este valor pelo consumo mensal de 130,18 Wh/mês, se chega a um gasto de 54,81 R\$/mês.

Nas melhorias sugeridas para o sistema proposto neste trabalho, foi falado da série MFV para substituir as baterias MS. As baterias MS têm 600 ciclos de vida útil para uma descarga de 30% a 25°C, já as baterias da série MFV possuem 5000 ciclos para o mesmo nível de descarga e de temperatura. E a outra melhoria sugerida no sistema, seria a utilização de um inversor híbrido que possui um custo mais elevado. As baterias MFV apesar do ciclo de vida elevado, são fornecidas de 200 Ah, 250 Ah e 400 Ah em células de 2 V, e refazendo os cálculos chega-se em um número de 48 baterias, para manter a capacidade e autonomia do sistema proposto inicialmente.

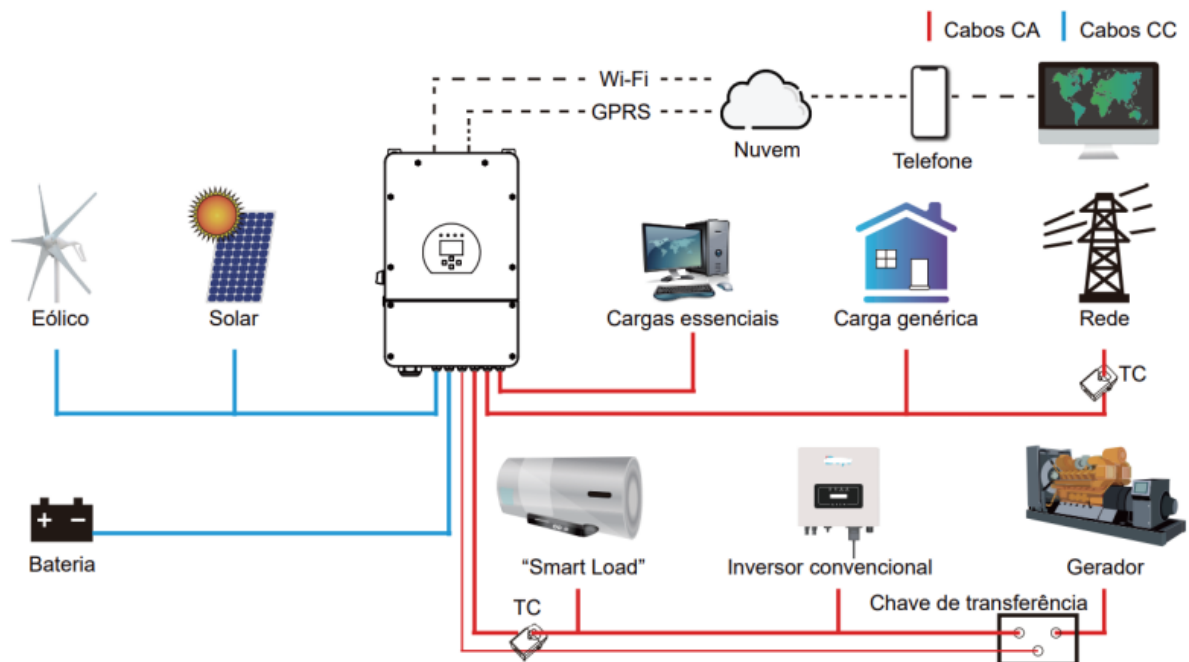
Na tabela 10, encontram-se os valores do sistema melhorado, e na Figura 17, pode-se ver o esquema de instalação fornecido pelo fabricante do inversor híbrido.

Tabela 8 - Lista de equipamento do sistema melhorado com seus respectivos valores. Pesquisa de preço realizada em junho de 2023.

Lista de equipamentos	Qty	Preço	Total
Módulo Solar JINKO JKM550M-72HL4	3	1.140,00	R\$3.420,00
Aérogador AVATAR™ -I; Avant Garde	1	5.886,75	R\$5.886,75
Gerador à Gasolina TG6500CXR 4T 6kVA	1	3.499,90	R\$3.499,90
Painel de Transferência Automático Monofásico	1	1.639,90	R\$1.639,90
Baterias Moura MFV 400	48	1.404,29	R\$67.405,92
Ponte Retificadora Trifásica MDS100-16 121521	1	105,00	R\$105,00
ELGIN8KW-HYB	1	12.125,00	R\$12.125,00
			R\$94.082,47

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

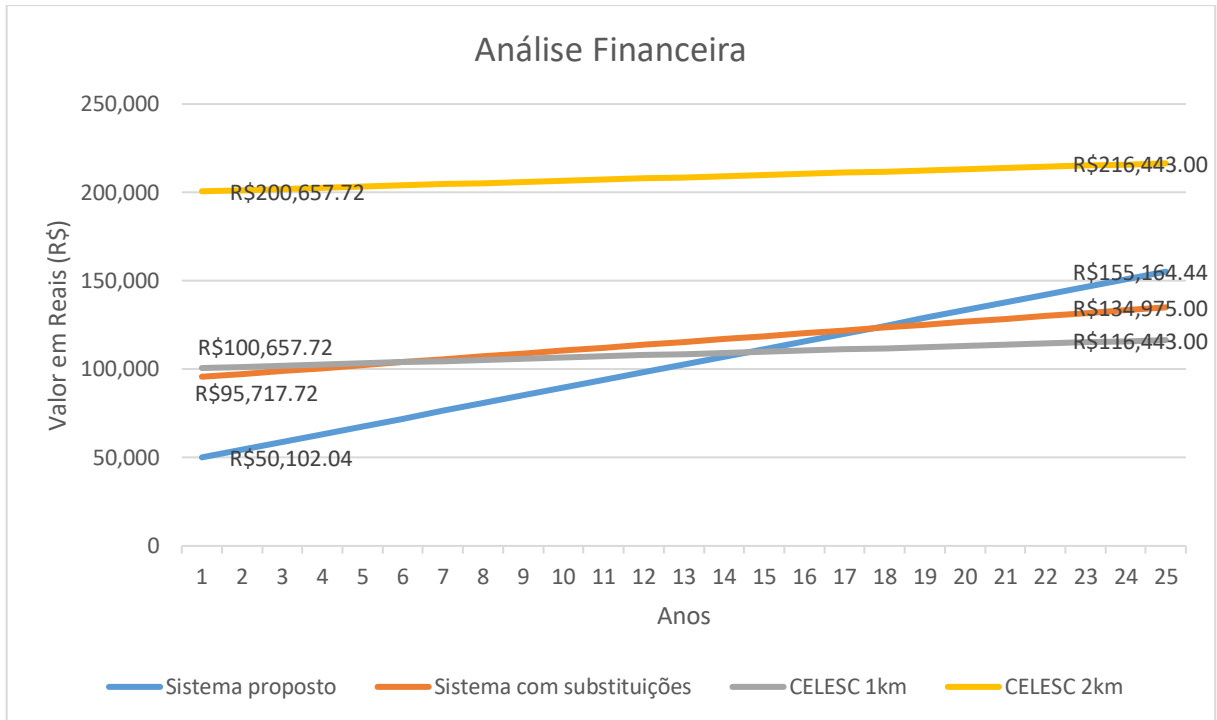
Figura 17 - Esquema de instalação de um inversor híbrido fornecido pelo fabricante Elgin Solar



Para concluir, neste trabalho são apresentadas três opções para o fornecimento de energia elétrica. A primeira opção consiste em um sistema inicial com equipamentos separados e uma bateria mais econômica, com um custo inicial de R\$ 45.724,44 e uma despesa mensal de manutenção das baterias de R\$ 364,8. A segunda opção é um sistema com um inversor híbrido e uma bateria um pouco mais cara, com um custo inicial de R\$ 94.082,47 e uma despesa mensal de manutenção das baterias de R\$ 131,31. No entanto, esse sistema possui uma vida útil mais longa. A terceira opção é o fornecimento de energia através da concessionária, com um custo inicial de R\$ 100.000 por km e uma taxa mensal de R\$ 54,81. Cabe ao usuário avaliar as vantagens e desvantagens de cada opção, levando em consideração o investimento inicial, os custos de manutenção e a durabilidade do sistema.

A última análise financeira será a comparação dos valores de investimento inicial e mensal ao longo de 25 anos dos 3 sistemas, fazendo uma diferenciação entre sistemas fornecidos pela concessionária CELESC de 1 km e 2 km. Na Figura 18 encontra-se esses valores.

Figura 18 - Análise financeira das opções de fornecimento de energia elétrica



Na Figura 18, não foram considerados o aumento anual da tarifa de energia elétrica, e a mudança anual no preço das baterias. Levando isso em consideração, percebe-se que a curto prazo os sistemas *off-grid* são mais baratos, mas a partir de aproximadamente 15 e 18 anos, o sistema da CELESC de 1 km, se torna mais econômico. Já um fornecimento da CELESC de 2 km ou mais, levaria mais de 40 anos para competir com os preços do sistema *off-grid* proposto pelo trabalho.

Uma comparação válida seria relacionar o custo de um sistema fornecido pela CELESC com fotovoltaico *on-grid*. Neste caso, o consumo precisaria ser maior que o de análise do estudo. Pois um sistema com consumo de 130 kWh/mês e uma tarifa de 0,82 R\$/kWh, levaria muito tempo para o investimento retornar.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi sugerido a geração híbrida entre energia solar, energia eólica e um gerador a combustão, como solução para o problema de residências afastadas de centros de distribuição de energia. Foram mostrados os passos para o correto dimensionamento de um sistema híbrido e exemplificado a instalação do mesmo, mostrando passos, problemas e algumas sugestões para contornar estes problemas.

A geração distribuída está, aos poucos, se tornando realidade na sociedade e a geração híbrida *off-grid* é um contribuinte importante para este caminho. Através da geração híbrida pode-se contornar o problema de fontes intermitentes de geração, e possíveis problemas de manutenção. Como vimos a geração eólica na região costeira possui pico de geração por volta das 20 horas e a solar, por volta do meio-dia. Essa complementariedade, junto à um banco de baterias, contorna qualquer problema de interrupção de energia. Em hipóteses onde, não acontece geração de energia em nenhuma das fontes por 3 dias, ainda tem o gerador a gasolina para atuar de fonte backup.

O sistema proposto teve um orçamento de R\$ 45.724,44. Embora esse valor seja consideravelmente elevado, ele seria suficiente para cobrir a instalação monofásica em até 457,24 metros pela distribuidora CELESC. Em outras palavras, apesar do custo elevado, essa opção ainda se torna economicamente viável para a substituição do fornecimento de energia elétrica, oferecendo até mesmo a possibilidade de o governo adotar essa estratégia no atendimento aos beneficiários do programa Luz para Todos.

As desvantagens dos sistemas *off-grid* em relação à transmissão fornecida por uma concessionária são percebidas, especialmente quando o objetivo da transmissão é o desenvolvimento da região. Essa discrepância é devida ao custo de implementação do sistema *off-grid* para uma única residência, o qual apresenta um valor específico, e esse custo aumentaria exponencialmente para duas, três ou mais residências. Em contraste, o investimento na infraestrutura de transmissão elétrica seria único, independentemente do número elevado de consumidores atendidos. Portanto, caso a prioridade seja o desenvolvimento da região, o investimento em transmissão elétrica revela-se mais favorável e vantajoso.

Em conclusão, visando aprimorar a eficiência desta solução, sugere-se a substituição de equipamentos de custo inicial mais baixo, mas com desempenho inferior, por equipamentos de custo mais elevado, como a linha de baterias da marca Moura, o inversor off-grid integrado com controlador de carga solar, eólico e controlador lógico programável. Embora essa troca resulte em um aumento de custos, o investimento ainda se manterá significativamente abaixo da opção com a concessionária de energia elétrica, ao mesmo tempo em que elevará a eficiência do projeto para aproximadamente 90%.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tem como intuito, tornar acessível a informação para implementação de sistemas de geração híbrida para comunidade de baixa renda, mostrando os passos, a montagem e instalação do mesmo, utilizando 3 fontes de energias. O próximo passo seria montar uma cartilha e fazer a distribuição, com utilização de gravuras, e contatos de fornecedores. Como visto na introdução, ainda há muitas residências isoladas de baixa renda sem energia elétrica, e pela distância da residência à concessionária de energia, não é lucrativo para a concessionária levar energia até estes consumidores. Com este fato, fica evidente que é de extrema importância desenvolver meios alternativos para levar energia para as pessoas de baixa renda que moram em lugares isolados para que elas consigam meios para melhorar sua qualidade de vida, obtendo acesso à informação para ter a possibilidade de transformar o seu meio.

Como este trabalho foi majoritariamente teórico, outra continuidade para o estudo, seria a implementação em MATLAB, para diferentes arranjos e verificar valores de correntes, limites de geração, problemas de carga etc. Criar modelos matemáticos para simular a aleatoriedade das fontes geradoras e ver como o sistema reagiria. Outra continuação seria, adquirir verba para montar um sistema pequeno de geração integrada para alguma família de baixa renda, ou fazer o acompanhamento de alguém que vá montar um sistema *off-grid* híbrido, e fazer as devidas anotações de problemas que venham a acontecer, fazendo a parte prática do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Regulamentação para consumidor de baixa renda**. 2016. Disponível em: <www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-regulamenta-criterios-para-consumidor-de-baixa-renda> Acesso em: setembro de 2021.
- CROTTI, Pâmela. **Dimensionamento, instalação e análise do desempenho de um sistema fotovoltaico autônomo para alimentação da iluminação externa de uma planta piloto bioclimática**. 2019. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2019.
- DUTRA, Ricardo; **Energia Eólica Princípios e Tecnologias**. Rio de Janeiro: creseb, 2008.
- ELETROBRÁS. **Programa Luz Para Todos**. 2003. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Luz-para-Todos.aspx>> Acesso em: setembro de 2021.
- GALDINO, Jean Carlos da Silva; **Curso: Manutenção de ferrovia – Eletrotécnica II** – 2011.
- GARCIA, Lenin Domingues. **Sistema híbrido gerador de energia elétrica para sustentação de estação de bombeamento**. 2018. 84 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- GWEC, Global Wind Energy Council. **Relatórios globais de energia eólica**. Acesso em 05/2022. <https://gwec.net/members-area-market-intelligence/reports/gwec-global-reports/>
- IBGE. **Relatório de análise contínua**. 2019. Disponível em: <sidra.ibge.gov.br> Acesso em: setembro de 2021.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia; **Dados de velocidade de vento da Estação Meteorológica de Araranguá (A867)**. Acesso em 05/2022. <https://portal.inmet.gov.br/>
- KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos César Barioni de; ROBBA, Ernesto João. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2ed. São Paulo, SP, 2010.
- LORA, E. E. S. e Haddad J. **Geração Distribuída: Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- LUQUE, A., HEGEDUS, S.; **Photovoltaic Science Handbook of Photovoltaic Science**. Chichester: Wiley & Sons Ltd, 2003.
- LUZ, Thaís Doll. **Tecnologia renovável de micro geração distribuída para aplicações conectadas à rede em comunidades de baixa renda para a cidade**

de Araranguá. 2015. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2015.

MAESTRI, Hugo Guilherme. **Dimensionamento De Um Sistema Fotovoltaico Autônomo Para Alimentação De Um Dispositivo De Monitoramento De Parâmetros Elétricos Em Linhas De Transmissão**. 2018. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

MANWELL J.F., MCGOWAN J.G., ROGERS A.L. **Wind Energy Explained. Theory, Design and Applications**. 1 ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2006

NELSON, D.B.; NEHRIR, M. H.; WANG, C. **Unit sizing and cost analysis of standalone hybrid wind/ PV/ fuel cell power generation systems**. Renewable Energy, v. 31, 2006

NISENBAUM, Moises André; **Pilhas e Baterias**. Apostila Academia, 2017. Acesso em 24/06/2022. <https://www.academia.edu/download/52043481/Apostila.pdf>

NOLASCO, Rafael César; **Modelagem Técnica e Econômica de Sistemas Híbridos Compostos por Geração Distribuída Fotovoltaica e Baterias Eletroquímicas**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.

OVELHA, Rui Miguel Rocha Val de; **Projeto, Dimensionamento e Instalação de Solução Fotovoltaica em moradia offgrid**. 2017. Tese (Mestrado) – Curso de Engenharia de Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, 2017.

PES, João Hélio Ferreira; ROSA, Taís Hemann da. **Análise jurisprudencial do direito de acesso à energia elétrica**. 2016.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel- cresesb, 2014.

PINTO, Milton de Oliveira; **Fundamentos De Energia Eólica**. 1ed. Rio de Janeiro. RJ, 2014.

ROBERTS, Justo José; **Análise de desempenho de um sistema híbrido de geração de energia solar-eólico-diesel considerando variações probabilísticas da carga e dos recursos renováveis**. 2012. Tese (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2017.

VERA, Luís Horácio; **Programa computacional para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos**. 2004. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.