



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

JENIFFER RIOS MARTINS

THIAGO VOLNEI DE OLIVEIRA VIEIRA

**ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA
DA PONTE ANITA GARIBALDI, EM LAGUNA/SC**

Palhoça
2020

JENIFFER RIOS MARTINS
THIAGO VOLNEI DE OLIVEIRA VIEIRA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA
DA PONTE ANITA GARIBALDI, EM LAGUNA/SC

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade do Sul de Santa Catarina, como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Me. Eng.

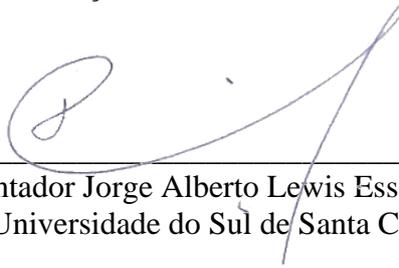
Palhoça
2020

JENIFFER RIOS MARTINS
THIAGO VOLNEI DE OLIVEIRA VIEIRA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA
DA PONTE ANITA GARIBALDI, EM LAGUNA/SC

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 16 de novembro de 2020.



Professor e orientador Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Me. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Paulo Roberto May, MSc.
Universidade do Sul de Santa Catarina



Professor Fabiano Max da Costa, Esp. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedicamos este trabalho as nossas famílias, que nos apoiaram e incentivaram durante todos os anos de estudos. São nossa inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus, por nossas vidas, e por nos proporcionar discernimento na escolha de nossos caminhos e na superação dos obstáculos.

Agradecemos aos nossos familiares e amigos por toda a paciência e incentivo que sempre demonstraram conosco, abraçando nosso sonho desde o início. Em especial, a Márcia e o Gabriel, esposa e filho do Thiago, também ao Ruan, Rosilda e Ézio, esposo, mãe e pai da Jeniffer, respectivamente. São pessoas únicas, sem as quais os estudantes não conseguiriam chegar até aqui.

Agradecemos também ao nosso orientador Jorge Alberto Lewis Esswein Junior por abraçar este trabalho, estando sempre disposto a sanar nossas dúvidas e preocupado com a boa evolução do estudo. Estendemos nossos agradecimentos ao professor Claudio Coelho, que esteve acompanhando o desenvolvimento da segunda parte do trabalho de forma atenta e disponível.

A Universidade do Sul de Santa Catarina agradecemos por fornecer estrutura e ferramentas adequadas para a formação do Engenheiro Eletricista, ao coordenador do curso Anderson Soares André, agradecemos por todos os ensinamentos e ao corpo docente agradecemos pela paciência e dedicação a arte de ensinar.

"Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer."
(Mahatma Gandhi)

RESUMO

Este trabalho objetiva apresentar uma solução economicamente viável para o fornecimento de energia elétrica para a iluminação da ponte Anita Garibaldi, em Laguna/SC. Como objetivos secundários, apresentou-se a história de Laguna, das suas pontes e sua importância geográfica para o comércio e para o desenvolvimento da região. Também procurou-se conhecer os empecilhos que dificultam o fornecimento de energia para a Ponte Anita Garibaldi e quais tecnologias de geração energética disponíveis no mercado, bem como seus custos de instalação e manutenção. Para alcançar este objetivo, utilizou-se como metodologia a revisão bibliográfica (para a parte teórica) e o estudo de caso para a parte de cálculos e engenharia. Como resultado da pesquisa, foi elaborado um estudo de viabilidade econômica tendo como base os valores orçados para cada fonte de energia renovável avaliada (fotovoltaico, eólico e híbrido). Por ser o mais adequado para projetos de engenharia/implementação de atividades, a metodologia do *payback* demonstrou que apenas o sistema de geração de energia fotovoltaico se apresenta economicamente viável para o projeto. De acordo com esta análise econômica, o retorno financeiro do investimento acontecerá após decorridos 60,3 meses, ou seja, pouco mais de 5 anos, já inclusos os custos mensais de manutenção e a depreciação estimada. Assim, ao final deste estudo, acreditou-se que os objetivos iniciais da pesquisa foram todos alcançados. Foi verificado, ainda, que a engenharia elétrica é muito dinâmica e proporciona novas e melhores soluções a cada ano, quer seja com novas tecnologias, quer seja com novos equipamentos ou materiais. Por mais que a solução energética da Ponte Anita Garibaldi venha a ser resolvida em breve, a geração de energia limpa/renovável sempre será um importante tema de debates na academia e na sociedade, ficando aqui a sugestão para novos estudos.

Palavras-chave: Engenharia Elétrica. Geração de Energia. Ponte Anita Garibaldi.

ABSTRACT

This work aims to present an economically viable solution for the supply of electricity for the lighting of the Anita Garibaldi Bridge, in Laguna/SC. As secondary goals, the history of Laguna, its bridges and its geographical importance for trade and for the development of the region are presented. Furthermore, it also sought to know the obstacles that hinder the supply of energy to the Anita Garibaldi Bridge and what energy generation technologies are available on the market, as well as their installation and maintenance costs. To achieve this objective, the bibliographic review (for the theoretical part) and the case study for the calculations and engineering part were used as methodology. As a result of the research, an economic feasibility study was prepared based on the budgeted values for each renewable energy source evaluated (wind, solar and hybrid). For being the most suitable approach for engineering/activity implementation projects, the payback methodology demonstrated that only the photovoltaic power generation system is economically viable for the project. According to this economic analysis, the financial return on investment will take place in 60.3 months after the project started, that is, just over 5 years, including monthly maintenance costs and estimated depreciation. Thus, at the end of this study, it is believed that the initial research objectives were all achieved. It was also verified that electrical engineering is very dynamic and provides new and better solutions every year, whether as new technologies or with new equipment or materials. As much as the energy solution of the Anita Garibaldi Bridge will be resolved soon, the generation of clean / renewable energy will always be an important topic of debate in academic rooms and society, leaving here the suggestion for further studies.

Keywords: Electrical engineering. Power generation. Anita Garibaldi Bridge.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do município de Laguna	22
Figura 2 - Pontilhão sobre o Canal das Laranjeiras em 1922.....	24
Figura 3 - Trânsito sobre aterro de Cabeçudas e a ponte Henrique Lage em 2013.....	25
Figura 4 - Projeção panorâmica do projeto arquitetônico vencedor.....	26
Figura 5 - Ponte Anita Garibaldi	27
Figura 6 - Mudanças na radiação solar.....	32
Figura 7 - Tipos de painéis fotovoltaicos	34
Figura 8 - Topologia de um sistema fotovoltaico.....	34
Figura 9 - Arranjos fotovoltaicos.....	35
Figura 10 - A circulação dos ventos no globo terrestre.....	37
Figura 11 - Primeiro aerogerador do Brasil.....	38
Figura 12 - Funcionamento de um aerogerador.....	43
Figura 13 - Sistema híbrido de geração de energia	44
Figura 14 - Topologia de um sistema híbrido conectado à rede elétrica.....	47
Figura 15 - Diagrama de ligação com a rede de distribuição	49
Figura 16 - Localização geográfica da ponte Anita Garibaldi.....	57
Figura 17 - Painel solar 380W – EMSZ 380M DG.....	63
Figura 18 - Topologia do aerogerador HUMMER modelo H13.2 20kW	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Adições líquidas de capacidade fotovoltaica solar entre 2016 e 2018.....	30
Gráfico 2 - Geração de energia eólica	39
Gráfico 3 - Geração de energia no Brasil por matriz e região.....	46
Gráfico 4 - Irradiação solar diária média mensal para as diferentes inclinações	61
Gráfico 5 - Consumo versus geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico	80
Gráfico 6 - Velocidade média mensal do vento na altura de 10 metros.....	82
Gráfico 7 - Direção do vento na altura de 10 metros.....	83
Gráfico 8 - Velocidade média mensal do vento na altura de 100 metros.....	85
Gráfico 9 - Curva de potência da turbina do aerogerador	85
Gráfico 10 - Consumo versus geração de energia elétrica do sistema eólico.....	101
Gráfico 11 - Consumo versus geração de energia elétrica do sistema híbrido.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrições técnicas dos equipamentos.....	58
Tabela 2 - Consumo e Custo Mensal de Energia Elétrica (2017-2018).....	59
Tabela 3 - Dados de irradiação solar na região de Laguna/SC.....	60
Tabela 4 - Descritivo técnico do módulo fotovoltaico.....	63
Tabela 5 - Descritivo técnico do inversor de frequência.....	67
Tabela 6 - Geração de energia elétrica mensal do sistema fotovoltaico.....	80
Tabela 7- Comprimento de rugosidade do solo.....	84
Tabela 8 - Características técnicas do aerogerador	86
Tabela 9 - Geração de energia elétrica mensal do sistema eólico	100
Tabela 10 - Geração de energia elétrica mensal do sistema híbrido	107
Tabela 11 – Síntese técnica dos sistemas de geração de energia elétrica.....	109
Tabela 12 - Custo de implantação do sistema fotovoltaico.....	110
Tabela 13 - Custo de implantação do sistema eólico.....	111
Tabela 14 - Custo de implantação do sistema híbrido.....	112
Tabela 15 - Manutenção e Depreciação (anual e mensal).....	113
Tabela 16 - Variáveis utilizadas na análise payback descontado - Fotovoltaico.....	114
Tabela 17 - Variáveis utilizadas na análise payback descontado - Eólico	115
Tabela 18 - Variáveis utilizadas na análise payback descontado - Híbrido	116
Tabela 19 - Valor Presente Líquido (VPL)	117
Tabela 20 - Síntese comparativa dos sistemas de geração de energia elétrica - Payback.....	118
Tabela 21 - Síntese econômica do sistema de geração fotovoltaico - VPL.....	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANTT – Agência Nacional de Transporte Terrestre
- ART – Anotação de Responsabilidade Técnica
- BR – Rodovia Brasileira
- BRISE – Do termo francês *brise-soleil*, a tradução literal é "bloqueador solar"
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- CCAF – Câmara de Conciliação e Arbitragem da Administração Federal
- CCR – Contrato de Concessão
- CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina
- COSIP – Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DPS – Dispositivo de Proteção Contra Surtos
- Dr – Doutor
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- FDI – Fator de Dimensionamento
- FP – Fator de Potência
- FSEC – Centro de Pesquisas Energéticas da Universidade da Flórida
- IEA – Agência Internacional de Energia
- IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- IPTU – Imposto Predial e Territorial Urbano
- MME – Ministério de Minas e Energia
- MPPT – Rastreador de Máxima Potência
- MT – Média Tensão
- NBR – Norma Brasileira
- NOCT – Temperatura Nominal de Operação da Célula
- NREL – Laboratório Nacional de Energia Renovável
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

OVERALL – Termo inglês para “No geral/Total”

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PCS – Subsistema Condicionador de Potência

PER – Programa de Exploração da Rodovia

PR – Performance Ratio

PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

PVC – Policloreto de Vinilo, material plástico

SC – Santa Catarina

SciELO - Termo inglês *Scientific Electronic Library Online*, é uma Biblioteca Eletrônica Virtual

SELIC – Sistema Especial de Liquidação e Custódia

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SIN – Sistema Interligado Nacional

STC – Condição Padrão de Teste

STF – Supremo Tribunal Federal

STRING – Termo inglês para corda/fileira de equipamentos

TIP – Taxa de Iluminação Pública

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

TRF4 – Tribunal Regional Federal da Quarta Região

UNISUL – Universidade do Sul de Santa Catarina

VCA – Tensão de Corrente Alternada

VCC – Tensão de Corrente Contínua

VOC – Tensão de Circuito Aberto

VPL – Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

%/K – Porcentagem por kelvin

° – Grau

°C – Grau Celsius

°N – Grau Norte

µm – Micrômetro

A – Ampère

GW – Gigawatt

GWh – Gigawatt hora

h/mês – Hora por mês

Hz – Hertz

kg – Quilograma

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

km – Quilômetro

km/h – Quilômetro por hora

kV – Quilovolt

kVA – Quilovolt ampère

kW – Quilowatt

kWh – Quilowatt hora

kWh/m² – Quilowatt hora por metro quadrado

kWh/m².dia – Quilowatt hora por metro quadrado dia

kWh/m².mês – Quilowatt hora por metro quadrado mês

kWh/mês – Quilowatt hora por mês

kWp – Quilowatt pico

m – Metro

m/s – Metro por segundo

m² – Metro quadrado

mm – Milímetro

mm² – Milímetro quadrado

m-Si – Painel solar fotovoltaico de Silício Monocristalino

MW – Megawatt

n° – Número

p-Si – Painel solar fotovoltaico de Silício Policristalino

R\$ – Real

rpm – Rotações por minuto

TWh – Terawatt hora

un – Unidade

V – Volt

V_{mpp} – Tensão do ponto de máxima potência

W – Watt

W/m² – Watt por metro quadrado

W_p – Watt pico

XVII – Numeral 17 em algarismos romanos

XVIII – Numeral 18 em algarismos romanos

Ω.mm²/m – Ohm milímetro quadrado por metro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	20
1.2 JUSTIFICATIVA	20
1.3 OBJETIVOS	21
1.3.1 Objetivo geral.....	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DA REGIÃO DE LAGUNA/SC.....	22
2.1.1 A transposição da laguna do Imaruí.....	23
2.2 A PONTE ANITA GARIBALDI	25
2.2.1 Custeio da energização da Ponte Anita Garibaldi.....	27
2.3 MÉTODOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL	29
2.3.1 Energia Fotovoltaica	29
2.3.1.1 A energia fotovoltaica no Brasil.....	30
2.3.1.2 O recurso fotovoltaico	31
2.3.1.3 Tecnologias para geração de energia fotovoltaica.....	32
2.3.1.3.1 <i>Tipos de células fotovoltaicas</i>	33
2.3.1.4 Topologia de sistemas de geração de energia fotovoltaica	34
2.3.1.4.1 <i>Principais características dos equipamentos do sistema fotovoltaico</i>	35
2.3.2 Energia Eólica	36
2.3.2.1 A energia eólica no Brasil	37
2.3.2.2 O recurso eólico.....	40
2.3.2.3 Tecnologias para geração de energia eólica	41
2.3.2.4 Topologia de sistemas de geração de energia eólica	42
2.3.3 Energia híbrida	43
2.3.3.1 A energia híbrida no Brasil e no mundo.....	45
2.3.3.2 Topologia de sistemas de geração de energia híbridos	46
2.4 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA	47
2.5 CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA	48
2.6 ANÁLISE TÉCNICA	49
2.6.1 Demanda energética do projeto.....	49
2.6.2 Custo de instalação e manutenção.....	50

2.6.3	Legislação e a rede compartilhada	50
2.6.4	Viabilidade econômica e financeira	50
3	METODOLOGIA.....	53
3.1	ENFOQUE METODOLÓGICO.....	53
3.2	PROCEDIMENTOS TÉCNICOS	54
3.3	AMOSTRA	55
3.4	COLETA DE DADOS.....	55
3.5	ANÁLISE DOS DADOS.....	55
4	ANÁLISE TÉCNICA DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO	57
4.1	LOCAL DE ESTUDO	57
4.2	ENTRADA DE ENERGIA.....	58
4.3	CARGA INSTALADA.....	58
4.4	CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	59
4.5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	60
4.5.1	Potencial solar na região de Laguna/SC.....	60
4.5.2	Potência do sistema fotovoltaico.....	61
4.5.3	Módulos fotovoltaicos.....	62
4.5.4	Média mensal de geração de energia elétrica.....	64
4.5.5	Área de instalação dos módulos fotovoltaicos	65
4.5.6	Inversor de frequência.....	66
4.5.6.1	Fator de dimensionamento (FDI)	66
4.5.6.2	Tensão de circuito aberto.....	68
4.5.6.3	Corrente de curto-circuito.....	69
4.5.6.4	Tensão de máxima potência	70
4.5.7	Dimensionamento dos condutores	72
4.5.7.1	Dimensionamento dos condutores em corrente contínua (CC).....	72
4.5.7.2	Dimensionamento da proteção em corrente contínua (CC).....	75
4.5.7.3	Dimensionamento dos condutores em corrente alternada (CA).....	75
4.5.7.4	Dimensionamento da proteção de corrente alternada (CA).....	77
4.5.8	Dimensionamento dos eletrodutos	78
4.5.9	Comparativo do consumo versus geração de energia elétrica.....	79
4.5.10	Proposta de conexão com à rede da distribuidora	81
4.6	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA EÓLICO.....	81
4.6.1	Potencial eólico na região de Laguna/SC.....	81

4.6.2	Aerogerador.....	85
4.6.2.1	Componentes elétricos do aerogerador	86
4.6.3	Potência do sistema eólico	87
4.6.4	Média mensal de geração de energia elétrica.....	87
4.6.5	Topologia do sistema eólico.....	88
4.6.6	Dimensionamento dos condutores e proteções	89
4.6.6.1	Dimensionamento em corrente contínua (CC).....	90
4.6.6.1.1	<i>Dimensionamento dos condutores do segundo trecho</i>	90
4.6.6.1.2	<i>Dimensionamento da proteção do segundo trecho</i>	92
4.6.6.2	Dimensionamento em corrente alternada (CA).....	93
4.6.6.2.1	<i>Dimensionamento dos condutores do primeiro trecho</i>	93
4.6.6.2.2	<i>Dimensionamento da proteção do primeiro trecho</i>	95
4.6.6.2.3	<i>Dimensionamento dos condutores do terceiro trecho</i>	96
4.6.6.2.4	<i>Dimensionamento da proteção do terceiro trecho</i>	97
4.6.7	Dimensionamento dos eletrodutos	98
4.6.8	Comparativo do consumo versus geração de energia elétrica.....	99
4.6.9	Proposta de conexão com à rede da distribuidora	101
4.7	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO	102
4.7.1	Potência do sistema híbrido.....	102
4.7.2	Dimensionamento dos condutores em corrente contínua (CC).....	104
4.7.2.1	Dimensionamento da proteção em corrente contínua (CC).....	105
4.7.2.2	Dimensionamento dos condutores em corrente alternada (CA).....	105
4.7.2.3	Dimensionamento da proteção de corrente alternada (CA).....	105
4.7.3	Dimensionamento dos eletrodutos	106
4.7.4	Dimensionamento dos condutores e proteções	107
4.7.5	Comparativo do consumo versus geração de energia elétrica.....	107
4.7.6	Proposta de conexão com à rede da distribuidora	108
4.8	SÍNTESE DO DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO	109
5	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	110
5.1	ANÁLISE ECONÔMICA PRIMÁRIA - MÉTODO PAYBACK	114
5.1.1	Análise payback descontado (sistema fotovoltaico)	114
5.1.2	Análise payback descontado (sistema eólico).....	115
5.1.3	Análise payback descontado (sistema híbrido)	116
5.1.4	Resultados	116

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA SECUNDÁRIA – SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	117
5.2.1 Valor presente líquido (VPL).....	117
5.3 SÍNTESE DA ANÁLISE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO	118
6 CONCLUSÃO.....	119
REFERÊNCIAS.....	121
APÊNDICE(S)	128
APÊNDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	129
APÊNDICE B – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA EÓLICO	130
APÊNDICE C – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA HÍBRIDO	131

1 INTRODUÇÃO

Para atender as necessidades sociais e econômicas do sul do Estado de Santa Catarina são necessárias constantes manutenções, ampliações e otimizações das estradas que escoam tanto a produção quanto viabilizam a ligação regional e o turismo nessa região.

Em conjunto as grandes obras viárias têm-se a preocupação com a segurança de seus usuários e é neste ponto que a estrutura de iluminação é um grande aliado, auxiliando na visibilidade de trechos de estradas e em alguns casos contribuindo para a composição paisagística da região (iluminação cênica).

A iluminação dessas obras depende da energia obtida junto às distribuidoras locais de energia elétrica. Comumente, o custo do consumo energético é repassado para os municípios via Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública - COSIP (antiga TIP), onde o valor arrecadado é repassado integralmente para os cofres públicos municipais. Ocorre que nem sempre as prefeituras entram em acordo e aceitam pagar pela energização de vias federais ou estaduais que interligam duas cidades ou dois estados, por exemplo.

A este respeito, um caso de conhecimento público é a obra viária da BR-101 no trecho que compreende a ligação entre os municípios de Laguna e Pescaria Brava, no litoral sul de Santa Catarina. A referida obra foi inaugurada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT em 2015 e contempla uma ponte de quase três quilômetros de extensão – a Ponte Anita Garibaldi. A conta de energia referente à iluminação deste trecho nunca foi paga pelo poder público. A distribuidora local, a Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), cortou o fornecimento em 2018 e retomou logo em seguida, fornecendo energia somente para garantir a segurança do tráfego. A iluminação cênica das estruturas de sustentação da ponte foi cortada. As faturas vencidas permanecem pendentes de pagamento e não há cenário para um acordo político entre DNIT, Prefeitura de Laguna e Prefeitura de Pescaria Brava, pois ninguém deseja assumir essa despesa sozinho (RBS/SC, 2017; REIS, 2018).

Neste cenário, por ser um problema que afeta a sociedade local e catarinense, cabe aos engenheiros eletricitas ofertarem soluções alternativas e viáveis que possam solucionar ou minimizar esta situação, apresentando melhores soluções tecnológicas para a geração de energia renovável, pois entende-se que a autossuficiência energética poderia resolver este impasse político.

Dentre os aparatos tecnológicos para produção de energia elétrica renovável à disposição (e que se enquadram na necessidade deste projeto), a geração de energia eólica, fotovoltaica e híbrida (eólico e fotovoltaica) são as opções mais viáveis do ponto de vista

técnico, econômico e ambiental. Isso indica que este estudo deverá se aprofundar nestes três modais, revelando suas características, vantagens e desvantagens.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A construção da ponte Anita Garibaldi na região de Laguna era uma necessidade conhecida há décadas. Era comum usuários da BR-101 perderem horas nos imensos congestionamentos na região da antiga ponte, ademais o transporte de cargas e passageiros também sofria prejuízos com o tráfego intenso na região. Essa demanda foi contemplada e a ponte foi inaugurada em 2015. Entretanto, ficou o impasse na questão do custeio e manutenção da iluminação, pois os entes governamentais se recusam a assumir na integralidade.

Neste sentido, a presente pesquisa pretende responder a seguinte questão: qual dentre as possibilidades tecnológicas de geração de energia renovável se mostra mais viável (técnica e economicamente) para suprir a demanda de energia elétrica da ponte Anita Garibaldi em Laguna/SC?

1.2 JUSTIFICATIVA

No ano de 2017, de acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica no país cresceu 1,2%, mantendo o Brasil entre os dez maiores consumidores de energia elétrica do mundo (EPE, 2018). O incremento da renda per capita, a qualidade de vida e a inserção de novas tecnologias de produção (baseadas na robótica) têm contribuído para este aumento, sendo percebido fortemente nas indústrias. Por outro lado, a matriz energética como vinha historicamente construída não está conseguindo atender as demandas dos consumidores, muito por consequência das novas filosofias de geração baseadas na sustentabilidade. Assim, o futuro tem cobrado dos pesquisadores e engenheiros eletricitistas soluções cada vez mais ajustadas com o meio ambiente e ao novo perfil dos investimentos neste setor.

Na outra ponta, temos a questão da iluminação em vias públicas. As prefeituras (e os consumidores) estão sem condições de arcar com novos gastos e custeio desta energia. A maior parte da arrecadação dos entes públicos é destinada a pagamento de aposentados, folha corrente, dívidas judiciais e repasses obrigatórios (educação e saúde). Pouco ou quase nada sobra para obras, investimentos e novas despesas. Neste cenário, é pouco provável que os

entes governamentais envolvidos com a manutenção da Ponte Anita Garibaldi entrem em entendimento para custeio da energia.

Dessa forma, a opção pela geração de energia renovável aparenta ser uma alternativa viável que, nos dias atuais, possibilita a geração energética com custos relativamente baixos, competitivos, remunerando o capital. Tendo como referência países europeus e asiáticos, a tendência é que os modais eólico e solar sejam as opções de geração de energia renováveis mais acessíveis do mercado. As demandas mundiais por fontes ecológicas e sustentáveis estão cada vez maiores, tornando seus custos (projeto, fabricação, instalação e manutenção) cada vez menores e, portanto, economicamente viáveis.

Pelo exposto, este projeto de pesquisa é importante e tem interesse social relevante, pois pretende estudar os modais de geração de energias renováveis como forma de solucionar o problema da iluminação da ponte Anita Garibaldi em Laguna/SC.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Identificar a melhor fonte de energia renovável, do ponto de vista técnico, econômico e ambiental, para proporcionar autossuficiência energética da ponte Anita Garibaldi, em Laguna/SC.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Apresentar a ponte Anita Garibaldi e sua demanda energética;
- b) Dimensionar o sistema de geração de energia fotovoltaica, eólica e híbrida para atender o consumo da Ponte Anita Garibaldi;
- c) Apresentar uma proposta de conexão do sistema de geração a rede da distribuidora;
- d) Realizar análise de viabilidade técnica e econômica;
- e) Comparar as possibilidades tecnológicas e apontar a opção mais viável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste capítulo é proporcionar base literária para avançar na propositura de alternativas energéticas renováveis para suprir a demanda da iluminação da Ponte Anita Garibaldi em Laguna/SC. Neste sentido, será realizada uma contextualização histórica da cidade, da ponte e da situação atual do custeio da energização do novo trecho da rodovia. Também serão revisadas as alternativas tecnológicas para geração de energias renováveis e a respectiva análise econômica dos projetos.

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DA REGIÃO DE LAGUNA/SC

O município de Laguna está localizado no litoral sul catarinense, no encontro da laguna de Imaruí com o oceano Atlântico, conforme ilustrado na Figura 1 (PML, 2020).

Figura 1 - Localização do município de Laguna



Fonte: MAPASAPP, 2020.

Em que pese a história de Laguna ser contada a partir da chegada dos colonizadores vicentinos, é de conhecimento dos historiadores que, antes da chegada dos colonizadores, algumas tribos de índios carijós por ali viviam (PML, 2020).

Entretanto, oficialmente, o que se sabe é que o vilarejo de Laguna nasceu em razão da localização privilegiada e da disputa territorial entre os reinos de Portugal e Espanha. Durante os séculos XVII e XVIII, as duas metrópoles imperiais (portuguesa e espanhola) acreditavam que esta região ao sul do trópico de capricórnio pertencia para si (PML, 2020).

Assim, em 29 de julho de 1676 o bandeirante vicentista Domingos de Brito Peixoto foi incumbido com a missão de adentrar a barra da Laguna do Imaruí e erguer uma capela no local. Por ser devoto de Santo Antônio, o bandeirante batizou o lugar como Santo Antônio dos Anjos de Laguna. Antes de voltar para São Vicente, o bandeirante deixou pequena infraestrutura suficiente para a sobrevivência de algumas famílias, cumprindo sua missão de expansão e colonização da capitania de São Vicente até os limites acordados no tratado de Tordesilhas (PML, 2020).

Posteriormente, entre os anos de 1748 e 1756, por ser uma política de colonização da metrópole diversas famílias açorianas foram instaladas na região que vai de São Vicente até Rio Grande de São Pedro, representando mais de 1000 km de litoral. Desta forma, a então chamada Vila de Santo Antônio dos Anjos de Laguna também foi contemplada com algumas famílias provenientes do arquipélago dos Açores. Esta interação cultural proporcionou o crescimento econômico e demográfico do então vilarejo (PML, 2020).

Com a instalação do Porto de Laguna, em 1839, o vilarejo alcançou notoriedade mundial. O porto de Laguna foi tomado por revolucionários rio-grandenses após a interdição de seus próprios portos. Passada a revolução, a vila foi elevada à condição de cidade em 15 de abril de 1847, com denominação oficial (já adotada por seus moradores) de Laguna ou Município de Laguna. Passou a ter prefeito, delegado, juiz e câmara de vereadores (PML, 2020).

2.1.1 A transposição da laguna do Imaruí

A transposição da laguna do Imaruí é muito antiga, sempre representando um desafio ao seu tempo. Até a construção do pontilhão¹ da estrada de Ferro Dona Teresa Cristina, entre 1880 e 1884, a transposição do curso d'água entre os distritos de Cabeçadas e Laranjeiras (ambos pertencentes a Laguna) era realizado por pequenas embarcações de passageiros e algumas balsas para cargas e carroceiros. A estrada de ferro, ilustrada na Figura 2, possibilitou uma ligação comercial efetiva, desenvolvendo a economia da região sul do estado (PML, 2020).

¹ Pontilhão: “Pequena ponte, ponte pouco extensa” (RIBEIRO, 2019).

Figura 2 - Pontilhão sobre o Canal das Laranjeiras em 1922



Fonte: GIESBRECHT, 2019.

Na década de 1930 a locomoção terrestre por automóveis já era uma realidade, disputando espaço com carruagens, carroças e alguns carros de boi. Em 1934 o presidente Getúlio Vargas inaugurou o aterro de Cabeçadas e a Ponte Henrique Lage (ainda em atividade), possibilitando a transposição da laguna do Imaruí, a ligação terrestre da capital catarinense com o sul do estado e a futura integração rodoviária nacional (PML, 2020).

Posteriormente, no ano de 1956, com a BR-101 finalizada em Santa Catarina, o projeto de integração nacional por rodovias passou a tomar forma. Era possível viajar do Rio de Janeiro até Porto Alegre e Montevideu por estradas de rodagem. Foi dado início ao importante corredor rodoviário que, poucas décadas mais tarde, chegou ao seu limite, ocasionando filas e atrasos para os usuários, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Trânsito sobre aterro de Cabeçudas e a ponte Henrique Lage em 2013



Fonte: ENGEPLUS, 2013.

Neste sentido, fruto da reivindicação antiga de usuários da rodovia e de diversas organizações sociais, a nova ponte foi licitada em 2011 e sua construção ficou a cargo da empreiteira Camargo Correa, vencedora do certame. O projeto previa 2,8 quilômetros de obras, com dois mastros estaiados de 50 metros de altura cada, suportando os 400 metros do vão central. Quatro anos passados desde o lançamento do edital, a ponte foi inaugurada em julho de 2015, trazendo fluidez para a rodovia, desenvolvimento econômico e beleza arquitetônica para os usuários, moradores e turistas.

2.2 A PONTE ANITA GARIBALDI

Fruto da antiga reivindicação da sociedade catarinense e de diversas entidades de classe, a nova ponte sobre o Canal das Laranjeiras, em Laguna/SC, passou a tomar forma no ano de 2001. A decisão política foi fundamental para o início da duplicação da BR-101 no trecho sul, entre os municípios de São José e Passo de Torres, ambos em Santa Catarina. As obras de duplicação da rodovia foram realizadas em trechos, previamente definidos e licitados de forma independente. Entretanto, em razão de seguidos contingenciamentos e cortes no orçamento público, as obras não avançaram conforme cronograma inicial e o trecho que envolvia a nova ponte sobre a laguna do Imaruí foi o mais afetado (DIÁRIO CATARINENSE, 2015).

Assim, em que pese a duplicação da rodovia oficialmente nunca ter parado, somente no ano de 2010, com o edital para escolha e contratação do escritório responsável pelo projeto

arquitetônico é que ficou realmente decidido pela construção de uma nova ponte sobre o Canal da Laguna do Imaruí (Canal das Laranjeiras). A ponte antiga seria mantida para trânsito local. Desta forma, no ano de 2011, com a licitação de escolha da empreiteira responsável pela engenharia e construção (Camargo Correa), as obras da nova ponte iniciaram no local (FIGUEIREDO, 2011).

O projeto arquitetônico vencedor, apresentou uma proposta que contemplava as premissas e especificações requeridas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) e, como solução de engenharia para o vão móvel, ofereceu uma ponte estaiada² em leve curvatura, conforme exposto na Figura 4, proporcionando solução tecnológica atual, com baixa manutenção e beleza visual.

Figura 4 - Projeção panorâmica do projeto arquitetônico vencedor



Fonte: FIGUEIREDO, 2011.

A obra de engenharia contempla um trecho de 2,8 km, localizado entre os quilômetros 313,1 e 315,9 da rodovia BR-101, cerca de 110 km ao sul da capital Florianópolis. Deste percurso do empreendimento de transposição, aproximadamente 85% estão sobre as águas da laguna do Imaruí. O projeto é composto por quatro pistas de rolagem e dois acostamentos. O

² Ponte estaiada: “Sustentada por cabos, geralmente de aço, que partem de grandes pilares e vão até a base suspensa” (ANDREY, 2018).

vão livre principal para transposição de embarcações possui 200 metros na porção mediana e 100 metros em cada uma das laterais, compondo 400 metros de estrutura suspensa (FIGUEIREDO, 2011).

2.2.1 Custeio da energização da Ponte Anita Garibaldi

A ponte Anita Garibaldi, mostrado na Figura 5, é uma obra de engenharia importante e representa um avanço político, econômico e social para os catarinenses. Sua arquitetura e iluminação cênica são de belezas ímpares, se destacando dentre as obras de engenharia nacionais. Entretanto, o custeio e manutenção da sua iluminação viraram motivo de polêmica.

Figura 5 - Ponte Anita Garibaldi



Fonte: NOTISUL, 2019.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Prefeitura de Laguna divergem a respeito desta responsabilidade e não querem arcar com o custeio energético. Desde a inauguração da obra, foram pagos à CELESC apenas os três primeiros meses, como forma de gentileza, em acordo consensual da empreiteira com autoridades locais. Segundo Cagnini (2019), a fatura nunca mais foi paga e o saldo devedor já ultrapassa os R\$ 540 mil, virando uma questão jurídica que se arrasta há quase cinco anos.

A Prefeitura Municipal de Laguna, nos autos do Processo nº 5002370-70.2015.7.04.7216, alega que não é responsabilidade dos moradores de Laguna pois eles nunca foram desejosos da nova ponte para seus deslocamentos, tendo em vista os bairros estarem interligados pela ponte Henrique Lage. Que entende o fato da ponte ser um desejo antigo dos usuários da rodovia, mas que, em sua imensa maioria, estes mesmos usuários não são moradores

de Laguna. Alega, ainda, que o custeio iria onerar justamente aqueles que pouco utilizam, até porque estes bairros não pagam IPTU à Prefeitura de Laguna, pois não são considerados urbanos (BRASIL, 2015).

Por outro lado, o DNIT alega não ser de sua responsabilidade o custeio da energização das rodovias. Que não absorve o custo de energia de nenhuma rodovia do Brasil, pois esta não é sua missão organizacional. Afirma, ainda, que não existe previsão orçamentária para isso ou taxa específica que lhe ampare tal custeio e que, portanto, é de consenso há anos que estes valores são absorvidos pelas prefeituras locais. Que, por fim, além da previsão constitucional, existe legislação e diversos julgados neste sentido, pacificando o tema a este respeito (BRASIL, 2015).

Assim, a Justiça Federal de Laguna, em decisão da lavra do Dr Timóteo Rafael Piangers – Juiz Federal Substituto, decidiu que a Prefeitura Municipal de Laguna deveria arcar com estas despesas de custeio e manutenção. A sentença foi questionada no Tribunal Regional Federal da Quarta Região (TRF4) onde foi confirmada, perfazendo íntegra a decisão que determina o pagamento da energia pela Prefeitura de Laguna (BRASIL, 2015).

Irresignados com o resultado, os procuradores da Prefeitura recorreram novamente e o caso foi parar no Supremo Tribunal Federal (STF). Trata-se do Recurso Extraordinário nº 1.043.921, de relatoria do Ministro Gilmar Mendes. Após receber parecer do Ministério Público, favorável à prefeitura do município de Laguna, o ministro-relator achou por bem enviar a questão para uma composição amigável, promovendo o diálogo e a composição entre as partes. Desta forma, enviou os autos para a Câmara de Conciliação e Arbitragem da Administração Federal (CCAF), com sede em Brasília. Desde a remessa, em fevereiro de 2019, o processo está pendente de resolução (BRASIL, 2020).

Por outro lado, visando eliminar o impasse, o governo federal ao oferecer este trecho da rodovia para privatização no programa de concessões da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), já definiu que o custeio da energização será de responsabilidade do concessionário. Além de amplamente divulgado antes do certame, isto ficou evidente no Contrato de Concessão com a CCR (vencedora da licitação), no item 9.1.8, nos seguintes termos:

9.1.8 - A Concessionária é integralmente responsável pela manutenção e pelas despesas com o consumo de energia dos sistemas elétricos e de iluminação já existentes e novos, conforme previsto no Programa de Exploração da Rodovia – PER (ANTT, 2019).

Desta forma, entende-se que a nova proposta de concessão engloba os valores atuais e futuros, uma vez que este é o teor da cláusula. Os valores em atraso estão sendo discutidos na Justiça e estão pendentes de um acordo judicial.

2.3 MÉTODOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

A produção de energia renovável representa o futuro da vida humana. Neste sentido, após divulgação de dados alarmantes a respeito do aquecimento global durante as décadas de 1990 e 2000, os governos procuraram reduzir a emissão de poluentes, principalmente os causados pela queima de derivados de petróleo. Estes poluentes são responsáveis, dentre outras coisas, pelo aquecimento gradativo da crosta terrestre, causando desequilíbrio e instabilidade nos diferentes ecossistemas, colocando em risco a vida humana. Uma das formas de reduzir a emissão de poluentes é produzindo energia de forma mais eficiente. São as chamadas fontes renováveis ou fontes sustentáveis de energia (SANTOS, 2016; BRASIL, 2014).

Sustentável e renovável são sinônimos para fins de geração de energia. Segundo o Portal Energia (2015a), fontes de energia renováveis são “aquelas em que a sua utilização e uso é renovável e pode-se manter e ser aproveitado ao longo do tempo sem possibilidade de esgotamento dessa mesma fonte”. São diversas as formas de produzir energia elétrica de forma sustentável. Basicamente utilizam-se recursos como a força gravitacional (usinas hidrelétricas), força dos ventos (usinas eólicas) energia solar (células fotovoltaicas) e as usinas térmicas movidas por biomassa. (PORTAL ENERGIA, 2015b; BRASIL, 2014).

De acordo com Nascimento e Alves (2016, p. 1), as energias renováveis “além de serem praticamente inesgotáveis, elas podem apresentar impacto ambiental muito baixo, sem afetar o balanço térmico ou a composição atmosférica do planeta”.

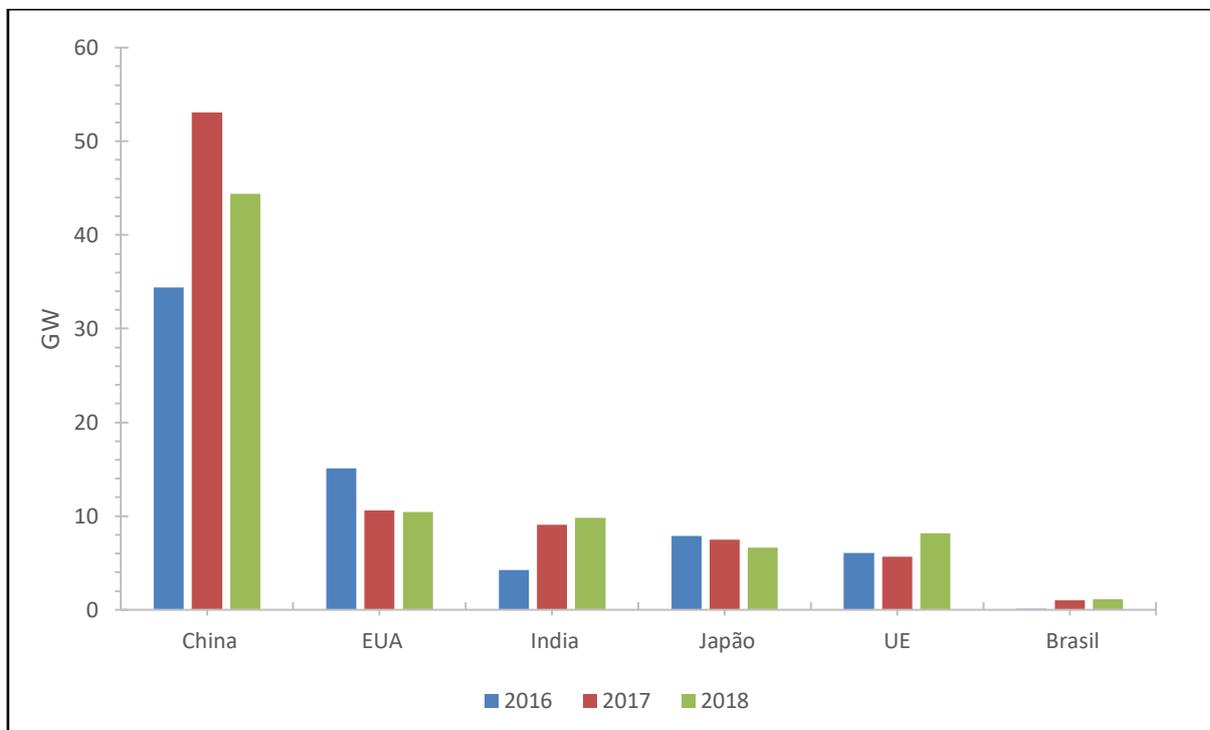
2.3.1 Energia Fotovoltaica

A energia fotovoltaica consiste na geração de eletricidade utilizando o efeito fotovoltaico, basicamente os fótons presentes na radiação solar interagem com materiais semicondutores com características elétricas específicas dando origem a corrente elétrica (RUTHER, 2004). Esse método integra o grupo de gerações renováveis, isso porque o recurso utilizado é considerado inesgotável. A geração fotovoltaica não produz energia em períodos noturnos. Pode ocorrer em usinas solares fotovoltaicas (áreas sem cobertura vegetal com um

conjunto de painéis fotovoltaicos) ou em dimensões menores como telhados de edificações, este segundo modo é denominado Microgeração ou Geração distribuída³. (INEE, 2020).

Segundo IEA (2019), a geração de energia fotovoltaica teve um aumento de 31% no ano de 2018 (mais de 580 TWh), superando 2% da produção mundial. Também informa que a geração distribuída chegou a 41 GW no mesmo ano. No Gráfico 1 é possível ver a contribuição de alguns países para o sistema fotovoltaico global entre os anos de 2016 e 2018. Atualmente a China lidera o ranking de países com o maior parque instalado, em 2017 produziu 130.658 GWh, conforme IEA (2019).

Gráfico 1 - Adições líquidas de capacidade fotovoltaica solar entre 2016 e 2018



Fonte: IEA, 2019, adaptado pelos autores.

2.3.1.1 A energia fotovoltaica no Brasil

Placas fotovoltaicas não são novidades no Brasil. Desde o final dos anos 60, esta tecnologia é bastante conhecida dos nossos cientistas e institutos de pesquisa. As primeiras placas solares para fornecer energia excedente para a rede surgiram em 1994, depois de um

³ Geração distribuída: “[...] geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia.” (INEE, 2020).

grande projeto envolvendo centros tecnológicos e o ministério das minas e energia, chamado PRODEEM. Naquela data, por intermédio da instalação de placas fotovoltaicas, foram criados diversos pontos de bombeamento de água no interior do Brasil, muitos em funcionamento até os dias de hoje.

Em 2009 o governo federal fez o primeiro leilão para entrega de lotes de concessão para produção de energia fotovoltaica no país. Daquele leilão saiu a empresa que iria construir a primeira usina geradora solar do Brasil. Posteriormente surgiram diversas iniciativas semelhantes por todo o país. Entretanto, somente nos últimos anos que este modal começou a ganhar espaço no país.

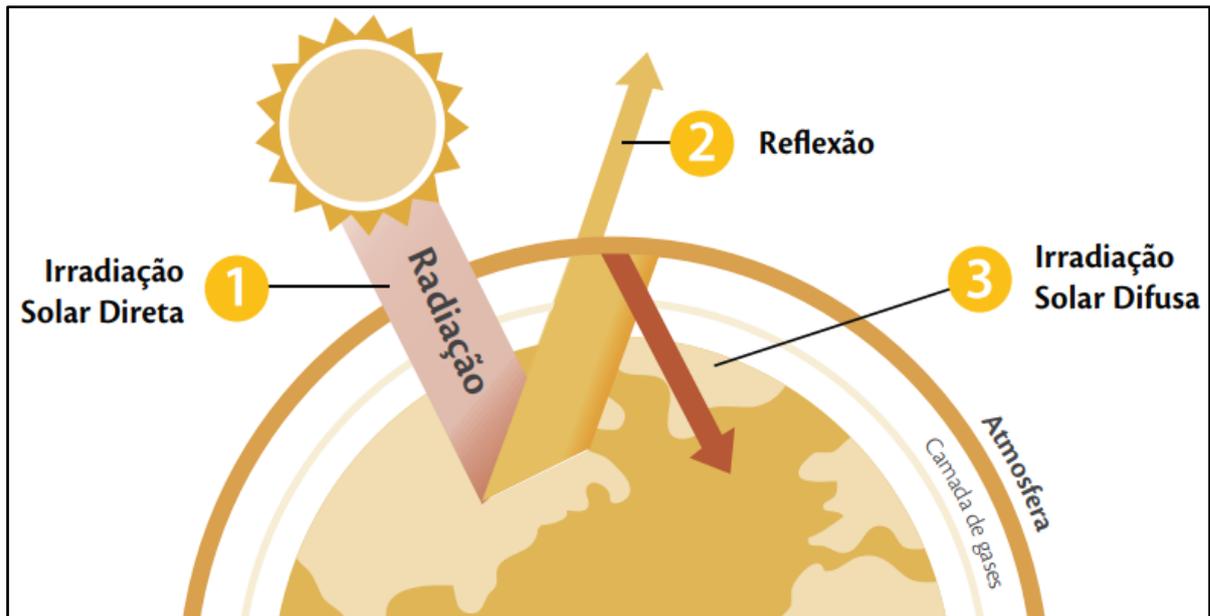
De acordo com dados do EPE (2019), no ano de 2016 a capacidade instalada de geração elétrica fotovoltaica no Brasil era de 24 MW, saltando para 935 MW em 2017 (um aumento de mais de 40 vezes) e 1.798 MW no ano seguinte, representando um aumento de 92% em relação a 2017. Apesar do aumento, a geração fotovoltaica ainda representa menos de 2% da potência gerada (EPE, 2019).

2.3.1.2 O recurso fotovoltaico

A energia incidente sobre a superfície terrestre ou radiação solar é o recurso necessário para geração de eletricidade utilizando sistemas fotovoltaicos. Segundo Rebollar e Rodrigues (2011), a radiação solar é formada por ondas eletromagnéticas ou fótons que atingem o topo da atmosfera terrestre. Devido a influências de camadas externas do Sol as radiações solares apresentam um modelo irregular.

Conforme NREL (2017) a constante solar ou irradiância solar média é igual a 1.366 W/m². Sua disponibilidade está diretamente ligada as mudanças climáticas, sofrendo dispersões, absorções e reflexões em seu percurso do topo da atmosfera terrestre até o solo, conforme Figura 6. Assim, “a intensidade de radiação que chega à superfície da terra ao meio-dia é da ordem de 1000 W/m²” (RUTHER, 2004). Os movimentos de rotação e translação da Terra, a latitude do local, hora e dia do ano também são responsáveis pela duração do recurso (INPE, 2017).

Figura 6 - Mudanças na radiação solar



Fonte: REBOLLAR; RODRIGUES, 2011.

Praticamente toda a radiação solar, aproximadamente 99%, apresenta ondas nas faixas curtas, com comprimentos inferiores a $4\ \mu\text{m}$ e pico de $0,5\ \mu\text{m}$, operando nas faixas de espectro visível e infravermelho (MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004). Segundo Rebollar e Rodrigues (2011, p. 25), 51% da radiação solar é absorvida pela superfície da Terra, 24% é perdida por reflexão, 19% é refletida pela superfície da Terra e absorvida pelos gases do efeito estufa que envolvem o planeta e 6% é perdida por difusão. A radiação solar incidente sobre um corpo é composta do somatório de radiações diretas⁴ e difusas⁵ no ponto.

2.3.1.3 Tecnologias para geração de energia fotovoltaica

Observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel (1820 - 1891) o efeito fotovoltaico é o meio utilizado para conversão da luz solar em eletricidade (REBOLLAR; RODRIGUES, 2011). A conversão exige o uso de materiais com camadas de valência preenchidas por elétrons e camadas de condução vazias quando em temperaturas muito baixas, denominados semicondutores (REIS, 2011). Estes materiais devem permitir que fótons com energia superior ao gap do semicondutor (e que estejam no espectro

⁴ Radiação solar direta: “A radiação solar direta é aquela que não é desviada por nuvens, fumaça ou poeira na atmosfera” (Rebollar e Rodrigues, 2011).

⁵ Difusa: Radiação proveniente de espalhamento na atmosfera (INPE, 2017).

de luz visível) excitam elétrons das camadas de valência para que estes saltem para as camadas de condução, gerando uma diferença de potencial, chamada de efeito fotovoltaico. Os semicondutores puros/intrínsecos apresentam estas características, porém para garantir o funcionamento da estrutura é realizado uma dopagem formando uma junção pn, permitindo que os elétrons excitados sejam coletados, gerando uma corrente útil (REIS, 2011).

De acordo com Villalva (2015) o recurso energético de origem fotovoltaica

(...) consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um sanduíche de materiais semicondutores. Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá tensão elétrica sobre eles. Se houver um caminho elétrico entre os dois eletrodos, surgirá uma corrente elétrica. (VILLALVA, 2015, p.39).

2.3.1.3.1 Tipos de células fotovoltaicas

Existem diversos materiais que possuem as propriedades necessárias para que o efeito fotovoltaico ocorra, abaixo alguns tipos conhecidos comercialmente:

- Silício cristalino (c-Si);
- Silício amorfo hidrogenado (a-Si);
- Telureto de cádmio (CdTe);
- Disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS).

As células fotovoltaicas de Silício cristalino são amplamente utilizadas devido a sua robustez e confiabilidade. Existem duas formas básicas, são: de Silício monocristalino (m-Si) ou Silício policristalino (p-Si). O m-Si possui alta pureza (99,99% a 99,9999%) e estrutura monocristalina, com baixa densidade de defeitos na rede. A capacidade máxima de geração é obtida a partir de dois anos (variando de acordo com o nível de radiação solar ao qual foi exposto). Sua eficiência comercial atinge 15% (RUTHER, 2004; BRAGA, 2008). Já o p-Si, por exigir perfeição cristalina inferior ao m-Si, apresenta custos produtivos menores, porém acarreta na perda de eficiência também (RUTHER, 2004).

As células de silício amorfo hidrogenado são formadas por estruturas irregulares compensadas por átomos de hidrogênio, são estruturas de filmes finos. Sua eficiência comercial está entre 7% e 8%. (BRAGA, 2008). Juntamente com as células de Silício amorfo hidrogenado, os tipos de Telureto de cádmio e Disseleneto de índio, tem como características comuns

possuírem formato de filmes finos, custos produtivos reduzidos, mas que também apresentam eficiência menor quando comparadas as células de Silício cristalino (MARQUES, 2014). Na Figura 7 é possível observar as diferenças entre as três células descritas.

Figura 7 - Tipos de painéis fotovoltaicos

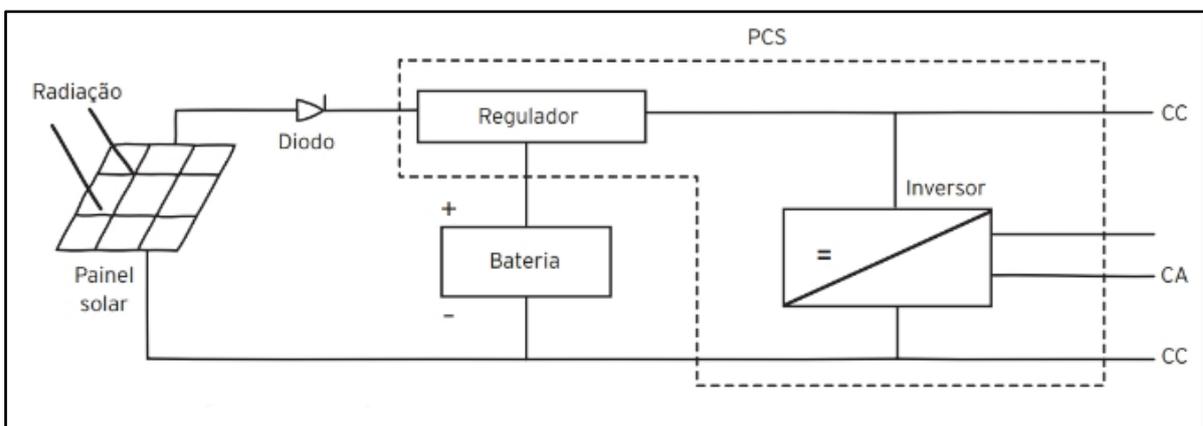


Fonte: EMAP SOLAR, 2019.

2.3.1.4 Topologia de sistemas de geração de energia fotovoltaica

Para que a geração de energia fotovoltaica possa ser utilizada em escala comercial é necessário um sistema que a transforme e armazene a energia, como apresentado na Figura 8. Os principais componentes desse sistema são: conjunto de módulos fotovoltaicos, regulador de tensão, sistema de armazenamento de energia, inversor de corrente contínua/corrente alternada (REIS, 2011).

Figura 8 - Topologia de um sistema fotovoltaico



Fonte: REIS, 2011.

2.3.1.4.1 Principais características dos equipamentos do sistema fotovoltaico

Módulos fotovoltaicos: São conjuntos de células fotovoltaicas seladas, que podem ser encontradas na forma de painéis (estruturas com um ou mais módulos), que por sua vez podem ser encontrado na forma de Arranjo fotovoltaico/Unidade geradora de energia completa (FSEC, 2020), conforme Figura 9. A sua corrente de saída é sempre contínua (CC).

Figura 9 - Arranjos fotovoltaicos



Fonte: FSEC, 2020.

Sistema de armazenamento de energia: Formada por um conjunto de baterias eletroquímicas, são equipamentos estáticos, de corrente contínua e baixa tensão (REIS, 2011).

Subsistema condicionador de potência: O PCS (do inglês *Power Conditioning Subsystem*) é responsável pelo controle do acionamento/desligamento, ponto de operação e conversão da energia CC produzida para CA, além da proteção do sistema. É formado por diversos equipamentos fisicamente conectados, como o regulador de tensão e inversor de frequência (REIS, 2011).

Inversor de frequência: Também conhecido como conversor CC-CA, é o equipamento responsável pela conversão da corrente contínua (CC) gerada pelo sistema para corrente alternada (CA) com as características (frequência, conteúdo de harmônicos, forma de onda, etc.) necessárias para conexão com a rede elétrica (RUTHER, 2004). Os dois tipos comumente utilizados de inversores são: Inversores comutados e Inversores autocomutados, o primeiro é

controlado pela tensão da rede, já o segundo utiliza um sinal gerado no próprio inversor para este controle (REIS, 2011).

Além dos dispositivos detalhados acima, a estrutura básica de um sistema fotovoltaico normalmente apresenta diodos de potência para proteção dos módulos fotovoltaicos e sua estrutura deve permitir a interligação dos módulos de forma simples. Alguns sistemas apresentam equipamentos de orientação do painel conforme o movimento do sol a fim de aumentar o rendimento do sistema (REIS, 2011).

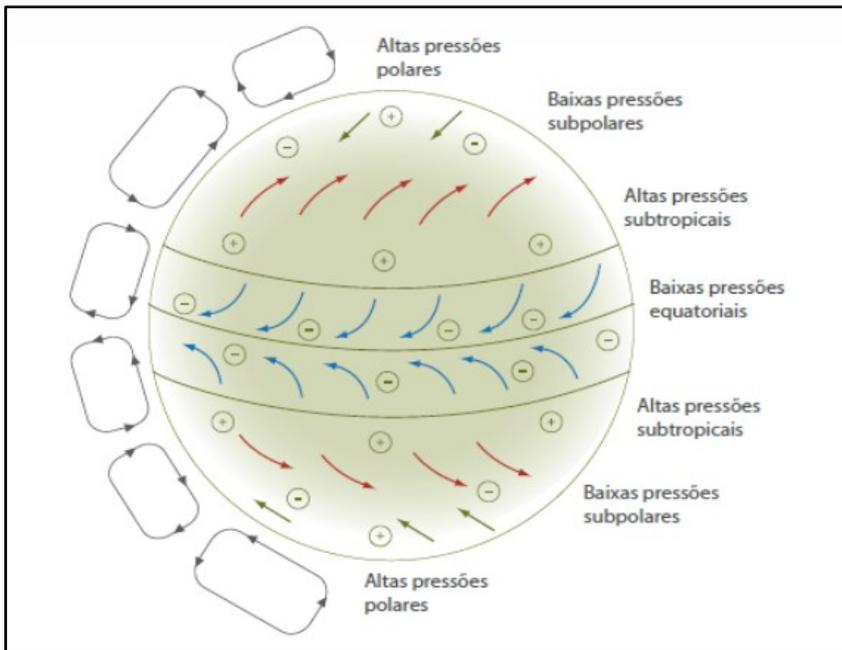
2.3.2 Energia Eólica

Energia eólica é a energia decorrente da força dos ventos. De acordo com Rodrigues (2011), o termo eólico é proveniente do latim *aeolicus*, que pertence a Éolo, o deus dos ventos na mitologia grega. Segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), energia eólica é:

[...] a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre através da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de energia elétrica, ou através de cataventos e moinhos para trabalhos mecânicos, como bombeamento de água (ANEEL, 2002, p. 85).

Os ventos, portanto, são a principal fonte geradora de energia para diversas utilizações, dentre as quais a geração de energia elétrica. A explicação para a geração dos ventos é dada pela movimentação das massas de ar ao redor da atmosfera terrestre, entre o dia e a noite, resultando em massas de ar frio e de ar quente, que se atraem e repelem entre si por simples força física, dando origem ao que conhecemos por vento. A Figura 10, a seguir, ilustra a circulação dos ventos no globo terrestre.

Figura 10 - A circulação dos ventos no globo terrestre



Fonte: RODRIGUES, 2011.

O vento é a matéria prima da energia eólica. Como visto na Figura 10, o vento é diferente em diferentes latitudes do globo terrestre, mas segue razoavelmente um padrão circular, podendo alternar levemente em razão da incidência solar (estações do ano). Segundo o Ministério das Minas e Energia,

[...] o vento é gerado pelo aquecimento não homogêneo da atmosfera, que é uma consequência das irregularidades da superfície terrestre (por exemplo terra versus mar), da rotação da terra (noite versus dia) e da forma quase esférica do nosso planeta. As massas de ar mais quentes sobem na atmosfera e geram zonas de baixa pressão junto à superfície da terra. Como consequência, massas de ar frio deslocam-se para essas zonas de baixa pressão e dão origem ao vento (BRASIL, 2014).

A captação desta fonte de energia pode ocorrer por diversas formas. A mais comum ocorre por sistemas de hélices unidas por um eixo horizontal, mantendo-se a uma altitude razoável do solo. Quando o vento soprar, fará girar o eixo que impulsionará um mecanismo multiplicador que, por sua vez, fornecerá a rotação necessária para produzir energia elétrica.

2.3.2.1 A energia eólica no Brasil

A energia eólica sempre foi utilizada para a navegação. Entretanto, para geração de energia elétrica, sua utilização é relativamente recente. No Brasil, a primeira usina geradora de

eletricidade pela força dos ventos foi instalada no arquipélago de Fernando de Noronha, em junho de 1992 (BRASIL, 2014).

Conforme ilustrado na Figura 11, trata-se de um aerogerador de três pás de 17 metros cada, instalado numa torre de 23 metros. Este equipamento supria 10% da necessidade de energia do local, economizando 70 mil litros de óleo diesel (BRASIL, 2014).

Figura 11 - Primeiro aerogerador do Brasil



Fonte: ANEEL, 2002.

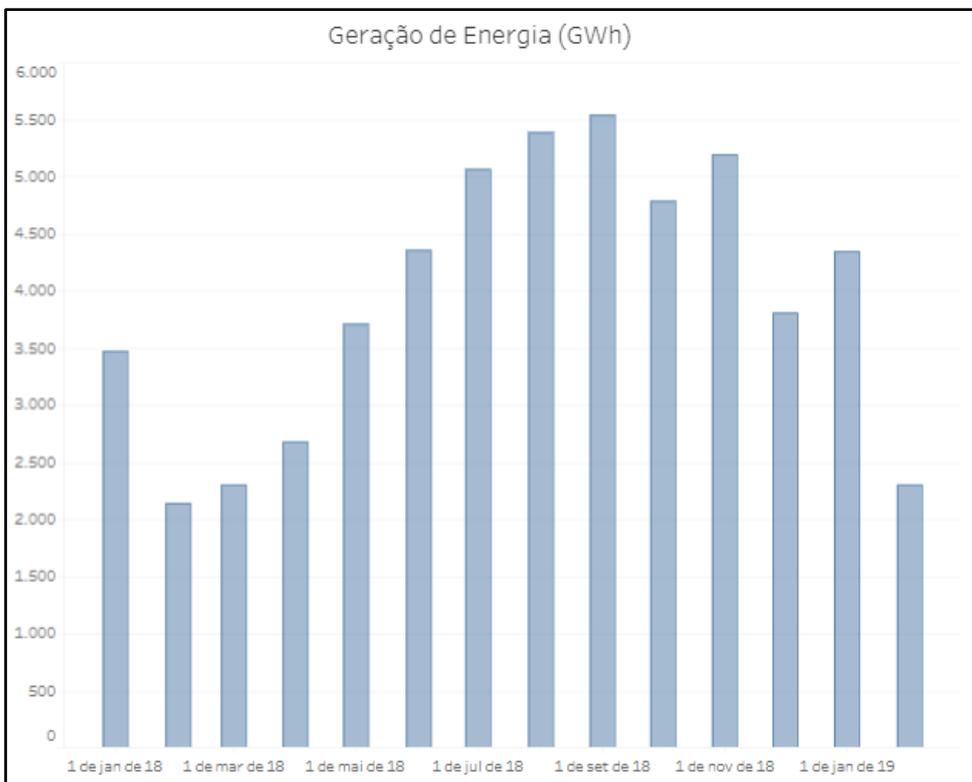
Na sequência, o governo brasileiro passou a financiar projetos de novas plantas de energia renovável. Com isso alguns projetos surgiram e muitas companhias energéticas nos estados passaram a se interessar pelos aerogeradores. Assim, foram instalados aerogeradores em Minas Gerais (Morro do Camelinho - Gouveia/MG), Ceará (Praia do Mucuripe/CE e Taíba/CE), Paraná (Usina de Palmas) todos até o ano de 2001 (ANEEL, 2002).

No ano de 2001 o Brasil sofreu um apagão energético, proporcionando falta de energia e posterior racionamento em todo o território. Assim, o governo resolveu incentivar fontes energéticas ecológicas, promovendo um plano de concessão de novas lavras para exploração da geração energética. Desta feita, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL ficou responsável por fazer o loteamento das áreas propícias para captação dos ventos e geração de energia, oferecendo os contratos para a iniciativa privada (ANEEL, 2002).

Nas duas décadas que se sucederam, foram instalados mais de 5600 aerogeradores e mais de 500 parques eólicos espalhados de norte a sul do Brasil. O percentual de participação energética das usinas eólicas passou de pouco mais de 0,03% em 2001 para 10,6% em 2017. A capacidade de geração das usinas da matriz eólica apresentou seu ápice em setembro de 2018, chegando a fornecer para a rede integrada cerca de 5,5 GWh, representando 64% do fornecimento de energia para o nordeste (REIS, 2018; ONS, 2020).

O Gráfico 2, a seguir, apresenta a geração de energia eólica mensal de janeiro de 2018 a janeiro de 2019, retirada do site do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Gráfico 2 - Geração de energia eólica



Fonte: ONS, 2020.

Com a inauguração de três grandes usinas de matriz hidroelétrica (Belo Monte, Santo Antônio e Jirau) além de mais de duas dúzias de pequenas centrais hidroelétricas (PCHs) a matriz energética brasileira modificou substancialmente. Estas três novas usinas representam o acréscimo energético de 1,25 Itaipú, ou seja, cerca de 16 GW a mais na rede. Assim, apesar do crescimento de todas as matrizes em números reais, a participação da energia eólica foi reduzida substancialmente entre 2017 e 2020. Atualmente a energia eólica representa 8,7% da matriz energética nacional, fornecendo, em média, 7,5 GW/h para a rede compartilhada da ONS (ONS, 2020).

O atual Plano Decenal de Expansão de Energia, do Ministério de Minas e Energia (MME), indica que a capacidade instalada eólica brasileira chegará a 22,4 GW em 2023, respondendo por 11,5% do total da matriz, com uma expansão média anual de 2 GW (BRASIL, 2019).

Atualmente, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a capacidade instalada de energia eólica em finais de 2018 chegou a 7,65 GW, superando a energia nuclear que é de 2,2 GW. A previsão para finais de 2023 é de 22,4 GW gerados por usinas eólicas e 3,34 GW gerados por fissão nuclear. Para fins de comparativo, Itaipu gera 14 GW, Belo Monte 11 GW e Tucuruí 8,5 GW, todas usinas hidrelétricas de matriz renovável (EPE, 2019).

Assim, a energia eólica passou a ser economicamente viável com a alta do barril de petróleo e com a instalação das grandes indústrias fornecedoras desta tecnologia no Brasil. Com a fabricação das peças e dos geradores em nosso território, o custo final de instalação barateou muito e proporcionou a instalação de novos parques eólicos fornecendo energia a preços competitivos.

2.3.2.2 O recurso eólico

Como é de conhecimento, o vento é um recurso energético que pode variar em razão de diversos fatores. Desde a latitude, a geografia do local bem como o horário do dia. Em algumas localidades o vento é mais intenso ao longo do dia e quase nulo à noite. Entretanto, a grande energia que forma os ventos ocorre por diferença térmica e acontece em razão da incidência solar. Neste sentido, é importante conhecer algumas características deste importante recurso natural.

Mecanismos de geração dos ventos - o globo terrestre é envolto pela atmosfera. Em sua porção mais próxima da terra, a atmosfera é composta por ar. O ar é uma mistura gasosa, onde predomina o nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%). Poderá, ainda, em menor proporção (cerca de 1%) conter vapor de água e outros gases.

Esta atmosfera está sujeita à ação dos raios do sol que, em contato com a superfície terrestre produz calor. Como o formato da terra indica, entre os trópicos a incidência solar é maior, provocando aumento da temperatura, resultando em camadas de ar mais leves e mais quentes. Já nos dois polos, o ar é menos aquecido, permanecendo maior parte do tempo frio. Por outro lado, em decorrência da rotação, em outros locais poderá ser noite e, portanto, vir a resfriar a massa de ar. Esta diferença térmica, somada ao conjunto de fatores geográficos,

promove a movimentação natural das massas de ar, resultando no vento (RODRIGUES, 2011).

Fatores que influenciam o regime dos ventos - como estuda anteriormente, os ventos surgem em decorrência de diferença térmica entre as massas de ar. Esta diferença térmica ocorre entre o dia e a noite ou em diferentes estações do ano. Outro ponto a ser observado é que a intensidade solar varia entre o equador e os polos, gerando locais mais propícios ao aquecimento e outros menos (DUTRA, 2010).

Assim, existem pontos na superfície que a formação dos ventos é diária, em outros é sazonal e, em alguns outros, é quase inexistente. Outro ponto que pode influenciar na intensidade é a formação geográfica da região. Diferenças topográficas (também conhecidas como rugosidades do solo) podem ocasionar uma concentração, uma dispersão ou até mesmo um cisalhamento e, com perda de intensidade dos ventos (DUTRA, 2010).

Energia e potência extraída do vento - Junto às camadas mais próximas da terra, o vento pode ser forte e continuado o suficiente para poder gerar energia. De acordo com Rodrigues (2011) a potência útil que pode ser extraída em uma turbina eólica é de aproximadamente 59,3% (limite de Betz). Esse percentual é chamado de coeficiente de potência. Entretanto, o autor leciona que na prática um gerador dificilmente consegue transformar mais de 50%, pois existem perdas aerodinâmicas e mecânicas que, somadas, podem interferir negativamente no sistema.

2.3.2.3 Tecnologias para geração de energia eólica

A geração de energia por intermédio da força dos ventos acontece por meio de geradores que captam esse movimento das massas de ar e transferem essa energia para um eixo rotor. Este eixo movimentará um gerador de energia elétrica que, por sua vez, fornecerá energia pronta para utilização (RODRIGUES, 2011).

As tecnologias têm como fator diferenciador a questão do eixo do rotor. A maioria dos geradores eólicos corresponde ao tipo “eixo horizontal”, onde a força dos ventos fornece energia para um eixo horizontal do rotor que, por sua vez, movimentará uma caixa multiplicadora. Ao final da caixa multiplicadora, a força inicial multiplicará a velocidade do eixo proporcionando maior eficiência para o gerador elétrico (RODRIGUES, 2011).

2.3.2.4 Topologia de sistemas de geração de energia eólica

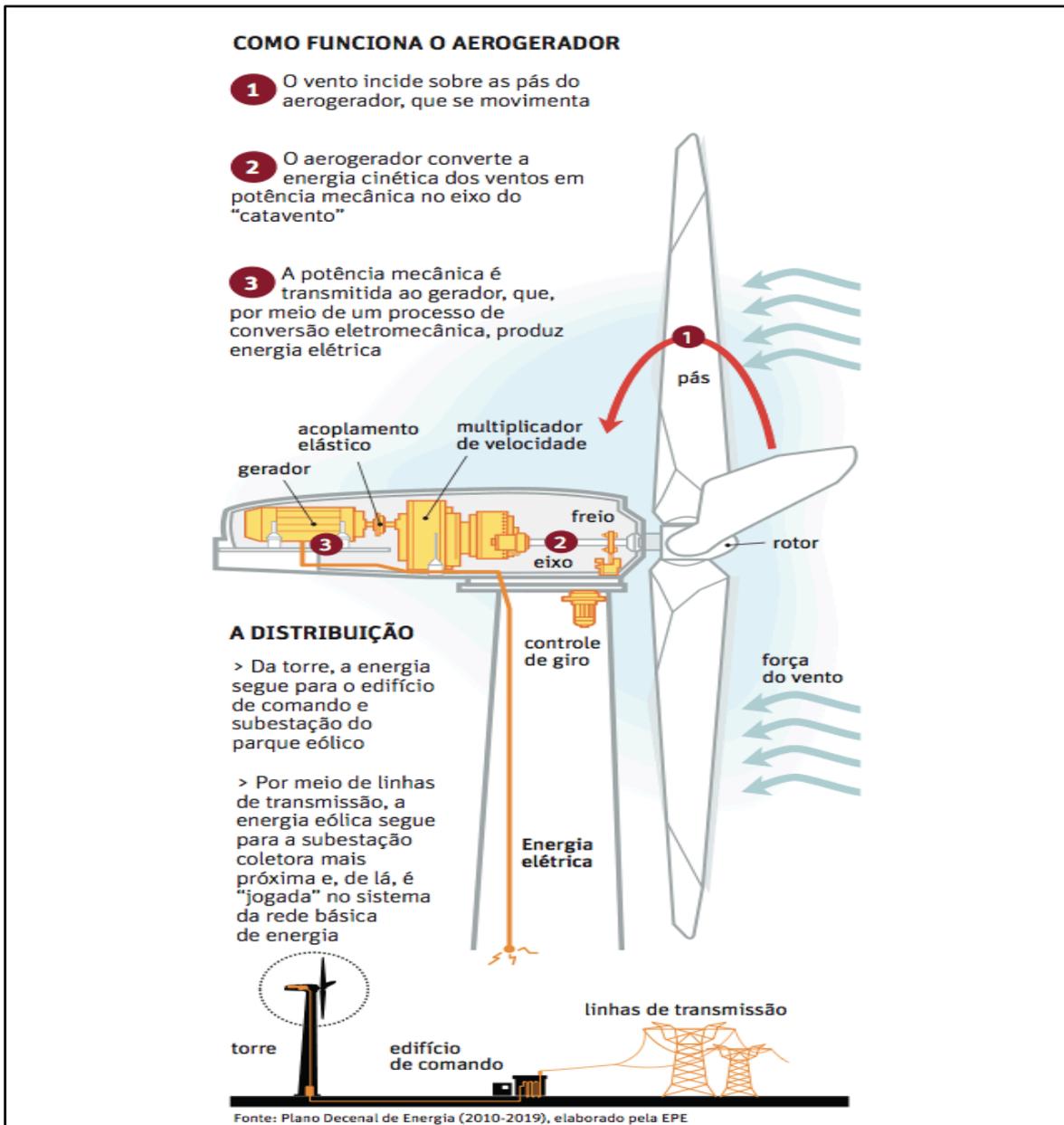
Em geral os sistemas de geração eólicos são compostos de pás, eixo rotor, freio a disco, caixa de redução (multiplicadora), eixo secundário, gerador, estabilizador, transformador, torre, mecanismo de controle e acessórios.

Na parte externa, a torre é a responsável por erguer a estrutura acima do solo para garantir a captação de ventos mais constantes. Quanto mais alta, maior a pá e maior a capacidade de captação dos ventos, resultando em mais força. Em geral as torres são estruturas de aço tubular, presas ao solo por fundações de concreto, dimensionadas para suportar o peso dos equipamentos, fortes ventos (de todas as direções), vibrações e descargas elétricas (PORTALSOLAR, 2020a).

As pás, por sua vez, são compostas por metal e diferentes fibras, sendo a de vidro a mais comum. Em geral, os aerogeradores são compostos por três pás, com desenho aerodinâmico, com maior passo próximo ao centro e menor arrasto próximo das pontas. Em dia de ventos fortes, o equipamento de 100 metros de diâmetro (50 m por pá) pode alcançar os 35 rpm, e a ponta de uma pá poderá alcançar velocidades acima dos 550 km/h.

A velocidade do rotor é controlada por um freio a disco, que é acionado sempre que o conjunto ultrapassar a velocidade de segurança calculada para o modelo. Em geral esta velocidade gira em torno de 30 a 35 rpm. Este freio é acionado automaticamente, por meio de dois sistemas distintos: eletro-hidráulico e hidráulico. O direcionamento do gerador ocorre em razão do sistema de controle, acionado eletricamente por um conjunto externo de sensores. Este sistema é responsável por posicionar as hélices para obter o máximo de eficiência dos ventos. A Figura 12, a seguir, demonstra o funcionamento de um aerogerador.

Figura 12 - Funcionamento de um aerogerador



Fonte: RODRIGUES, 2011.

2.3.3 Energia híbrida

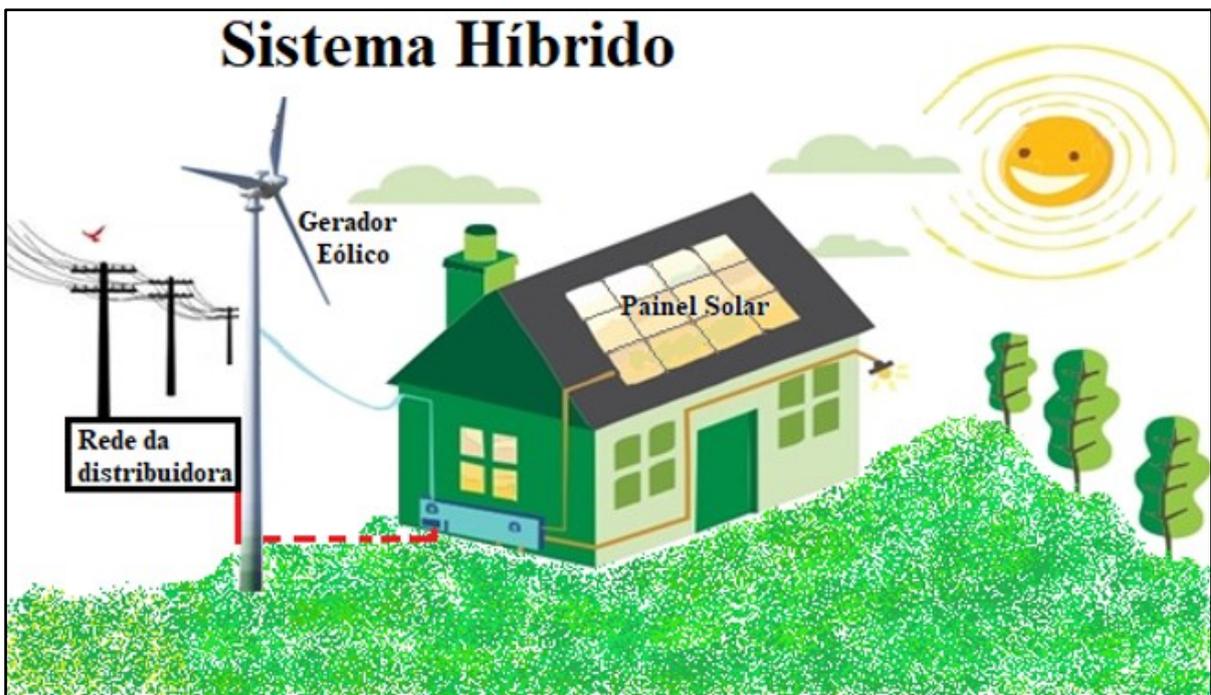
O conceito de energia híbrida surgiu com uma constatação comum: a instabilidade da geração energética baseada em um único modal. Um sistema 100% eólico, por exemplo, não produzirá energia em dias sem ventos. O sistema hidráulico-gravitacional não funcionará na estação de estiagem. O sistema fotovoltaico, por sua vez, não produzirá energia à noite e reduzirá significativamente sua produção em dias muito carregados de nuvens.

Neste sentido, é importante buscar alternativas e soluções tecnológicas para equalizar a geração, combinando fontes geradoras diversas para que o fornecimento energético seja regular e continuado. Dessa forma, em razão da necessidade do fornecimento continuado de energia, foi criado o conceito da energia híbrida (PINHO et al., 2008).

As alternativas de geração energética que podem compor um sistema híbrido são conhecidas das ciências há décadas. Entretanto, modernamente, novos sensores e programações robóticas ampliaram as possibilidades da produção energética, proporcionando viabilidade econômica, maior eficiência e durabilidade aos novos modais, como eólico, fotovoltaico. Possibilitam, ainda, otimizar estes geradores, transferindo a capacidade entre os sistemas e controlando a quantidade de energia gerada, resultando em eficiência energética e aumento da vida útil dos equipamentos (ZANONI, SCHNEIDER, 2018; PINHO et al., 2008).

A Figura 13 a seguir, representa um sistema híbrido composto por geração eólica e solar conectado à rede elétrica da distribuidora.

Figura 13 - Sistema híbrido de geração de energia



Fonte: SANDIADULCE, 2014, adaptado pelos autores.

O sistema híbrido não representa um modal gerador, mas a associação de diferentes modais. Neste sentido, não existe regra de emissão de poluentes para um sistema energético ser chamado de sistema híbrido. Poderá surgir da combinação de dois sistemas poluentes como, por exemplo, geradores à diesel associados com geradores térmicos movidos a

biomassa (bagaço de cana). O primeiro produz monóxido de carbono e o segundo dióxido de carbono e resíduos sólidos. Entretanto, quando combinadas, as duas tecnologias formam uma fonte geradora híbrida ideal, garantindo a necessidade energética local. Este modelo é comum em usinas produtoras de açúcar no sudeste brasileiro.

Modernamente, um sistema híbrido ideal em consonância com as tendências energéticas mundiais deverá reunir duas ou mais fontes renováveis (eólico, solar, hidroelétrica) a um gerador térmico ou à combustão (biodiesel ou gás natural). Esta é a tendência ecologicamente correta para dar viabilidade econômica aos projetos de geração de energia híbrida e garantir acesso a linhas de financiamento estatais (ZANONI, SCHNEIDER, 2018).

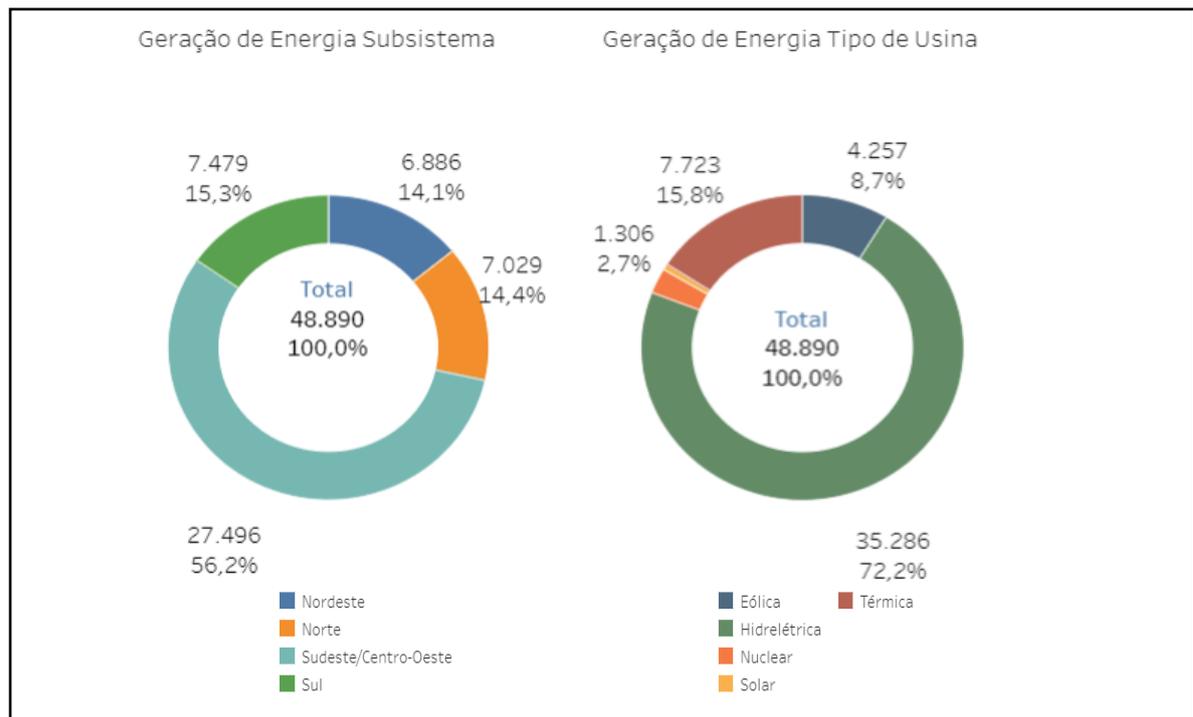
2.3.3.1 A energia híbrida no Brasil e no mundo

A energia híbrida é uma solução bastante conhecida. Qualquer empresa ou condomínio residencial que tenha um gerador ligado à sua rede de energia já está fazendo uso de um sistema híbrido. Assim que a energia cair, entrará em ação o gerador à diesel e proporcionará a energia. Este é o princípio básico da conjunção de sistemas energéticos distintos: a continuidade do fornecimento (PINHO et al., 2008).

Entretanto, é possível existir sistemas híbridos que não operem neste conceito de fornecimento ininterrupto. São casos de integração solar e eólico, por exemplo, ou solar e hidrelétrico. Geralmente são plantas energéticas suplementares, criadas para abastecer os grandes centros consumidores, planejadas para atuarem quando as condições permitirem, aliviando os outros sistemas.

No mundo, os sistemas de geração de energia chamados ‘híbridos’ são bastante conhecidos. Desde pequenos sistemas isolados (sem ligação com a rede externa) até grandes empresas, complexos industriais e países inteiros, interligados por grandes linhas de distribuição. No Brasil o sistema híbrido é bastante conhecido e muito utilizado. A matriz energética nacional é composta por diversas fontes geradoras, tais como hidrelétrica (65%), térmica - gás natural (10,5%), térmica biomassa (8,2%), solar e eólica (6,9%) e demais fontes correspondendo a 9,4% da energia gerada. Esta composição de diferentes fontes geradoras de energia, mesmo que em grande escala, é considerado um modelo de sistema híbrido (TOMALSQUIM, 2016). O Gráfico 3, a seguir, apresenta a geração de energia por matriz e por região, entre os meses de junho de 2019 e junho de 2020.

Gráfico 3 - Geração de energia no Brasil por matriz e região



Fonte: ONS, 2020.

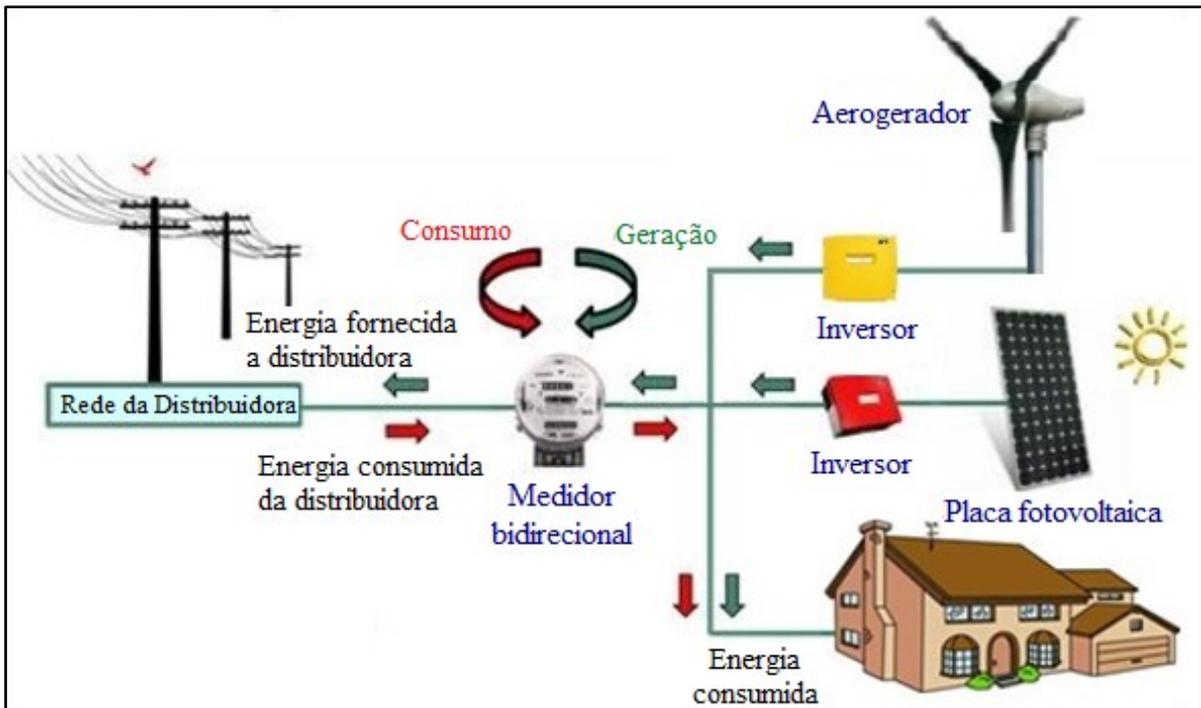
O próprio Sistema Interligado Nacional (SIN), controlado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), é um exemplo de sistema híbrido interligado em operação. Neste modelo, várias fontes energéticas (soluções tecnológicas diferentes) estão operando de forma simultânea, distantes milhares de quilômetros, interligadas por linhas de alta tensão, sob o controle de uma central inteligente.

2.3.3.2 Topologia de sistemas de geração de energia híbridos

A conjugação dos equipamentos de geração de energia no sistema híbrido é fundamental, devendo necessariamente existir uma central controladora computadorizada. Via de regra, os equipamentos possuem sensores que informam ininterruptamente para a central a respeito de diversos parâmetros de funcionamento. Estas centrais são compostas de um comando e de alguns equipamentos acessórios, porém necessários, tais como: acumuladores, inversores, transformadores e estabilizadores de tensão (TOMALSQUIM, 2016).

A Figura 14, ilustra a topologia de um sistema de geração de energia híbrido do tipo *on grid*, baseado em duas fontes geradoras (eólico e solar) com os respectivos inversores de corrente contínua/corrente alternada. A energia excedente é repassada para a linha de transmissão da distribuidora local.

Figura 14 - Topologia de um sistema híbrido conectado à rede elétrica



Fonte: MATHEUS, 2015, adaptado pelos autores.

2.4 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Sistemas de geração de energia são agrupamentos de fontes energéticas de mesma tecnologia. Por exemplo, sistema eólico (composto por geradores eólicos), sistema fotovoltaico (composto por placas de captação da energia solar), sistema à combustão (composto por motores à diesel, gasolina ou etanol), sistema termoeletrico (fornos para queima de resíduos, gás, carvão), sistema hidráulico (composto por hidrelétricas) sistema termonuclear (composto por usinas atômicas), entre outros (TOMALSQUIM, 2016; PINHO et al., 2008).

Em regra, um novo investimento energético recairá sobre aquele modal cuja relação custo versus benefício seja economicamente viável e atrativo para os investidores. Um sistema baseado na geração eólica, por exemplo, certamente não será viável em locais com pouca incidência de ventos. Tampouco placas solares em locais com forte incidência de nuvens e/ou chuvas. Portanto cada sistema deverá produzir sua competitividade, sua viabilidade econômica, dentro das suas características. Os sistemas podem ser classificados em três tipos, são eles: os sistemas isolados, híbridos e interligados à rede (TOMALSQUIM, 2016).

Os **sistemas isolados**, como o nome diz, são sistemas energéticos que suprem as necessidades de uma única residência ou empresa, não se ligando a outros sistemas ou à rede elétrica. Via de regra, os sistemas isolados utilizam controladores de carga, acumuladores

(baterias) e inversores estabilizados. Podem ser compostos por geradores à combustão, placas solares, turbinas eólicas ou pequenas centrais hidrelétricas (SHAYANI, 2006).

Por sua vez, os **sistemas híbridos** comportam mais de uma fonte geradora de energia, podendo (ou não) estabelecer ligação com a rede pública. Objetiva garantir uma fonte segura de energia, sem oscilações ou interrupções. Em geral, a garantia da não interrupção é dada por um gerador à combustão. Nestes sistemas, é importante ter uma central de controle inteligente, moderna, pois dela dependerá a eficiência e a economia do sistema gerador como um todo (SHAYANI, 2006).

Por fim, os **sistemas interligados** são aqueles que permanecem conectados à rede externa, ou seja, à rede pública de energia permanentemente, sem interrupção. Essa classificação independe do sistema de geração utilizado, podendo ser gravitacional/hidráulico, à combustão, eólico ou fotovoltaico. Já são projetados para esta finalidade, ou seja, para fornecer energia para a rede externa ou, em caso de necessidade, abastecer-se de energia externa. São também chamados de sistemas *on grid* (PINHO et al., 2008; SHAYANI, 2006).

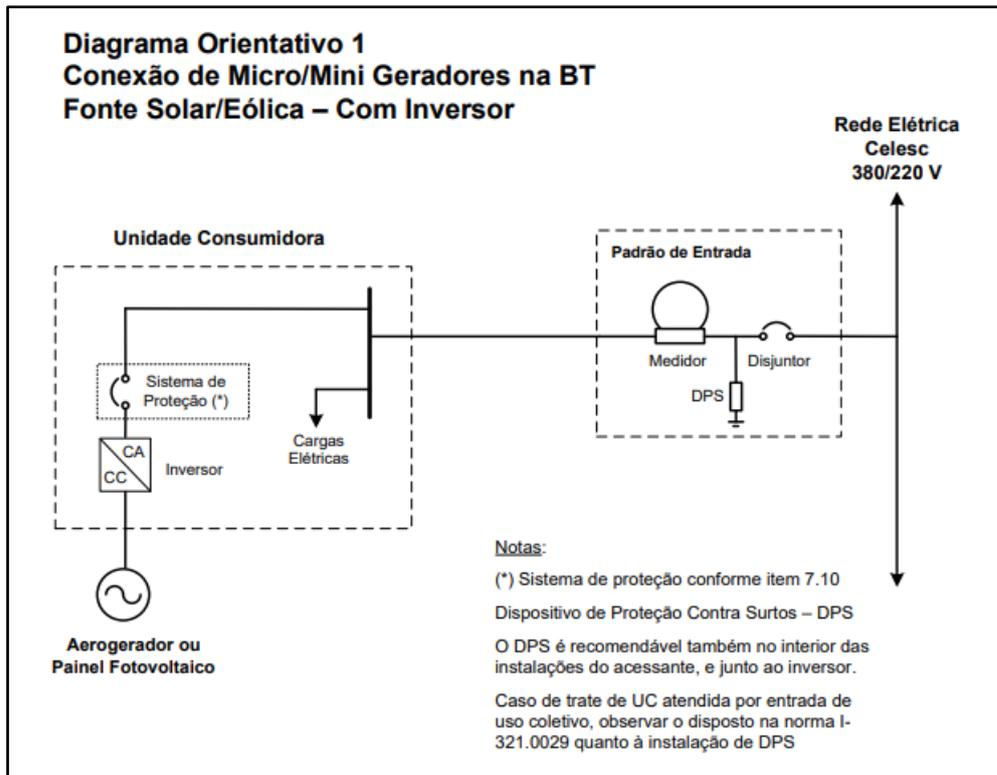
2.5 CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA

A energia elétrica gerada por aerogeradores ou placas fotovoltaicas necessita de um tratamento especial para poder se conectar com a rede elétrica. Estes sistemas interligados com a rede são classificados em sistemas *on grid* e devem obrigatoriamente atender as especificações da distribuidora de energia local antes de poder fornecer energia à rede. Em geral, as distribuidoras publicam um manual com todas as especificações a serem seguidas.

No caso em análise, a distribuidora de energia na região de laguna é a CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A). O Manual de Procedimentos da CELESC (Código I-432.0004) estabelece os requisitos mínimos necessários para a conexão de agentes classificados como micro ou minigeração de energia elétrica (CELESC, 2017).

De acordo com o Manual de Procedimentos da CELESC, o consumidor que desejar distribuir a energia excedente para a rede comum deverá seguir os procedimentos exigidos pelos órgãos de regulamentação do setor elétrico bem como as especificações da própria CELESC. A energia deverá ser fornecida em corrente alternada, estabilizada, de 380/220 V (Volts) na frequência de 60 Hz. A Figura 15, a seguir, foi retirada do Manual de Procedimentos da CELESC e ilustra a ligação com a rede da distribuidora (CELESC, 2017).

Figura 15 - Diagrama de ligação com a rede de distribuição



Fonte: CELESC, 2017.

O usuário deverá, após ter os equipamentos geradores instalados e testados, solicitar uma Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) junto a um engenheiro eletricista que será o responsável técnico pelo fornecimento de energia para a rede compartilhada. Após a aprovação da documentação junto ao escritório regional da distribuidora, a ligação será realizada por técnicos da CELESC, mediante prévio pagamento de taxa de instalação e agendamento dos serviços (CELESC, 2017).

2.6 ANÁLISE TÉCNICA

2.6.1 Demanda energética do projeto

A demanda energética deste projeto é de conhecimento público, uma vez que foi apresentada em detalhes na proposta vencedora da licitação para iluminação da Ponte Anita Garibaldi. Assim, de acordo com o anteprojeto da iluminação, capitaneado pelas empresas Engevix e Iguatemi, a demanda de energia é de 61 kW.

2.6.2 Custo de instalação e manutenção

Para análise dos custos de instalação e manutenção adotou-se estudos similares com valores estimados para instalação da turbina eólica, das placas solares e do sistema híbrido interligado (*on grid*). São valores que podem extrapolar a casa dos milhões e, por esta razão, devem ser bem pesquisados e avaliados.

Lembrando que custos de projeto e locação de terreno para instalação dos equipamentos não estão inclusos na simulação, devendo ser indicados à parte (caso houver).

Para a geração eólica, existem estimativas (parâmetros) de custos de aquisição e instalação. Os valores exatos só podem ser aferidos no local, após a determinação do sítio exato de instalação, condições do solo e subsolo, bem como distanciamento da linha de transmissão.

2.6.3 Legislação e a rede compartilhada

Nos dias de hoje, um projeto de geração de energia pode vislumbrar a produção de energia para consumo próprio e para fornecer o excedente na rede compartilhada (da distribuidora local). Com a publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, ficou regulamentada a produção e distribuição de energia por micro e miniprodutores.

Desta forma, estes usuários poderão interligar seus sistemas geradores na rede compartilhada local (da companhia distribuidora) e os excedentes serão computados como créditos para utilizar em até 60 meses, de acordo com a legislação em vigor.

2.6.4 Viabilidade econômica e financeira

Para um projeto ser economicamente viável é necessário que o retorno financeiro seja compatível com a projeção financeira do investimento, remunerando o capital, os custos de operação e manutenção, bem como proporcionando receita para o investidor. Se o investimento não trazer ganhos financeiros, ele não é atrativo para iniciativa privada, devendo ser encampado pela sociedade por intermédio do poder público.

Neste sentido, e para fins de análise de viabilidade deste projeto, serão utilizados os seguintes parâmetros econômico/financeiros: TMA (taxa mínima de atratividade), VPL (valor presente líquido) e *Payback*.

Taxa Mínima de Atratividade (TMA): também conhecida como custo do capital, esta taxa representa o ‘momento’ matemático no qual o investidor acredita estar obtendo ganhos financeiros. Em outras palavras, TMA é a taxa mínima que um investidor se propõe a ganhar e, por outro lado, a taxa máxima que alguém se propõe a pagar (MIRANDA, 2011).

Em geral a TMA varia de acordo com a área e tipo de investimento, não apresentado um valor ideal. Para fins de análise de investimentos, esta taxa (TMA) é utilizada como referência de juros na formula da VPL (valor presente líquido). Via de regra, utiliza-se a taxa SELIC – Sistema Especial de Liquidação e Custódia, fornecida pelo Banco Central.

Valor Presente Líquido (VPL): o método do valor presente líquido é uma das técnicas mais utilizadas para avaliar a viabilidade de um investimento. O VPL consiste em atualizar o fluxo de caixa e comparar este valor atualizado com o investimento inicial. É obtido calculando-se o valor presente de uma série de fluxos de caixa (pagamento ou recebimento) com base em uma taxa de custo de oportunidade conhecida e subtraindo-se o investimento inicial (MIRANDA, 2011).

Para fins de análise, aceita-se projetos cuja VPL seja positiva, ou seja, maior que zero. De outra forma, recusam-se projetos cuja VPL seja negativa. A fórmula do VPL é dada pela equação 1:

$$VPL = -FC_0 + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Onde:

VPL = Valor Presente Líquido;

FC = Capital Inicial investido no projeto;

FC₁, FC₂ (...) = Fluxo de caixa;

i = Taxa de juros.

Payback: que em português significa “retorno” é uma técnica muito utilizada nas empresas para análise do prazo de retorno do investimento em um projeto. Igualmente é utilizada por bancos para avaliar o retorno dos empréstimos concedidos.

Para fins de conceituação, podemos entender que *Payback* é o tempo de retorno do investimento inicial até o momento no qual o ganho acumulado se iguala ao valor deste

investimento. Normalmente este período é medido em meses ou anos (MENDES, PEREIRA, 2017; MIRANDA, 2011). A fórmula do *Payback* é dada pela equação 2:

$$\text{Quantidade de meses} = \frac{\text{Investimento}}{\text{Receita mensal líquida}} \quad (2)$$

Entende-se que o valor da receita mensal líquida será utilizado em sua integralidade para pagar o investimento inicial, visto que os demais custos do empreendimento e remuneração dos demais agentes já foi descontado da receita bruta (MIRANDA, 2011).

3 METODOLOGIA

Para Andrade (2017, p. 109) pesquisa científica é o “conjunto de procedimentos sistemáticos, baseado no raciocínio lógico, que tem por objetivo encontrar soluções para problemas propostos, mediante a utilização de métodos científicos”.

Para Otani e Fialho (2011, p. 22) método científico é o “conjunto de processos que devem ser empregados na investigação científica. É a linha de raciocínio adotada no processo da pesquisa”. Na mesma linha de pensamento, de acordo com as autoras Marconi e Lakatos (2016, p. 65) metodologia é:

[...] conjunto das atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo – conhecimentos válidos e verdadeiros – traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões dos cientistas.

3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

Trata-se de projeto de pesquisa de um estudo de caso caracterizado cientificamente por ser de caráter exploratório e qualitativo.

Trata-se de estudo de caso porque, segundo Otani e Fialho (2011, p. 40), neste tipo de pesquisa

[...] realiza-se um estudo aprofundado e exaustivo de um caso específico, que seja relevante pelo potencial de abrangência, de forma a permitir um amplo e detalhado conhecimento do caso, fato ou fenômeno estudado, através do processo de análise e interpretação.

A pesquisa será exploratória, pois de acordo com Santos (2016, p. 132) este tipo de pesquisa tem como característica principal o fato de “levantar informações sobre um determinado objetivo, delimitando assim um campo de trabalho, mapeando as condições de manifestação desse objeto.” Segundo o autor, a grande maioria dos estudos exploratórios, podem ser considerados pesquisas bibliográficas, pois procuram aprofundar em determinado tema utilizando-se de material previamente pesquisado e publicado. Ainda complementando a questão, Gil (2017, p. 28) reforça que as pesquisas exploratórias têm a finalidade de

[...] desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores. De todos os tipos de pesquisas, estas são as que exigem menor rigidez no planejamento. Habitualmente envolvem levantamento bibliográfico e documental, entrevistas não padronizadas e estudos de casos.

Por fim, será qualitativa porque é uma característica da pesquisa que se refere à análise do seu conteúdo, quanto a abordagem do problema. Segundo Otani e Fialho (2011, p. 38), neste tipo de pesquisa “o ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave”, portanto ele deve observar a qualidade das informações coletadas, comparando com os objetivos da pesquisa e assim proceder a seleção das fontes.

3.2 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS

As técnicas que serão utilizadas para realização da pesquisa serão a revisão bibliográfica e pesquisa documental. Para tal, utilizaremos dados de fontes secundárias, tais como: obras literárias, resenhas e artigos científicos, ou seja, todos os materiais bibliográficos disponíveis sobre o tema da pesquisa.

Para as autoras Marconi e Lakatos (2016, p. 166), a pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange

[...] toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde de publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico, etc; até meios de comunicação oral: rádio, gravações em fitas magnéticas e audiovisuais. Sua finalidade é colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências seguidas de debates que tenham tido transcritos por alguma forma, quer publicadas, quer gravadas.

No mesmo sentido, Santos (2016), ainda reforça que a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado e publicado por algum pesquisador, constituído principalmente de livros, dicionários, periódicos, artigos científicos, entre outros. A grande maioria dos estudos exploratórios, segundo o autor, podem ser considerados pesquisas bibliográficas, pois procuram aprofundar em determinado tema utilizando-se de material previamente pesquisado e publicado.

A pesquisa também será documental, pois serão utilizados todos os documentos disponíveis referentes a construção e especificações da Ponte Anita Garibaldi para chegar aos objetivos gerais da pesquisa. Para Marconi e Lakatos (2016, p. 157) a característica da pesquisa documental “é que a fonte de coleta de dados está restrita a documentos, escritos ou não.” De acordo com, Santos (2016), as vantagens da pesquisa documental são a confiança nas fontes documentais e o contato do pesquisador com documentos originais.

3.3 AMOSTRA

Amostra é a parte do universo da pesquisa, pois conforme Marconi e Lakatos (2016, p. 206), “é uma porção ou parcela convenientemente selecionada do universo (população); é um subconjunto do universo”. Entende-se, ainda, a amostragem como a parte de um todo, porém representativa estatisticamente deste todo.

Nesse estudo a amostra se refere a ponte Anita Garibaldi localizada no município de Laguna/SC, que segundo Malhotra (2011), entende-se por uma amostra não probabilística, ou seja, uma amostra escolhida intencionalmente.

3.4 COLETA DE DADOS

Será realizado um planejamento, e os dados para investigação e elaboração da monografia serão coletados e analisados conforme as seguintes etapas:

- a) Para realização da pesquisa, serão utilizados documentos oficiais, bem como livros técnicos e especializados no tema, teses, dissertações e artigos científicos provenientes das seguintes bases de dados eletrônicas: Periódicos Capes, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) e o portal Google Acadêmico (*Scholar Google*);
- b) Coleta de dados verídicos e demonstrativo realizado de acordo com histórico de consumo de energia elétrica, da estrutura em estudo, assim como, com o levantamento físico-financeiro para instalação dos geradores eólicos, dos painéis fotovoltaicos e sistema híbrido, garantindo a fidedignidade dos resultados;
- c) Observação direta dos pesquisadores, pois permite dados não previstos em materiais anteriores e, ao mesmo tempo, possibilita a subjetividade dos pesquisadores em relação aos dados existentes, sempre fundados no referencial teórico previamente definido.

3.5 ANÁLISE DOS DADOS

Conforme ensinamentos de Otani e Fialho (2011, p. 71) a análise dos dados é a etapa subsequente à coleta de dados (no campo, em laboratório ou, ainda, em bibliografias ou

documentos), responsável por “analisar, estratificar, interpretar e apresentar uma discussão científica dos resultados do procedimento final de uma pesquisa”. Procura comparar e confrontar dados estatísticos com a finalidade de averiguar a admissão ou não da hipótese de pesquisa.

Neste sentido, a análise, discussão e interpretação dos dados atingidos serão realizados pelos pesquisadores, segundo entendimento da teoria descrita e perante sua compreensão subjetiva, utilizando-se fórmulas algébricas para demonstração numérica do projeto.

A pesquisa também seguirá os preceitos éticos para a publicação e apresentação dos resultados, bem como a correta citação de todos os autores dos materiais utilizados, conforme as normas da NBR 10520 (citações) e NBR 6023 (referências).

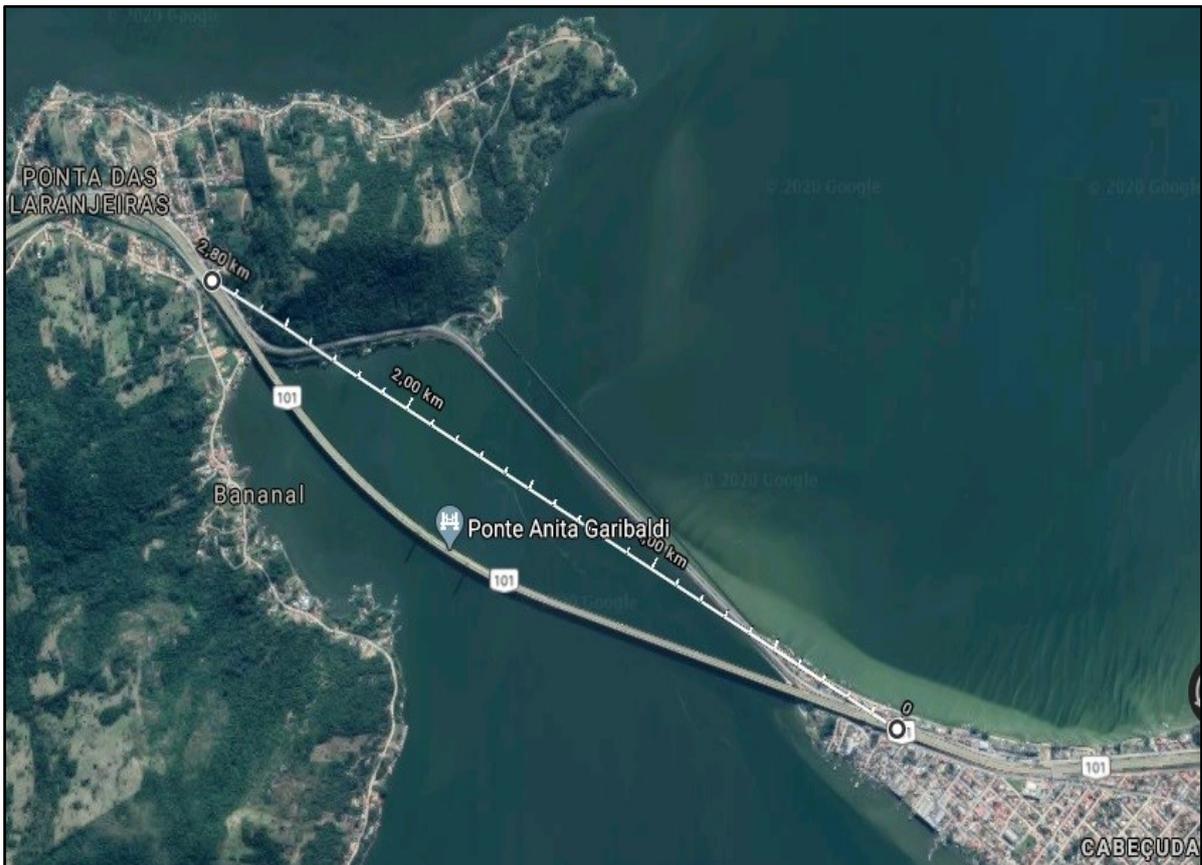
4 ANÁLISE TÉCNICA DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO

4.1 LOCAL DE ESTUDO

O local de estudo é a ponte Anita Garibaldi, a qual foi construída sobre o canal da lagoa de Imaruí, no município de Laguna, entre os bairros de Cabeçuda e Bananal, no Sul do estado de Santa Catarina.

A estrutura possui 2,815 quilômetros de comprimento e com uma largura total de 25,3 metros. Possui duas faixas de tráfego e acostamento para cada sentido da rodovia. A ponte possui 400 metros do vão central estaiados, suspensos por 60 cabos de aço, presos em dois mastros que fazem a sustentação central, distribuídos em 15 cabos para cada lado. A vista aérea do local dá um panorama da complexidade da obra de engenharia, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Localização geográfica da ponte Anita Garibaldi



Fonte: GOOGLE MAPS, 2020.

4.2 ENTRADA DE ENERGIA

O fornecimento atual de energia elétrica para a ponte Anita Garibaldi é realizado pela empresa Centrais Elétricas de Santa Catarina. Conforme dados fornecidos pelo projeto de iluminação viária e decorativa da obra, a energia é disponibilizada em rede primária de média tensão - MT - de distribuição 13,8 kV, trifásica com transformadores de 75 kVA, tensão secundária de 380/220V instalados em postes de 11 metros em cada ponto de medição (cabeceira norte e sul) da ponte.

Neste sentido, a Resolução Normativa nº 414/2010 da ANEEL classifica a unidade consumidora – Ponte Anita Garibaldi – como sendo do grupo A, subgrupo A4, com tensão de fornecimento entre 2,3 kV e 25 kV.

4.3 CARGA INSTALADA

A carga instalada na ponte Anita Garibaldi é exclusivamente de iluminação. As descrições técnicas dos equipamentos, assim como suas quantidades foram retiradas do Projeto de Iluminação Viária e Decorativa da ponte, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrições técnicas dos equipamentos

Equipamento	Potência (W)	Quantidade	Potência total instalada (W)
Greenvision Xceed BRP 373	275	164	45.100
Colorreach Powercore	290	52	15.080
Colorblast 12 Powercore	50	20	1.000
Data Enabler Pro Eu	10	16	160
Iplayer3	5	1	5
Total		253	61.345

Fonte: Autores, 2020.

Portanto, as cargas estão distribuídas em 253 equipamentos, com uma potência total de 61,345 kW, divididos em 27,969 kW para a cabeceira sul e 33,376 kW para a cabeceira norte.

4.4 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para efetivar este estudo e ter dados mais próximos da realidade, baseou-se o consumo de energia elétrica da ponte Anita Garibaldi nos dados disponibilizados pela empresa CELESC por meio da fatura de energia elétrica. Analisou-se o período compreendido entre os meses de outubro de 2017 a setembro de 2018, totalizando 12 meses de análise. Gerando um consumo médio mensal (duas cabeceiras) de 19.965,46 kWh e anual de 239.585,48 kWh. Totalizou-se um dispêndio financeiro da ordem de R\$ 163.545,77 a valores da época, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo e Custo Mensal de Energia Elétrica (2017-2018)

CONSUMO TOTAL 2017-2018 CABECEIRA NORTE - SUL		
Mês/Ano	Consumo Mensal (kWh)	Custo Mensal (R\$)
out/17	21.540,99	R\$ 14.615,96
nov/17	22.052,17	R\$ 14.604,66
dez/17	20.156,47	R\$ 13.584,18
jan/18	20.247,18	R\$ 13.440,17
fev/18	18.796,99	R\$ 12.919,14
mar/18	16.730,99	R\$ 12.060,40
abr/18	19.459,80	R\$ 13.111,78
mai/18	19.619,41	R\$ 13.700,44
jun/18	20.385,63	R\$ 14.132,84
jul/18	17.995,52	R\$ 12.911,35
ago/18	21.008,91	R\$ 13.798,41
set/18	21.591,45	R\$ 14.666,44
Total	239.585,51	R\$ 163.545,77
Média Mensal	19.966,46	R\$ 13.628,81

Fonte: Freccia, 2018.

4.5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para determinar o dimensionamento do sistema fotovoltaico realizou-se o levantamento dos dados de irradiação solar na região, consumo médio mensal de energia elétrica, para posterior realização dos equacionamentos e definição dos equipamentos necessários.

4.5.1 Potencial solar na região de Laguna/SC

Para analisar a viabilidade de implantação do sistema fotovoltaico de painéis solares coletou-se os dados de incidência solar na região de Laguna/SC, mais precisamente nas cercanias da Ponte Anita Garibaldi.

De posse das coordenadas geográficas, latitude $28,4825^\circ$ Sul e longitude $48,780833^\circ$ Oeste obtidas por meio do programa Google Earth, extraiu-se os dados de irradiação solar diária média mensal através do sistema de dados do programa SunData v3.0 disponibilizado no site do CRESESB para diferentes inclinações na localização mais próxima da Ponte Anita Garibaldi (distância de 3,7 km), conforme ilustrado na Tabela 3.

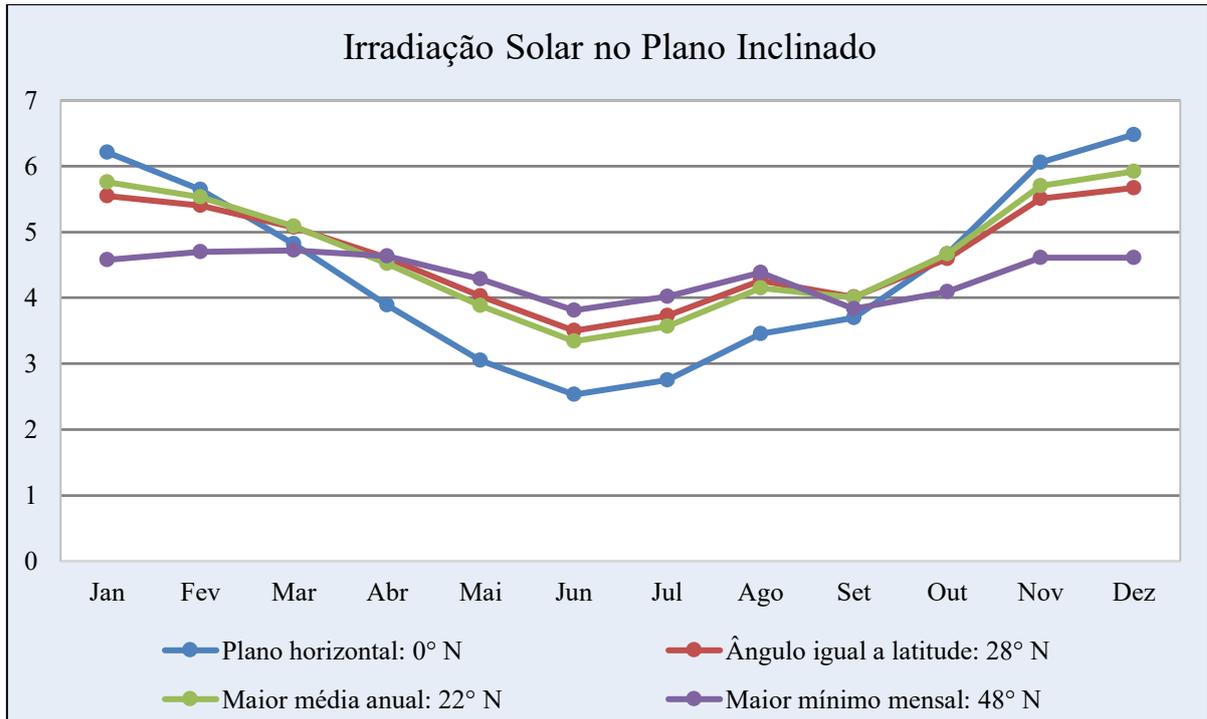
Tabela 3 - Dados de irradiação solar na região de Laguna/SC

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
Plano horizontal	0° N	6,21	5,64	4,82	3,89	3,05	2,53	2,75	3,45	3,70	4,67	6,06	6,48	4,44	3,95
Ângulo igual a latitude	28° N	5,55	5,40	5,07	4,61	4,03	3,50	3,73	4,26	4,01	4,59	5,51	5,67	4,66	2,17
Maior média anual	22° N	5,76	5,53	5,09	4,52	3,88	3,34	3,57	4,15	4,00	4,67	5,70	5,92	4,68	2,58
Maior mínimo mensal	48° N	4,58	4,70	4,72	4,63	4,29	3,81	4,02	4,38	3,83	4,09	4,61	4,61	4,36	0,90

Fonte: SunData, CRESESB, adaptado pelos autores, 2020.

A partir dos dados obtidos gerou-se o gráfico da irradiação solar média mensal para as diferentes inclinações, conforme Gráfico 4, a seguir.

Gráfico 4 - Irradiação solar diária média mensal para as diferentes inclinações



Fonte: SunData, CRESESB, adaptado pelos autores, 2020.

Diante dos dados apresentados na Tabela 3 e no Gráfico 4, observou-se que a maior média de irradiação solar foi de $H_t = 4,68 \text{ (kWh/m}^2 \cdot \text{dia)}$ em uma inclinação de 22° Norte. Os meses compreendidos entre novembro e fevereiro foram os meses com maior insolação, que representam o verão no hemisfério sul.

Portanto, tendo em vista a possibilidade de definição de inclinação e orientação dos módulos para o dimensionamento do sistema fotovoltaico multiplicou-se por 30 dias o valor da maior média de irradiação solar mencionada anteriormente, resultando num valor de irradiação $H_t = 140,40 \text{ (kWh/m}^2 \cdot \text{mês)}$.

4.5.2 Potência do sistema fotovoltaico

A primeira etapa de dimensionamento do sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) foi o cálculo da potência do sistema, que se fez mediante aos dados coletados e apresentados anteriormente.

Segundo Urbanetz Junior (2013), para realizar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico, utiliza-se a equação 3.

Esta equação estabelece o produto entre a energia média mensal a ser gerada (E) para suprir a demanda de energética da unidade consumidora – Ponte Anita Garibaldi, informado na

Tabela 2, pela irradiância na condição padrão de teste (STC), dividido pela irradiância média mensal (H_t) e performance ratio ou taxa de desempenho do sistema fotovoltaico (PR). Adotou-se 80% como a taxa de desempenho do sistema fotovoltaico.

$$P_{(FV)} = \frac{E \times G_{(STC)}}{H_t \times PR} \quad (3)$$

Onde:

$P_{(FV)}$: Potência do sistema fotovoltaico instalado (kWp);

E : Energia elétrica média mensal a ser gerada (kWh/mês);

$G_{(STC)}$: Irradiação na condição padrão de teste STC (kWh/m²);

H_t : Irradiação média mensal (kWh/m². mês);

PR : Performance ratio ou taxa de desempenho do sistema fotovoltaico.

Sendo assim, retornando à equação 3, teve-se:

$$P_{(FV)} = \frac{19.965,46 \times 1}{140,40 \times 0,80} = 177,76 \text{ (kWp)}$$

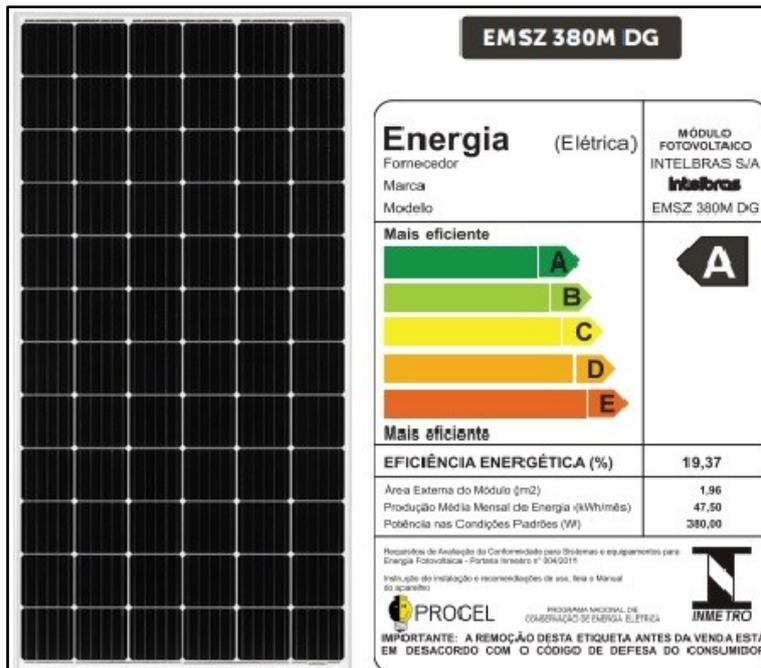
Dessa forma, a potência necessária para o sistema fotovoltaico foi de 177,76 kWp.

4.5.3 Módulos fotovoltaicos

Após o cálculo da potência do sistema fotovoltaico, realizou-se a definição do módulo fotovoltaico por meio de uma pesquisa de mercado. Os fatores que contribuíram para a escolha do módulo foram: preço, disponibilidade de entrega, tempo de garantia, reconhecimento no mercado, eficiência e potência do módulo. Este último fator está diretamente relacionado na quantidade de módulos necessários para suprir a potência do sistema fotovoltaico, pois quanto maior a potência do módulo menor a quantidade de módulos a serem utilizados.

Nesse sentido, selecionou-se o painel solar modelo EMSZ 380M DG monocristalino de 72 células com potência de 380 Wp, conforme Figura 17. Na Tabela 4 observou-se as características informadas pelo fabricante do equipamento.

Figura 17 - Painel solar 380W – EMSZ 380M DG



Fonte: INTELBRAS, 2020, adaptado pelos autores.

Tabela 4 - Descritivo técnico do módulo fotovoltaico

(continua)

DADOS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO – MODELO EMSZ 380M DG				
Descrição	Unidade	Performance em STC*	Performance em NOCT*	
Potência máxima	Wp	380	281,1	
Tensão máxima de operação	Vcc	39,8	36,8	
Corrente máxima de operação	A	9,55	7,63	
Tensão de circuito aberto	Vcc	48,5	44,8	
Corrente de curto-circuito	A	10,04	8,11	
Eficiência do módulo	%	19,37	-	
Temperatura da célula	°C	25	45	
Temperatura ambiente	°C	-	20	
Especificações Mecânicas				
Tipo de célula	-	Monocristalino		
Largura	m	0,992		
Altura	m	1,978		
Profundidade	m	0,03		

Tabela 4 – Descritivo técnico do módulo fotovoltaico

(conclusão)

Características de Temperatura		
Coefficiente de temperatura $V_{m\acute{a}x}$	%/K	-0,39
Coefficiente de temperatura V_{oc}	%/K	-0,29
Coefficiente de temperatura I_{sc}	%/K	0,05

Fonte: INTELBRAS, 2020, adaptado pelos autores.

Calculou-se a quantidade de módulos necessários para atender a potência do gerador fotovoltaico por meio da equação 4. Esta equação estabelece a razão entre a potência nominal do sistema e a potência do módulo escolhido.

$$N^{\circ}_{(mod)} = \frac{P_{(FV)}}{P_{(mod)}} \quad (4)$$

Onde:

$N^{\circ}_{(mod)}$: Quantidade de módulos fotovoltaicos;

$P_{(FV)}$: Potência do sistema fotovoltaico instalado (kWp);

$P_{(mod)}$: Potência do módulo fotovoltaico (kWp).

Sendo assim, retornando à equação 4, teve-se:

$$N^{\circ}_{(mod)} = \frac{177,76}{0,38} = 468$$

Assim, para o modelo EMSZ 380M DG com potência de 380 Wp definido, foram calculados 468 módulos fotovoltaicos para atendimento da necessidade do projeto.

4.5.4 Média mensal de geração de energia elétrica

Para cálculo da geração de energia média mensal concedida pelo volume de módulos fotovoltaicos para atender a demanda de energia elétrica da ponte Anita Garibaldi aplicou-se a equação 5.

$$E = \frac{P_{(FV)} \times H_t}{G_{(STC)}} \times PR \quad (5)$$

Onde:

E : Energia elétrica média mensal (kWh/mês);

$P_{(FV)}$: Potência do sistema fotovoltaico instalado (kWp);

$G_{(STC)}$: Irradiação na condição padrão de teste STC (kWh/m²);

H_t : Irradiação média mensal (kWh/m². mês);

PR : Performance ratio ou taxa de desempenho do sistema fotovoltaico.

Mediante os dados que foram calculados anteriormente e introduzindo-os na equação 5 tem-se:

$$E = \frac{177,76 \times 140,40}{1} \times 0,80 = 19.966 \text{ (kWh/mês)}$$

Portanto, a energia média mensal gerada pelo sistema fotovoltaico foi 19.966 kWh/mês.

4.5.5 Área de instalação dos módulos fotovoltaicos

A área necessária para a instalação dos módulos fotovoltaicos deverá estar enquadrada nos limites do espaço físico do ambiente. Portanto, para dimensionamento da área de instalação utilizou-se a equação 6, que relaciona a quantidade de módulos e as dimensões informadas pelo fabricante.

$$A = [L_{(mod)} \times A_{(mod)}] \times N^{\circ}_{(mod)} \quad (6)$$

Onde:

A : Área total dos módulos fotovoltaicos (m²);

$L_{(mod)}$: Largura do módulo fotovoltaico (m);

$A_{(mod)}$: Altura do módulo fotovoltaico (m);

$N^{\circ}_{(mod)}$: Quantidade de módulos fotovoltaicos.

Sendo assim, retornando à equação 6, teve-se:

$$A = (0,992 \times 1,978) \times 468 = 918,30 \text{ (m}^2\text{)}$$

Portando, para instalação dos módulos fotovoltaicos calculou-se 918,30 m² de área.

4.5.6 Inversor de frequência

O dimensionamento do inversor depende do arranjo e das características construtivas e elétricas do módulo fotovoltaico, topologia de instalação, características do ambiente além da potência do gerador fotovoltaico.

Para este estudo definiu-se que os 468 módulos fotovoltaicos estariam divididos entre os três inversores, resultando em 156 módulos para cada. Estes foram dispostos em 12 *strings* contendo 13 módulos conectados em série.

4.5.6.1 Fator de dimensionamento (FDI)

Para determinar o inversor utilizou-se o fator de dimensionamento de inversor (FDI). Este fator exprime a relação entre a potência nominal do inversor em corrente alternada pela potência geradora de pico do sistema fotovoltaico que normalmente deverá estar compreendido entre 0,75 e 0,85, enquanto que o limite superior é de 1,05. Os fabricantes recomendam a utilização deste fator pois dificilmente os módulos fotovoltaicos operam em condição de potência nominal, uma vez que a irradiância está próxima de 1000 W/m² no início da tarde e raramente atinge este valor nos demais horário de sol. (PINHO; GALDINO, 2014).

Porém, se o inversor selecionado estiver fora desse limite, a potência do sistema fotovoltaico e do inversor deveram ser ajustadas, de modo que o FDI esteja compreendido nesta escala.

Aplicou-se a equação 7 para verificar se o inversor estará dentro da escala recomendada.

$$FDI = \frac{P_{(Nca)}}{P_{(FV)}} \quad (7)$$

Onde:

FDI: Fator de dimensionamento do inversor;

$P_{(FV)}$: Potência do sistema fotovoltaico instalado (kWp);

$P_{(Nca)}$: Potência nominal em corrente alternada do inversor (kW).

Dessa forma, utilizou-se três inversores com potência de 50 kW cada, para uma potência do sistema fotovoltaico descrito na seção 4.5.2. Sendo assim, retornando à equação 7, teve-se:

$$FDI = \frac{3 \times 50}{177,76} = 0,84$$

Logo, verificou-se pelo critério do FDI que três inversores do modelo EGT 50000 Max trifásico com potência de 50 kW cada, totalizando uma potência de 150 kW, atenderiam a este projeto. Os dados do inversor foram retirados do descritivo técnico disponibilizado pelo fabricante os quais estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5 - Descritivo técnico do inversor de frequência

DADOS DO INVERSOR - MODELO EGT 50000 MAX – TRIFÁSICO		
Descrição	Unidade	Valor
Especificações de Entrada CC		
Potência fotovoltaica máxima CC	W	65.000
Tensão máxima de entrada CC	Vcc	1.100
Tensão de inicialização CC	Vcc	250
Faixa de tensão do sistema fotovoltaico CC	Vcc	200 - 1.000
Tensão nominal de entrada CC	Vcc	585
Faixa de tensão MPPT CC	Vcc	500 - 850
Corrente máxima de entrada	A	6 x 25
Número de rastreadores MPPT	un.	6
Quantidade de strings por rastreador MPPT	un.	2
Especificações de Saída CA		
Potência nominal CA	W	50.000
Tensão nominal de saída	Vca	220/380
Corrente máxima de saída CA	A	80,5

Fonte: INTELBRAS, 2020, adaptado pelos autores.

4.5.6.2 Tensão de circuito aberto

Para a adequação do inversor ao sistema fotovoltaico proposto avaliou-se a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Nesse contexto, comparou-se a tensão de circuito aberto do arranjo dos módulos com a máxima tensão de entrada que o inversor suportará.

A temperatura da célula do módulo fotovoltaico é inversamente proporcional a tensão de saída do arranjo. Aplicou-se a expressão descrita na equação 8 para cálculo da tensão de circuito aberto (V'_{oc}).

$$V'_{oc} = V_{oc} + \left[\Delta T \times \left(\frac{\beta_{voc}}{100} \times V_{oc} \right) \right] \quad (8)$$

Onde:

V'_{oc} : Tensão de circuito aberto corrigido para temperatura da célula (V_{cc});

V_{oc} : Tensão de circuito aberto (V_{cc});

ΔT : Variação de temperatura entre a célula e o ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

β_{voc} : Coeficiente de temperatura do V_{oc} ($\%/K$).

Os dados de temperatura máxima e mínima da localidade foram extraídos da base de registro do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) os quais foram $35,9^{\circ}\text{C}$ e $7,5^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Utilizou-se o coeficiente de temperatura informado no descritivo técnico do fabricante do módulo fotovoltaico o qual está disponível na seção 4.5.3.

Sendo assim, retornando à equação 8, teve-se:

$$V'_{oc} = 48,5 + \left[(2,5^{\circ} - 25^{\circ}) \times \left(\frac{-0,29}{100} \times 48,5 \right) \right] = 51,66 (V_{cc})$$

Em posse do valor da tensão de circuito aberto corrigido deve-se calcular a tensão máxima na saída do arranjo, a fim de verificar se é menor que a tensão máxima na entrada do inversor, conforme equação 9.

$$V_{m\acute{a}x_inv} = N^{\circ}_{(mod)} \cdot V'_{oc} \quad (9)$$

Onde:

$N^{\circ}_{(mod)}$: Quantidade de módulos fotovoltaicos;

$V_{m\acute{a}x_inv}$: Tensão Máxima de entrada do Inversor (V_{cc});

V'_{oc} : Tensão de circuito aberto corrigido para temperatura da célula (V_{cc}).

Sendo assim, retornando à equação 9, teve-se:

$$V_{m\acute{a}x_inv} = 13 \times 51,66 = 671,58 (V_{cc})$$

Comparando com os dados calculados com as informações do descritivo técnico do equipamento, disponíveis na Tabela 5, verificou-se que o valor calculado é inferior a tensão máxima de entrada suportada pelo inversor. Neste critério, constatou-se que o inversor atende as especificações do sistema.

Logo, $671,58 < 1100 (V_{cc})$

4.5.6.3 Corrente de curto-circuito

Nesta seção avaliou-se a condição de maior temperatura do módulo, onde ocorre aumento de corrente e redução da tensão na entrada do inversor. Para realização dos cálculos utilizou-se os dados de condição padrão de teste (STC), com irradiância de 1000W/m^2 , massa de ar (AM) de 1,5 e temperatura de 25°C , porém corrigidos para a temperatura nominal de operação da célula, conforme equação 10.

$$I'_{sc} = I_{sc} + \left[\Delta T \times \left(\frac{\alpha_{isc}}{100} \times I_{sc} \right) \right] \quad (10)$$

Onde:

I'_{sc} : Corrente de curto-circuito corrigido para a temperatura da célula (A);

I_{sc} : Corrente de curto-circuito (A);

ΔT : Variação de temperatura entre a célula e o ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

α_{isc} = Coeficiente de temperatura do I_{sc} ($\%/K$).

Sendo assim, aplicando-se à equação 10, teve-se:

$$I'_{sc} = 10,04 + \left[(65,9^\circ - 25^\circ) \times \left(\frac{0,05}{100} \times 10,04 \right) \right] = 10,25 \text{ (A)}$$

Avaliou-se que a corrente de curto-circuito após as correções de temperatura permaneceu dentro das especificações do equipamento.

A partir do valor da corrente de curto-circuito corrigido calculou-se a corrente de curto-circuito máxima na entrada do inversor, afim de verificar se o valor encontrado era menor que o informado no descritivo técnico do fabricante, conforme equação 11.

$$I_{scm\acute{a}x} = N^{\circ}_{strings} \times I'_{sc} \quad (11)$$

Onde:

$I_{scm\acute{a}x}$: Corrente máxima de curto-circuito na entrada do inversor (A);

$N^{\circ}_{strings}$: Número de *strings*;

I'_{sc} : Corrente de curto-circuito corrigido para a temperatura da célula (A).

Sendo assim, retornando à equação 11, verificou-se:

$$I_{scm\acute{a}x} = 12 \times 10,25 = 123 \text{ (A)}$$

A corrente de curto-circuito calculada apresentou valor inferior a máxima corrente suportada pelo inversor. Neste critério o inversor atendeu as especificações do sistema.

Logo, $123 < 125 \text{ (A)}$

4.5.6.4 Tensão de máxima potência

Seguindo a mesma analogia que foi realizada para a tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito, objetivou-se analisar a tensão do ponto de máxima potência (V'_{mpp}) corrigida para a temperatura da célula na entrada do inversor para assegurar que os módulos fotovoltaicos

conectados nas *strings* do MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) ou seguidor do ponto de máxima potência, funcionem em seu ponto de máxima potência.

Na equação 12 está a expressão que define a tensão do ponto de máxima potência.

$$V'_{mpp} = V_{mpp} + \left[\Delta T \times \left(\frac{\gamma}{100} \times V_{mpp} \right) \right] \quad (12)$$

Onde:

V'_{mpp} : Tensão do ponto de máxima potência corrigido (V_{cc});

V_{mpp} : Tensão do ponto de máxima potência (V_{cc});

ΔT : Variação de temperatura entre a célula e o ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

γ : Coeficiente de temperatura do γ ($\%/K$).

Sendo assim, retornando à equação 12, teve-se:

$$V'_{mpp} = 39,8 + \left[(2,5^{\circ} - 25^{\circ}) \times \left(\frac{-0,39}{100} \times 39,8 \right) \right] = 43,29 (V_{cc})$$

Em posse do valor da tensão do ponto de máxima potência corrigido, calculou-se a tensão máxima na entrada do inversor, afim de verificar se este valor de tensão estava compreendido na faixa de tensão do MPPT do inversor, conforme equação 13.

$$V'_{mpp_m\acute{a}x} = N^{\circ}_{(mod)} \times V'_{mpp} \quad (13)$$

Onde:

$V'_{mpp_m\acute{a}x}$: Tensão do ponto de máxima potência na entrada do inversor (V_{cc});

V'_{mpp} : Tensão do ponto de máxima potência corrigido para temperatura da célula (V_{cc});

$N^{\circ}_{(mod)}$: Número de módulos.

Sendo assim, retornando à equação 13, calculou-se:

$$V'_{mpp_m\acute{a}x} = 13 \times 43,29 = 562,77 (V_{cc})$$

Comparando com os dados calculados com as informações do descritivo técnico do inversor, disponível na Tabela 5, verificou-se que o valor calculado da tensão do ponto de máxima potência na entrada do inversor estava dentro da faixa de tensão MPPT do inversor. Neste critério o inversor atendeu as especificações do sistema.

Logo, $500 < 562,77 < 850 (V_{cc})$

4.5.7 Dimensionamento dos condutores

O cabeamento utilizado para sistemas de energia solar necessita de uma cobertura especial com resistência a radiação ultravioleta e suporte às severas condições ambientais, tais como: variações de temperatura, umidade entre outros.

As instalações elétricas e dimensionamento do sistema fotovoltaico em corrente alternada são atendidos pela norma ABNT NBR 5410, sendo orientadas pela norma ABNT NBR 16690 que relaciona os requisitos de projetos e instalações elétricas para circuitos de corrente contínua e assessorada pela norma ABNT NBR 16612 que retrata das especificações do cabeamento.

Neste sentido, para o sistema fotovoltaico proposto utilizou-se cabos com bitolas diferentes, um para o lado de corrente contínua (CC), dos módulos até o inversor e o outro para o lado de corrente alternada (CA), do inversor até o quadro geral (CA).

4.5.7.1 Dimensionamento dos condutores em corrente contínua (CC)

Para dimensionar os condutores em corrente contínua das *strings*, considerou-se a corrente máxima no condutor.

Segundo Barros (2011), o condutor da *string* deve ser dimensionado para suportar 1,25 vezes a corrente de curto-circuito (I'_{sc}). Conforme foi definido anteriormente a corrente de curto-circuito (I'_{sc}) é igual a 10,25 A. Logo a capacidade de corrente no condutor foi apresentada na equação 14.

$$I_{CaboCC} = I'_{sc} \times 1,25 \quad (14)$$

Onde:

I_{CaboCC} : Capacidade de corrente no condutor (A);

I'_{sc} : Corrente de curto-circuito corrigido para a temperatura da célula (A).

Sendo assim, retornando à equação 14, teve-se:

$$I_{CaboCC} = 10,25 \times 1,25 = 12,81 \text{ (A)}$$

Em seguida, aplicou-se o critério da capacidade de condução de corrente para determinar a seção do condutor. Este critério leva em consideração a temperatura ambiente, o agrupamento dos condutores e os métodos de instalação.

Deste modo, considerou-se uma distância de 25 metros de cabeamento para fazer a conexão de cada arranjo fotovoltaico ao inversor. Esta conexão foi realizada através de um eletroduto de sobrepor em material PVC (método de instalação B1) com 12 circuitos agrupados a uma temperatura ambiente 60°C e temperatura no condutor de 120°C. Por esta razão, aplicou-se o fator de correção de temperatura ambiente (F_{ct}) de 0,71 e um fator de correção de agrupamento (F_{ca}) de 0,45, conforme a tabela da ABNT NBR 5410:2004.

Mediante aos valores apresentados, corrigiu-se a capacidade de corrente no condutor, utilizando a equação 15.

$$I'_{CaboCC} = \frac{I_{CaboCC}}{F_{ca} \times F_{ct}} \quad (15)$$

Onde:

I'_{CaboCC} : Capacidade de corrente no condutor corrigida (A);

I_{CaboCC} : Capacidade de corrente no condutor (A);

F_{ca} : Fator de correção de agrupamento;

F_{ct} : Fator de correção de temperatura ambiente.

Sendo assim, retornando à equação 15, teve-se:

$$I'_{CaboCC} = \frac{12,81}{0,45 \times 0,71} = 40,10 \text{ (A)}$$

Mediante ao resultado apresentado pelo critério da capacidade de condução de corrente e juntamente com a tabela da ABNT NBR 16612:2017, definiu-se que a seção nominal do condutor seria de 6 mm².

Outro critério aplicado para determinar a seção nominal do condutor nas *strings* foi a queda de tensão. Segundo NBR 16690:2019, a queda de tensão, sob condições de carga máxima não poderá exceder a 3% da tensão máxima do arranjo fotovoltaico.

Para este critério utilizou-se o coeficiente de resistividade do cobre de 0,020 Ω.mm²/m e queda de tensão de 1%. Desse modo, utilizou-se a equação 16 para cálculo da seção nominal do condutor pelo critério da queda de tensão.

$$S = \frac{2 \times l \times \rho \times I_{CaboCC}}{\Delta V \times V'_{mpp} \times N^{\circ}_{(mod)}} \quad (16)$$

Onde:

S : Seção nominal do condutor (mm²);

l : Comprimento do condutor (m);

ρ : Coeficiente de resistividade do cobre para a temperatura considerada (Ω.mm²/m);

I_{CaboCC} : Capacidade de corrente no condutor (A);

ΔV : Queda de tensão no condutor (%);

V'_{mpp} : Tensão do ponto de máxima potência corrigido para a temperatura da célula (V_{cc});

$N^{\circ}_{(mod)}$: Quantidade de módulos fotovoltaicos.

Sendo assim, retornando à equação 16, teve-se:

$$S = \frac{2 \times 25 \times 0,020 \times 12,81}{0,01 \times 43,29 \times 13} = 2,28 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Observa-se que comercialmente não existe uma seção de condutor de 2,28 mm², logo escolheu-se uma seção do condutor de 2,5 mm².

Portanto, entre os dois critérios estabelecidos, definiu-se para este trecho a seção nominal do condutor de 6 mm².

4.5.7.2 Dimensionamento da proteção em corrente contínua (CC)

O modelo de inversor adotado para este projeto possui *string box*⁶ embarcada, por este motivo não foi necessário o dimensionamento deste equipamento. Calculou-se 36 fusíveis distribuídos para 3 inversores com 12 *strings*. A inequação 17, apresenta o cálculo para estabelecer a corrente nominal do fusível.

$$1,1 \times I'_{sc} \leq I_{fusível} \leq 1,5 \times I'_{sc} \quad (17)$$

Onde:

I'_{sc} : Corrente de curto-circuito corrigido para a temperatura da célula (A);

$I_{fusível}$: Corrente nominal do fusível (A);

$I_{reversa}$: Corrente reversa do módulo (A).

Sendo assim, aplicando à inequação 17, teve-se:

$$1,1 \times 10,25 \leq I_{fusível} \leq 1,5 \times 10,25 \text{ (A)}$$

$$11,3 \leq I_{fusível} \leq 15,37 \text{ (A)}$$

Portanto, atendendo ao critério, definiu-se um fusível com uma corrente nominal ($I_{fusível}$) igual a 12 A para o projeto.

4.5.7.3 Dimensionamento dos condutores em corrente alternada (CA)

O dimensionamento dos condutores (CA) foi baseado na corrente máxima de saída do inversor de 80,5 A, conforme disponibilizado no descritivo técnico da Tabela 5.

Desse modo, considerou-se uma distância de 10 metros para fazer a conexão de cada inversor ao quadro geral (CA), através de um eletroduto subterrâneo em material PVC (método

⁶ *String box*: Para proteger as entradas do inversor no lado de corrente contínua (lado da conexão do inversor com os módulos fotovoltaicos) contra surtos de tensões e correntes normalmente são instalados caixas de junção, também conhecidas como *string box*. Nelas são alojados os protetores de surto, fusíveis e chaves seccionadoras.

de instalação D) com 1 circuito agrupado a uma temperatura no solo 20°C e temperatura no condutor de 90°C. Em virtude disso, considerou-se os fatores de correção de temperatura (F_{ct}) e de agrupamento (F_{ca}) unitário, conforme a tabela da ABNT NBR 5410:2004.

Portanto, a capacidade de corrente no condutor foi calculada utilizando a equação 18

$$I'_{CabOCA} = \frac{I_{CabOCA}}{F_{ca} \times F_{ct}} \quad (18)$$

Onde:

I'_{CabOCA} : Capacidade de corrente no condutor corrigida (A);

I_{CabOCA} : Capacidade de corrente no condutor (A);

F_{ca} : Fator de correção de agrupamento;

F_{ct} : Fator de correção de temperatura ambiente.

Sendo assim, retornando à equação 18, teve-se:

$$I'_{CabOCA} = \frac{80,5}{1 \times 1} = 80,5 \text{ (A)}$$

Mediante ao resultado apresentado pelo critério da capacidade de condução de corrente e juntamente com a tabela da ABNT NBR 5410:2004, foi definido que a seção nominal do condutor seria de 25 mm².

Pelo critério da queda de tensão foi utilizado um coeficiente de resistividade do cobre de 0,01724 Ω.mm²/m, fator de potência (FP) unitário e uma queda de tensão de 3%.

Desse modo, utilizou-se a equação 19 para cálculo da seção nominal do condutor pelo critério da queda de tensão, conforme a (GREENPRO, 2004).

$$S = \frac{\sqrt{3} \times l \times \rho \times I_{CabOCA} \times \cos\varphi}{\Delta V \times V_n} \quad (19)$$

Onde:

S : Seção nominal do condutor (mm²);

l : Comprimento do condutor (m);

ρ : Coeficiente de resistividade do cobre para temperatura considerada (Ω.mm²/m);

I_{CabOCA} : Capacidade de corrente no condutor (A);

ΔV : Queda de tensão no condutor (%);

V_n : Tensão nominal da rede elétrica (V);

$\cos\varphi$: Fator de potência do inversor.

Sendo assim, retornando à equação 19, teve-se:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 10 \times 0,01724 \times 80,5 \times 1}{0,03 \times 380} = 2,10 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Observa-se que comercialmente não existe uma seção de condutor de 2,10 mm², logo foi escolhido uma seção do condutor de 2,5 mm².

Confrontando os resultados obtidos nos dois critérios, foi definido para este trecho a seção nominal do condutor de 25 mm².

A seção nominal do condutor neutro e aterramento foi igual a realizada para a seção dos condutores de fase, conforme a norma ABNT NBR 5410:2004.

4.5.7.4 Dimensionamento da proteção de corrente alternada (CA)

Para proteger a saída do inversor contra surtos provenientes da rede elétrica em corrente alternada é utilizado o quadro geral CA, que aloja no seu interior disjuntores e dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

No dimensionamento do dispositivo de proteção utilizou-se a capacidade de corrente na saída do inversor igual a 80,5 A, e a capacidade máxima de corrente igual a 101 A para uma seção nominal do condutor de 25 mm².

A inequação 20, apresenta o cálculo para estabelecer a corrente nominal do disjuntor.

$$I'_{CabOCA} \leq I_{disj} < I_{cam\acute{a}x} \quad (20)$$

Onde:

I'_{CabOCA} : Capacidade de corrente no condutor corrigida (A);

I_{disj} : Corrente nominal do disjuntor (A);

$I_{cam\acute{a}x}$: Capacidade máxima de corrente (A).

Sendo assim, retornando à inequação 20, teve-se:

$$80,5 \leq I_{disj} < 101 \text{ (A)}$$

Portanto, atendendo ao critério, definiu-se utilizar o disjuntor tripolar com uma corrente nominal (I_{disj}) igual a 90 A. Cada inversor teve seu próprio disjuntor tripolar, logo serão necessários 3 disjuntores tripolares para o sistema.

4.5.8 Dimensionamento dos eletrodutos

Conforme a norma regulamentadora NBR 5410:2004, a área total dos condutores confinados num eletroduto não poderá ultrapassar o limite de 40% da área útil do eletroduto.

Nesse sentido, após a definição dos condutores, foi realizado o dimensionamento dos eletrodutos para os trechos que compreendem a conexão dos módulos fotovoltaicos ao inversor e deste com a rede da distribuidora de energia elétrica local.

Considerando-se que os condutores das *strings* possuem uma seção nominal de 6 mm² com área de 29,22 mm² e sabendo que este projeto fotovoltaico possui 3 inversores com totalidade de 36 *strings* (12 por inversor) e estão dispostos em 2 condutores por *strings* (positivo e negativo), totalizando 24 condutores para o circuito de corrente contínua.

Utilizou-se a equação 21 para determinar o diâmetro interno do eletroduto e assim definir uma seção comercial mais adequada para o eletroduto.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times \sum A_{cond}}{f \times \pi}} \quad (21)$$

Onde:

D_i : Diâmetro interno do eletroduto (mm);

$\sum A_{cond}$: Somatório das áreas externas dos condutores a serem instalados (mm²);

f : Fator de preenchimento no eletroduto de 0,40.

Sendo assim, retornando à equação 21, teve-se:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times 24 \times (29,22)}{0,40 \times \pi}} = 47,25 \text{ (mm)}$$

Portanto, foi definido o eletroduto com diâmetro interno de 50 mm para comportar os 24 condutores, respeitando o limite da taxa de ocupação do eletroduto.

Enquanto, para o trecho correspondente ao circuito de corrente alternada trifásico foram considerados 5 condutores de seção nominal 25 mm² e área de 95,03 mm². De forma semelhante ao cálculo realizado no trecho CC para determinar o diâmetro interno do eletroduto e assim definir uma seção comercial mais adequada do eletroduto, utilizou-se a equação:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times 5 \times (95,03)}{0,40 \times \pi}} = 38,89 \text{ (mm)}$$

Deste modo, definiu-se um eletroduto com diâmetro interno de 40 mm para comportar os 5 condutores, respeitando o limite da taxa de ocupação do eletroduto.

Por fim, no Apêndice A representou-se o dimensionamento do sistema fotovoltaico na forma de diagrama unifilar.

4.5.9 Comparativo do consumo versus geração de energia elétrica

A Tabela 6 ilustra a geração de energia elétrica mensal, a partir do sistema fotovoltaico no período compreendido de doze meses.

Tabela 6 - Geração de energia elétrica mensal do sistema fotovoltaico

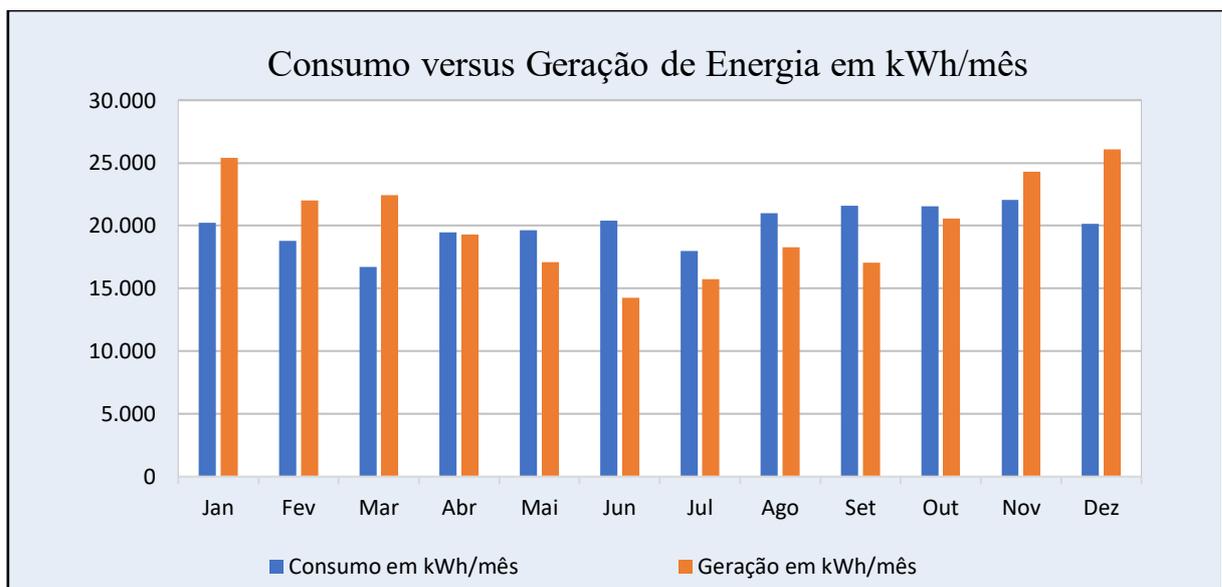
Meses	Energia Gerada (kWh)
Janeiro	25.392,66
Fevereiro	22.019,49
Março	22.439,00
Abril	19.283,40
Mai	17.104,78
Junho	14.249,24
Julho	15.738,16
Agosto	18.295,06
Setembro	17.064,96
Outubro	20.587,45
Novembro	24.317,57
Dezembro	26.098,01
Média	20.215,82
Total	242.589,78

Fonte: Autores, 2020.

Em face dos valores exibidos na Tabela 6, notou-se que o mês de dezembro apresentou um ápice na energia gerada de 26.098,01 kWh/mês, ao passo, no mês de junho obteve-se a pior geração de energia de 14.249,24 kWh/mês para o período analisado.

O Gráfico 5 explicita o comparativo do consumo versus geração de energia elétrica para o mesmo período analisado.

Gráfico 5 - Consumo versus geração de energia elétrica do sistema fotovoltaico



Fonte: Autores, 2020.

Observou-se no Gráfico 5, que os meses compreendidos entre novembro e março obtiveram geração de energia elétrica superior ao consumo da ponte Anita Garibaldi. Por outro lado, os demais meses apresentaram consumo de energia maior que a geração de energia elétrica com o sistema fotovoltaico.

Em suma, o sistema proposto apresentou um balanço energético favorável, pois nos meses que a geração de energia foi superior ao consumo, injetou-se a energia excedente na rede da distribuidora local para posterior crédito nos meses que o consumo superou a geração de energia elétrica.

4.5.10 Proposta de conexão com à rede da distribuidora

Para conexão com a rede da distribuidora sugere-se que a fixação dos módulos fotovoltaicos ocorra no entorno da Ponte Anita Garibaldi como *brise* de fachada, utilizando a estrutura da própria, que apresenta aproximadamente 2815 metros. Conectando-se o sistema fotovoltaico em um único ponto de medição (cabeceira norte ou sul).

Desta forma, reduzindo-se os gastos com cabeamento e conexões, pois o sistema gerador estaria próximo ao ponto de medição. Por estar conectado à rede distribuidora injetou-se toda energia elétrica na rede da concessionária sendo convertida em créditos para abatimento nas faturas dos dois pontos de medição, haja vista, que estão na mesma concessão e titularidade.

4.6 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA EÓLICO

Para elaboração do dimensionamento do sistema composto por turbinas eólicas, avaliou-se o comportamento do vento na localidade, nos aspectos da sua direção e velocidade média. Por fim, realizou-se os equacionamentos para definição dos equipamentos necessários para suprimento da demanda energética da Ponte Anita Garibaldi.

4.6.1 Potencial eólico na região de Laguna/SC

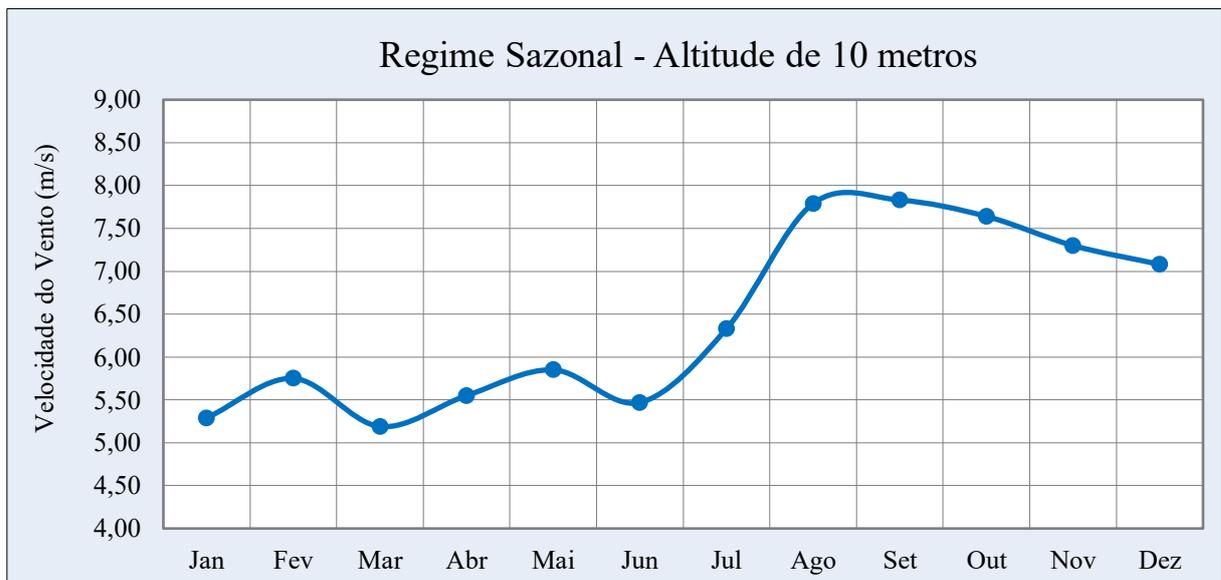
A viabilidade técnica de implantação do sistema de geração eólica na ponte, deu-se por meio do levantamento de dados do potencial eólico na região.

Os dados analisados estavam compreendidos no período entre 01/06/2008 e 13/06/2011, totalizando 24.850 registros, obtidos na base de registro do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estes dados foram mensurados por meio de um instrumento de

medição (anemômetro), instalado a 10 metros de altura em um mastro metálico da estação meteorológica do Farol de Santa Marta que fica localizado aproximadamente 14 km de distância da ponte Anita Garibaldi.

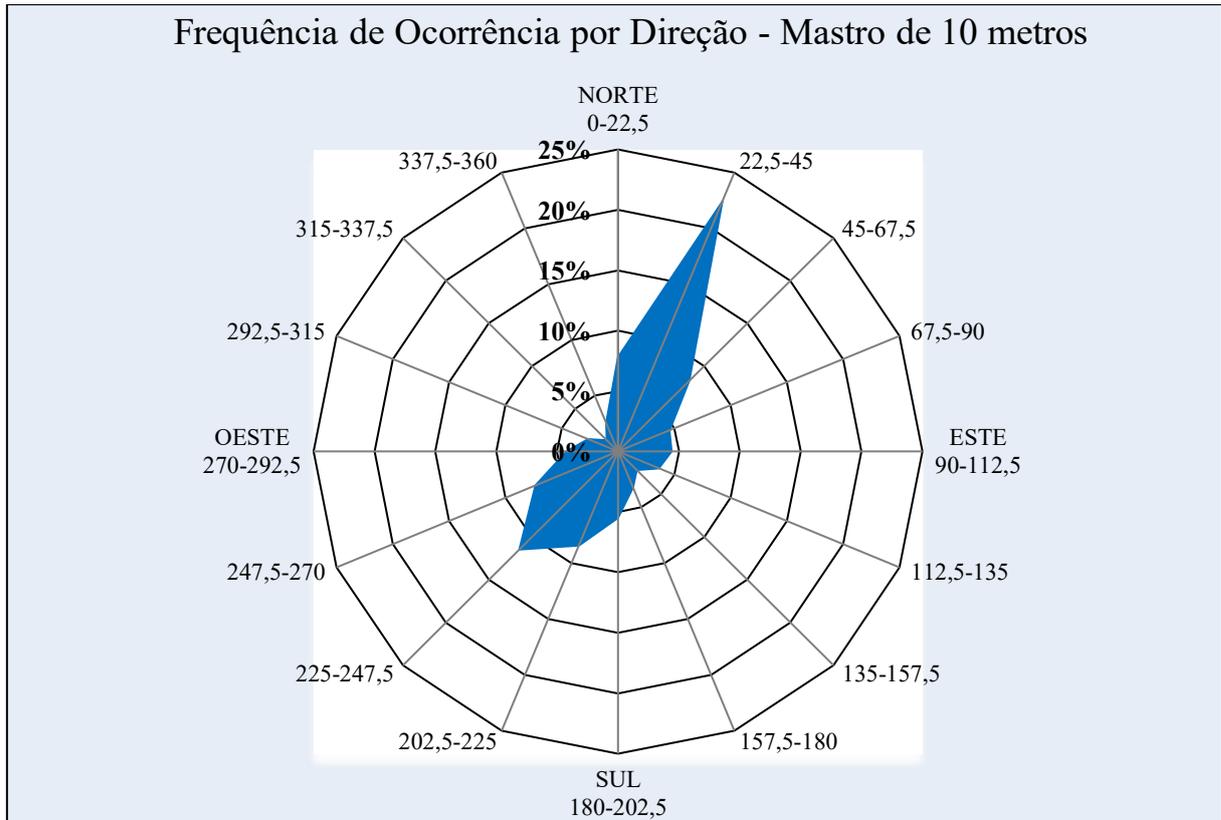
A partir destas informações, projetou-se no Gráfico 6 o comportamento da velocidade média do vento ao longo dos meses para uma altitude de 10 metros. Assim, como sua direção que está disposta no diagrama de dispersão, apresentado no Gráfico 7.

Gráfico 6 - Velocidade média mensal do vento na altura de 10 metros



Fonte: Autores, 2020.

Gráfico 7 - Direção do vento na altura de 10 metros



Analisando os dados apresentados nos Gráfico 6 e Gráfico 7, verificou-se que a velocidade média mensal dos ventos para a região de Laguna/SC esteve superior a velocidade de 5,20 m/s e apresentou uma velocidade média anual de 6,42 m/s, com os ventos predominantemente nordestes e com fortes frequências de velocidade nessa direção, com segunda preferência para o quadrante sul e raramente ocorrendo ventos de outros quadrantes.

Os gráficos apresentados foram utilizados para definição do melhor posicionamento do aerogerador objetivando-se o maior aproveitamento da energia eólica.

Em virtude de que a medição anemométrica ter ocorrido numa posição inferior à da nacelle do aerogerador, necessitou-se extrapolar os dados da velocidade média do vento da altura de 10 metros para 100 metros, para tanto, utilizou-se a equação logarítmica 22 devido ao aerogerador normalmente estar instalado próximo dessa altitude.

$$V_{(z)} = V_{(z_r)} \times \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (22)$$

Onde:

$V_{(z)}$ = Velocidade média do vento desejada (m/s);

V_{Z_r} = Velocidade média do vento medido (m/s);

Z = Altura desejada para obtenção da nova velocidade (m);

Z_r = Altura da medição dos dados (m);

Z_0 = Comprimento de rugosidade do solo (m).

Baseado nos dados apresentados na Tabela 7 que relaciona o comprimento de rugosidade do solo (Z_0) com a descrição do mesmo e de posse dos dados medidos (velocidade média mensal e altura de 10 metros), encontrou-se a velocidade média do vento ao longo dos meses de 7,79 m/s (metros por segundo) para uma altura de 100 metros, conforme ilustrado no Gráfico 8.

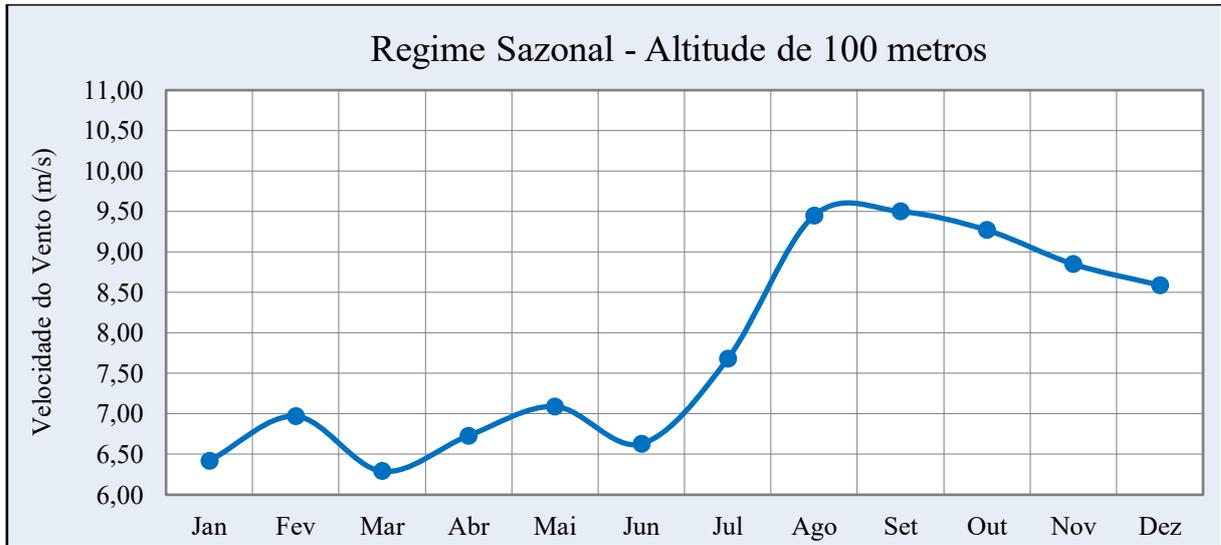
Para este projeto utilizou-se o valor referente a descrição do terreno – mar aberto em condições de calmaria – igual a 0,20 mm, porém este valor convertido para metros.

Tabela 7- Comprimento de rugosidade do solo

Descrição do terreno	Z_0 (mm)
Terreno muito liso, gelo, lama	0,01
Mar aberto em condições de calmaria	0,20
Mar agitado	0,50
Neve	3,00
Gramado	8,00
Pasto rugoso	10,00
Campo de pousio	30,00
Plantações	50,00
Poucas árvores	100,00
Muitas árvores, poucas construções	250
Florestas	500
Subúrbios	1500
Centros de cidade com construções altas	3000

Fonte: Manwell, adaptado pelos autores, 2020.

Gráfico 8 - Velocidade média mensal do vento na altura de 100 metros



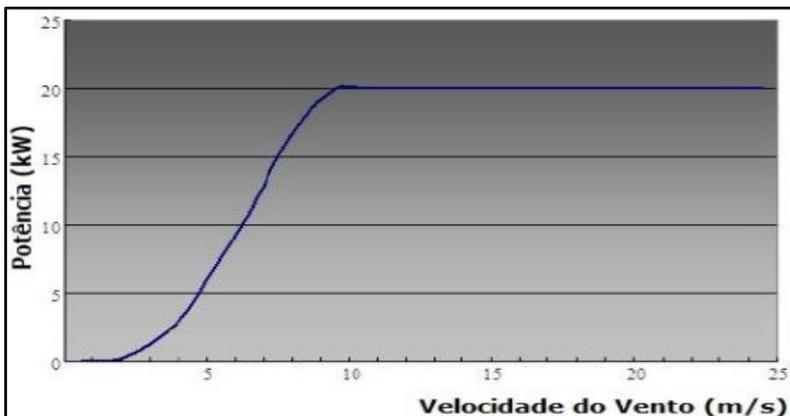
Fonte: Autores, 2020.

Em relação à sazonalidade da intensidade dos ventos em Laguna/SC a uma altura de 100 metros, percebeu-se que durante os seis últimos meses do ano os ventos sopram com maior intensidade, com grande performance nos meses de agosto a dezembro, conforme Gráfico 8.

4.6.2 Aerogerador

Objetivando dimensionar o sistema eólico conectado à rede foi prevista uma potência do aerogerador a partir do cruzamento dos dados obtidos do recurso eólico (velocidade média do vento) de 7,79 m/s na altura da nacela com a curva de potência da turbina do aerogerador – Modelo HUMMER H13.2 -20 kW, conforme ilustrado no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Curva de potência da turbina do aerogerador



Fonte: Eletrovento, 2020.

Seguidamente, averiguou-se os parâmetros técnicos disponibilizados pelo fabricante deste aerogerador para a determinação da potência do sistema eólico. Estes parâmetros estão explanados na Tabela 8.

Tabela 8 - Características técnicas do aerogerador

DADOS DO AEROGERADOR - MODELO HUMMER H13.2 -20kW – TRIFÁSICO		
Descrição	Unidade	Valor
Especificações de Entrada e Saída		
Potência nominal	W	20.000
Potência máxima de saída	W	20.000
Tensão de saída	Vac	380
Corrente nominal	A	35
Velocidade na partida	m/s	3
Velocidade nominal	m/s	10
Eficiência do aerogerador	%	96
Coefficiente de performance	-	0,42
Especificações Mecânicas		
Área varrida	m ²	136,84
Quantidade de pás	un	3
Peso do aerogerador	kg	940

Fonte: Eletrovento, adaptado pelos autores, 2020.

4.6.2.1 Componentes elétricos do aerogerador

Segundo o fabricante do aerogerador, definiu que para este equipamento deverão ser utilizados os componentes elétricos: retificador e inversor, ambos HUMMER, de modo que a entrada e saída destes equipamentos deverão estar de acordo com os níveis de tensão, corrente e frequência entre si e juntamente com a rede elétrica.

Deste modo, foram coletadas as especificações técnicas do inversor, sendo elas: faixa de tensão de operação na entrada do inversor de $200 - 780 V_{cc}$ e na saída tensão e frequência de $380 V_{ac}$ e $60 H_z$ respectivamente.

Por outro lado, o fabricante não informou as especificações do retificador alegando ser uma questão de sigilo comercial. Mesmo sem esta informação, foi possível dimensionar os condutores com base nos dados de entrada e saída do aerogerador e inversor.

4.6.3 Potência do sistema eólico

Segundo Dutra Ricardo (2010), a quantidade de energia do vento varia com o cubo da velocidade média do vento, porém apenas uma parcela desta energia é extraída através de um aerogerador. Desta forma, utilizou-se a equação 23 descrita abaixo para cálculo da potência gerada pelo aerogerador.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \times \eta \quad (23)$$

Onde:

P = Potência gerada pela turbina eólica (kW);

ρ = Densidade do ar seco de 1,225 (kg/m³);

A = Área de varredura pelas hélices do rotor (m²);

V^3 = Velocidade do vento ajustada na altura da nacele do aerogerador (m/s);

C_p = Coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

η = Eficiência do conjunto gerador/transmissão (%).

Fundamentado na equação da potência e dos parâmetros do aerogerador, definiu-se a potência do gerador. Sendo assim, utilizando à equação 23, calculou-se:

$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 136,84 \times 7,79^3 \times 0,42 \times 0,96 = 15,98 \text{ (kW)}$$

Dessa forma, a potência gerada por uma turbina eólica ou potência aproveitável nas condições definidas anteriormente foi de 15,98 kW.

4.6.4 Média mensal de geração de energia elétrica

Estabeleceu-se a energia elétrica média mensal gerada por uma turbina eólica utilizando o equacionamento da energia elétrica (24).

Essa equação representa a quantidade de energia gerada através da potência útil da turbina eólica multiplicada pela variação temporal dentro do período analisado, neste caso considerou-se 730 horas (número de horas mensal).

$$E = P \times \Delta T \quad (24)$$

Onde:

E = Energia elétrica média mensal (kWh/mês);

P = Potência gerada pela turbina eólica (kW);

ΔT = Variação temporal (h/mês).

Com o resultado da potência gerada e a quantidade de horas mensal, as quais foram apresentados anteriormente e introduzindo-os na equação 24 teve-se:

$$E = 15,98 \times 730 = 11.665,4 \text{ (kWh/mês)}$$

A partir do resultado da energia elétrica média mensal obtido anteriormente, quantificou-se dois aerogeradores para que o sistema gere a capacidade de energia elétrica para suprimento da demanda energética da ponte Anita Garibaldi.

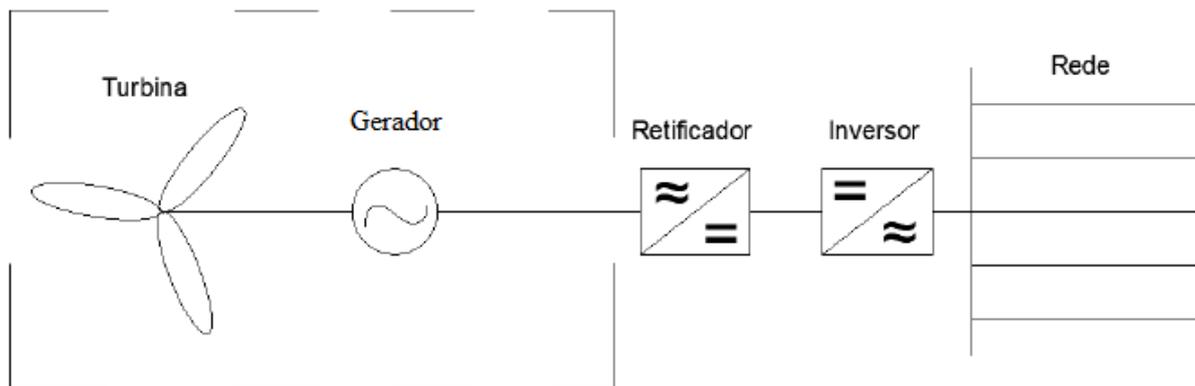
Portanto, com dois aerogeradores teve-se uma estimativa de energia média mensal gerada (E) igual a 23.330,80 kWh/mês.

4.6.5 Topologia do sistema eólico

Para realizar o dimensionamento dos condutores, foi verificado com o fabricante do aerogerador HUMMER modelo H13.2 – 20kW, que este equipamento permite a conexão com a rede de distribuidora mediante a sua ligação com os seus componentes elétricos (retificador e inversor), desde que os seus parâmetros elétricos de saída sejam compatíveis com a rede da distribuidora de energia local.

A Figura 18 apresenta esquematicamente as etapas de conexão da turbina do aerogerador até a rede da distribuidora de energia elétrica.

Figura 18 - Topologia do aerogerador HUMMER modelo H13.2 20kW



Fonte: Autores, 2020.

A topologia do aerogerador da Figura 18 revela que a turbina eólica faz a conexão direta com o eixo do gerador, em corrente alternada trifásica (CA) com amplitude e frequência variável. Este, faz o acoplamento com o retificador controlado de silício (SCR), onde a energia elétrica é convertida em corrente contínua (CC) e novamente convertida em corrente alternada (CA) através do inversor conectado no mesmo barramento (CC) do retificador. Após este último estágio, o inversor entrega a energia a rede elétrica no mesmo nível de tensão e frequência.

4.6.6 Dimensionamento dos condutores e proteções

O cabeamento utilizado para sistemas de energia eólica necessita de tratamento especial, fornecendo uma resistência à abrasão, térmica, radiação ultravioleta e contendo uma eficiente flexão e torção, além de suportar às severas condições ambientais, tais como: umidade, nevoa, salinidade entre outros.

Estas peculiaridades são baseadas por um conjunto de normatizações da IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional – norma IEC 61400-21:2010 a qual permite a sua utilização em instalações elétricas de sistemas eólicos juntamente com a norma ABNT NBR 5410:2004.

Dessa forma, para este projeto eólico utilizou-se condutores com seções nominais diferentes correspondentes aos três trechos que interligam a turbina com a rede elétrica. Estes trechos foram divididos em: primeiro e terceiro trecho correspondentes ao circuito de corrente alternada (CA) e o segundo trecho em corrente contínua (CC).

Nesse sentido, para dimensionamento dos condutores (CC) e (CA) foram aplicados dois critérios: a capacidade de corrente no condutor e a queda de tensão.

4.6.6.1 Dimensionamento em corrente contínua (CC)

Nesta seção dimensionou-se os condutores e proteções para o trecho entre o retificador e o inversor do sistema eólico.

4.6.6.1.1 Dimensionamento dos condutores do segundo trecho

No dimensionamento dos condutores (CC), relativos ao segundo trecho, considerou-se 2 metros de cabeamento para conectar o retificador ao inversor.

Sabendo-se a faixa da tensão de entrada e saída do inversor e a potência de saída do mesmo, foi possível determinar a corrente elétrica e a seção nominal do condutor neste trecho. Logo a corrente elétrica na entrada do inversor foi determinada pela equação 25.

$$I_{e_inv} = \left(\frac{P}{3 \times V_n} \right) \quad (25)$$

Onde:

I_{e_inv} : Corrente elétrica na entrada do inversor (A);

P : Potência nominal na entrada do inversor (kW);

V_n : Tensão nominal na entrada do inversor (V_{cc}).

Sendo assim, retornando à equação 25, teve-se:

$$I_{e_inv} = \left(\frac{20.000}{3 \times 200} \right) = 33,33 \text{ (A)}$$

Entretanto, o condutor deve ser dimensionado para suportar 1,25 vezes a corrente na entrada do inversor (I_{e_inv}). Conforme definiu-se anteriormente a corrente (I_{e_inv}) é 33,33 A (por fase), logo a capacidade de corrente no condutor foi calculada utilizando-se a equação 26.

$$I_{Cabocc} = I_{e_inv} \times 1,25 \quad (26)$$

Onde:

I_{cabocc} : Capacidade de corrente no condutor (A);

$I_{e_{inv}}$: Corrente elétrica na entrada do inversor (A).

Sendo assim, retornando à equação 26, teve-se:

$$I_{cabocc} = 33,33 \times 1,25 = 41,66 \text{ (A)}$$

Posteriormente, aplicou-se o critério da capacidade de condução de corrente para determinar a seção nominal do condutor.

Assim sendo, foi considerado 2 metros de cabeamento unipolar para fazer a conexão do barramento (CC) entre o retificador e inversor através de um eletroduto de sobrepor em material PVC (método de instalação B1) com 1 circuito a uma temperatura ambiente de 30°C e temperatura no condutor de 90°C. Por este motivo, considerou-se os fatores de correção de temperatura (F_{ct}) e de agrupamento (F_{ca}) unitário, conforme a tabela da ABNT NBR 5410:2004.

Portanto, a capacidade de corrente no condutor foi calculada utilizando a equação 27.

$$I'_{cabocc} = \frac{I_{cabocc}}{F_{ca} \times F_{ct}} \quad (27)$$

Onde:

I'_{cabocc} : Capacidade de corrente no condutor corrigida (A);

I_{cabocc} : Capacidade de corrente no condutor (A);

F_{ca} : Fator de correção de agrupamento;

F_{ct} : Fator de correção de temperatura ambiente.

Sendo assim, retornando à equação 27, teve-se:

$$I'_{cabocc} = \frac{41,66}{1 \times 1} = 41,66 \text{ (A)}$$

Mediante ao resultado apresentado e através da utilização tabela da ABNT NBR 5410:2004, definiu-se que a seção nominal do condutor seria de 6 mm².

Outro critério aplicado para determinar a seção do condutor foi a queda de tensão. Neste critério utilizou-se o coeficiente de resistividade do cobre de $0,0179 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ e queda de tensão de 1%.

Desse modo, calculou-se para este trecho a seção nominal do condutor pelo critério da queda de tensão, conforme a equação 28.

$$S = \frac{2 \times l \times \rho \times I_{\text{caboCC}}}{\Delta V \times V_{\text{cc}}} \quad (28)$$

Onde:

S : Seção nominal do condutor (mm^2);

l : Comprimento do condutor (m);

ρ : Coeficiente de resistividade do cobre para a temperatura considerada ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

I_{caboCC} : Capacidade de corrente no condutor (A);

ΔV : Queda de tensão no condutor (%);

V_{cc} : Tensão de entrada do inversor (V_{cc}).

Sendo assim, retornando à equação 28, teve-se:

$$S = \frac{2 \times 2 \times 0,0179 \times 41,66}{0,01 \times 200} = 1,49 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Observa-se que comercialmente não encontramos uma seção de condutor de $1,49 \text{ mm}^2$, logo escolheu-se a uma seção de $1,5 \text{ mm}^2$.

Portanto, entre os dois critérios estabelecidos, definiu-se para este trecho que a seção nominal do condutor seria de 6 mm^2 .

4.6.6.1.2 Dimensionamento da proteção do segundo trecho

Para proteger a entrada do inversor necessitou-se instalar um fusível. Nesse sentido foi realizado o dimensionamento para determinar a sua corrente nominal, conforme apresentado na inequação 29.

$$1,1 \times I'_{CabocC} \leq I_{fusível} \leq 1,5 \times I'_{CabocC} \quad (29)$$

Onde:

I'_{CabocC} : Capacidade de corrente no condutor corrigida (A);

$I_{fusível}$: Corrente nominal do fusível (A).

Sendo assim, retornando à inequação 29, teve-se:

$$1,1 \times 41,66 \leq I_{fusível} \leq 1,5 \times 41,66$$

$$45,82 \leq I_{fusível} \leq 62,49 \text{ (A)}$$

Portanto, atendendo ao critério, definiu-se a utilização de um fusível com corrente nominal ($I_{fusível}$) igual a 50 A.

Nesta situação, como a capacidade de condução de corrente no condutor de seção nominal igual a 6 mm² definido anteriormente foi menor que a proteção, alterou-se a seção nominal do condutor para 10 mm².

4.6.6.2 Dimensionamento em corrente alternada (CA)

Nesta seção dimensionou-se os condutores e proteções para dos trechos entre o aerogerador e o retificador, denominado primeiro trecho, e entre o inversor de frequência e o quadro CA rede da concessionária, denominado terceiro trecho.

4.6.6.2.1 Dimensionamento dos condutores do primeiro trecho

Baseou-se o dimensionamento dos condutores de corrente alternada para o primeiro trecho na corrente nominal do aerogerador de 35 A, conforme disponibilizado no descritivo técnico da Tabela 8.

Para dimensionar o condutor aplicou-se o fator de 1,25 vezes a corrente de saída do aerogerador, que é igual a 35 A, logo a capacidade de corrente no condutor é apresentada na equação 30.

$$I_{CaboCA} = I_n \times 1,25 \quad (30)$$

Onde:

I_{CaboCA} : Capacidade de corrente no condutor (A);

I_n : Corrente nominal do aerogerador (A).

Sendo assim, retornando à equação 30, teve-se:

$$I_{CaboCA} = 35 \times 1,25 = 43,75 \text{ (A)}$$

A conexão da turbina com o retificador é realizada através de um eletroduto em material PVC (método de instalação D) percorrido na parede interna da torre numa distância 120 metros. Este eletroduto contém apenas um único circuito trifásico a uma temperatura de solo 20°C e temperatura no condutor de 90°C.

Por esta razão, considerou-se os fatores de correção de temperatura (F_{ct}) e agrupamento (F_{ca}) unitário, conforme a tabela da ABNT NBR 5410:2004. Portanto, corrigiu-se a capacidade de corrente no condutor, utilizando a equação 31.

$$I'_{CaboCA} = \frac{I_{CaboCA}}{F_{ca} \times F_{ct}} \quad (31)$$

Onde:

I'_{CaboCA} : Capacidade de corrente no condutor corrigida (A);

I_{CaboCA} : Capacidade de corrente no condutor (A);

F_{ca} : Fator de correção de agrupamento;

F_{ct} : Fator de correção de temperatura ambiente.

Sendo assim, retornando à equação 31, teve-se:

$$I'_{CaboCA} = \frac{43,75}{1 \times 1} = 43,75 \text{ (A)}$$

Pelo critério da capacidade de condução de corrente e juntamente com a tabela da ABNT NBR 5410:2004 a seção nominal no condutor seria de 6 mm².

Entretanto, pelo critério da queda de tensão foi utilizado um coeficiente de resistividade do cobre de $0,01724 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, fator de potência (FP) de 0,87 e uma queda de tensão de 3%.

Desse modo, utilizou-se o critério da queda de tensão para cálculo do trecho correspondente a seção do condutor, conforme a equação 32 (GREENPRO, 2004).

$$S = \frac{\sqrt{3} \times l \times \rho \times I_{\text{CaboCA}} \times \cos\varphi}{\Delta V \times V_l} \quad (32)$$

Onde:

S : Seção nominal do condutor (mm^2);

l : Comprimento do condutor (m);

ρ : Coeficiente de resistividade do cobre para temperatura considerada ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);

I_{CaboCA} : Capacidade de corrente no condutor (A);

ΔV : Queda de tensão no condutor (%);

V_l : Tensão nominal da rede elétrica (V);

$\cos\varphi$: Fator de potência do inversor.

Sendo assim, retornando à equação 32, teve-se:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 120 \times 0,01724 \times 43,75 \times 0,87}{0,03 \times 380} = 11,96 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Observou-se que comercialmente não encontramos uma seção de condutor de $11,96 \text{ mm}^2$, logo escolheu-se uma seção do condutor de 16 mm^2 . Diante dos resultados obtidos nos dois critérios, foi determinado para este trecho que a seção nominal do condutor seria de 16 mm^2 .

Determinou-se que a seção nominal do condutor neutro e aterramento seriam iguais a seção dos condutores de fase, conforme a norma ABNT NBR 5410:2004.

4.6.6.2.2 Dimensionamento da proteção do primeiro trecho

A proteção da entrada do retificador deu-se pela realização do dimensionamento do dispositivo de proteção.

Para dimensionar o disjuntor levou-se em consideração, a capacidade de corrente na saída do aerogerador, que é igual a 43,75 A, e a capacidade de corrente no condutor para uma seção nominal de 16 mm² que é igual a 79 A.

Na inequação 33 apresentou-se o cálculo para estabelecer a corrente nominal do disjuntor.

$$I'_{CabOCA} \leq I_{disj} < I_{cam\acute{a}x} \quad (33)$$

Onde:

I'_{CabOCA} : Capacidade de corrente no condutor corrigida (A);

I_{disj} : Corrente nominal do disjuntor na entrada do retificador (A);

$I_{cam\acute{a}x}$: Capacidade de corrente no condutor (A).

Sendo assim, retornando à inequação 33, teve-se:

$$43,75 \leq I_{disj} < 79 \text{ (A)}$$

Portanto, atendendo ao critério, definiu-se utilizar um disjuntor tripolar com uma corrente nominal (I_{disj}) igual a 50 A.

4.6.6.2.3 Dimensionamento dos condutores do terceiro trecho

O dimensionamento dos condutores de corrente alternada para o terceiro trecho foram calculados com base na corrente de saída do inversor de 35 A, aplicando-se o fator de 1,25 vezes a corrente de saída do inversor.

Logo para correção do cálculo da capacidade de corrente no condutor utilizou-se a equação 30, seção 4.6.6.2.1, conforme resolução abaixo:

$$I_{CabOCA} = 35 \times 1,25 = 43,75 \text{ (A)}$$

Desse modo, considerou-se uma distância de 200 metros para a conexão do inversor ao quadro geral (CA) através de um eletroduto subterrâneo em material PVC (método de instalação D) contendo um circuito a uma temperatura no solo 20°C e temperatura no condutor de 90°C.

Em virtude disso, considerou-se os fatores de correção de temperatura (F_{ct}) e agrupamento (F_{ca}) unitário, conforme a tabela da ABNT NBR 5410:2004. Para cálculo da capacidade de corrente no condutor utilizou-se a equação 31, seção 4.6.6.2.1, conforme resolução abaixo:

$$I'_{CaboCA} = \frac{43,75}{1 \times 1} = 43,75 \text{ (A)}$$

Pelo critério da capacidade de condução de corrente e juntamente com a tabela da ABNT NBR 5410:2004, foi definido que a seção nominal do condutor seria de 6 mm².

Entretanto, pelo critério da queda de tensão adotou-se o coeficiente de resistividade do cobre de 0,01724 Ω.mm²/m, fator de potência (FP) unitário e uma queda de tensão de 3%.

Utilizou-se a equação 32, seção 4.6.6.2.1, para cálculo da seção do condutor pelo critério da queda de tensão. Portanto, teve-se:

$$S = \frac{\sqrt{3} \times 200 \times 0,01724 \times 43,75 \times 1}{0,03 \times 380} = 22,91 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Observou-se que comercialmente não encontramos uma seção de condutor de 22,91 mm², logo escolheu-se uma seção de condutor de 25 mm². Diante dos resultados obtidos nos dois critérios, determinou-se para este trecho que a seção nominal do condutor seria de 25 mm².

Determinou-se que a seção nominal dos condutores de neutro e aterramento seriam iguais a seção dos condutores de fase, conforme a norma ABNT NBR 5410:2004.

4.6.6.2.4 Dimensionamento da proteção do terceiro trecho

Para proteger a saída do inversor da rede elétrica contra surtos de corrente e tensão realizou-se o dimensionamento do dispositivo de proteção.

No dimensionado do disjuntor considerou-se a capacidade de corrente na saída do inversor igual a 43,75 A, e a capacidade de condução de corrente para uma seção nominal do condutor de 25 mm² igual a 101 A. Utilizou-se a inequação a inequação 34 para estabelecer a corrente nominal do disjuntor.

$$I'_{CaboCA} \leq I_{disj} < I_{cam\acute{a}x} \tag{34}$$

Sendo assim, retornando à inequação 34, teve-se:

$$43,75 \leq I_{disj} < 101 \text{ (A)}$$

Portanto, atendendo ao critério, definiu-se que o disjuntor tripolar teria uma corrente nominal (I_{disj}) igual a 50 A.

4.6.7 Dimensionamento dos eletrodutos

Para dimensionar os eletrodutos do sistema eólico, aplicou-se a mesma analogia empregada para o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Uma vez definido os condutores, foram dimensionados os eletrodutos dos trechos compreendidos entre o aerogerador e a rede da distribuidora de energia elétrica local.

Para o primeiro trecho referente ao circuito de corrente alternada trifásico entre (aerogerador – retificador), foram considerados 5 condutores com seção nominal de 16 mm² e área 73,86 mm². Baseado nestes dados, utilizou-se a equação 35 para determinar o diâmetro interno do eletroduto e assim definir uma seção comercial mais adequada para o eletroduto.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times \sum A_{cond}}{f \times \pi}} \quad (35)$$

Onde:

D_i : Diâmetro interno do eletroduto (mm);

$\sum A_{cond}$: Somatório das áreas externas dos condutores a serem instalados (mm²);

f : Fator de preenchimento no eletroduto de 0,40.

Sendo assim, retornando à equação 35, teve-se:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times 5 \times (73,86)}{0,40 \times \pi}} = 34,29 \text{ (mm)}$$

Portanto, determinou-se que o eletroduto possuiria diâmetro interno de 40 mm para comportar os 5 condutores, respeitando o limite da taxa de ocupação do eletroduto.

Já para o segundo trecho referente ao circuito de corrente contínua entre (retificador – inversor), foram considerados 5 condutores de seção nominal de 10 mm² e área de 44,17 mm². Desta forma aplicou-se o cálculo do dimensionamento do eletroduto de maneira equivalente ao realizado no trecho CC para determinar o diâmetro interno do eletroduto e assim definir uma seção comercial mais adequada do eletroduto, conforme resolução abaixo:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times 5 \times (44,17)}{0,40 \times \pi}} = 26,51 \text{ (mm)}$$

Desde modo, foi definido que o eletroduto teria diâmetro interno de 34 mm para comportar os 5 condutores, respeitando o limite da taxa de ocupação do eletroduto.

Por fim, realizou-se o dimensionamento do eletroduto para o terceiro e último trecho pertencente ao circuito CA trifásico entre o inversor e à rede elétrica da distribuidora. Também foram considerados 5 condutores, porém de seção nominal de 25 mm² e área de 95,03 mm². Desta forma aplicou-se o cálculo do dimensionamento do eletroduto de maneira equivalente ao realizado no trecho CC para determinar o diâmetro interno do eletroduto e assim definir uma seção comercial mais adequada do eletroduto, conforme resolução abaixo:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times 5 \times (95,03)}{0,40 \times \pi}} = 38,89 \text{ (mm)}$$

Portanto, foi definido o eletroduto com diâmetro interno de 40 mm para comportar os 5 condutores, respeitando o limite da taxa de ocupação do eletroduto.

Por fim, no Apêndice B representou-se o dimensionamento do sistema eólico na forma de diagrama unifilar.

4.6.8 Comparativo do consumo versus geração de energia elétrica

Utilizou-se como referências as equações da potência (23) e da energia (24) para estimar a energia gerada pelo sistema eólico mensalmente. Para tal, considerou-se um período temporal de 720 ou 744 horas a depender do mês vigente, aplicado a um fator de performance de 80%

na planta eólica, ou seja, o valor percentual do sistema resultante das perdas eletromecânicas. Além disso, empregou-se a velocidade média referida ao mês na altura da nacele do aerogerador juntamente com os parâmetros do mesmo.

A Tabela 9 ilustra a geração de energia elétrica do sistema eólico para o período de doze meses, a partir dos dados apontados anteriormente.

Tabela 9 - Geração de energia elétrica mensal do sistema eólico

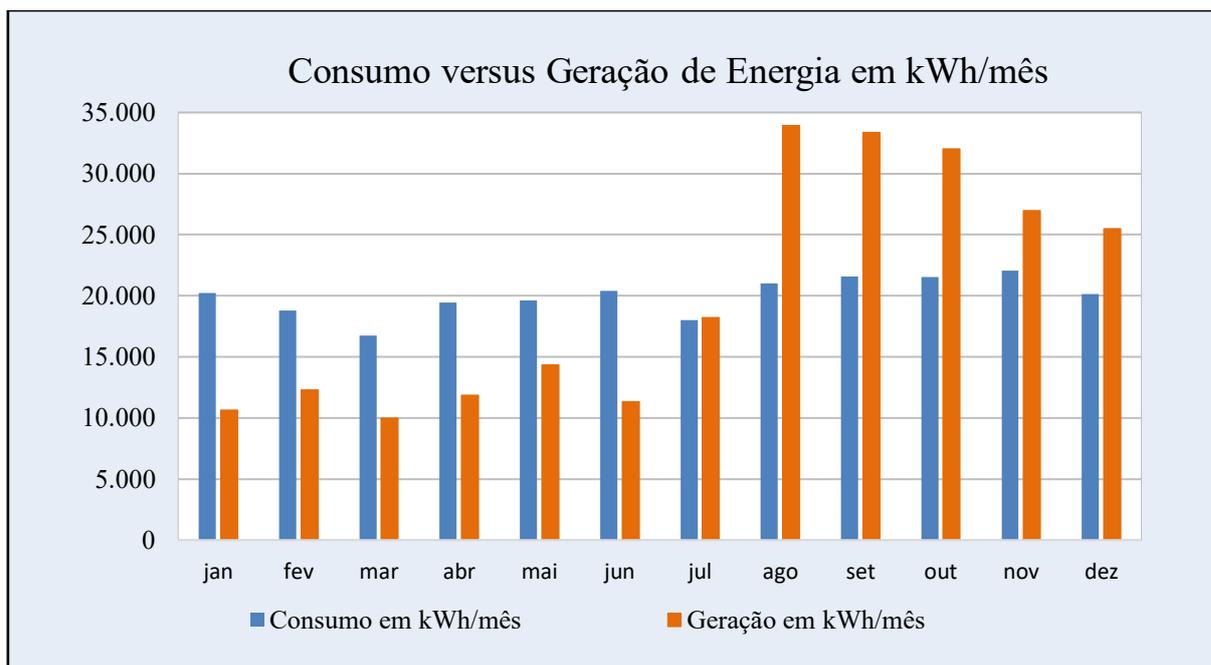
Meses	Energia Gerada (kWh)
Janeiro	10.642,18
Fevereiro	12.300,29
Março	10.011,26
Abril	11.865,60
Mai	14.332,42
Junho	11.347,20
Julho	18.225,02
Agosto	33.950,21
Setembro	33.373,44
Outubro	32.045,57
Novembro	26.979,84
Dezembro	25.498,37
Média	20.047,62
Total	240.571,39

Fonte: Autores, 2020.

Os valores apresentados na Tabela 9 revelaram que o mês de agosto superou os demais meses em termos de energia gerada, atingindo uma marca de 33.950,21 kWh/mês, ao passo, no mês de março obteve-se a pior geração de energia, chegando a 10.011,26 kWh/mês para o período analisado.

O Gráfico 10 explicita o comparativo do consumo versus geração de energia elétrica para o mesmo período analisado.

Gráfico 10 - Consumo versus geração de energia elétrica do sistema eólico



Fonte: Autores, 2020.

Observou-se no Gráfico 10, que os meses compreendidos entre julho e dezembro obtiveram geração de energia elétrica superior ao consumo da ponte Anita Garibaldi. Por outro lado, os demais meses tiveram um consumo maior que a geração de energia elétrica do sistema eólico.

Em síntese, do mesmo modo que o sistema fotovoltaico, o eólico também se apresentou favorável em termos de balanço energético, pois nos meses em que o consumo foi superior a geração de energia elétrica, opostamente esta foi compensada.

4.6.9 Proposta de conexão com à rede da distribuidora

Para conexão com a rede da distribuidora sugere-se que o conjunto de equipamentos (aerogerador, retificador e inversor) sejam instalados nas cercanias da Ponte Anita Garibaldi e do ponto de medição, contribuindo com a composição arquitetônica da ponte.

Propõe-se que o sistema eólico (dois aerogeradores) seja conectado em um único ponto de medição (cabeceira norte ou sul). Desta forma, reduzindo os gastos com cabeamento e conexões, pois o sistema gerador estaria próximo ao ponto de medição.

Por estar conectado à rede distribuidora toda energia elétrica gerada seria injetada na rede da concessionária sendo convertida em créditos para abatimento nas faturas dos dois pontos de medição, haja vista, que estão na mesma concessão e titularidade.

4.7 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA HÍBRIDO

Para elaboração do dimensionamento do sistema híbrido levou-se em conta todos os aspectos e dados do potencial solar e eólico na região, as quais foram apresentados nas seções anteriores. Além disso considerou-se para este projeto uma capacidade de geração de energia de 50% do consumo de energia média mensal de 19.965,46 kWh/mês, resultando em 9.982,73 kWh/mês para cada fonte (solar e eólico). E finalmente, realizou-se os equacionamentos para definição dos equipamentos necessários para suprimento da demanda energética da Ponte Anita Garibaldi.

4.7.1 Potência do sistema híbrido

A primeira fase para dimensionar o sistema híbrido conectado à rede, fez-se necessário o cálculo da potência global do sistema por meio do levantamento dos potenciais (solar e eólico) na localidade.

Para determinar a potência do sistema, os cálculos foram segmentados em duas etapas, sendo elas: potência do gerador fotovoltaico e do gerador eólico.

Em virtude desses equacionamentos já terem sido apresentados a partir da seção 4.5.2, aqui serão apenas demonstrados os resultados da potência gerada por estes dois sistemas.

Para o cálculo da potência gerada pelo sistema fotovoltaico, utilizou-se a equação 3, onde:

$$P_{(FV)} = \frac{9.982,73 \times 1}{140,40 \times 0,80} = 88,88 \text{ (kWp)}$$

Após o resultado da potência do sistema fotovoltaico de 88,88 kWp, utilizou-se a equação 4, seção 4.5.3 para identificação da quantidade de módulos necessários para gerar essa potência, conforme o cálculo a seguir:

$$N^{\circ}_{(mod)} = \frac{88,88}{0,38} = 234$$

Assim, para o mesmo modelo de módulo fotovoltaico apresentando na Tabela 4, seção 4.5.3, no sistema híbrido seriam necessários 234 módulos com potência de 380 Wp cada.

Portanto, com esse volume de módulos fotovoltaicos e mediante aos dados calculados anteriormente utilizou-se a equação 5, seção 4.5.4, para obtenção da energia média mensal, onde:

$$E = \frac{88,88 \times 140,40}{1} \times 0,80 = 9.983,0 \text{ (kWh/mês)}$$

Posteriormente calculou-se área necessária para a instalação dos módulos fotovoltaicos, para tal utilizou-se a equação 6, seção 4.5.5, resultando em:

$$A = (0,992 \times 1,978) \times 234 = 459,15 \text{ (m}^2\text{)}$$

Em síntese, para compor o sistema híbrido definiu-se que os 234 módulos fotovoltaicos estariam divididos nos dois inversores do modelo apresentado na Tabela 5, contendo 13 módulos conectados em série e dispostos em 12 *strings*, sendo que um destes inversores estaria utilizando a metade das *strings*.

Para adequação dos inversores, calculou-se os mesmos critérios que foram calculados nas seções 4.5.6.2 a 4.5.6.4 tais como: tensão de circuito aberto (V'_{oc}), corrente de curto-circuito (I'_{sc}) e tensão de máxima potência (V'_{mpp}) corrigido para a temperatura da célula. Estes valores estão denotados respectivamente por: 51,66 (V_{cc}), 10,25 (A) e 43,29 (V_{cc}).

Baseado nestes valores, foi possível calcular os parâmetros de tensão, corrente e tensão de máxima potência corrigidos, analisando se estão dentro dos limites suportados na entrada do inversor.

Seguindo a mesma analogia, serão apenas elucidados os valores dos parâmetros, com exceção para a corrente máxima de curto-circuito, pois tem-se um inversor com metade das *strings*. Tais valores são respectivamente: 671,58 (V_{cc}), 123 (A) e 562,77 (V_{cc}).

Para um dos inversores calculou-se a corrente máxima de curto-circuito corrigido, para tal retornou-se à equação 11, seção 4.5.6.3, onde:

$$I_{scm\acute{a}x} = 6 \times 10,25 = 61,5 \text{ (A)}$$

Logo, $61,5 < 125 \text{ (A)}$

A corrente de curto-circuito calculada para o inversor que utiliza a metade das *strings* apresentou o valor inferior a máxima corrente suportada pelo inversor. Neste critério o inversor atendeu a este parâmetro.

4.7.2 Dimensionamento dos condutores em corrente contínua (CC)

Para dimensionar os condutores (CC) de um dos inversores/módulos considerou-se os mesmos parâmetros determinados na seção 4.5.7.1, ou seja, a capacidade de condução de corrente (I_{cabocc}) igual a 12,81 (A), 25 metros de cabo entre módulos e inversor, um eletroduto sobrepor em PVC com 12 circuitos agrupados, temperatura ambiente 60°C e no condutor de 120°C. Aplicou-se os fatores de correção de temperatura (F_{ct}) de 0,71 e de agrupamento (F_{ca}) de 0,45 e obteve-se uma capacidade de corrente no condutor corrigida igual a 40,10 (A) resultando numa seção do condutor de 6 mm².

Por sua vez, para o segundo inversor foi considerado as mesmas características, porém com 6 circuitos agrupados em um eletroduto a temperatura ambiente 60°C e no condutor de 120°C. Aplicou-se os fatores de correção de temperatura (F_{ct}) de 0,71 e de agrupamento (F_{ca}) de 0,57, para o mesmo equacionamento 15 apresentado na seção 4.5.7.1, obtendo-se uma capacidade de corrente no condutor corrigida de:

$$I'_{cabocc} = \frac{12,81}{0,57 \times 0,71} = 31,65 \text{ (A)}$$

Mediante o resultado pelo critério da capacidade de condução de corrente definiu-se que a seção nominal do condutor seria de 4 mm².

Outro critério aplicado para determinar a seção nominal do condutor nas *strings* foi a queda de tensão. Neste critério utilizou-se o coeficiente de resistividade do cobre de 0,020 Ω.mm²/m e a queda de tensão igual a 1%.

Desse modo, utilizou-se a equação 16, seção 4.5.7.1 para cálculo do trecho correspondente a seção nominal do condutor pelo critério da queda de tensão.

$$S = \frac{2 \times 25 \times 0,020 \times 12,81}{0,01 \times 43,29 \times 13} = 2,28 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Nota-se que comercialmente não encontramos uma seção de condutor de 2,28 mm², logo escolheu-se uma seção do condutor igual a 2,5 mm².

Portanto, entre os dois critérios estabelecidos, foi definido para este trecho a seção nominal do condutor de 4 mm².

4.7.2.1 Dimensionamento da proteção em corrente contínua (CC)

O mesmo critério que foi realizado na seção 4.5.7.2, aplicado neste tópico para o dimensionamento da proteção em (CC).

Calculou-se 18 fusíveis distribuídos em 2 inversores, sendo um destes carregado com metade das *strings*. Utilizando o mesmo equacionamento abordado na seção 4.5.7.2, encontrou-se um fusível com corrente nominal ($I_{fusivel}$) igual a 12 A.

4.7.2.2 Dimensionamento dos condutores em corrente alternada (CA)

No dimensionamento dos condutores (CA), considerou-se os mesmos parâmetros estabelecidos na seção 4.5.7.3, ou seja, corrente de saída do inversor de 80,5 A, 10 metros de cabo entre inversor e quadro (CA), um eletroduto subterrâneo em PVC com 1 circuito agrupado, temperatura no solo 20°C e no condutor de 90°C. Aplicou-se os fatores de correção de temperatura (F_{ct}) e de agrupamento (F_{ca}) unitário e obteve-se uma capacidade de corrente no condutor igual a 80,5 (A) resultando numa seção do condutor de 25 mm².

Pelo critério da queda de tensão utilizou-se o coeficiente de resistividade do cobre de 0,01724 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, fator de potência (FP) unitário e uma queda de tensão de 3%, obtendo-se uma seção do condutor igual a 2,5 mm². Diante dos critérios definiu-se para este trecho que a seção do condutor seria de 25 mm².

Estabeleceu-se que a seção dos condutores de neutro e aterramento seriam iguais a seção dos condutores de fase, conforme a norma ABNT NBR 5410:2004.

4.7.2.3 Dimensionamento da proteção de corrente alternada (CA)

Quanto ao dimensionamento da proteção (CA) utilizou-se os mesmos parâmetros da seção 4.5.7.4, onde, para uma capacidade de condução de corrente de 80,5 A e seção do condutor de 25 mm² seria utilizado um disjuntor tripolar com corrente nominal (I_{disj}) igual a 90 A para cada entrada do inversor.

4.7.3 Dimensionamento dos eletrodutos

Seguindo a mesma analogia do cálculo utilizado na seção 4.5.8 para dimensionar o eletroduto, foi definido para um dos inversores do trecho (CC) um eletroduto com diâmetro interno de 50 mm para comportar os 24 condutores.

Enquanto, no segundo inversor, considerou-se uma seção nominal de 4 mm² com área de 22,90 mm² para 6 *strings* dispostos em 2 condutores (positivo e negativo), totalizando em 12 condutores. Baseado nesses parâmetros foi definido o eletroduto conforme o cálculo a seguir:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times 12 \times (22,90)}{0,40 \times \pi}} = 29,58 \text{ (mm)}$$

Portanto, adotou-se um eletroduto com diâmetro interno de 34 mm para comportar os 12 condutores, respeitando o limite da taxa de ocupação de 40% conforme a norma NBR 5410:2004.

De acordo com os cálculos apresentados na seção 4.5.8, definiu-se para o trecho (CA) um eletroduto com diâmetro interno de 40 mm para comportar 5 condutores.

Por fim, conforme o equacionamento mostrado na seção 4.6.3, calculou-se a potência do sistema eólico gerada por uma turbina, conforme resolução abaixo:

$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 136,84 \times (7,79)^3 \times 0,42 \times 0,96 = 15,98 \text{ (kW)}$$

Portanto, a partir da potência útil da turbina eólica calculada anteriormente multiplicada pela variação temporal (730 horas) e utilizando a equação 24, seção 4.6.4, teve-se a energia elétrica média mensal gerada, conforme resolução abaixo:

$$E = 15,98 \times 730 = 11.665,4 \text{ (kWh/mês)}$$

Finalmente, encontrou-se a geração de energia elétrica média mensal do sistema híbrido, efetuando o somatório da energia elétrica média mensal das fontes (solar e eólica), as quais foram calculadas nas seções 4.7.1 e 4.7.3 respectivamente.

$$E = 9.983,0 + 11.665,4 = 21.648,40 \text{ (kWh/mês)}$$

4.7.4 Dimensionamento dos condutores e proteções

Quanto ao dimensionamento dos condutores e proteções dos trechos que interligam a turbina eólica à rede elétrica da distribuidora os resultados são os mesmos que foram aplicados na seção 4.6.6, logo os cálculos e análise não serão explanados novamente.

Por fim, no Apêndice C representou-se o dimensionamento do sistema híbrido na forma de diagrama unifilar.

4.7.5 Comparativo do consumo versus geração de energia elétrica

Neste tópico aplicou-se o somatório da energia elétrica média das fontes (solar e eólica) mensalmente, resultando numa energia elétrica média estimada para o sistema híbrido. Neste propósito, considerou-se um período temporal de 720 ou 744 horas a depender do mês vigente, o fator de performance adotado foi de 80% da planta eólica e a velocidade média na altura da nacelle.

A Tabela 10 ilustra a geração de energia elétrica do sistema híbrido para o período de doze meses, a partir dos dados apontados anteriormente.

Tabela 10 - Geração de energia elétrica mensal do sistema híbrido

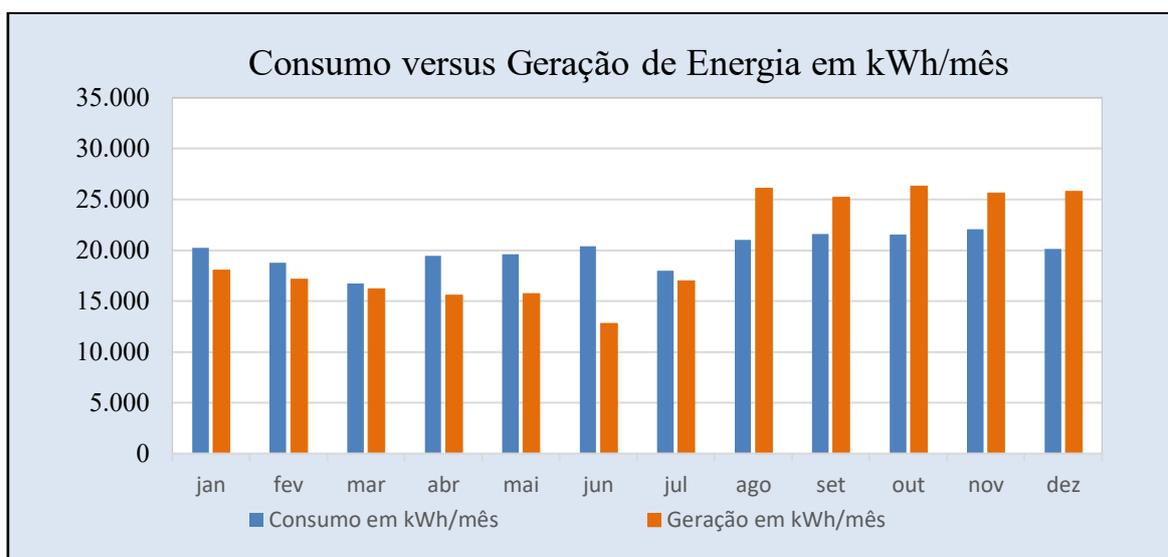
Meses	Energia Gerada (kWh)
Janeiro	18.017,42
Fevereiro	17.159,88
Março	16.225,13
Abril	15.574,50
Mai	15.718,60
Junho	12.798,22
Julho	16.981,59
Agosto	26.122,63
Setembro	25.219,20
Outubro	26.316,51
Novembro	25.648,70
Dezembro	25.798,19
Média	20.131,71
Total	241.580,57

Fonte: Autores, 2020.

Os valores apresentados na Tabela 10 apontaram que o mês de outubro superou os demais meses em termos de energia gerada, atingindo um valor de 26.316,51 kWh/mês, ao passo, no mês de junho obteve-se a pior geração de energia, chegando a 12.798,22 kWh/mês para o período analisado.

O Gráfico 11 mostra o comparativo do consumo versus geração de energia elétrica para o mesmo período analisado.

Gráfico 11 - Consumo versus geração de energia elétrica do sistema híbrido



Fonte: Autores, 2020.

No Gráfico 11, verificou-se que os meses compreendidos entre agosto e dezembro obtiveram geração de energia elétrica superior ao consumo da ponte Anita Garibaldi. Por outro lado, os demais meses tiveram um consumo maior que a geração de energia elétrica do sistema híbrido.

Em sùmula, do mesmo modo que os dois sistemas de geração apresentados anteriormente (fotovoltaico e eólico), o híbrido também se apresentou favorável em termos de balanço energético, pois nos meses em que o consumo foi superior a geração de energia elétrica, opostamente esta foi compensada.

4.7.6 Proposta de conexão com à rede da distribuidora

Para conexão com a rede da distribuidora propõe-se a junção dos equipamentos do sistema eólico (aerogerador, retificador e inversor) com o sistema fotovoltaico (módulos e

inversores) de modo que estes sejam instalados nas imediações da Ponte Anita Garibaldi e do ponto de medição.

O sistema híbrido proposto também deve ser conectado em um único ponto de medição (cabeceira norte ou sul), com isso, reduzindo-se os gastos com cabeamento e conexões, pois o sistema gerador estaria próximo ao ponto de medição. Por estar conectado à rede distribuidora toda energia elétrica gerada seria injetada na rede da concessionária sendo convertida em créditos para abatimento nas faturas dos dois pontos de medição, haja vista, que estão na mesma concessão e titularidade.

4.8 SÍNTESE DO DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO

Neste tópico foi realizada uma comparação entre os principais equipamentos utilizados nos três sistemas de geração estudados (fotovoltaico, eólico e híbrido), conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Síntese técnica dos sistemas de geração de energia elétrica

Descrição	Fotovoltaico	Eólico	Híbrido
Potência instalada	177,76 kWp	31,96 kW	88,88 kWp + 15,98 kW
Módulos Fotovoltaicos	468 un - 380 W	-	234 un – 380 W
Aerogeradores	-	2 un - 20 kW	1 un – 20 kW
Inversores de frequência	3 un - 50 kW	2 un - 20 kW	2 un - 50 kW + 1 un - 20 kW
Retificadores	-	2 un	1 un
Energia elétrica gerada	20.215,82 kWh	20.047,62 kWh	20.131,71 kWh
Proposta de instalação	Na estrutura da ponte	Nas cercanias da ponte	Combinação do fotovoltaico + eólico
Proposta de conexão	Em uma das unidades de medição (cabeceira Norte ou cabeceira Sul)		

Fonte: Autores, 2020.

5 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Os equipamentos que foram definidos para este projeto (sistema fotovoltaico, eólico e híbrido) conectados à rede, bem como os seus custos de implantação para suprir a demanda energética da ponte Anita Garibaldi encontram-se dispostos, respectivamente, nas Tabelas 12, 13 e 14.

No sistema fotovoltaico, foi proposta a instalação dos painéis solares na ponte com ótima irradiação ao longo do dia, sem interferência geográfica ou edificações.

O sistema fotovoltaico, num primeiro momento, mostrou-se financeiramente menos oneroso. Para suprir o consumo de energia da ponte, seriam necessários 468 painéis. Estes painéis seriam integrados a rede da distribuidora (*on grid*) produzindo energia ao longo do dia que, via contabilização de energia produzida, seria revertida na iluminação noturna.

O custo total de aquisição dos equipamentos e instalação (sem a compra/aluguel do terreno) foi estimado em aproximadamente R\$ 536 mil reais (valor base outubro de 2020). Os dados do sistema fotovoltaico são apresentados na Tabela 12, a seguir.

Tabela 12 - Custo de implantação do sistema fotovoltaico

Descrição dos equipamentos	Quantidades
Módulo Fotovoltaico 380W EMSZ - 380P DG	468 un
Inversor On Grid trifásico 50 kW MAX	3 un
Estrutura de fixação - solo (mesa 20 mod-retrato)	23 cj
Caixa de proteção CA (Disjuntor Trip C 90 A + DPS)	3 un
Conector - cabo MC4 par FM/MC 1 via 1,5 kV 45A	36 un
Fusível	36 un
Eletroduto 2" PVC PT Master liso 3 m	27 un
Eletroduto 1.1/2" PVC PT Master liso 3 m	12 un
Cabo solar Preto 1,8 kV ECS 6 mm ²	900 m
Cabo solar vermelho 1,8 kV ECS 6 mm ²	900 m
Cabo solar verde/amarelo 1,8 kV ECS 6 mm ²	900 m
Cabo sintemax flex 25 mm ²	150 m
Subtotal Equipamentos, Projeto e instalação	R\$ 536.272,39

Fonte: Autores, 2020.

Por sua vez, também foram orçados os custos de instalação de dois aerogeradores de 20 kW cada. São aerogeradores de médio porte, cujo diâmetro de giro nas pás é de 12 metros. Sua instalação requer mão de obra mais especializada e um local mais específico, pois dependerá de corrente de ventos com regularidade e potência suficiente para produzir energia.

Assim, levantou-se a possibilidade destes aerogeradores serem instalados nas cercanias da ponte Anita Garibaldi, em estruturas tubulares de 100 metros de altura. O custo total de aquisição dos equipamentos e instalação (sem a compra/aluguel do terreno) foi estimado em aproximadamente R\$ 1.380 mil reais (valor base outubro de 2020). Os dados do sistema de turbinas eólicas são apresentados na Tabela 13, a seguir.

Tabela 13 - Custo de implantação do sistema eólico

Descrição dos equipamentos	Quantidades
Aerogerador H13.2 - 20 kW	2 un
Retificador	2 un
Inversor On Grid trifásico 20 kW	2 un
Torre 100 m	2 un
Eletroduto 1.1/4" PVC PT Master liso 3 m	2 un
Eletroduto 1.1/2" PVC PT Master liso 3 m	80 un
Eletroduto 1.1/2" PVC PT Master liso 3 m	134 un
Fusível 50 A	2 un
Disjuntor Trip C 50 A	4 un
Cabo eólico Termofixo 0,6/1 kV 10 mm ²	20 m
Cabo eólico WK 101H 0,6/1 kV 16 mm ²	1200 m
Cabo sintemax flex 25 mm ²	2000 m
Subtotal Equipamentos, Projeto e instalação	R\$ 1.382.312,16

Fonte: Autores, 2020.

No sistema híbrido, foram utilizados equipamentos de energia solar e eólica, ambos localizados nas mesmas intermediações e interligados a rede pública (*on grid*). O objetivo é que a complementariedade das fontes renováveis forneça energia suficiente para suprir a capacidade instalada da ponte Anita Garibaldi.

O custo total de aquisição dos equipamentos e instalação no sistema híbrido (sem a compra/aluguel do terreno) foi estimado em aproximadamente R\$ 961 mil reais (valor base outubro de 2020). Os dados do sistema híbrido são apresentados na Tabela 14, a seguir.

Tabela 14 - Custo de implantação do sistema híbrido

Descrição dos equipamentos	Quantidades
Aerogerador H13.2 - 20 kW	1 un
Retificador	1 un
Inversor On Grid trifásico 20 kW	1 un
Torre 100 m	1 un
Eletroduto 1.1/4" PVC PT Master liso 3 m	1 un
Eletroduto 1.1/2" PVC PT Master liso 3 m	40 un
Eletroduto 1.1/2" PVC PT Master liso 3 m	67 un
Fusível 50 A	1 un
Disjuntor Trip C 50 A	2 un
Cabo eólico Termofixo 0,6/1 kV 10 mm ²	10 m
Cabo eólico WK 101H 0,6/1 kV 16 mm ²	600 m
Cabo sintemax flex 25 mm ²	1000 m
Módulo Fotovoltaico 380W EMSZ - 380P DG	234 un
Inversor On Grid trifásico 50 kW MAX	2 un
Estrutura de fixação - solo (mesa 20 mod-retrato)	12 cj
Caixa de proteção CA (Disjuntor Trip C 90 A + DPS)	2 un
Conector - cabo MC4 par FM/MC 1 via 1,5 kV 45A	18 un
Eletroduto 2" PVC PT Master liso 3 m	9 un
Eletroduto 1.1/4" PVC PT Master liso 3 m	9 un
Eletroduto 1.1/2" PVC PT Master liso 3 m	8 un
Fusível	18 un
Cabo solar Preto 1,8 kV ECS 6 mm ²	300 m
Cabo solar vermelho 1,8 kV ECS 6 mm ²	300 m
Cabo solar verde/amarelo 1,8 kV ECS 6 mm ²	300 m
Cabo solar Preto 1,8 kV ECS 4 mm ²	150 m
Cabo solar vermelho 1,8 kV ECS 4 mm ²	150 m
Cabo solar verde/amarelo 1,8 kV ECS 4 mm ²	150 m
Cabo sintemax flex 25 mm ²	100 m
Subtotal Equipamentos, Projeto e instalação	R\$ 961.157,49

Fonte: Autores, 2020.

Para fins de estudo de viabilidade econômica, foram atribuídos a todos os projetos um valor de manutenção de 12% do valor total de instalação dos equipamentos. Entende-se que em razão da proximidade com o mar, os desgastes das estruturas das placas solares como dos aerogeradores sejam mais acelerados e, por esta razão, não podem ser desprezados no presente estudo. Também é importante incluir uma taxa de depreciação, na faixa de 5% ao ano, o que resultará na troca completa dos componentes ou dos equipamentos (*overall*) em 20 anos.

Estes valores de manutenção e depreciação seguem uma média mundial para instalações offshore ou próximas ao mar, cuja influência do clima afetam diretamente a durabilidade dos componentes.

Os valores de manutenção e depreciação dos sistemas de geração de energia encontram-se dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 - Manutenção e Depreciação (anual e mensal)

Descrição dos sistemas de geração	Manutenção (12%)	Depreciação (5%)
Fotovoltaico anual	R\$ 64.352,68	R\$ 26.813,62
Fotovoltaico mensal	R\$ 5.362,68	R\$ 2.234,47
Eólico anual	R\$ 165.877,46	R\$ 69.115,61
Eólico mensal	R\$ 13.823,12	R\$ 5.759,63
Híbrido anual	R\$ 115.338,90	R\$ 48.057,87
Híbrido mensal	R\$ 9.611,57	R\$ 4.004,82

Fonte: Autores, 2020.

Outro ponto importante a ser explicitado é que a energia gerada em excesso não poderá ser vendida para a concessionária local (Celesc), devendo apenas ser considerado para fins de análise econômica o valor que efetivamente deixará de ser cobrado pelo custeio de energia da Ponta Anita Garibaldi.

Assim, é importante utilizar duas formulações universalmente conhecidas e utilizadas para verificar o retorno de um investimento, são elas a TIR (taxa interna de retorno) e a Payback. Esta última será realizada por primeiro, pois permite selecionar os projetos de acordo com a realidade econômica que os cerca, ensejando uma seleção prévia dos sistemas de geração de energia.

5.1 ANÁLISE ECONÔMICA PRIMÁRIA - MÉTODO PAYBACK

Como já foi apresentado anteriormente, o Payback é uma terminologia norte-americana e representa a formulação mais simples e eficaz de verificar o retorno de um investimento. Payback significa, numa tradução de forma literal, retorno do pagamento. Ele indica, em regra, o tempo necessário para que a soma de riquezas geradas se iguale ao valor inicial de investimento. É bastante eficiente e dá uma visão bastante consistente da viabilidade do negócio/investimento.

Neste tipo de cálculo de retorno do investimento em equipamentos de geração de energia, é importante introduzir a manutenção e a depreciação dos equipamentos (que efetivamente serão realizadas). Agindo desta forma (introduzindo variáveis) é trabalhado com o conceito de Payback descontado, a fim de melhorar e se ajustar ao projeto. Assim, descreveu-se a formulação do Payback descontado na equação 36.

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Fluxo de caixa descontado}} \quad (36)$$

Onde, **payback** representa o número de meses; **investimento inicial** é o valor do projeto; e, **fluxo de caixa descontado** é o valor de retorno mensal descontados a manutenção e a depreciação, lembrando que o fluxo de caixa está limitado ao valor da cobrança mensal de energia.

5.1.1 Análise payback descontado (sistema fotovoltaico)

Para cálculo da análise de payback descontado do sistema fotovoltaico utilizou-se os dados descritos na Tabela 16.

Tabela 16 - Variáveis utilizadas na análise payback descontado - Fotovoltaico

Variáveis utilizadas	
Custo total de instalação do sistema fotovoltaico	R\$ 536.272,39
Fatura mensal CELESC (projetada para 2020)	R\$ 16.490,86
Custo mensal de manutenção sistema fotovoltaico	R\$ 5.362,68
Custo mensal de depreciação sistema fotovoltaico	R\$ 2.234,47

Fonte: Autores, 2020.

Aplicando-se a equação 36 encontrou-se:

$$Payback = \frac{536.272,39}{(16.490,86 - 5.362,68 - 2.234,47)} = 60,3$$

Portando, o payback descontado encontrado para o sistema fotovoltaico foi de 60,3 meses.

5.1.2 Análise payback descontado (sistema eólico)

Para cálculo da análise de payback descontado do sistema eólico utilizou-se os dados descritos na Tabela 17.

Tabela 17 - Variáveis utilizadas na análise payback descontado - Eólico

Variáveis utilizadas	
Custo total de instalação do sistema eólico	R\$ 1.382.312,16
Fatura mensal CELESC (projetada para 2020)	R\$ 16.490,86
Custo mensal de manutenção sistema eólico	R\$ 13.823,12
Custo mensal de depreciação sistema eólico	R\$ 5.759,61

Fonte: Autores, 2020.

Aplicando-se a equação 36 encontrou-se:

$$Payback = \frac{1.382.312,16}{(16.490,86 - 13.823,12 - 5.759,61)} = -447,1$$

Portando, o payback descontado encontrado para o sistema eólico foi indefinido.

Para o sistema eólico deu fluxo de caixa negativo, ou seja, economicamente é um sistema inviável, não se remunera até porque o fluxo de caixa é limitado ao valor da conta de energia média mensal projetado para 2020.

5.1.3 Análise payback descontado (sistema híbrido)

Para cálculo da análise de payback descontado do sistema híbrido utilizou-se os dados descritos na Tabela 18.

Tabela 18 - Variáveis utilizadas na análise payback descontado - Híbrido

Variáveis utilizadas	
Custo total de instalação do sistema eólico	R\$ 961.157,98
Fatura mensal CELESC (projetada para 2020)	R\$ 16.490,86
Custo mensal de manutenção sistema híbrido	R\$ 9.611,57
Custo mensal de depreciação sistema híbrido	R\$ 4.004,82

Fonte: Autores, 2020.

Aplicando-se a equação 36 encontrou-se:

$$Payback = \frac{961.157,98}{(16.490,86 - 9.611,57 - 4.004,82)} = 334,4$$

Portando, o payback descontado encontrado para o sistema híbrido foi de 334,4 meses.

5.1.4 Resultados

Assim, após realizar a análise com o sistema Payback descontado, ficou evidenciado que somente os sistemas de geração de energia fotovoltaico e híbrido são economicamente viáveis. Entretanto, apenas o sistema fotovoltaico consegue se remunerar antes do período estimado de troca total de equipamentos (*overall*), com a depreciação estimada em 20 anos, podendo proporcionar rentabilidade ao capital investido.

Neste sentido, por se apresentar o sistema de geração de energia mais interessante do ponto de vista do projeto, as demais simulações econômicas tomarão como base apenas o sistema fotovoltaico.

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA SECUNDÁRIA – SISTEMA FOTOVOLTAICO

5.2.1 Valor presente líquido (VPL)

Esse método é utilizado em investimentos financeiros e de engenharia para comparar o valor atual de um investimento e sua rentabilidade. Utilizou-se a equação 37 para cálculo da VPL.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} - \text{Investimento Inicial} \quad (37)$$

Onde:

FC: Fluxo de caixa;

TMA: Taxa mínima de atratividade;

j: Período de cada fluxo de caixa.

Assim, para o estudo em questão, temos como fluxo de caixa anual a fatura de energia projetada multiplicada por 12 meses, ou seja, R\$ 16.490,86 × 12 = 197.890,32 ao ano. A taxa mínima de atratividade (TMA) é o equivalente a manter esse valor parado na poupança, ou seja, 6% ao ano. Como investimento inicial temos o custo total da instalação do sistema fotovoltaico, ou seja, R\$ 536.272,39. Para fins de cálculo, o investimento inicial é negativo. Como período de verificação escolheu-se 5 anos. Desta forma pode-se verificar na Tabela 19 o saldo do investimento ao longo dos 5 anos.

Tabela 19 - Valor Presente Líquido (VPL)

Período	Ano	Equação VPL	Fluxo atualizado	Saldo de Investimento
0	1	-	-	- 536.272,39
1	2	197.890,32 / 1,06	197.890,32	- 338.382,07
2	3	197.890,32 / (1,06) ²	186.688,98	- 151.693,09
3	4	197.890,32 / (1,06) ³	176.121,68	+ 24.428,59
4	5	197.890,32 / (1,06) ⁴	166.152,53	+ 190.581,12

Fonte: Autores, 2020.

De acordo com a equação da VPL, o sistema fotovoltaico é economicamente viável podendo vir a surpreender e se pagar ao final dos primeiros 4 anos desde a sua entrada em operação. Portanto é um investimento plenamente viável e que ultrapassará o rendimento deste mesmo valor depositado em uma poupança, por exemplo. Sabemos que o VPL é apenas um cálculo financeiro, que não leva em conta a depreciação e demais custos de manutenção.

Extrapolando para o modelo de concessão de 30 anos, a empresa investirá este capital inicial de R\$ 536.272,39 e, assim que o sistema começar a gerar energia, em aproximadamente quatro anos e meio ou cinco anos ele já se pagou e estará gerando rendimentos para a concessionária para os demais 25 anos de atividade da concessionária na rodovia.

5.3 SÍNTESE DA ANÁLISE ECONÔMICA DOS SISTEMAS DE GERAÇÃO

Neste tópico realizou-se a comparação econômica dos três sistemas de geração estudados utilizando o método do Payback, conforme Tabela 20. Somente o sistema fotovoltaico demonstrou-se viável neste cálculo, neste sentido o cálculo utilizando o método do VPL foi realizado unicamente para o sistema de geração fotovoltaico, conforme Tabela 21.

Tabela 20 - Síntese comparativa dos sistemas de geração de energia elétrica - Payback

Variáveis	Fotovoltaico	Eólico	Híbrido
Custo total de instalação do sistema	R\$ 536.272,39	R\$ 1.382.312,16	R\$ 961.157,98
Fatura mensal CELESC (projetada para 2020)	R\$ 16.490,86	R\$ 16.490,86	R\$ 16.490,86
Custo mensal de manutenção sistema	R\$ 5.362,68	R\$ 13.823,12	R\$ 9.611,57
Custo mensal de depreciação sistema	R\$ 2.234,47	R\$ 5.759,61	R\$ 4.004,82
Payback	60,3 meses	-447,1 meses	334,4 meses

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 21 - Síntese econômica do sistema de geração fotovoltaico - VPL

Ano	1	2	3	4
Fluxo atualizado	-	197.890,32	186.688,98	176.121,68
VPL	-536.272,39	-338.382,07	-151.693,09	+24.428,59

Fonte: Autores, 2020.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou apresentar uma solução economicamente viável para o fornecimento de energia elétrica para a ponte Anita Garibaldi, em Laguna/SC. Buscou-se, ainda, conhecer a história de Laguna, das suas pontes e sua importância geográfica para o comércio e para o desenvolvimento da região. Por fim, a pesquisa procurou conhecer os empecilhos que dificultam o fornecimento de energia para a Ponte Anita Garibaldi e quais tecnologias de geração energética estão disponíveis no mercado, bem como seus custos de instalação e manutenção.

Como resultado da pesquisa, verificou-se que dentre os três sistemas de geração de energia analisados, o fotovoltaico revelou maior homogeneidade ao longo do ano, por outro lado, o sistema eólico apresentou maior variação de geração ao longo dos meses.

Analisando a energia média gerada no ano, o sistema híbrido demonstrou o resultado mais ajustado em relação a energia média consumida, equilibrando o uso dos dois recursos.

No estudo do sistema híbrido necessitou-se operar com 50% da capacidade de geração de energia para cada método (fotovoltaico e eólico), uma vez que a geração eólica estava limitada a dois aerogeradores e o mínimo a se trabalhar seria 1 aerogerador (50%). Caso tivéssemos optado em utilizar aerogeradores de porte menores, seria possível calcular percentuais diferentes com o objetivo de maximizar a geração do sistema ao longo dos meses, tornando-se mais próximo do consumo da ponte Anita Garibaldi. Com isso, observou-se que o porte dos equipamentos escolhidos pode interferir diretamente no layout do projeto e possibilidades de alterações.

Posteriormente elaborou-se um estudo de viabilidade econômica tendo como base os valores orçados para os três modelos de geração de energia renováveis (eólico, fotovoltaico e híbrido). Por ser o mais adequado para projetos de engenharia/implantação de atividades o PAYBACK demonstrou que apenas o sistema fotovoltaico se apresenta economicamente viável para o projeto. De acordo com esta análise econômica, o retorno financeiro do investimento acontecerá após decorridos 60,3 meses, ou seja, pouco mais de 5 anos, já inclusos os custos mensais de manutenção e a depreciação estimada. Para confirmar a tese da viabilidade, a análise do VPL também se mostrou mais animadora, com um retorno estimado no quarto ano desde a instalação e entrada em operação. Entretanto, esta análise apenas faz a atualização dos fluxos de caixa, não levando em conta depreciação e manutenção, por exemplo.

Os demais sistemas de geração de energia aqui estudados não se apresentaram economicamente viáveis. O custo de instalação e manutenção do sistema eólico, por exemplo,

ainda é o maior obstáculo. Para sua instalação requer mão-de-obra extremamente especializada ficando restrito para aqueles grandes projetos em áreas propícias, com grande incidência de ventos ao longo dos meses ou para áreas deficitárias e isoladas, onde o custo de transmissão seja muito elevado. O sistema híbrido, por sua vez, exigiria um custo inicial igualmente elevado, multiplicando o tempo de retorno do investimento por sete quando comparado ao fotovoltaico, inviabilizando sua implantação.

Assim, este estudo objetivou apresentar uma solução energética economicamente viável para a questão da Ponte Anita Garibaldi. O sistema fotovoltaico, de acordo com os resultados deste estudo, se apresenta como a solução do momento. No início deste ano de 2020 o trecho que compreende a Ponte Anita Garibaldi foi concedido, por concorrência pública, para a iniciativa privada. Neste sentido, a concessionária ganhadora do certame vai assumir a rodovia por 30 anos. Este investimento em geração de energia fotovoltaica, caso seja implantado pela concessionária da rodovia, renderá aproximadamente 25 anos de resultados econômicos favoráveis.

Assim, ao final deste estudo, acredita-se que os objetivos iniciais da pesquisa foram todos alcançados. Esta área da engenharia elétrica é muito dinâmica e proporciona novas e melhores soluções a cada ano, quer seja como novas tecnologias, quer seja com novos equipamentos ou materiais. Por mais que a solução energética da Ponte Anita Garibaldi venha a ser resolvida em breve, a geração de energia limpa/renovável sempre será um importante tema de debates na academia e na sociedade, ficando aqui a sugestão para novos estudos de viabilidade técnica e econômica utilizando outros métodos de geração de energia renováveis, e comparando-os com os métodos apresentados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf. Acesso em: 4 abr. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 24 maio 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES - ANTT. **Edital de Concessão nº 02/2019**. 2019. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/rodovias/BR101SC/EditalBR101SC.html>. Acesso em: 21 abr. 2020.
- ANDRADE, Maria Margarida de. **Introdução à Metodologia do Trabalho Científico**. 10. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão: Electrical installations of buildings – Low voltage. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16612**: Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores: Requisito de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16690**: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos: Requisitos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2008.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Energia Eólica no Brasil e Mundo**. 2014. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256600/Folder+Energia+Eolica.pdf/b1a3e78c-7920-4ae5-b6e8-7ba1798c5961>. Acesso em: 9 abr. 2020.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. 2019. Disponível em: http://www.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=a18d104e-4a3f-31a8-f2cf-382e654dbd20&groupId=36189. Acesso em: 9 abr. 2020.
- BRASIL. Supremo Tribunal Federal – STF. **Decisão interlocutória nos autos do Recurso Extraordinário nº 1.043.921**. Gabinete do Exmo Sr Ministro Gilmar Mendes. Superior Tribunal Federal. 2020. Disponível em: <http://portal.stf.jus.br/processos/detalhe.asp?incidente=5178072>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- BRASIL. Tribunal Regional Federal da Quarta Região – TRF4. **Sentença em Ação Ordinária nº 5002370.70.2015.4.04.7216**. Primeira Vara Federal de Laguna. 2015. Disponível em: https://eproc.jfsc.jus.br/eprocV2/controladorphp?acao=acessar_documento_publico&doc=72145044192608391024_0000000052&evento=821&key=702998611eb7da

fda2d33def6d23d3b63905618a031ed2d8f0ef67b0fb9679a1&hash=77b204d39ef0101c76dd8161946c4732. Acesso em: 20 abr.2020.

CAGNINI, L. **Conta de luz da Ponte Anita Garibaldi ultrapassa R\$ 540 mil.** NSC Total, jan. 2019. Disponível em: <https://www.nscotal.com.br/colunistas/lariane-cagnini/conta-de-luz-da-ponte-anita-garibaldi-ultrapassa-r-540-mil>. Acesso em: 1 maio 2020.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA S.A. – CELESC. **Manual de Procedimentos.** Requisitos para a conexão de micro ou minigeradores de energia ao sistema elétrico da Celesc Distribuição. 2017. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/conexao-centrais-geradoras/conexao-micro-mini-geradores.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO – CRESESB. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 30 out. 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Anteprojeto de engenharia:** projeto de iluminação viária e decorativa da ponte sobre o Canal Laranjeiras. 2014. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/anexo/projetos/projetos_edital0255_14-16_0.pdf. Acesso em: 10 abr. 2020.

DIÁRIO CATARINENSE. **Ponte Anita Garibaldi:** o elo do sul. 2015. Disponível em: http://www.clicrbs.com.br/sites/swf/DC_ponte_laguna/index.html. Acesso em: 19 mar. 2020.

DUTRA, R. **Energia Eólica:** princípios e tecnologias. Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPTEL. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2010.

ELETROVENTO. **Modelo ELV-H13.2 – 20 Kw.** Disponível em: <https://www.eletovento.com.br/site/produto/modelo-elv-h13-2-20-kw/12/>. Acesso em: 30 out. 2020.

EMAP SOLAR. **Tipos de Painel Solar:** leia antes de escolher o melhor para você. 2019. Disponível em: <https://emapsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-leia-antes-de-escolher-o-melhor-para-voce>. Acesso em: 24 maio 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2018.** Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Matriz Energética e Elétrica 2017.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 29 mar. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2019.** Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-52/topico-89/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202019.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2020.

ENGEPLUS. **Trânsito sobre aterro de Cabeçadas e a ponte Henrique Lage em 2013.** 2013. Disponível em: <http://www.engeplus.com.br/cache/noticia/seguranca/2013/transito-lento-e-com-filas-em-laguna/>. Acesso em: 20 abr. 2020.

FAGLIONI. **Dimensionamento.** Disponível em: <http://www.faglioniipaineis.com/resources/pirelli.pdf>. Acesso em: 27 set. 2020.

FIGUEIREDO, Jurandir S. **Ponte de Laguna - Ponte Anita Garibaldi, a ser construída sobre o Canal das Laranjeiras - Cabeçada - Laguna - SC.** 2011. Disponível em: <http://www.pontedelaguna.com.br/site/noticias/41-ponte-de-laguna-ponte-anita-garibaldia-ser-construida-sobre-o-canal-das-laranjeiras-cabecuda-laguna-sc.html>. Acesso em: 14 mar. 2020.

FLORIDA SOLAR ENERGY CENTER – FSEC. **Solar Electricity.** 2020. Disponível em: http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/index.htm. Acesso em: 23 maio 2020.

FRECCIA, Marina Locks. **Estudo de viabilidade técnica e econômica de alternativas de geração para suprir o fornecimento de energia elétrica da ponte Anita Garibaldi, em Laguna/SC.** 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade do Sul de Santa Catarina. Disponível em: <https://www.riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/6062/TCC%20MARINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 set. 2020.

GENERAL CABLE. **Cabos para instalações de energia solar fotovoltaica.** Disponível em: <https://www.generalcable.com/assets/documents/LATAM%20Documents/Brazil%20Site/Catálogo-ExZHellent-Solar.pdf?ext=.pdf>. Acesso em: 27 set. 2020.

GIESBRECHT, R. M. **Estações ferroviárias do Brasil.** 2019. Disponível em: <http://www.estacoesferroviarias.com.br/eftc/cabecuda.htm>. Acesso em: 20 abr. 2020.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOOGLE MAPS. Localização geográfica da ponte Anita Garibaldi. 2020. Disponível em: <https://www.google.com/maps/place/Pte.+de+Laguna,+Laguna+-+SC,+88790-000/@-28.4340879,48.846133,2551m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x95214fcb49179e99:0x3e176b835453e67f!8m2!3d-28.4357337!4d-48.8411438?hl=pt-BR%3E>. Acesso em: 21 abr. 2020.

GREENPRO. **Energia Fotovoltaica: Manual sobre tecnologias, projecto e instalação.** 2004. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

GUIA GEOGRÁFICO. 2020. Disponível em: <https://www.brasil-turismo.com/rio-grande-sul/historia/mapa-sidney-hall.htm>. Acesso em: 12 abr. 2020.

HELUKABEL. **Cables & Accessories for Wind Turbines: 2013 / 2014.** Disponível em: <http://www.eurocabos.com.br/files/cabos/helukabel/energia-solar-e-especiais/helukabel-windpower.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

HELUKABEL. **TOPSERV® 110 / 120 / Feedback-Cable**. Disponível em: <http://www.eurocabos.com.br/files/cabos/helukabel/cabos-servo-encoder/d-009-topserv-110-120-feedback-cable.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

HUMMER. **H13.2-20KW**. Disponível em: <http://www.chinahummer.cn/index.php/index/content/167>. Acesso em: 30 out. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - INEE. **O que é geração distribuída**. 2020. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 24 maio 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Dados históricos anuais**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 27 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE/LABREN, 2017. Disponível em: http://labren.cst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 3 maio 2020.

INTELBRAS. **Cabo solar 1,8 kV DC 6mm**. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/cabo-solar-18-kv-dc-6-mm-cabo-solar#beneficios>. Acesso em: 27 set. 2020.

INTELBRAS. **Inversor solar On Grid trifásico 50,0 kW**. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/inversor-solar-on-grid-trifasico-500-kw-egt-50000-max#beneficios>. Acesso em: 27 set. 2020.

INTELBRAS. **Módulo Fotovoltaico Monocristalino 72 células 380W**. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/modulo-fotovoltaico-monocristalino-72-celulas-380w-emsz-380m-dg#beneficios>. Acesso em: 27 set. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Tracking Power: Solar PV**. 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-power-2019/solar-pv>. Acesso em: 21 maio 2020.

MALHOTRA, N. K. **Introdução a Pesquisa de Marketing: uma orientação aplicada**. 6. ed. São Paulo: Bookman, 2011.

MAPASAPP. **Mapa de Laguna – SC**. 2020. Disponível em: <https://mapasapp.com/brasil/santa-catarina/laguna-sc>. Acesso em: 21 abr. 2020.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

MARQUES, F. C. **Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos**. p.33. Instituto de Física Gleb Wathagin – IFGW/Unicamp. International Energy Initiative - IEI: 2014.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.

MATHEUS, Felipe. **Sistema de Tarifação Net Metering**. 2015. Disponível em: <https://fomatheus.wordpress.com/2015/11/05/sistema-de-tarifacao-net-metering/>. Acesso em: 24 maio 2020.

MENDES, A. Marina, PEREIRA, L. Fabiana. **O uso de energia solar fotovoltaica como alternativa à redução da fatura de energia elétrica em blocos universitários**. 2017. 28p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2017.

MIRANDA, Joseane Borges de. **Engenharia econômica**: livro didático. Palhoça: UnisulVirtual, 2011.

NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: métodos e benefícios ambientais. In: XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência. 2016. **Resumos...** Universidade do Vale do Paraíba. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/0859_1146_01.pdf. Acesso em: 31 mar. 2020.

NOTISUL. **Com débito superior a R\$ 450 mil, conta da Ponte Anita Garibaldi continua sem pagador**. 2019. Disponível em: <https://notisul.com.br/geral/com-debito-superior-a-r-450-mil-conta-da-ponte-anita-garibaldi-continua-sem-pagador/>. Acesso em: 10 maio 2020.

NREL. **Solar Resource Glossary**. 2017. Disponível em: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>. Acesso em: 3 maio 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS. **Geração de Energia**. 2020. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 21 abr. 2020.

OTANI, N.; FIALHO, F. A. P. **TCC: Métodos e Técnicas**. 2. ed. Florianópolis: Visual Books, 2011.

PINHO, João Tavares et al. **Sistemas híbridos**: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

PORTAL ENERGIA. **Conceito de energia renovável**. 2015a. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>. Acesso em: 4 abr. 2020.

PORTAL ENERGIA. **Fontes de energias renováveis e não renováveis**. 2015b. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/fontes-de-energia/>. Acesso em: 9 abr. 2020.

PORTALSOLAR. **Como produzir e vender energia elétrica**. 2020a. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/como-vender-energia-solar>. Acesso em: 18 maio 2020.

PORTALSOLAR. **Simulador de custos de instalação**. 2020b. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>. Acesso em: 18 maio 2020.

PREFEITURA MUNICIPAL DE LAGUNA - PML. **História de Laguna**. 2020. Disponível em: <https://www.laguna.sc.gov.br/cms/pagina/ver/codMapaItem/96142>. Acesso em: 12 abr. 2020.

PRYSMIAN. **Cabo Sintenax Flex 0,6/1Kv**. Disponível em: https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/LV_006_01_PT_Sintenax_1kV.pdf. Acesso em: 30 out. 2020.

RBS/SC. **Dívida com conta de luz da Ponte de Laguna chega a R\$ 300 mil, diz Celesc**. 2017. Disponível em: <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2017/02/divida-com-conta-de-luz-da-ponte-de-laguna-chega-r-300-mil-diz-celesc.html>. Acesso em: 10 abr. 2020.

REBOLLAR, Paola Beatriz May; RODRIGUES, Paulo Roberto. **Energias Renováveis: Energia Solar**. Tubarão. Unisul, 2011.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. Barueri: Manole, 2011.

REIS, M. **Laguna: falta de energia na Ponte Anita Garibaldi reacende discussão**. 2018. Disponível em: <https://tnsul.com/2018/destaque/ponte-de-laguna-falta-de-energia-reacende-discussao/>. Acesso em: 22 mar. 2020.

REIS, P. **Brasil conta com mais de 500 parques eólicos**. 2018. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/brasil-parques-eolicos/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

RODRIGUES, Paulo Roberto. **Energias Renováveis – Energia Eólica**. Tubarão. Unisul, 2011.

RUTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SANDIADULCE. **Energia Eólica - experiência**. 2014. Disponível em: <http://sandiadulce.blogspot.com/2014/11/energia-eolica-experiencia.html>. Acesso em: 07 jun. 2020.

SANTOS, A. F. **Eletricidade Aplicada**. Rio de Janeiro: Editora SESES, 2016.

SANTOS, I. E. **Manual de Métodos de Pesquisa Científica**. 12. ed. Niterói: Impetus, 2016.

SHAYANI, Rafael Amaral. **Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células**. 2006. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Universidade de Brasília. Brasília/DF. 2006.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE 2016.

TORÍBIO, A. M. V. **História da Física**. Vitória: UFES, 2012.

URBANETZ JR, J. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a**

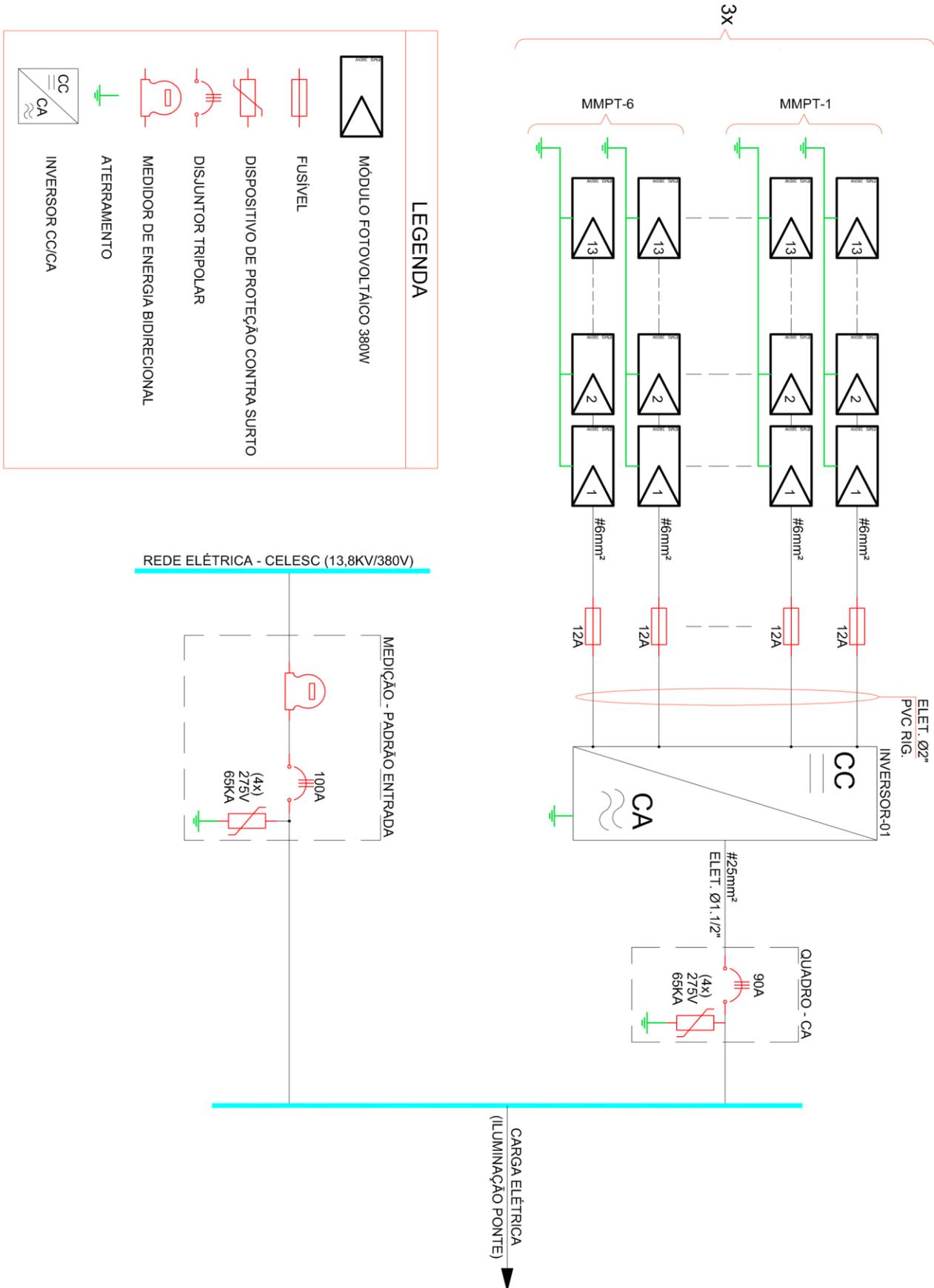
conectividade. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VILLALVA, Marcelo Gradella. **Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica.

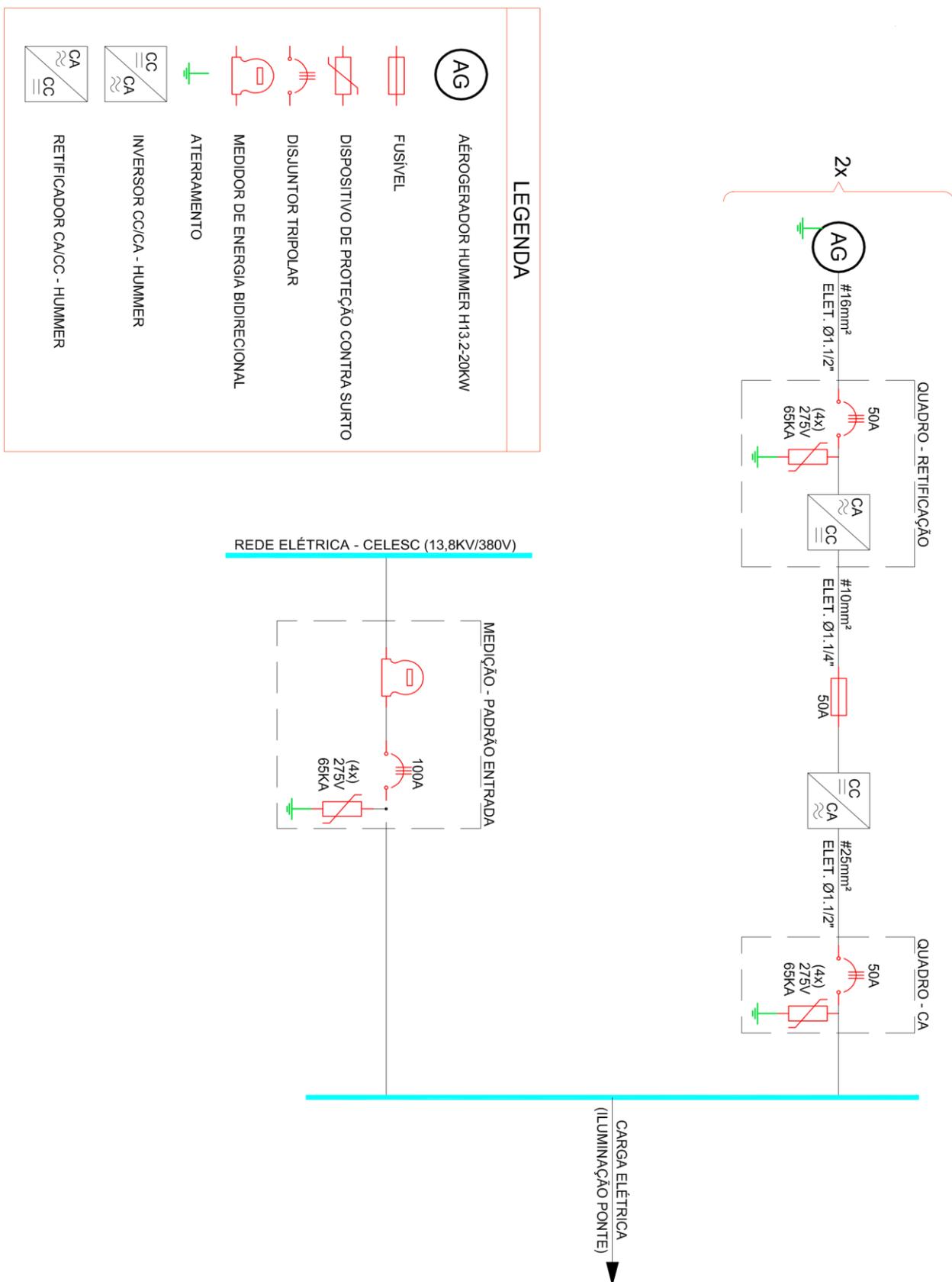
ZANONI, Naubert; SCHINEIDER, Vania Elisabete. Análise da Viabilidade da Implantação de um Sistema Híbrido para Geração de Energia Elétrica. In: 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente Bento Gonçalves – RS, Brasil. 2018. **Resumos**. Disponível em: https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=692&ano=_sexto. Acesso em: 17 maio 2020.

APÉNDICE(S)

APÊNDICE A – Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico



APÊNDICE B – Diagrama unifilar do sistema eólico



LEGENDA

- AÉROGERADOR HUMMER H13.2-20KW
- FUSIVEL
- DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTO
- DISJUNTOR TRIPOLAR
- MEDIDOR DE ENERGIA BIDIRECIONAL
- ATERRAMENTO
- INVERSOR CC/CA - HUMMER
- RETIFICADOR CA/CC - HUMMER

APÊNDICE C – Diagrama unifilar do sistema híbrido

