

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Carlos Eduardo Gasparetto

**PROJETO TÉCNICO E ECONÔMICO DE UMA ESTRUTURA COM
DUPLA FUNÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

**Santa Maria, RS
2019**

Carlos Eduardo Gasparetto

**PROJETO TÉCNICO E ECONÔMICO DE UMA ESTRUTURA COM DUPLA
FUNÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Roos

Santa Maria, RS
2019

Carlos Eduardo Gasparetto

**PROJETO TÉCNICO E ECONÔMICO DE UMA ESTRUTURA COM DUPLA
FUNÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 11 de julho de 2019:

Cristiano Roos, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Alexandre Aparecido Buenos, Dr. (UFSM)

Álvaro Luiz Neuenfeldt Júnior, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível se não fosse por várias pessoas que estiveram comigo durante minha trajetória na universidade. Assim, de maneira especial, agradeço:

- a Deus pelo dom da vida e por ter me proporcionado chegar até aqui;*
 - ao meu Pai Eduardo Julio Gasparetto, minha mãe Jovilde Luvisa e minha irmã Giovana Aparecida Gasparetto, que me apoiaram nos momentos mais difíceis da minha vida;*
 - ao meu orientador Cristiano Roos pela confiança depositada mim e por dado todo o auxílio para a elaboração do projeto;*
 - à Universidade pública, gratuita e de qualidade por fornecer todas as ferramentas essenciais que permitiram o desenvolvimento do mesmo;*
 - a todos os meus professores pelo conhecimento transmitido, especialmente ao corpo docente do curso de Engenharia Mecânica da UFSM;*
 - aos meus colegas, amigos e namorada por sempre estarem ao meu lado;*
 - a empresa Sonnen Energia e a Nettelin Energia Solar e Engenharia pelas informações concedidas;*
- Enfim, agradeço a todas pessoas que me ajudaram direta e indiretamente nesta trajetória.*

RESUMO

PROJETO TÉCNICO E ECONÔMICO DE UMA ESTRUTURA COM DUPLA FUNÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

AUTOR: Carlos Eduardo Gasparetto

ORIENTADOR: Cristiano Roos

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um projeto técnico de uma estrutura mecânica, complementado por um estudo de viabilidade econômica a respeito da implementação de uma estrutura para painéis fotovoltaicos com dupla função no campus da Universidade Federal de Santa Maria. Para o modelamento dos desenhos técnicos e desenhos representativos da estrutura foi utilizado o *software SolidWorks*. Posteriormente a isso foram determinados os carregamentos incidentes na estrutura através de alguns conceitos básicos da norma NBR 6123. A obtenção do campo de tensões e deformações incidentes nos perfis estruturais, bem como a geração das malhas e as simplificações foram feitas através de um *software* de elementos finitos. Para complementar o conjunto foi dimensionado um sistema fotovoltaico com potência nominal de 51,48 kWp e capaz de fornecer em média 5.603,21kWh de potência efetiva mensal constituído por 152 placas fotovoltaicas. Na análise econômica foram simulados 4 cenários, sendo cada um correspondendo a uma categoria de bandeira tarifária. Os métodos econômicos utilizados foram o Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno, *Payback* Simples e *Payback* Descontado. Utilizou-se também a métrica de custo de geração de energia (LCOE). Como principal resultado, o cenário que apresenta o maior grau de atratividade econômica, corresponde ao cenário tarifado pela bandeira vermelha de patamar 2 com VPL de R\$ 665.936,99 e TIR de 1,77%, PBS de 62 meses, PBD de 73 meses e LCOE de 0,2583 R\$/kWh.

Palavras-chave: Engenharia Econômica. Sistema fotovoltaico. Análise de Investimento. Projeto estrutural mecânico.

ABSTRACT

TECHNICAL AND ECONOMIC DESIGN OF A DOUBLE FUNCTION STRUCTURE FOR PHOTOVOLTAIC PANELS

AUTHOR: Carlos Eduardo Gasparetto

ADVISOR: Cristiano Roos

The present work aims to develop a technical design of a mechanical structure, complemented by an economic feasibility study on the implantation of a structure for photovoltaic panels with dual function in the campus of the Federal University of Santa Maria. For the modeling of the technical drawings and representative drawings of the structure, SolidWorks software was used. Subsequently, the loads incident on the structure were determined through some basic concepts of the standard NBR 6123. The field of stresses and deformations incident on the structural profiles, as well as the generation of the meshes and the simplifications were made through the software of finite elements. To complement the set was designed a photovoltaic system with nominal power of 51.48 kWp and capable of delivering on average 5,603.21 kWh of monthly effective power composed of 152 photovoltaic panels. In the economic analysis, four scenarios were simulated, each corresponding to a tariff flag category. The economic methods used were Net Present Value, Internal Rate of Return, Simple Payback and Discounted Payback. The cost of the power generation metric (LCOE) was also used. As the main result, the scenario with the greatest economic attractiveness corresponds to the scenario marked by the red flag of level 2 with NPV of R \$ 665,936.99 and IRR of 1.77%, PBS of 62 months, PBD of 73 months and LCOE of 0, \$ 2583 / kWh.

Keywords: Economic Engineering. Photovoltaic system. Investment analysis. Mechanical structural design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bandas de valência e condução em um material semicondutor	18
Figura 2 - As fases do projeto	20
Figura 3 - Imagem do terreno em que a estrutura ficará situada.....	29
Figura 4 - Gráfico da radiação solar diária horizontal e temperatura.....	30
Figura 5 - Mapa de isopletas de vento de velocidade básica	35
Figura 6 - Direção do carregamento.....	37
Figura 7 - Borracha de vedação	39
Figura 8 - Dimensões dos setores C, D e E	40
Figura 9 - Desenho detalhado da estrutura	42
Figura 10 - Simplificação da geometria	43
Figura 11 - Força atuante do vento sobre os perfis.....	44
Figura 12 - Detalhes da malha	45
Figura 13 – Deformações na estrutura.....	46
Figura 14 - Tensões na estrutura	46
Figura 15 - Regiões de maiores tensões.....	47
Figura 16- Relação de TIR E VPL.....	54
Figura 17 - Relação <i>Payback</i> Descontado e <i>Payback</i> Simples.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos.....	38
Tabela 2 - Valores mínimos dos fatores estatísticos.....	38
Tabela 3 - Valores dos coeficientes e variáveis de cada setor.....	41
Tabela 5 - Quantidade total de componentes.....	48
Tabela 6 - Valores correspondentes as manutenções preventivas e corretivas.....	49
Tabela 7 - Dados de consumo de energia elétrica da Reitoria.....	50
Tabela 8 - Histórico do rendimento da poupança.....	51
Tabela 9 - Histórico da inflação.....	52
Tabela 10 - Distribuição dos cenários.....	52
Tabela 11 - Resultados dos cálculos de viabilidade econômica.....	53
Tabela 12 - Resultados do LCOE.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Localização dos dados climáticos	30
Quadro 2 - Área dos setores	34
Quadro 3 - Definição de categorias para determinação do coeficiente S2	36
Quadro 4 - Definição de classes de edificação para determinação de S2.....	37
Quadro 5 - Componentes com seus respectivos materiais	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Corrente Contínua
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CREA-SC	Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Santa Catarina
CRF	Fator de Recuperação de Capital/ <i>Capital Recovery Factor</i>
DPS	Dispositivos Contra Surtos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
eV	<i>Elétron-volt</i>
FV	Energia Fotovoltaica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPC-A	Índice de Preços ao Consumidor Amplo
Kg	Quilograma
kN	KiloNewton
kV	Quilovolt
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilo-watt pico
LCEA	<i>Life Cycle Economic Analysis</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
m	Metro
MEF	Método dos Elementos Finitos
MG	Minas Gerais
MIGDI	Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica
mm	Milímetro
Mpa	Megapascal
mW	Megawatts
m ²	Metro quadrado
m/s	Metro por segundo
NAFA	Núcleo de Automação e Processos de Fabricação
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PBD	Método do <i>Payback</i> Descontado
PBS	Método <i>Payback</i> Simples
RS	Rio Grande do Sul
SC	Santa Catarina
SFV	Sistemas Fotovoltaicos
TIR	Método da Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UTFPR	Universidade Federal Tecnológica do Paraná
VPL	Método do Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	DEFINIÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo geral	12
1.2.2	Objetivos específicos	13
1.3	JUSTIFICATIVA	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ENERGIA SOLAR	15
2.2	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	16
2.2.1	Sistemas fotovoltaicos conectado à rede	18
2.2.2	Sistemas fotovoltaicos autônomos	18
2.2.3	Sistemas fotovoltaicos em estudos aplicados	19
2.3	PROJETO TÉCNICO	20
2.4	ELEMENTOS FINITOS	21
2.4.1	Elementos Finitos em estudos aplicados	22
2.5	ENGENHARIA ECONÔMICA	23
2.5.1	Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	24
2.5.2	Método do Valor Presente Líquido (VPL)	24
2.5.3	Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)	25
2.5.4	Método <i>Payback</i> Simples (PBS) e <i>Payback</i> Descontado (PBD)	25
2.5.5	<i>The Levelized Cost of Energy (LCOE)</i>	26
2.5.6	Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos em estudos aplicados	27
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	29
3.1	CENÁRIO	29
3.2	MÉTODO DE PESQUISA	31
3.3	ETAPAS DA PESQUISA	32
4	RESULTADOS E ANÁLISES	34
4.1	DADOS DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA ESTRUTURA	34
4.2	CARREGAMENTOS	35
4.3	DETALHAMENTOS DA ESTRUTURA	41
4.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	43
4.5	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	48
4.6	COLETA DE DADOS	49
4.6.1	Consumo de energia elétrica	49
4.6.2	Tarifa de energia elétrica	50
4.6.3	Taxa de juros do investimento e inflação	51
4.7	VIABILIDADE ECONÔMICA	52
5	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A - ÁREA ABRANGENTE DA ESTRUTURA	63
	APÊNDICE B - DESENHOS REPRESENTATIVOS	66
	APÊNDICE C - CENÁRIO D	69

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade se tornou a principal fonte de calor, luz e força motriz. No panorama mundial, existe uma forte submissão energética em petróleo e gás natural. Segundo García-Olivares *et al.* (2011), devido à forte dependência tecnológica atual sobre o petróleo, o pico da sua utilização pode ser um problema para setores econômicos, isso se nas próximas décadas não houverem outras fontes de energia que substituam os combustíveis fósseis.

Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2018), a matriz elétrica brasileira (conjunto de fontes formadoras da geração elétrica) é baseada, principalmente, em usinas hidrelétricas correspondendo a 68,1%. Com base na mesma referência, o gás natural corresponde a 9,1%, biomassa a 8,2%, a solar e a eólica a 5,4%, o carvão a 4,2%, a nuclear a 2,6% e outros derivados do petróleo corresponde a 2,4% da matriz energética brasileira. Dados obtidos através do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2006) o Brasil é o país com maior índice de irradiação solar do mundo, correspondendo a 1500-2500kWh/m², muito superior aos da maioria dos países europeus como a Alemanha (900-1250kWh/m²), a França (900-1650kWh/m²) e a Espanha (1200-1850kWh/m²), isso demonstra como o Brasil ainda tem forte potencial para explorar a geração de energia fotovoltaica em seu território.

A energia solar, dentre as fontes de energias renováveis, destaca-se por ser autônoma, por não poluir o meio ambiente, por ser uma fonte inesgotável, por oferecer grande confiabilidade e por reduzir custos de consumo a longo prazo (DUTRA *et al.*, 2013). Com uma tecnologia capaz de fornecer eletricidade sustentável e reduzir a carga de combustíveis fósseis no meio ambiente, os Sistemas Fotovoltaicos (SFV) têm atraído cada vez mais atenção nos últimos anos. A indústria de geração de energia elétrica a partir da fonte solar pode ser considerada definitivamente a melhor opção para a demanda de energia no futuro, uma vez que é superior em termos de disponibilidade, custo-eficácia, acessibilidade, capacidade e eficiência em comparação com outras fontes de energia renováveis (KANNAN; VAKEESAN, 2016).

No Brasil, o crescimento da geração solar fotovoltaica tem sido favorecido e impulsionado graças à iniciativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Normativa nº 482 de 17/04/2012. Esse documento permite

micro e mini geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, com sistemas de geração distribuída conectados a redes elétricas de baixa tensão. Em outras palavras, estabelece que clientes residenciais, comerciais e industriais podem instalar painéis solares fotovoltaicos e reduzir essa produção de suas contas de energia (SIQUEIRA, 2015).

1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA E DO PROBLEMA DE PESQUISA

Este trabalho de conclusão de curso tem como tema o desenvolvimento de um projeto técnico de uma estrutura mecânica, complementado por um estudo de viabilidade econômica sobre a implementação de uma estrutura para painéis com dupla função. O termo dupla desta refere-se a uma estrutura para dar suporte a painéis fotovoltaicos e também servir como um abrigo da chuva e do sol em locais de circulação de pedestres. Este projeto será desenvolvido supondo sua implementação na Universidade Federal de Santa Maria, ligando o prédio do Laboratório de Soldagem ao Refeitório II do campus sede.

De tal modo o trabalho em questão será dividido em duas premissas básicas. A primeira que irá abordar o projeto estrutural mecânico, utilizando métodos para a resolução de problemas embasados na área de mecânica dos sólidos. A segunda parte irá abordar método de análise de investimentos para verificar a viabilidade econômica da implementação do projeto estrutural mecânico.

Assim o problema de pesquisa se refere na seguinte pergunta chave: existe viabilidade técnica e econômica para a implementação de um sistema fotovoltaico na UFSM, considerando o projeto de uma estrutura mecânica de dupla função.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um projeto técnico-estrutural e análise de viabilidade econômica de uma instalação de um sistema solar fotovoltaico.

1.2.2 Objetivos específicos

A fim de chegar ao objetivo geral, alguns objetivos devem ser seguidos:

- a) levantar dados e informações precisas do local de instalação do sistema fotovoltaico, como dimensões da área de instalação, dados climáticos, geográficos, análise energética e incidência solar média;
- b) projetar a estrutura de fixação dos sistemas fotovoltaicos com o auxílio de *softwares* e levando em consideração alguns conceitos da norma NBR 6123;
- c) dimensionar tecnicamente o sistema fotovoltaico ligado à rede, juntamente com uma empresa especializada na área;
- d) buscar dados econômicos sobre a estrutura e sobre o sistema fotovoltaico;
- e) aplicar métodos de Engenharia Econômica para a análise de investimento utilizando *software* de cálculo.

1.3 JUSTIFICATIVA

A justificativa para a elaboração desse projeto é devido à crescente busca por soluções energéticas renováveis, sendo uma delas a energia solar. Dentre as fontes de energias renováveis, a energia solar pode favorecer o estabelecimento de geração distribuída, permitindo uma maior diversificação da matriz energética e auxiliando no suprimento desta demanda (SANTOS; JABBOUR, 2013). Além disso, soluções inteligentes para a fixação dos painéis devem ser desenvolvidas, pois a produção de energia elétrica do painel é diretamente proporcional à área de incidência dos raios solares. Isto porque a eficiência de um painel fotovoltaico é baixa, dependendo assim de grandes áreas para uma geração ótima de energia.

Além disso, outra justificativa deste trabalho é a importância de mais estudos aplicados que envolvam análises de investimento nesta área. E nesse contexto este trabalho tem como diferencial unir o conhecimento de projeto estrutural mecânico com Engenharia Econômica para realizar um estudo da utilização da energia solar para reduzir custos com o consumo de energia elétrica e ao mesmo tempo contribuir para a preservação do meio ambiente, visto que as universidades públicas exercem grande efeito na responsabilidade social e sustentável do meio acadêmico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho está subdividido em cinco tópicos principais. O primeiro deu algumas definições sobre a energia solar. O segundo abordou sobre o princípio de funcionamento dos painéis fotovoltaicos e sobre alguns modelos de sistemas utilizados atualmente. O terceiro tópico abordou aspectos para o desenvolvimento de um projeto técnico-mecânico. No quarto tópico foi trazido de modo sucinto os conceitos sobre métodos de análise e solução de problemas usando a análise por elementos finitos. O quinto tópico trouxe definições sobre análise de viabilidade econômica.

2.1 ENERGIA SOLAR

Existe muito espaço para o crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil. Mais do que uma fonte alternativa, a energia fotovoltaica é uma opção viável e promissora para complementar e ampliar a geração de eletricidade (VILLALVA, 2015). O Brasil possui expressivo potencial para geração de energia elétrica a partir de fonte solar, contando com níveis de irradiação solar superiores aos de países onde projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente disseminados, como Alemanha, França e Espanha (NASCIMENTO, 2017). Os sistemas fotovoltaicos podem gerar eletricidade em qualquer espaço onde for possível instalar um painel fotovoltaico como telhados e fachadas de prédios e residências poderão gerar eletricidade em áreas urbanas. Usinas de eletricidade podem ser construídas em áreas abertas de qualquer dimensão, próximas ou distantes dos centros de consumo (VILLALVA, 2015). Conforme Kannan e Vakeesan (2016), a energia fotovoltaica pode ser a melhor opção de geração de energia elétrica para o mundo futuro, isto por que, o sol emite 2.8×10^{23} kW, sendo que aproximadamente 1.8×10^{14} kW são interceptados pela terra.

Estudos revelam que a demanda de energia global pode ser suprida usando a energia solar de forma satisfatória. A cada ano o planeta recebe cerca de 50.000 vezes mais joules de energia solar do que o consumo atual de eletricidade em todo o mundo (BLAKERS, 2015). Grande parte dessa energia está na forma de radiação direta do feixe, isto é, radiação que vem diretamente do disco visível do sol e pode

ser convertida em energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos (PEREIRA *et al.*, 2006).

2.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As primeiras descobertas da energia fotovoltaica (FV) ocorreram em 1839, quando o cientista francês Alexandre-Edmond Becquerel, de 19 anos, colocou duas placas de latão em um líquido condutor e imediatamente resplandeceu uma luz nas placas. Ele constatou que foi gerada uma corrente elétrica decorrente desse processo (NASCIMENTO, 2017). O próximo grande passo na energia FV só foi dado nos anos 1950 quando Cientistas nos Laboratórios Bell investigaram as qualidades do elemento silício. Os cientistas descobriram que o silício, tratado com impurezas, se torna responsivo à luz. Quando a luz solar atinge a célula solar, os elétrons se separam de seus átomos e se movem. Esse movimento cria eletricidade através de um circuito elétrico (BALFOUR; SHAW; NASH, 2016).

De acordo com Nowak e Frankl (2014) os sistemas fotovoltaicos convertem diretamente a energia solar em eletricidade. O bloco de construção básico de um sistema fotovoltaico é a célula fotovoltaica, que é um dispositivo semicondutor que converte energia solar em energia elétrica em forma de corrente contínua (CC). As células fotovoltaicas são interligadas para formar um módulo fotovoltaico, com potência média que varia entre 50-200 Watts. Os módulos fotovoltaicos são combinados com um conjunto de componentes adicionais do sistema dependentes da aplicação (por exemplo, inversores, baterias, componentes elétricos e sistemas de suporte (VARELLA; GOMES; JANUZZI, 2009). Os sistemas fotovoltaicos são modulares, isto é, podem ser ligados entre si para fornecer energia que varia desde alguns watts até dezenas de megawatts (MW). Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente pela junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo *P* e outra *N* (NOWAK; FRANKL, 2014). O material *N* possui um excedente de elétrons e o material *P* apresenta falta de elétrons. Devido à diferença de concentração de elétrons nas duas camadas de materiais, os elétrons da camada *N* fluem para a camada *P* e criam um campo elétrico dentro de uma zona de depleção, também chamada de barreira de potencial no interior da estrutura da célula (VILLALVA, 2015). Quando duas camadas de materiais *P* e *N* são colocadas em contato,

formando o que se chama junção semicondutora, os elétrons da camada N migram para a camada P e ocupam os espaços vazios das lacunas (BEZERRA, 2018).

Os átomos de silício são tetravalentes, ou seja, caracterizam-se por possuírem 4 elétrons de valência que formam ligações covalentes com os átomos vizinhos, resultando em 8 elétrons compartilhados por cada átomo, constituindo uma rede cristalina (VILLALVA, 2015).

O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto é mal condutor elétrico. Para alterar isto acrescentam-se porcentagens de outros elementos (NASCIMENTO, 2004). Este processo denomina-se dopagem. A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres (SEBASTIÃO, 1992).

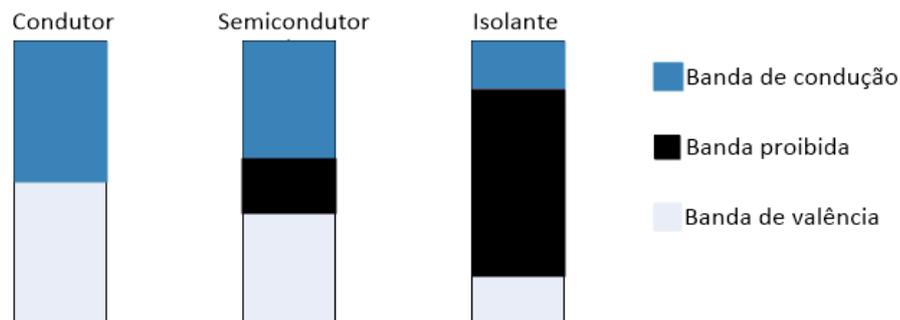
Ao se introduzir nesta estrutura um átomo pentavalente, como, por exemplo, o fósforo (P), haverá um elétron em excesso fracamente ligado a seu átomo de origem, uma vez que ocupa um nível de energia da banda proibida de apenas -0,045 eV abaixo do limite inferior da banda de condução (NEVES, 2015). Como sua temperatura é muito baixa, na temperatura ambiente a energia térmica é suficiente para libertar este elétron fazendo com que salte para a banda de condução, deixando seu átomo de origem com uma carga positiva (PINHO; GALDINO, 2014).

Os átomos que são condutores elétricos têm apenas um ou dois elétrons de valência. Esses elétrons não são muito presos ao átomo. Os elétrons de valência podem ser empurrados da camada de valência para a faixa de condução (BALFOUR; SHAW; NASH, 2016). Os elétrons com energia da faixa de condução se movem livremente e podem ser acelerados quando um campo elétrico é aplicado. É a aceleração desses elétrons livres que cria a corrente elétrica (LENGRUBER, 2014). Já os átomos com três, quatro ou cinco elétrons de valência são semicondutores. Eles não conduzem a corrente elétrica com tanta facilidade quanto os condutores. No entanto, os elétrons de valência dos semicondutores podem ser obrigados a se soltar. A exposição à luz é o que faz os elétrons se moverem nos semicondutores (BALFOUR; SHAW; NASH, 2016). Células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, ou seja, material com características intermédias entre um condutor e um isolante.

A separação entre duas bandas de energia permitida dos materiais semicondutores, Figura 1, denominada de banda proibida (*bandgap*, ou

simplesmente *gap*) e representada por E_g , pode atingir até 3 eV (*elétron-volt*), diferenciando estes materiais dos materiais considerados isolantes, onde a banda proibida supera este valor (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 1 - Bandas de valência e condução em um material semiconductor



Fonte: Adaptado de Pinho e Galdino (2014).

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos conectado à rede

O sistema fotovoltaico conectado à rede (*grid-connected*) opera em paralelismo com a rede de eletricidade. O objetivo desse sistema fotovoltaico é gerar eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou eliminar o consumo da rede pública ou mesmo gerar excedente de energia (VILLALVA, 2015). No Brasil, em 2015, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa nº 687, na qual alterou o artigo 2º da Resolução Normativa nº 482/2012, que agora possibilita a compensação da injeção e consumo de energia elétrica. Neste sistema toda energia excedente produzida pela unidade geradora é injetada na rede da distribuidora local que posteriormente é compensada pelo consumo de energia pela mesma unidade. Esses sistemas de créditos energéticos permanecem válidos por um prazo de até 60 meses (RIGO, 2017).

2.2.2 Sistemas fotovoltaicos autônomos

Os sistemas fotovoltaicos autônomos, também chamados sistemas isolados, são empregados em locais não atendidos por uma rede elétrica. Podem ser usados para fornecer eletricidade para residências em zonas rurais, na praia, em ilhas e em qualquer lugar onde a energia elétrica não esteja disponível (DANTAS; CARVALHO; ALVES, 2018). Os sistemas isolados foram regulamentados pela resolução Aneel nº

83/2004, a qual teve um papel importante na inserção dos sistemas fotovoltaicos nos programas de eletrificação rural no país (VILLALVA, 2015). Devido ao potencial de uso e as diferentes configurações usando fontes intermitentes de energia e à demanda por atendimento de minirredes isoladas, a Aneel publicou a Resolução nº 493/2012, que substitui a anterior e estabelece procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI) (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.3 Sistemas fotovoltaicos em estudos aplicados

Muitos estudos e aplicações de sistemas fotovoltaicos vem sendo realizados na busca por alternativas para a geração de energia em um nível sustentável. Marinoski, Salamoni e Rütther (2004) apresentaram um estudo de caso de um pré-dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico integrado a uma edificação do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Santa Catarina (CREA-SC) interligado à rede elétrica pública. Verificou-se neste estudo que até 51% da energia elétrica vinda da rede pública poderia ser substituída pela energia gerada a partir do sistema fotovoltaico.

Braun, Jardim e Rütther (2007) determinaram o percentual de redução de consumo de energia elétrica no Aeroporto Internacional de Florianópolis com a utilização de sistemas fotovoltaicos integrados à edificação. A metodologia aplicada no estudo compreende as fases de obtenção de informações sobre o consumo energético do aeroporto e de irradiação solar; o cálculo da geração fotovoltaica considerando a aplicação dos módulos fotovoltaicos em coberturas, fachadas e pátio do aeroporto e a fase de interpretação dos resultados numéricos relacionados ao potencial de geração elétrica. Os resultados obtidos demonstram que a integração dos sistemas fotovoltaicos em aeroportos poderia suprir em 100% o consumo de energia elétrica da edificação.

Zomer (2010), através de um estudo de área disponível na edificação e suas áreas adjacentes, quantificou-se o potencial fotovoltaico existente na Eletrosul (empresa do setor elétrico, localizada em área urbana de Florianópolis - SC). A partir disso, estimou-se a geração fotovoltaica horária, mensal e anual, a fim de comparar com o consumo da edificação. Com 1MWp instalado, a contribuição anual seria de 31% do consumo energético, chegando a 42% no mês de dezembro. Na

comparação horária, verificaram-se momentos de geração energética superior ao consumo, resultando em energia injetada na rede.

2.3 PROJETO TÉCNICO

Projetar é formular um plano para atender uma necessidade específica ou resolver um problema (BUDYNAS; NISBETT, 2011). Segundo Alves Filho (2000), os engenheiros que trabalham diariamente com projetos são colocadas à frente de problemas técnicos, alguns mais simples e outros mais complexos, tendo assim que resolve-lo de forma satisfatória e ao mesmo tempo garantir que a estrutura objeto da análise não estará sujeita a falhas sob as condições de operação.

Conforme Budynas e Nisbett (2011), o processo de projeto completo, muitas vezes é descrito como na Figura 2. Começa com a identificação de uma necessidade e a decisão de se fazer algo a respeito. Após repetições, o processo termina com a apresentação dos planos para atender à necessidade. Dependendo da natureza da tarefa do projeto, várias de suas fases talvez tenham que ser repetidas ao longo da vida do produto, desde seu princípio até o seu término.

Figura 2 - As fases do projeto



Fonte: Adaptado de Collins (2019).

Os objetivos-chave de toda atividade de projeto mecânico são a seleção do melhor material possível e determinação da melhor geometria possível para cada peça. Conforme Collins (2006), algumas iterações são necessárias para o desenvolvimento de um projeto. Durante a primeira iteração, os engenheiros-projetistas se concentram em determinar as especificações para o desempenho funcional, selecionando materiais e arranjos geométricos potenciais que possam oferecer resistência e durabilidade adequadas ao carregamento, ambiente e modos de falha potencial que governam a aplicação. Um fator de segurança razoável é escolhido, tipicamente, nesse estágio, para cobrir as incertezas. Nesta primeira iteração são, também, incluídas considerações preliminares quanto aos métodos de fabricação. A segunda iteração, normalmente, estabelece todas as dimensões nominais e as especificações detalhadas de material para satisfazer, com segurança, as exigências de desempenho, resistência e vida. A terceira iteração audita a segunda iteração de projeto segundo as perspectivas de fabricação, montagem, inspeção, manutenção e custo. A quarta iteração inclui a determinação cuidadosa de ajustes e tolerâncias, modificações resultantes da auditoria da terceira iteração e uma verificação final do fator de segurança para garantir que a resistência e a durabilidade estejam de acordo com a aplicação, mas que não haja desperdícios nem de materiais nem de quaisquer outros recursos.

2.4 ELEMENTOS FINITOS

Segundo Alves Filho (2000) componentes mecânicos na forma de barra simples, vigas, etc., podem facilmente ser analisados através de métodos básicos da mecânica dos sólidos, que fornecem resultados analíticos. Porém estruturas reais, no entanto, raramente são tão simples para serem analisadas pelas técnicas da mecânica clássica. Existe uma grande variedade de técnicas numéricas usadas em aplicações de engenharia para as quais o computador é muito útil. Em desenhos mecânicos, a plataforma CAD (desenho com o auxílio do computador) é essencial para projetar, visualizar os componentes de forma simplificada, e otimizar o tempo de trabalho (BUDYNAS; NISBETT, 2011). Para estruturas de forma arbitrária, a solução analítica frequentemente torna-se impossível, e o problema requer grandes e excessivas simplificações (ALVES FILHO, 2000). Um método de solução de

problemas mais complexos, usado juntamente com *softwares* de CAD, é a análise por elementos finitos (FEA) (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

A ideia básica do método dos elementos finitos é dividir o corpo em elementos finitos, muitas vezes chamados apenas de elementos, conectados por nós, e obter uma solução aproximada. Esta é chamada de malha de elementos finitos e o processo para sua construção é conhecido como geração de malha. O Método dos Elementos Finitos (MEF) provê uma metodologia sistemática com a qual a solução pode ser determinada por meio de um programa de computador. Para problemas lineares, a solução é determinada pela resolução de um sistema de equações lineares; o número de incógnitas é igual ao número nodal. Para obter uma solução razoavelmente exata, milhares de nós são geralmente necessários, assim os computadores são essenciais para resolver essas equações (FISH; BELYTCHKO, 2009). Os resultados são geralmente apresentados como visualizações computacionais, tais como gráficos. Essa informação é então usada nas etapas do projeto.

Segundo Mirlisenna (2018), antes de fazer a análise por elementos finitos é necessário fazer uma análise detalhada do modelo a ser estudado. Primeiramente antes de iniciar a modelagem no *software* de elementos finitos, algumas decisões preliminares devem ser tomadas: Qual as necessidades para a avaliação da estrutura? Qual é o tipo de análise? O que deve ser representado na geometria? Quais os carregamentos, apoios e materiais? Após essa primeira avaliação, parte-se para a etapa de pré-processamento, aonde será executada a geração da geometria, definido as propriedades do material, criada a malha de elementos, definido os apoios e os carregamentos. Posteriormente é executado o processamento da análise, aonde o *software* irá calcular as repostas. Em seguida, chega-se a etapa de pós-processamento, fase em que se obtém a respostas de distribuições de contornos, tensões e deformações são fornecidas através de gráficos.

2.4.1 Elementos Finitos em estudos aplicados

Análises em elementos finitos abrangem o campo linear e não linear, com abordagens estáticas e dinâmicas, que visam desde uma análise estática da distribuição de tensões em resposta a carregamentos externos, como casos mais complexos envolvendo fratura e fadiga (FORMENTON; SOARES, 2012). Existem

muitos trabalhos que abordam o uso de ferramentas numéricas para a investigação de problemas estruturais, fazendo assim desta ferramenta um bom recurso para obter o campo de tensões e deformações da estrutura modelada neste trabalho.

Sordi (2016), fez o projeto e dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante univiga para aplicação na indústria metal-mecânica utilizando uma análise através de um *software* específico com base no método dos elementos finitos. Braçal e Bertolino Jr. (2012) analisou o comportamento de tubos cilíndricos de paredes finas submetidas a uma força axial de compressão, determinando a sua força crítica de flambagem através da ferramenta *Static Strutral* do *software Ansys Workbench*. Castro (2018) fez uma análise numérica de uma viga de seção na forma de T, com um momento concentrado aplicado na extremidade livre, através do *software Ansys*. Como forma de verificação os resultados obtidos na modelagem numérica foram comparados com uma solução analítica. Observou-se que as diferenças entre os resultados no modelo numérico e os encontrados pelo modo analítico são quase nulas, comprovando a confiabilidade do *software Ansys* e mostrando-se bastante eficaz para analisar estruturas metálicas. Andrade e Medeiros (2016) desenvolveu uma análise de elementos finitos com o programa *Ansys* para verificação de estabilidade estrutural em uma treliça metálica içadora de aduelas de concreto para pontes.

2.5 ENGENHARIA ECONÔMICA

A Engenharia Econômica é utilizada principalmente como complemento ao trabalho que os engenheiros desenvolvem em análises de desempenho, síntese e conclusão em projetos de todas as categorias. Em outras palavras, a engenharia econômica está no âmago do processo de tomada de decisões (BLANK; TARQUIN, 2008). Decisões ocorrem no presente, mas tratam das consequências de eventos futuros. Em Engenharia Econômica, concentra-se no caso mais simples em que o futuro pode ser previsto, ou pelo menos que alguns cenários do futuro podem ser bem caracterizados e as análises serem feitas dentro do contexto de cada cenário (EHRLICH; MORAES, 2013).

Um projeto de engenharia econômica depende de diversos fatores como a identificação do problema, a definição do objetivo, a estimativa do fluxo de caixa, a análise financeira e a tomada de decisão (BLANK; TARQUIN, 2008). O estudo de

técnicas e métodos dispostos na disciplina de Engenharia Econômica é fundamental para a resolução de problemas relacionados a análise de investimentos (RIGO, 2017).

2.5.1 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A determinação da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) para um estudo de econômica não é um processo exato. A combinação de financiamento com capital de terceiros e capital próprio se modifica ao longo do tempo e entre projetos (BLANK; TARQUIN, 2008). Segundo Schroeder *et al.* (2005), as decisões de investimento e financiamento de um projeto de investimento podem ser separáveis, mas dificilmente podem ser independentes. O capital é um fator de produção, e como os outros fatores, tem seu custo associado.

A TMA é baseada no retorno médio obtido do capital investido. Considerada como uma taxa razoável de retorno, a TMA estabelece a avaliação e a seleção de alternativas em um empreendimento (BLANK; TARQUIN, 2008).

2.5.2 Método do Valor Presente Líquido (VPL)

O método do VPL, caracteriza-se, essencialmente, por transferir todas as variações de caixas esperados, no fluxo de caixa, para o instante presente, descontando à TMA, ou seja, seria o transporte para a data zero em um diagrama de fluxo de caixa de todos os recebimentos e desembolsos esperados (TORRES, 2004). O VPL é obtido pela Equação 1.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \left(\frac{FC_t}{(1+k)^t} \right) - FC_0 \quad (1)$$

Assim: VPL é o fluxo de caixa do investimento [R\$]; FC_t é a entrada ou fluxo de caixa no período t [R\$]; n é o número de períodos na linha do tempo; t é o período genérico na linha do tempo; k é taxa de custo de capital da empresa, TMA [% ao período]; FC_0 é o investimento inicial (RIGO, 2017).

2.5.3 Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa que iguala as saídas previstas (investimentos) com as entradas estimadas (retornos) de um determinado projeto. Por meio da comparação com a TMA desejada pela empresa é possível verificar se o investimento será considerado rentável (ANTONIK, 2012). O VPL e a TIR são considerados e denominados em grande parte da literatura financeira como os métodos mais tradicionais e eficientes na avaliação de projetos de investimentos (SCHROEDER *et al.*, 2005). A literatura especializada define a TIR como sendo a taxa de juros que anula o VPL (Valor Presente Líquido) do fluxo de caixa de um investimento. A obtenção da TIR se dá pela resolução da Equação 2 (BARBIERI, 2007).

$$0 = \sum_{t=1}^n \left(\frac{FC_t}{(1+k)^t} \right) - FC_0 \quad (2)$$

Assim: FC_0 é o investimento realizado no momento zero [R\$]; FC_t é a entrada ou fluxo de caixa de cada período t [R\$]; k é a TIR [% ao período]; n é o período estimado para o projeto (LEE *et al.*, 2016).

2.5.4 Método *Payback* Simples (PBS) e *Payback* Descontado (PBD)

Segundo Eick (2010), o *Payback* Simples se resume em identificar o número de períodos em que se retorna um dado investimento inicial, subtraindo do capital do caixa inicial “n” períodos, até a liquidação do capital investido. O empreendimento será considerado viável caso o valor encontrado para o *Payback* Simples seja inferior ao período pré-determinado para a recuperação do investimento (RIGO, 2017).

No entanto, Antonik (2012) faz algumas considerações sobre esse método de análise, enunciando que o modelo é pouco sofisticado do ponto de vista matemático, pois utiliza um raciocínio demasiadamente simplista, pois não considera os fluxos de caixa ocorridos após o período de *Payback* e que não considera o valor do dinheiro no tempo.

Segundo Souza e Oliveira (2016), o *Payback* Descontado visa corrigir o *Payback* Simples no sentido que o primeiro não considera o valor do dinheiro ao

longo do tempo. A vantagem desse critério em relação ao anterior, é que este, pelo menos, para análise de um projeto isolado, é consistente do ponto de vista financeiro.

2.5.5 *The Levelized Cost of Energy (LCOE)*

A metodologia LCOE é uma ferramenta usada como “*benchmarking*” de classificação para avaliar a relação custo-eficácia de diferentes tecnologias de geração de energia (BRANKER; PEARCE; PATHAK, 2011).

Historicamente, a metodologia LCOE vem sendo empregada como uma forma sensível de precificação do investimento, consistindo na avaliação do custo por kWh para construção e operação de uma planta de geração ao longo de sua vida útil estimada, em termos do custos de capital, custos da fonte primária empregada (combustíveis fósseis ou nucleares, carvão, óleo combustível, biomassa, CCGT, etc.), custos financeiros, custos fixos, além do ciclo de funcionamento previsto para planta (MEDEIROS, 2017).

Para a determinação do LCOE para a instalação de sistemas fotovoltaicos é necessário o cálculo do fator de recuperação do capital (CRF – sigla em inglês para *Capital Recovery Factor*) para o período analisado, obtido pela Equação 3 descrita por (RAMADHAN; NASEEB, 2011).

$$CRF = \frac{(i * (1 + i)^n)}{[(1 + i)^n - 1]} \quad 3)$$

Onde: i é a taxa de juros aplicada [% ao período]; n é o período de análise [períodos]. Após a definição deste fator é possível obter o LCOE segundo a Equação 4.

$$LCOE = \frac{(CI * CRF) + \sum_n CM}{\sum_n PT} \quad 4)$$

Onde: CI é o custo de instalação [R\$]; CRF é o fator de recuperação do capital; n é o número de períodos [períodos]; CM é o custo de manutenção ao longo do período [R\$]; e PT é a produtividade total [kWh].

2.5.6 Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos em estudos aplicados

A fim de compreender melhor as aplicações de sistemas fotovoltaicos, é relevante analisar os vários métodos e procedimentos utilizados na verificação da viabilidade econômica e energética destes sistemas (RIGO, 2017).

Campos *et al.* (2014) aplicou o método *Payback* para analisar a viabilidade econômica de retorno do capital investido para instalar sistemas fotovoltaicos, conectados à rede, na Universidade Federal Tecnológica do Paraná (UTFPR). Das *et al.* (2015), usufruiu da análise pelo método *life cycle economic analysis* (LCEA) e o Valor Presente Líquido (VPL), para comparar, em regiões remotas na Índia onde não há fornecimento de energia elétrica, um sistema fotovoltaico autônomo comparando com um gerador de energia que utiliza o Diesel como combustível. Concluiu-se que apesar de o investimento inicial do sistema fotovoltaico ser maior, este, no entanto, é economicamente mais viável. Siqueira (2015) demonstrou que é viável economicamente a instalação de um sistema *grid-connected* em um templo relógio na cidade de Juíz de Fora, MG, e constatou que o tempo do retorno financeiro se altera de acordo com o perfil de consumo, investimento inicial, aumento anual tarifário, taxa de juros e valor economizado no primeiro ano da instalação através do método VPL e do *Payback*. Silva (2015), observou uma viabilidade econômica positiva em cenários com financiamento de 25% a 50% do valor investido para implementação da usina fotovoltaica em uma área rural do município de Nova Iguaçu, na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, através dos métodos de Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e *Payback*. Mondal e Islam (2011), encontraram uma condição favorável para o desenvolvimento do sistema fotovoltaico solar de 1 MW, conectado à rede, em Bangladesh com os métodos de VPL, TIR e PBS. Os resultados também mostraram que no mínimo de 1423 toneladas de emissões de gases de efeito estufa poderiam ser evitadas anualmente usando o sistema proposto. Vale *et al.* (2016), fizeram um estudo comparativo sobre a viabilidade econômica, utilizando o método da TIR e do VPL, visando a implementação de sistemas fotovoltaicos ligados à rede elétrica em casas do projeto social “Minha Casa Minha Vida”, em um estabelecido local no estado de São Paulo e outro no estado do Piauí. Este estudo mostrou-se mais viável no estado de São

Paulo, mesmo com uma irradiação solar menor do que o estado do Piauí. Isso se deve aos incentivos fiscais do governo paulista serem melhores.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção é dividida em três subseções. A primeira apresenta informações e dados referentes ao cenário em que a pesquisa será realizada. A segunda aborda os métodos de pesquisa empregados, e por fim, a terceira, explana detalhadamente os métodos de pesquisa empregados.

3.1 CENÁRIO

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos nesta pesquisa, é de suma importância especificar o panorama geográfico, climático e energético em qual o objeto de estudo se encontra. Assim, o local escolhido para a realização do projeto está no campus principal da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Em específico, está localizado no bairro Camobi, na cidade de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, mais precisamente situado entre o Laboratório de Soldagem e o Refeitório II. A área destacada em linhas amarelas na Figura 3 demonstra o terreno englobado pela estrutura dos painéis fotovoltaicos.

Figura 3 - Imagem do terreno em que a estrutura ficará situada



Fonte: Google Maps (2019).

Outro item importante nesta subseção é a respeito das condições climáticas na qual a estrutura ficará submetida. Estas informações, foram extraídas com o auxílio do *software RETScreen*. O Quadro 1 exibe dados de latitude, longitude, zona climática e elevação da cidade de Santa Maria.

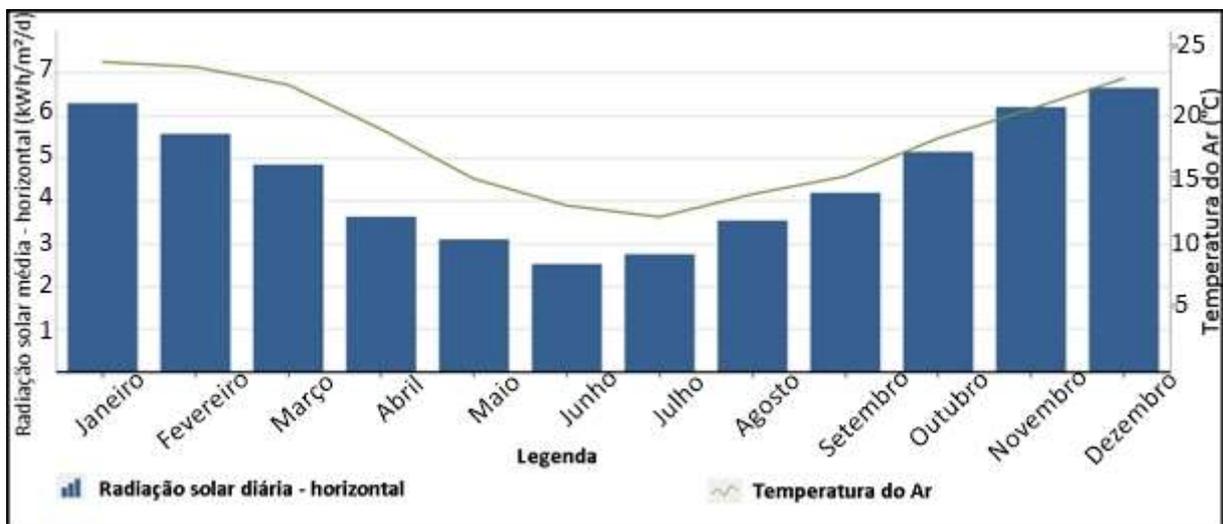
Quadro 1 - Localização dos dados climáticos

Dados	Unidade	Localização e dados climáticos
Localização		Santa Maria – RS
Latitude	°N	-29,7
Longitude	°E	-53,8
Zona climática		2A – Quente – Úmido
Elevação	M	246

Fonte: Adaptado do *software RETScreen* (2019).

O ponto de referência geográfica é estabelecido no centro de Santa Maria, e por consequência, o *software* infere segundo dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) os valores para as principais características climáticas da região. Outro dado relevante fornecido pelo *software* é a incidência de radiação solar diária horizontal (kWh/m²/d) e a temperatura do ar (°C).

Figura 4 - Gráfico da radiação solar diária horizontal e temperatura



Fonte: Adaptado do *software RETScreen* (2019).

Uma vez determinados os dados climáticos e geográficos são necessárias informações de distribuição energética da região. Isto porque o estudo deve realizar uma análise comparativa entre as tarifas cobradas pela concessionária distribuidora em relação à produção desenvolvida pelo sistema fotovoltaico (RIGO, 2017). Desta forma, a distribuição de energia elétrica na região de Santa Maria é realizada pela empresa RGE Sul. Responsável por distribuir 65% da energia elétrica consumida no Rio Grande do Sul e atender 2,86 milhões de clientes residenciais, industriais e comerciais em 373 municípios gaúchos (RGE, 2019).

3.2 MÉTODO DE PESQUISA

Pesquisa é um processo de investigação que foca em descobrir as relações existentes entre os aspectos que envolvem fatos, fenômenos, situações ou coisas (HEERDT; LEONEL, 2007). Ao desenvolver uma pesquisa, tem-se em mente aprofundar o conhecimento sobre determinado objeto de estudo ou resolver alguma dificuldade. O objeto de estudo apresenta algumas características que precisam ser analisados. São elas: a situação encontrada, o que deseja ou tem necessidade para o momento atual e, finalmente, qual mudança para o futuro é desejada (NASCIMENTO, 2012).

Segundo Gil (1987), é sabido que toda e qualquer classificação se faz mediante algum critério, assim pesquisas científicas podem ser classificadas em relação a: natureza, abordagem, objetivos, procedimentos técnicos e métodos de pesquisas. Do ponto dos objetivos, a pesquisa em questão enquadre-se como descritiva, pois analisa, observa, registra e correlaciona aspectos (variáveis) que envolvem fatos ou fenômenos, sem manipulá-los (HEERDT; LEONEL, 2007). Quanto a natureza: aplicada, já que a pesquisa tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos (PEREIRA, 2016). Tratando a respeito dos métodos de pesquisa, este trabalho enquadra-se como pesquisa axiomática quantitativa, visto que, a preocupação fundamental é obter soluções para o modelo em questão e assegurar que tais soluções ajudem a esclarecer a estrutura do problema descrito pelo modelo (MIGUEL, 2018). Sob o enfoque da abordagem, classifica-se como quantitativo, já que os dados podem ser mensurados numericamente, ou seja, pode ser traduzido em números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso

de recursos e de técnicas estatísticas (PEREIRA, 2016). Quanto aos procedimentos técnicos: modelagem e simulação, logo que este método permite a inter-relação simultânea das variáveis pré-definidas afim da obtenção de um sistema que possibilite a solução do problema (MIGUEL, 2018).

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Este trabalho é dividido em cinco seções principais e algumas seções são divididas em outras subseções. A primeira seção refere-se a etapa de introdução, a qual, salienta a importância do uso da energia solar nos dias atuais, e divide-se em definição do tema e do problema de pesquisa, bem como, em objetivos e justificativas. A segunda etapa traz o referencial teórico, em que foram utilizados recursos eletrônicos, dentre eles, o portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o recurso Minha Biblioteca, o qual está no portal do aluno da UFSM, além de sites e portais educacionais e-books e livros.

Na terceira etapa foi utilizado o *software RETScreen* para entender melhor o cenário detalhado de instalação do sistema fotovoltaico e definir as principais características climáticas. Além disso, foram expostas as etapas que compõem a pesquisa, apresentando resumidamente em que local os dados foram coletados e como foram analisados.

Na quarta etapa foi desenvolvida a pesquisa aplicada. Para facilitar a compreensão da subseção detalhamento da estrutura, da seção dos resultados e análises, foi necessário ter em mãos as medidas do local em que a estrutura seria instalada. Estas que foram concedidas pela PROINFRA da UFSM. Primeiramente a intenção do trabalho era fazer o estudo interligando o Centro de Tecnologia ao Refeitório II. Logo verificou-se que devido ao sombreamento em algumas regiões isso não seria viável. Então optou-se em fazer o estudo interligando o passeio do Laboratório de Soldagem ao Refeitório II.

A partir disso a estrutura foi modelada no programa de CAD *SolidWorks*. Os perfis, presilhas e demais componentes foram concedidos por uma empresa especializada em soluções de fixação para painéis fotovoltaicos. Para definir o carregamento, usou-se como base a norma NBR 6123, que trata das forças devidas ao vento em edificações. Foram descosidendo alguns conceitos dessa norma,

tais como, coeficiente de pressão, coeficiente de forma, coeficiente de força e os efeitos aerodinâmicos. A geração da malha, imposição das condições de contorno, análise de tensões e descolamentos foram realizados através de um *software* de elementos finitos.

A TMA adotada foi obtida como sendo o rendimento médio mensal da poupança nos últimos sete anos, tendo como base de dados a Calculadora do Cidadão do Banco Central. Para a inflação foi utilizado a taxa média do histórico dos últimos 10 anos, coletada na Calculadora do Cidadão para o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPC-A) calculado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O projeto e o orçamento do sistema fotovoltaico, da instalação e da manutenção foram realizadas por uma empresa especializada neste ramo, com sede em Lajeado - RS.

As quatro diferentes tarifas de energia elétrica foram obtidas através do endereço eletrônico da Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE). Foram simulados quatro cenários, sendo cada um representando pela respectiva tarifa de energia. Após a coleta e organização dos dados foi possível aplicar os métodos de Engenharia Econômica, sendo eles: VPL, TIR, *Payback* Simples e *Payback* Descontado, calculados com o auxílio do *software Microsoft Excel* e relacionados com o método LCOE. Por fim, na quinta etapa, foram desenvolvidas as conclusões.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

A seção de Resultados e análises foi subdividida em sete subseções. A primeira aborda os dados do local de instalação da estrutura. A segunda traz os carregamentos incidentes segundo alguns conceitos da NBR 6123. A terceira subseção aborda a respeito do detalhamento da estrutura. A quarta explana como foi realizada a simulação numérica. A quinta traz a coleta de dados econômicos. A sexta subseção aborda informações técnicas do sistema fotovoltaico, e por fim na sétima os cálculos são realizados conforme os métodos econômicos previamente estabelecidos.

4.1 DADOS DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA ESTRUTURA

Para desenvolver o projeto estrutural, é necessário ter as medidas que ligam o Centro de Tecnologia ao Refeitório II. A fim de ter em mãos dados mais exatos, entrou-se em contato com a Pró-Reitoria de Infraestrutura da UFSM, a qual disponibilizou a planta baixa com dimensões das calçadas atualizadas, e com isto foi elaborado um desenho simplificado demonstrando a área total compreendida pela estrutura (Apêndice A). Para simplificar a visualização optou-se por dividir a área em 5 setores sendo esses descritos no Quadro 2.

Quadro 2 - Área dos setores

Setor	Área	Unidade	Situação	Descrição
A	83,25	m ²	Sombreada	Parede lateral do prédio do Centro de Tecnologia
B	240,81	m ²	Sombreada	Bicicletário, ala da lateral Sul do Anexo A e do Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA).
C	30,25	m ²	Com incidência solar	Passeio do Laboratório de Soldagem.
D	43,95	m ²	Com incidência solar	Passeio área verde.
E	96,69	m ²	Com incidência solar	Passeio entrada do Restaurante II.

Fonte: Do autor (2019).

Analisando a Figura 5, a velocidade básica do vento considerada na cidade de Santa Maria é de 44m/s. Para determinar a pressão dinâmica incidente na estrutura, é usada a velocidade característica (V_k), sendo que são considerados os fatores topográficos (S_1), influência da rugosidade (obstáculos no entorno da edificação), dimensões da edificação (S_2) e o fator de uso da edificação (que considera a vida útil e o tipo de uso), conforme a Equação 5.

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (5)$$

Onde: V_0 - velocidade básica; S_1 - fator topográfico; S_2 - fator de rugosidade e dimensões da edificação; S_3 - fator estatístico. O fator topográfico S_1 leva em consideração as variações do relevo do terreno e neste caso equivale a um, pois o local em questão é um terreno plano ou fracamente acidentado.

O fator S_2 considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com a altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração. As categorias são definidas conforme o Quadro 3.

Quadro 3 - Definição de categorias para determinação do coeficiente S_2

Categoria	Descrição do ambiente
I	Superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas.
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos de árvores, edificações baixas e esparsas.
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada.
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

As classes definem-se através das dimensões da edificação de acordo com o Quadro 4.

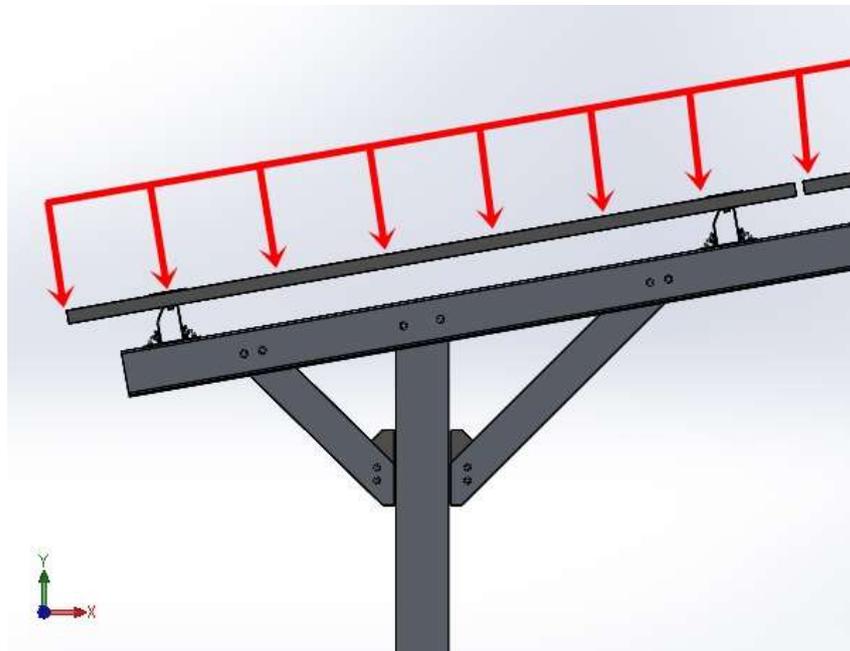
Quadro 4 - Definição de classes de edificação para determinação de S_2 .

Classe	Descrição
A	Maior dimensão da superfície frontal menor ou igual a 20 metros
B	Maior dimensão da superfície frontal entre 20 e 50 metros
C	Maior dimensão da superfície frontal que 50 metros

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

A norma diz a respeito da superfície frontal que atinge a estrutura, no caso deste trabalho corresponde a área útil contemplada pelos painéis solares, sendo cada setor classificado de acordo com a dimensão de maior comprimento, ou seja, no Setor C - 13,75m, Setor D - 43,95m e Setor E - 21m. O carregamento do vento, foi calculado pensando na pior das hipóteses, ou seja, a pressão dinâmica incidindo na superfície normal aos painéis fotovoltaicos, e é possível observar na Figura 6.

Figura 6 - Direção do carregamento.



Fonte: Do autor (2019).

O cálculo de S_2 é obtido pela Equação 6. Onde z é a altura da edificação.

$$S_2 = b \cdot Fr. \left(\frac{z}{10}\right)^p$$

(6)

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos

Categoria	z_g (m)	Parâmetros	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		Fr	1,00	0,98	0,95
III	350	p	0,085	0,09	0,10
		b	0,94	0,94	0,93
IV	420	p	0,10	0,105	0,115
		b	0,86	0,85	0,84
V	500	p	0,12	0,125	0,135
		b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

O fator S_3 é baseado em conceitos estatísticos, e considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação e pode ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores mínimos dos fatores estatísticos

Grupo	Descrição	S_3
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,1
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias.	0,83

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988).

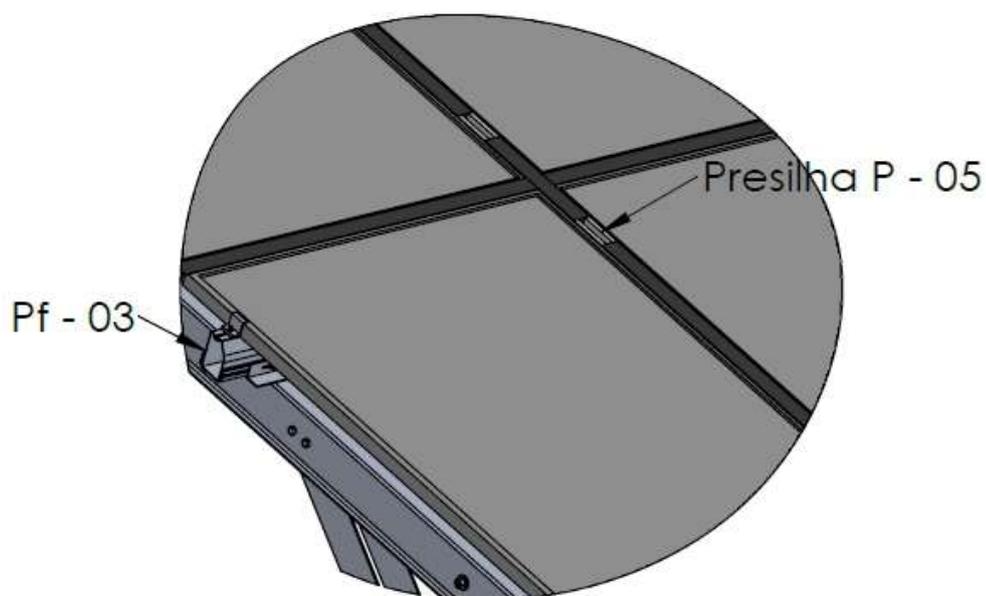
Por fim, para calcular a pressão dinâmica incidente na estrutura, é utilizado a Equação 7.

$$q = 0,613.V_k^2 \quad (7)$$

Para definir o carregamento incidente na estrutura, é necessário saber as dimensões dos painéis fotovoltaicos utilizados no projeto, para posteriormente saber quantos painéis serão usados e, com isso, estipular a área total em cada setor. Na sequência, com a área total e a pressão dinâmica calculada, é possível obter as cargas atuantes. As dimensões dos painéis fotovoltaicos são de 1962mm x 992mm x 35mm.

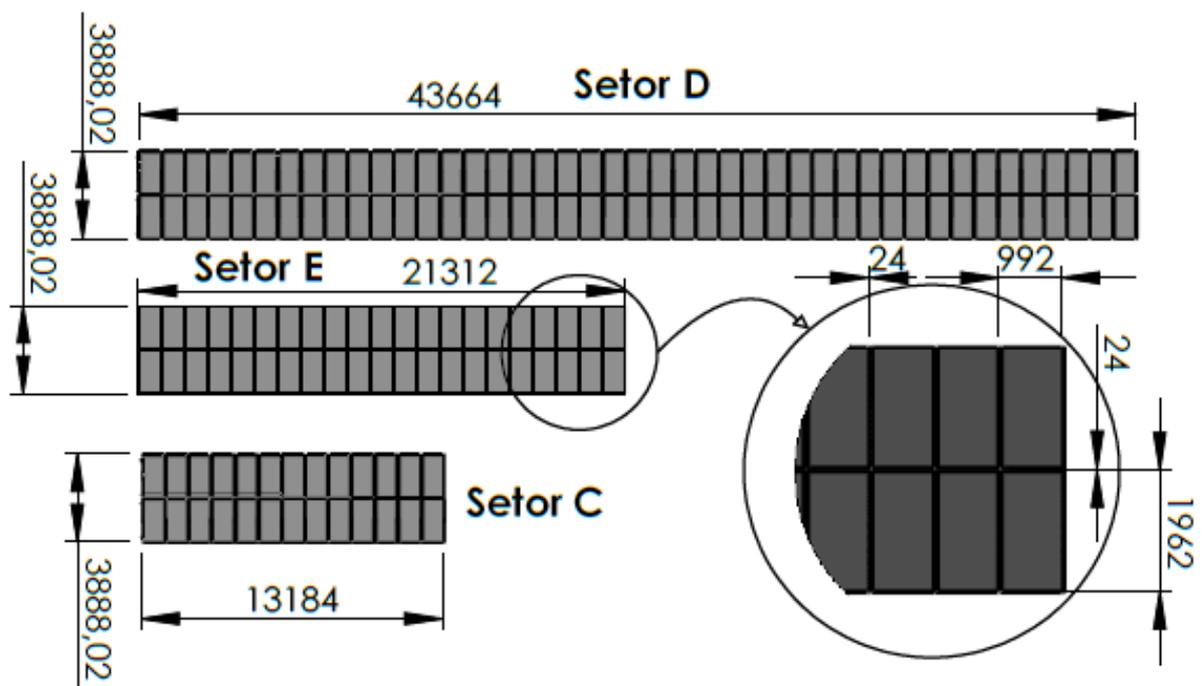
É possível observar que existe uma folga de 24mm entre os posicionamentos dos painéis, isto acontece por que neste local é instalado a presilha (P - 05) para a fixação dos painéis aos perfis (Pf - 03). Essa distância é preenchida por uma borracha com secção transversal em forma de “T” para minimizar os efeitos das intempéries da natureza. Na Figura 6 é detalhada as dimensões de ocupação, dimensões dos painéis e as folgas existente entre eles, sendo todas as cotas em milímetros. Fato observável na Figura 7.

Figura 7 - Borracha de vedação



É importante atentar ao fato de que a calçada tem uma largura de 2200mm, somando as folgas e medidas dos painéis totaliza 3888,02mm. Se fosse realizar o projeto com apenas um painel, não seria possível cobrir toda a superfície da calçada e a viabilidade econômica ficaria comprometida. Por estes motivos, optou-se em usar duas fileiras de painéis. Isto é possível também pelo fato que não há nenhuma construção ou qualquer outro objeto que obstrua recuar os pés de sustentação.

Figura 8 - Dimensões dos setores C, D e E



Fonte: Do autor (2019).

Para os três setores, tem-se S_1 igual a 1. A partir da Tabela 2 tem-se o valor de S_3 equivalendo 0,88. Agora para determinar S_2 , parte-se do pressuposto que os três setores pertencem a Categoria II, segundo o Quadro 3. A partir do Quadro 4, o Setor C é classificado pertencente à Classe A, adotando uma altura máxima de 3347,90mm, e aplicando os valores na Equação 6, o S_2 do Setor C é igual a 0,91. Agora para os Setores D e E, pertencentes a Classe B, conforme ao Quadro 4, já que o comprimento não excede 20m e não ultrapassa 50 m, e a altura máxima é 3347,60mm, aplicando estes valores novamente na Equação 6, conclui-se que S_2 é 0,89.

A partir destes dados, observando as dimensões da Figura 6 e com as Equações 5 e 7 é possível calcular a velocidade e a pressão dinâmica de cada setor. Estes valores foram organizados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos coeficientes e variáveis de cada setor

Variáveis	Setor		
	C	D	E
S_1	1	1	1
S_2	0,91	0,89	0,89
S_3	0,88	0,88	0,88
V_0	44 m/s	44 m/s	44 m/s
V_k	35,23 m/s	34,46 m/s	34,46 m/s
q	760,87 N/m ²	727,96 N/m ²	727,96 N/m ²
Nº de painéis	26	86	42
Área	51,25 m ²	169,76 m ²	82,86 m ²

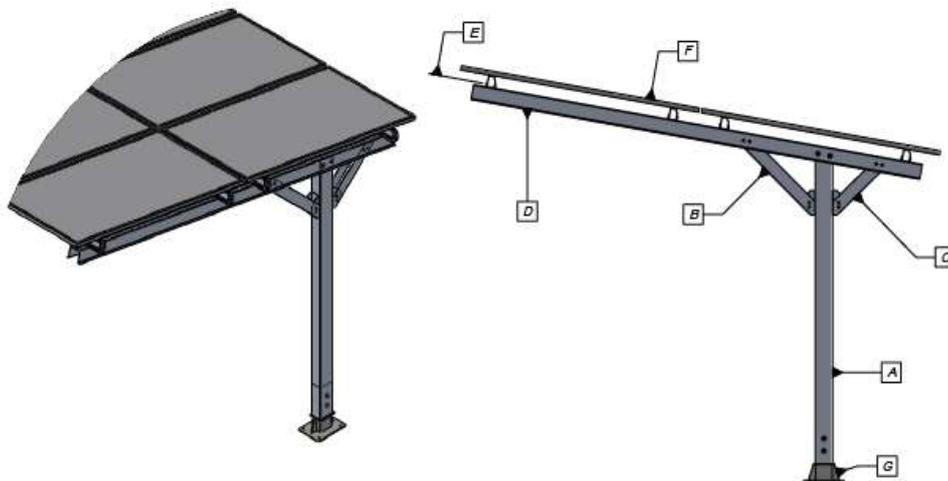
Fonte: Do autor (2019).

4.3 DETALHAMENTOS DA ESTRUTURA

A criação de uma estrutura metálica está relacionada diretamente com a solução estrutural escolhida. O sistema estrutural, o lançamento da estrutura e o sistema de estabilização adotado irão determinar, além da geometria das peças e da escolha dos materiais e, as ligações entre os diversos elementos estruturais (GUARNIER, 2009).

Com o intuito de facilitar o processo de modelamento da estrutura entrou-se em contato com uma empresa especializada em soluções de fixação para painéis fotovoltaicos, a qual disponibilizou seu portfólio de perfis estruturais, perfis de suporte, bases de fixação, presilhas e parafusos para servir como base do projeto. Os arquivos em formato *.sldprt* dos perfis foram importados para o *software* de CAD *SolidWorks* e a partir das dimensões da área da calçada a ser coberta, foi possível arquitetar a estrutura esquematizada na Figura 9.

Figura 9 - Desenho detalhado da estrutura



Fonte: Do autor (2019).

No Quadro 5 são discriminados os componentes e de que material a estrutura é constituída.

Quadro 5 - Componentes com seus respectivos materiais

Recurso Referencial	Componente	Material
A	Pilar (Pf – 01)	Liga de alumínio 6063 - T6
B	Base maior (B – 02)	Liga de alumínio 6063 - T6
C	Base menor (B – 01)	Liga de alumínio 6063 - T6
D	Perfil cartola (Pf – 02)	Liga de alumínio 6063 - T6
E	Perfil de sustentação (Pf – 03)	Liga de alumínio 6063 - T6
F	Painel fotovoltaico 330w	-
G	Pé de Sustentação (Ps - 01)	Aço SAE 1020

Fonte: Do autor (2019).

A escolha do material partiu do fato de que a fabricação dos perfis, as bases e o pilar principal são extrudados e a liga de alumínio 6063 – T6 é a mais empregada em perfis deste tipo. Ela pode ser tratada termicamente, apresenta boa resistência a corrosão e apresenta bom acabamento superficial após a extrusão. A escolha do aço SAE 1020 foi por proporcionar uma boa conformabilidade, soldabilidade e ter bom custo benefício.

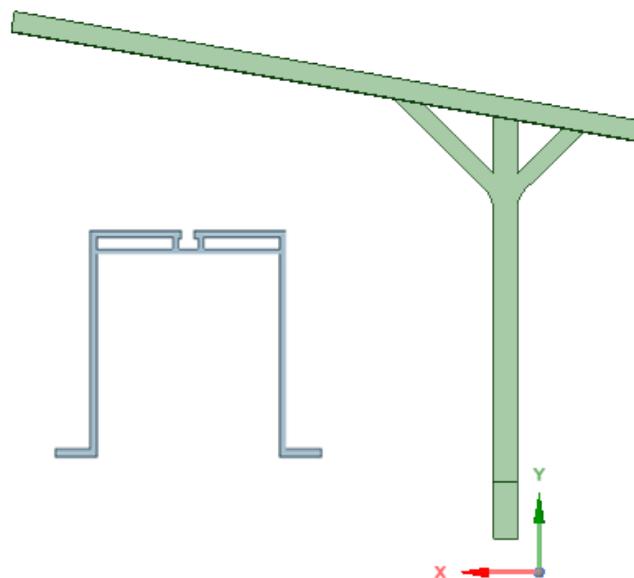
No desenho da Figura 9 estão contidas apenas os perfis de sustentação e a base de apoio. Ficou isenta da imagem os parafusos sextavados, arruelas, porcas, presilhas de fixação dos painéis ao perfil de sustentação e as presilhas de fixação do perfil P - 03 ao perfil cartola. A fim de representar detalhadamente e possibilitar uma boa interpretação da estrutura foi esboçado desenhos representativos que se encontram no Apêndice B deste trabalho.

4.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para realizar uma boa análise em elementos finitos é importante haver um bom planejamento, saber quais os objetivos da análise, identificando os principais modos de falha da estrutura.

Posterior ao modelamento realizado em CAD de todos os componentes da estrutura, a primeira etapa da análise de elementos finitos é a simplificação da geometria considerando apenas os componentes que influenciaram diretamente nos resultados. Isto é, excluindo as geometrias que não são importantes para o modelo, e as quais se mantidas demandariam muito tempo de processamento e não implicariam em resultados significativos. A Figura 10 mostra em detalhes as simplificações realizadas no modelo CAD.

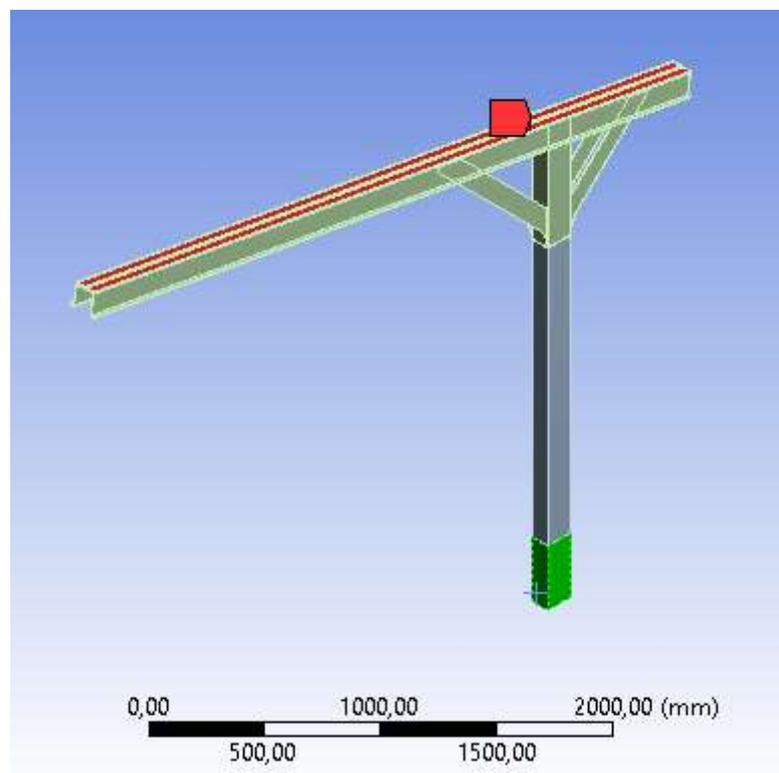
Figura 10 - Simplificação da geometria



Foram retiradas do perfil cartola (Pf – 02) os chanfros e cantos arredondados da secção do perfil, deste e dos demais perfis foram retirados também os furos, parafusos, arruelas, porcas, painéis fotovoltaicos e o pé de sustentação já que está análise visa determinar qual o carregamento máximo que os perfis podem suportar, não dimensionando as uniões parafusadas. Com o intuito de remover pontos de singularidade na estrutura, nos cantos vivos das bases de sustentação B – 01 e B – 02 ao pilar foram adicionados filetes.

O objetivo principal da análise é identificar qual o carregamento máximo que a estrutura suporta. Para isso foram impostas condições de contorno que aproximam o modelo matemático em FEA ao modelo real. A força atuante que o vento faz sobre a estrutura foi determinada a partir de repetidas simulações, até chegar a uma força que desse como resultado uma tensão de escoamento próxima da liga de alumínio 6063 – T6. Depois de algumas iterações, esta foi estimada em 10850N e tem a mesma direção do carregamento da Figura 6, e é representada em vermelho na Figura 11.

Figura 11 - Força atuante do vento sobre os perfis

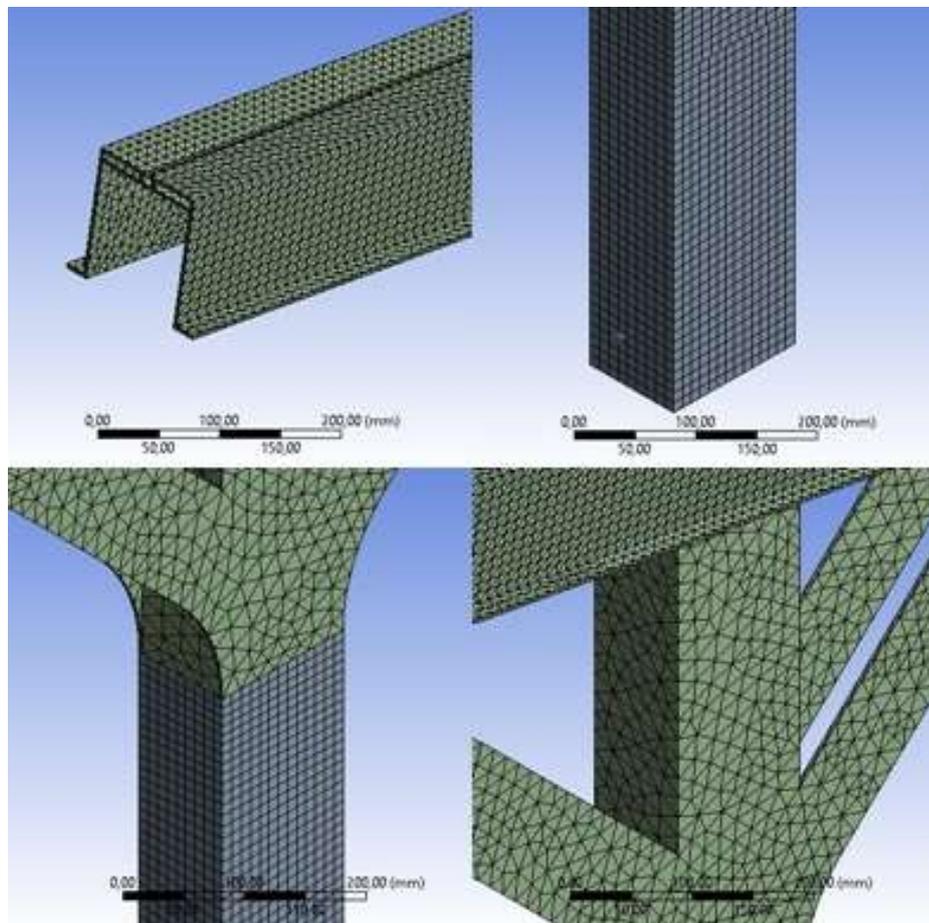


Fonte: Do autor (2019).

As restrições de fixação foram determinadas pelo fato de que o pilar principal é fixado recobrimdo o pé de sustentação, ou seja, nesta região de contato entre o pé e o pilar é imposta uma condição de engaste com restrições de translação nos 3 eixos e rotação nos 3 eixos. Fato representado no *software* como *Fixed Support* e está vinculado as faces internas demonstrado na Figura 9 em verde.

A malha gerada é constituída por 296308 nós e 130732 elementos e pode ser observada na Figura 10. Constituída em grande parte por elementos tetraédricos e hexaédricos.

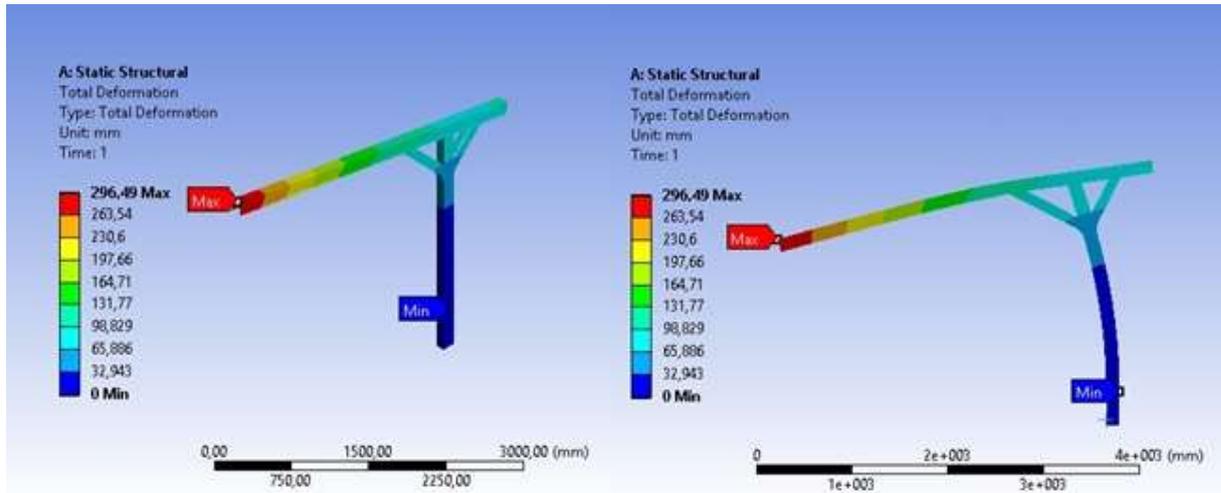
Figura 12 - Detalhes da malha



Fonte: Do autor (2019).

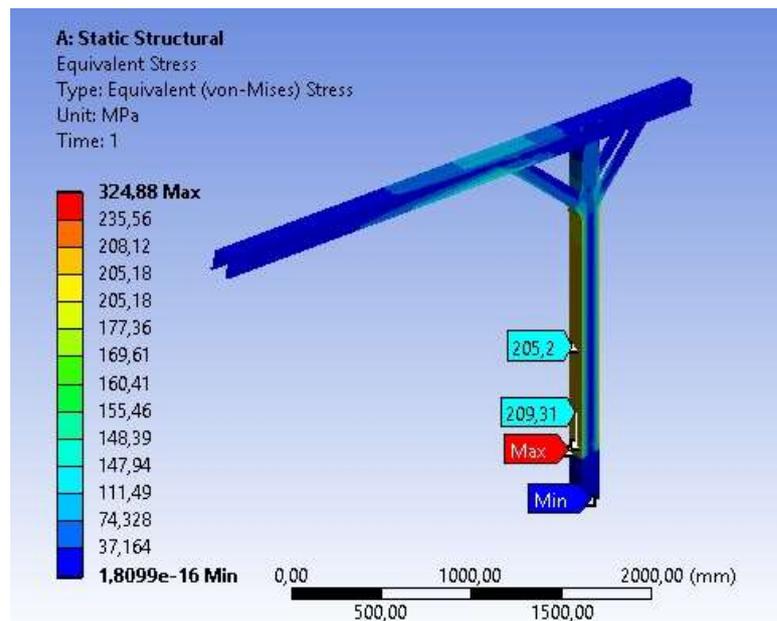
Com as condições de contornos impostas e a malha criada e refinada nas regiões de maiores tensões foi possível determinar as deformações e as tensões resultantes na estrutura, ambos representados na Figura 13 e Figura 14, respectivamente.

Figura 13 – Deformações na estrutura



Fonte: Do autor (2019).

Figura 14 - Tensões na estrutura

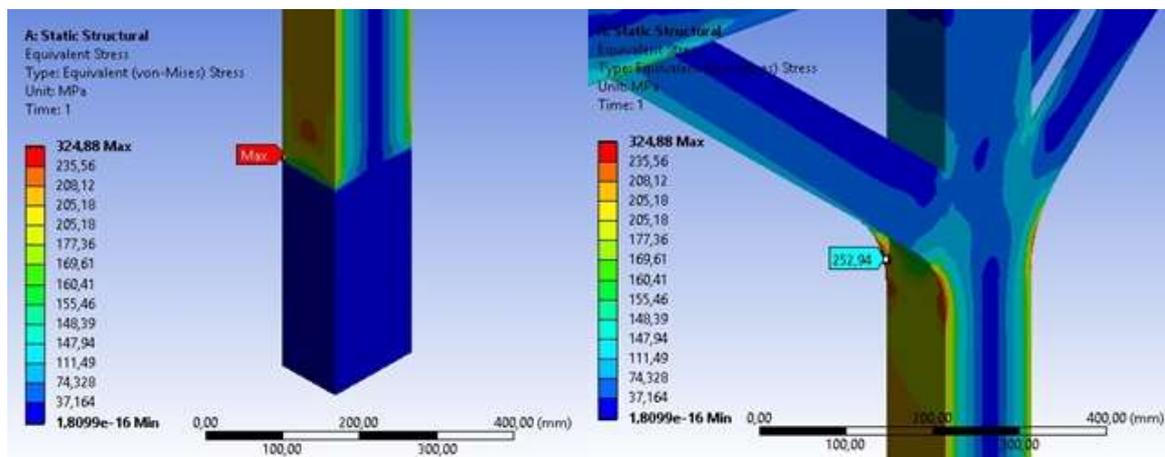


Fonte: Do autor (2019).

Observa-se que as maiores deformações ocorrem nas proximidades da extremidade do perfil cartola (Pf – 02), ficando perto dos 296mm e, as menores deformações, no local onde o pilar é fixado. As maiores tensões de von Mises ocorrem justamente nos filetes de encontro entre a base maior e a base menor com o perfil de sustentação, e nas proximidades do engastamento, verificado na Figura 15. Estas tensões elevadas podem ser desconsideradas do modelo matemático em

comparação com o modelo real, já que os métodos de fixação em ambos os locais serão por uniões parafusadas, e não serão tratadas neste trabalho. A partir destas considerações a maior tensão a ser considerada no projeto é de 209,31MPa, ficando bem próxima da tensão de escoamento do material utilizado na fabricação dos perfis. Segundo a *ASM International* o limite de escoamento da liga de alumínio 6063 T6, é de 214MPa.

Figura 15 - Regiões de maiores tensões



Fonte: Do autor (2019).

Desta forma, conforme os dados da Tabela 4 é possível calcular a força de incidência total no setor C, setor D e setor E multiplicando a pressão dinâmica pela área de abrangência dos painéis. Posteriormente somando esta relação com o peso de cada painel (23,5kg), tem-se o carregamento total em cada setor correspondendo a respectivamente, 44,99kN, 143,41kN e 70,00kN. Sabendo que cada conjunto estrutural suporta um carga máxima de 10,85kN, então cada setor necessitará de no mínimo, 5, 14 e 7 conjuntos de sustentação, respectivamente.

Assim para finalizar esta subseção a totalidade de componentes mecânicos utilizados no projeto foram organizados na Tabela 5.

Com estes dados é possível determinar o custo da estrutura juntamente com a empresa que forneceu os perfis para o desenvolvimento do projeto. O orçamento total de fabricação acrescidos da instalação e aparatos de fixação foi estimado em R\$104.520,00.

Tabela 4 - Quantidade total de componentes

Descrição	Unidade	Setor C	Setor D	Setor E	Total
Pilar (Pf – 01)	un	5	14	7	26
Perfil cartola (Pf – 02)	un	5	14	7	26
Perfil sustentação (Pf-03)	m	56	176	88	32
Base menor (B – 01)	un	10	28	14	52
Base maior (B – 02)	un	10	28	14	52
Pé de Sustentação (Ps - 01)	un	5	14	7	26
Arruela 12 mm	un	30	84	42	156
Parafuso sextavado M12x1,75x120mm	un	30	84	42	156
Parafuso sextavado M10x1,75x25mm	un	40	112	56	208
Parafuso M6x1,00x20mm	un	176	512	256	944
Porca M12x1,75mm	un	30	84	42	156
Porca M6x1mm	un	176	512	256	944
Presilha (P-09)	un	40	112	56	208
Presilha (P-06)	un	8	8	8	24
Presilha (P-05)	un	48	168	80	296

Fonte: Do autor (2019).

4.5 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico foi dimensionado considerando a quantia necessária de placas para cobrir a área compreendida pela estrutura, isto é, 152 placas fotovoltaicas. Este conjunto possui potência nominal de 51,48kWp e irá fornecer em média 5603,2kWh de potência efetiva mensal, custando ao total R\$174.460,86. Neste orçamento estão inclusos os valores do sistema fotovoltaico completo, como o inversor, as placas fotovoltaicas, o valor do serviço de instalação e do projeto elétrico. Todo o dimensionamento técnico foi elaborado por uma empresa especializada.

Para que o sistema opere uniformemente em toda sua vida útil, é necessário realizar manutenções periódicas. A limpeza dos painéis é acessível e realizada semestralmente utilizando água e sabão, a um custo estimado de R\$1800,00. Este custo é proporcional ao número de placas. Outro aparelho analisado que gera despesas é o inversor. Esse que é um dispositivo que converte um sinal elétrico de

corrente contínua em corrente alternada. O inversor apresenta vida útil de 10 anos, e logo recomenda-se a troca nesse período de tempo. No total é necessário 1 inversor, com um custo aproximado de troca avaliado em R\$45.312,55. O sistema apresenta também 4 dispositivos contra surtos (DPS), a um valor de R\$125,00 cada um. O DPS é um aparato fundamental para assegurar que descargas elétricas atmosféricas e sobretensões não atinjam o equipamento e conseqüentemente a rede elétrica, e possui manutenção corretiva. A troca desses, conforme dados históricos da empresa, é realizada a cada 5 anos.

Com estas informações é possível fazer o registro dos valores referentes as manutenções para cada equipamento, uma vez que são utilizados nos cálculos de viabilidade econômica. A Tabela 6 dispõem estes valores.

Tabela 5 - Valores correspondentes as manutenções preventivas e corretivas

Manutenção	Frequência (em anos)	Custo (R\$)
Limpeza das placas	0,5	1.800,00
Troca do dispositivo contra surto	5	500,00
Troca do inversor	10	45.312,55

Fonte: Do autor (2019).

4.6 COLETA DE DADOS

4.6.1 Consumo de energia elétrica

Como citado na subseção 3.3 a aplicação deste trabalho é na região entre o Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA) e o Refeitório II da UFSM. No entanto os dados de consumo de energia elétrica foram obtidos do prédio da Reitoria da própria UFSM. Isto é possível, pois toda rede da UFSM é interligada. No período de 08/03/2015 à 25/02/2016, com o auxílio de um aparelho de medição instalado no prédio da Reitoria, foi possível coletar dados acerca do consumo de energia elétrica. O aparelho utilizado registrou 68.004 medidas, em um intervalo de 15 minutos entre uma medição e outra. O consumo máximo observado foi de 124,117kWh e ocorreu às 14:00 horas do dia 25/01/2016. O consumo mínimo foi de

1,996kWh e ocorreu às 14:00 do dia 14/05/2015. Na Tabela 7 pode-se observar o valor de consumo médio diário na reitoria (BIEGER, 2018).

Tabela 6 - Dados de consumo de energia elétrica da Reitoria

Consumo médio diário (kWh)	
Março/2015	29,071
Abril/2015	21,963
Maió/2015	19,916
Junho/2015	21,032
Julho/2015	21,256
Agosto/2015	20,344
Setembro/2015	17,930
Outubro/2015	18,539
Novembro/2015	20,619
Dezembro/2015	21,821
Janeiro/2016	26,060
Fevereiro/2016	26,378

Fonte: Do autor (2019).

A partir das informações da Tabela 7 é possível calcular o consumo médio diário de energia, correspondendo a 21,875kWh, e que as medidas de maior consumo de energia ocorrem nos meses de solstício de verão.

4.6.2 Tarifa de energia elétrica

As tarifas de energia elétrica são regulamentadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e homologadas através de resolução. Desde o ano de 2015, as contas de energia passaram a trazer uma novidade: o Sistema de Bandeiras Tarifárias, que apresenta as seguintes modalidades: verde, amarela e vermelha. Estas cores indicam se haverá ou não acréscimo no valor da energia a ser repassada ao consumidor final, em função das condições de geração de eletricidade (ANEEL, 2019). Cada modalidade apresenta as seguintes características:

- a) bandeira verde - condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;

- b) bandeira amarela - condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$0,01 para cada quilowatt-hora (kWh) consumidos;
- c) bandeira vermelha - Patamar 1 - condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$0,03 para cada quilowatt-hora (kWh) consumido;
- d) bandeira vermelha - Patamar 2 - condições ainda mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$0,05 para cada quilowatt-hora (kWh) consumido.

A UFSM pertence à tarifa horária azul, subgrupo A4, que engloba unidades consumidoras com fornecimento em tensão superior a 2,3kV e inferior a 25kV.

4.6.3 Taxa de juros do investimento e inflação

Para os cálculos econômicos deste trabalho foi utilizado como base para a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) histórico dos últimos seis anos na variação 51 da poupança. Foi adotado este período de tempo devido ao fato de não ser mais possível realizar depósitos em outra variação da poupança, conforme Lei implementada em 4 de maio de 2012, nº 12.703 (BRASIL, 2012). A Tabela 8 mostra os valores referentes ao período. Através destes dados é possível inferir que há um rendimento total de 56,30% entre os anos de 2012 e 2018. Utilizando a fórmula da Taxa de Juros Equivalente, tem-se que o rendimento mensal de 0,53306%.

Tabela 7 - Histórico do rendimento da poupança

Ano	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012
Rendimento da poupança (ao ano)	4,62%	5,78%	8,17%	8,34%	7,26%	6,46%	5,47%

Fonte: Do autor (2019).

Para determinar a correção monetária foi realizada a coleta de dados dos últimos 10 anos, levando em consideração o período de 2008 até 2018, seguindo como modelo de correção o Índice Nacional de Preços ao Consumidor (IPC-A) do IBGE. Para o cálculo da inflação anual foi utilizado a ferramenta Calculadora do Cidadão (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2018). A Tabela 9 expõem esses valores.

Tabela 8 - Histórico da inflação

Ano	Inflação pelo IPC-A (ao ano)
2018	3,7455%
2017	2,9473%
2016	6,2881%
2015	10,6735%
2014	6,4076%
2013	5,9108%
2012	5,8386%
2011	6,5031%
2010	5,9091%
2009	4,3120%
2008	5,9023%

Fonte: Do autor (2019).

Neste período, é obtido uma inflação total de 86,74%. A partir do cálculo pela equação da Taxa de Juros Equivalente, obtém-se uma média anual de 5,448%.

4.7 VIABILIDADE ECONÔMICA

Preliminarmente aos cálculos de viabilidade econômica foram definidos quatro cenários conforme a classificação tarifária de cada bandeira. Para realizar os cálculos foi utilizado o *software* de edição de planilha eletrônica *Microsoft Excel*. Nos cálculos foram considerados o valor total do investimento (estrutura mais sistema fotovoltaico), os custos de manutenção, os preços das bandeiras tarifárias, acrescido o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) de alíquota de 30%, a correção monetária e a TMA. As duas últimas anteriormente calculas, e seus valores representam, respectivamente, 5,448% ao ano e 0,53306% ao mês. Na Tabela 10 é representado a bandeira e seu correspondente cenário.

Tabela 9 - Distribuição dos cenários

Bandeira	Cenário
Verde	A
Amarela	B
Vermelha Patamar 1	C
Vermelha Patamar 2	D

Fonte: Do autor (2019).

A partir disso, para gerar a receita do desempenho do conjunto multiplicou-se o rendimento médio mensal do sistema fotovoltaico pela tarifa de energia elétrica acrescida do custo tarifário da bandeira no período, bem como, do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) incidente. Os custos de manutenção e a tarifa de energia elétrica foram corrigidos pela inflação média anual. O horizonte da análise foi estipulado em 300 meses, conforme a vida útil do sistema fotovoltaico. Na Tabela 11 estão representados os cálculos de *Payback* Simples, *Payback* Descontado, VPL e TIR e função de cada cenário estabelecido. A planilha de cálculo encontra-se no Apêndice C, utilizou-se como exemplo o Cenário D.

Tabela 10 - Resultados dos cálculos de viabilidade econômica

Cenário	PBD (meses)	PBS (meses)	VPL (R\$)	TIR (%)
A	80	67	601.827,08	1,65
B	79	65	620.923,93	1,68
C	75	63	659.385,57	1,73
D	73	62	665.936,99	1,77

Fonte: Do autor (2019).

Com relação aos dados expostos, é possível verificar que todos os cenários são viáveis economicamente, visto que a TIR encontrada dos quatro cenários ficaram acima da TMA definida em 0,53306% ao mês. Comparando o Cenário A com o Cenário D nota-se a influência nos resultados pela diferença unitária paga de R\$ 0,05 pelo kW de energia consumida, entre a bandeira tarifária verde e a vermelha de patamar 2.

Outro método importante nos cálculos econômicos é o LCOE (*Levelized Cost of Energy*). Como citado no referencial teórico esses são cálculos importantes no momento de precificar o investimento, pois consideram em valor presente todos os custos esperados ao longo da vida útil do projeto (investimento, operação e manutenção). Para realizar estes cálculos primeiramente é preciso estipular o valor do fator de recuperação de capital (CRF) a partir da Equação 3, o qual leva em consideração a TMA de 0,53306% ao mês e o tempo de vida útil do equipamento, especificado em 300 meses. Após isso, é possível obter o LCOE, conforme a Equação 4. A Tabela 12 apresenta os valores calculados.

Tabela 11 - Resultados do LCOE

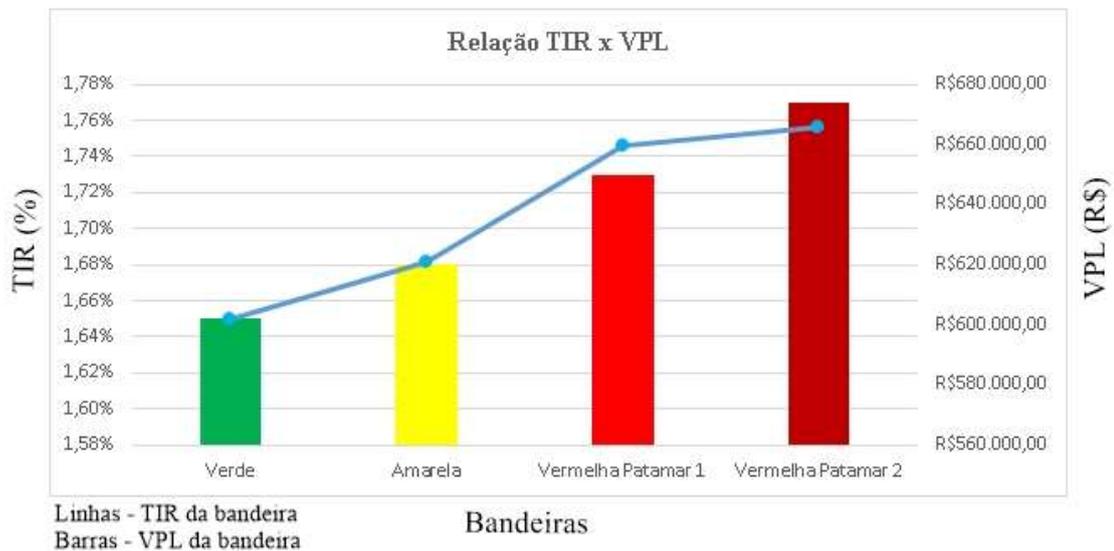
Cenário	Rendimento Anual (kWh)	CRF	Custo total do SV mais estrutura (R\$)	Custo de manutenção (R\$)	LCOE (R\$/kWh)
A, B, C e D	5603,21	0,006877909	278.980,26	432.471,65	0,2583

Fonte: Do autor (2019).

Com estas informações é possível inferir que os valores de LCOE são viáveis economicamente, visto que, a relação R\$/kWh obtida é inferior as quatro tarifas de energia elétrica vigentes.

Baseado nos cálculos previamente apresentados infere-se que os quatro cenários são viáveis economicamente, considerando uma vida útil de 25 anos de todo o conjunto. Nessa projeção de investimento é notória a influência da bandeira tarifária nos indicadores, ou seja, quanto maior o custo pago pela energia elétrica, maiores são os índices de Valor Presente Líquido e maior a Taxa Interna de Retorno. Para uma melhor visualização foi elaborada a Figura 16.

Figura 16- Relação de TIR E VPL

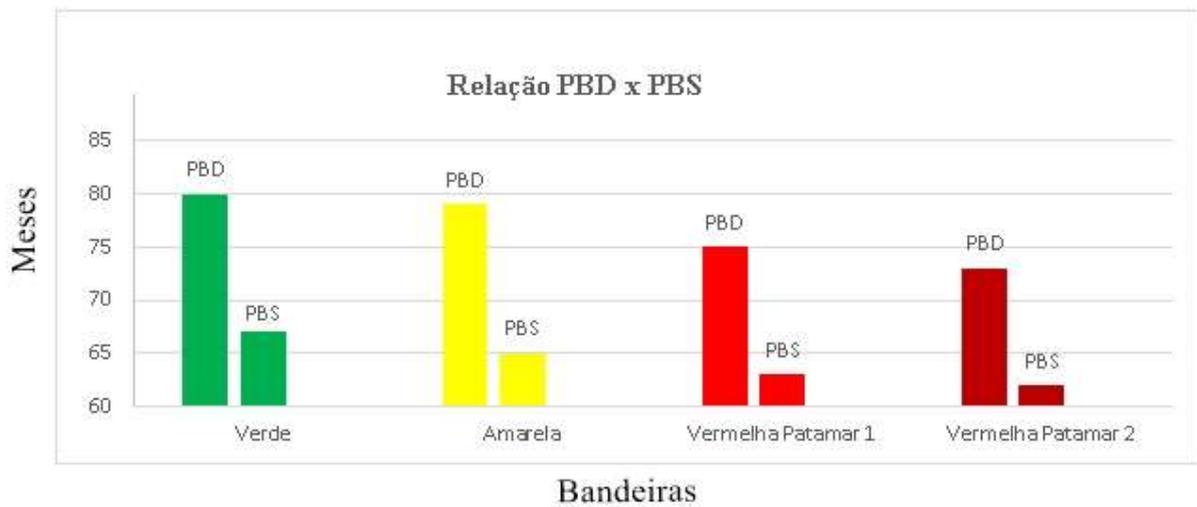


Fonte: Do autor (2019).

Nos quatro cenários foram obtidos TIR maior que a TMA proposta, e um VPL maior que zero comprovando a potencialidade do investimento. Também é possível notar o crescimento linear entre ambos os gráficos.

Outro parâmetro ser considerado na análise é o *Payback* Simples e o *Payback* Descontado. Novamente é visível a notoriedade que as bandeiras influem nos resultados, conforme a Figura 17.

Figura 17 - Relação *Payback* Descontado e *Payback* Simples



Fonte: Do autor (2019).

Com base na Figura 15 infere-se que o período de retorno no maior espaço de tempo para o *Payback* Descontado é 80 meses, e o retorno no menor espaço de tempo ocorre em 73 meses. Este tempo é razoavelmente interessante, levando em conta a vida útil do equipamento e o valor investido. Já para o *Payback* Simples é no período de 67 meses e no período de 63 meses.

5 CONCLUSÃO

A forte dependência do ser humano aos combustíveis derivados do petróleo, correlacionada à importância deste na econômica mundial, faz-se necessário a busca por alternativas energéticas que sejam viáveis economicamente e que ao mesmo tempo não poluam significativamente o meio ambiente. É visando este propósito que o presente trabalho foi elaborado. O objetivo seguiu a linha de duas premissas. A primeira elaborar o projeto técnico de uma estrutura para comportar um sistema fotovoltaico. A segunda verificar a viabilidade econômica simulando a instalação do conjunto no campus da Universidade Federal de Santa Maria, mais especificamente ligando as proximidades do NAFA ao Refeitório II.

A partir das opções de perfis estruturais e os demais aparatos de fixação cedidos pela empresa citada foi possível modelar uma solução que atendesse as necessidades do problema proposto. Para tal foram utilizados diversos recursos do *software* de modelagem 3D, *SolidWorks*, e outro específico de análise estrutural. A partir de algumas simplificações da norma NBR 6123, foi possível definir o carregamento atuante na estrutura. Após algumas iterações foi chegado a conclusão que o carregamento máximo suportado por cada conjunto estrutural foi de 10850N. As tensões máximas da estrutura ficaram bem próximas da tensão de escoamento do material, sendo que as tensões máximas obtidas na simulação foram desconsideradas, visto que o modelo proposto em FEA não condiz exatamente com o modelo real. Os resultados de deformação, apesar de apresentarem valores um pouco elevados, são valores condizentes, uma vez que são valores da deformação total da estrutura.

O sistema de geração de energia solar foi dimensionado a partir do número de placas utilizadas no projeto. Já os dados de consumo energéticos foram obtidos do prédio da Reitoria. Após isso foi analisado a viabilidade econômica de quatro cenários de consumo, sendo cada cenário representado por uma bandeira tarifária. Para isso foram usados métricas de Engenharia Econômica, sendo elas, VPL, TIR, *Payback* Simples e *Payback* Descontado, juntamente com o método LCOE de custo de geração de energia. Todos os cenários mostraram-se viáveis economicamente. Os melhores indicadores foram obtidos a partir do cenário 4 (bandeira vermelha de patamar 2), resultado já esperado, visto que é a tarifa com maior valor pago por kWh consumida. O VPL deste cenário é de R\$665.936,99, correspondendo a 10,65%

superior, se comparado com o menos viável economicamente. A diferença da TIR entre ambos é de 0,12 pontos percentuais. O método LCOE apresentou um valor relativamente alto. Isto ocorreu devido ao alto custo da estrutura que comporta o sistema de geração de energia, mas mesmo assim, o índice LCOE (R\$/kWh) é inferior em 47,06% se comparado com a bandeira com o menor custo do kWh consumido.

É possível otimizar a estrutura usando outras opções de perfis, ou até mesmo desenvolver uma solução diferente usando alguns princípios de metodologia de desenvolvimento de projeto e produto. Isso não foi contemplado nessa pesquisa pelo fato de que não havia tempo para aplicar a metodologia. Em trabalhos futuros, seria importante adentrar com mais detalhes à norma NBR 6123. Analisar outros cenários, correlacionando TMA, e junto com isso, incluir orçamentos de sistemas fotovoltaicos de empresas diferentes. Aplicar o projeto em outras localidades do campus da UFSM seria igualmente interessante, visto que a intenção inicial da pesquisa era fazer o estudo entre o Centro de Tecnologia e o Refeitório II, cobrindo assim uma área maior se comparado com a analisada.

Este trabalho buscou correlacionar diversos segmentos estudados no curso de Engenharia Mecânica, dentre eles podem ser citados: projeto mecânico, análise de tensões e deformações, desenho técnico, desenho digital, interpretação de normas técnicas, sistemas de geração de energia e análise econômica, para poder solucionar um problema inicialmente proposto. Por último, vale salientar que este trabalho cumpriu com o objetivo geral inicialmente proposto.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. 1. ed. São Paulo: Érica, 2000.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa Nº 482**. Brasília, 2012.
- ANDRADE, A. D. D. D.; MEDEIROS, C. A. Análise de estabilidade estrutural para uma treliça metálica içadora de aduelas de concreto para pontes. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 7., 2016, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: ABCEM, 2016.
- ANTONIK, L. R. **Matemática financeira, instrumentos financeiros para a tomada de decisão em Administração, Economia e Contabilidade**. 1. ed. São Paulo: Saraiva, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. **Introdução ao projeto fotovoltaico**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão**. 2018. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores>. Acesso em: 21 mai. 2019.
- BANDEIRAS Tarifárias. **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL**, Brasília, 24 mai. 2019. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias/>>. Acesso em: 13 mai. 2019.
- BARBIERI, J. C. Taxa interna de retorno: controvérsias e interpretações. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 131-142, dez. 2007.
- BEZERRA, L. D. S. **Análise técnica e econômica para implantação de um sistema fotovoltaico residencial**. 2018. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- BIEGER, K. L. **Viabilidade econômica de microgeradores eólicos para a reitoria da Universidade Federal de Santa Maria**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- BLAKERS, A. Sustainable energy options. **Asian Perspective**, v. 39, n. 4, p. 559-590, out./dez. 2015.
- BLANK, L.; TARQUIN, A. **Engenharia econômica**. 6. ed. São Paulo: AMGH, 2008.

BRAÇAL, T. P.; BERTOLINO JR., R. **Determinação da força crítica de flambagem de tubos cilíndricos de paredes finas**. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA, 5., 2012, Ilha Solteira. **Anais [...]**. Ilha Solteira: ABCEM, 2012.

BRANKER, K.; PEARCE, J.; PATHAK, M. J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4470-4482, out. 2011.

BRASIL. Lei nº 12.703, de 7 de agosto de 2012. Altera o art. 12 da Lei nº 8.177, de 1º de março de 1991, que estabelece regras para a desindexação da economia e dá outras providências, [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 46, 08 ago. 2012.

BRAUN, P.; JARDIM, C. D. S.; RÜTHER, R. Análise da contribuição energética de sistemas fotovoltaicos integrados em edificações: Aeroporto Internacional de Florianópolis, um estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL, 9., ENCONTRO LATINO-AMERICANO, DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 2007, Ouro Preto. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2007.

BUDYNAS, R.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 8. ed. São Paulo: AMGH Ltda., 2011. 1084 p.

CAMPOS, M. H. *et al.* Study of technical feasibility and the payback period of the invested capital for the installation of a grid-connected photovoltaic system at the library of the Technological Federal University of Paraná. **International Journal of Energy and Environment**, Curitiba, v. 5, n. 6, p. 643-654, 2014.

CASTRO, E. C. D. Procedimento para análise numérica com software ansys de uma viga em flexão com a forma t. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiás, v. 14, n. 1, p. 43-49, jan. 2018.

COLLINS, J. A. **Projeto mecânico de elementos de máquina - uma perspectiva de prevenção de falha**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

DANTAS, F. F. D.; CARVALHO, P. G. G. D.; ALVES, D. L. Árvore fotovoltaica: análise, simulação e montagem de um protótipo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: Abens, 2018.

DAS, S. *et al.* Life cycle economic analysis of stand-alone solar pv system in India – a relative study. **World Journal of Engineering**, Burdwan, v. 12, n. 1, p. 37-44, jan. 2015.

DUTRA, J. C. D. N. *et al.* Uma análise do panorama das regiões Missões e Noroeste do estado do Rio Grande do Sul sob o prisma da energia eólica e solar fotovoltaica como fontes alternativas de energia. **Revista Paranaense do Desenvolvimento**, Curitiba, v. 34, n. 124, p. 225-243, jan. 2013.

EHRlich, P. J.; MORAES, E. A. D. **Engenharia econômica: avaliação e seleção de projetos de investimentos**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

- EICK, G. **Viabilidade econômica e financeira de uma pequena central hidrelétrica no Brasil**. 2010. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um primeiro curso em elementos finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- FORMENTON, A. B. K.; SOARES, G. F. P. Um estudo de redução de tensões em uma viga automotiva através do método dos elementos finitos. **Perspectiva**, Erechim, v. 36, n. 134, p. 187-196, jun. 2012.
- GARCÍA-OLIVARES, A. *et al.* **A global renewable mix with proven technologies and common materials**. Barcelona: Elsevier, 2011.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas S.A., 1987.
- GUARNIER, C. R. F. **Metodologias de detalhamento de estruturas metálicas**. Ouro Preto: UFOP, 2009. 376 p.
- HEERDT, M. L.; LEONEL, V. **Metodologia científica**. 5. ed. Palhoça: UnisulVirtual, 2007.
- KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 1092-1105, mai. 2016.
- LENGRUBER, T. Z. G. **Filmes nanoestruturados de óxido de zinco para aplicação em conversão fotovoltaica de energia**. 2014. 140f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.
- LEE, J.; CHANG, B.; AKTAS, C.; GORTHOLA, R. (2016). Economic feasibility of campus-wide photovoltaic systems in New England. **Renewable Energy**. 99. 452-464. 10.1016/j.renene.2016.07.009.
- MARINOSKI, D. L.; SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. *In*: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1., 2004, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: UFSC, 2004.
- MATRIZ ENERGÉTICA e Elétrica. **Empresa de Pesquisa Energética - EPE**, Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 22 ago. 2018.
- MEDEIROS, L. H. C. LCOE, LACE e ICB: análise comparativa dos custos de capital e o&m da geração de energia e a curva do pato (duck chart). **Linkedin**, [S. l.], 13 mar. 2017. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/lcoe-lace-e-icb-an%C3%A1lise-comparativa-dos-custos-de-om-c%C3%A2mara-medeiros/>. Acesso em: 10 out. 2018.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 226 p.

MIRLISENNA, G. Curso básico de simulação estrutural utilizando o ANSYS Workbench. **IESSS**, [S. l.], set. 2018. Disponível em: <https://esss.eadbox.com/ng/student/courses/curso-basico-de-simulacao-estrutural-utilizando-o-ansys-workbench/lectures/a-aplicacao-da-analise-por-elementos-finitos-na-area-estrutural>. Acesso em: 21 set. 2018.

MONDAL, M. A. H. M.; ISLAM, A. K. M. Potential and viability of grid-connected solar PV system in Bangladesh. **Renewable Energy**, Bangladesh, v. 36, n. 6, p. 1869-1874, jun. 2011.

NASCIMENTO, C. A. D. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21f. Monografia (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

NASCIMENTO, L. P. **Elaboração de projeto de pesquisa**. São Paulo: Cengage Learning, 2012.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas**. Brasília: Câmara Dos Deputados, 2017. 46 p.

NEVES, H. B. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR): um estudo de caso**. 2015. 139f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas, Belo Horizonte, 2015.

NOWAK, S.; FRANKL, P. Solar photovoltaic energy. **International Energy Agency**, [S. l.], 2014. p. 44.

PEREIRA, B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p.

PEREIRA, J. M. **Manual de metodologia científica**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Edição própria, 2014.

RAMADHAN, M.; NASEEB, A. The cost benefit analysis of implementing photovoltaic solar system in the state of Kuwait. **Renewable Energy**, v. 36, n. 4, p. 1272-1276, abr. 2011.

RGE. 2019. Disponível em: <https://www.rge-rs.com.br/institucional/quem-somos/a-rge/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 09 mar. 2019.

RIGO, R. M. M. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos na reitoria da UFSM**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

SANTOS, J. B.; JABBOUR, C. J. C. Adoção da energia solar fotovoltaica em hospitais: revisando a literatura e algumas experiências internacionais. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 972-977, jul./set. 2013.

SCHROEDER, J. T. *et al.* O custo de capital como taxa mínima de atratividade na avaliação de projetos de investimento. **Revista Gestão Industrial**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 33-42, 2005.

SEBASTIÃO, J. R. **Dopagem de silício monocristauno pela transmutação com neutrons**. 1992. 132f. Dissertação (Mestre em Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1992.

SILVA, G. T. M. M. **Dimensionamento e análise de viabilidade econômica de usina fotovoltaica em Nova Iguaçu – RJ**. 2015. 165f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SIQUEIRA, L. M. D. **Estudo do dimensionamento e da viabilidade econômica de microgerador solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2015. 52f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.

SORDI, G. **Dimensionamento da viga principal de uma ponte rolante**. 2016. 60f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

SOUZA, C. S. G. D.; OLIVEIRA, C. A. D. Administração financeira – fundamentos e um modelo prático: estudos Globo / Departamento de Efeitos Especiais. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 12., 2016, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: CNEG & INOVARSE, 2016.

TORRES, R. **Matemática financeira e engenharia econômica: a teoria e a prática**. 2004. 94f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Matemática) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

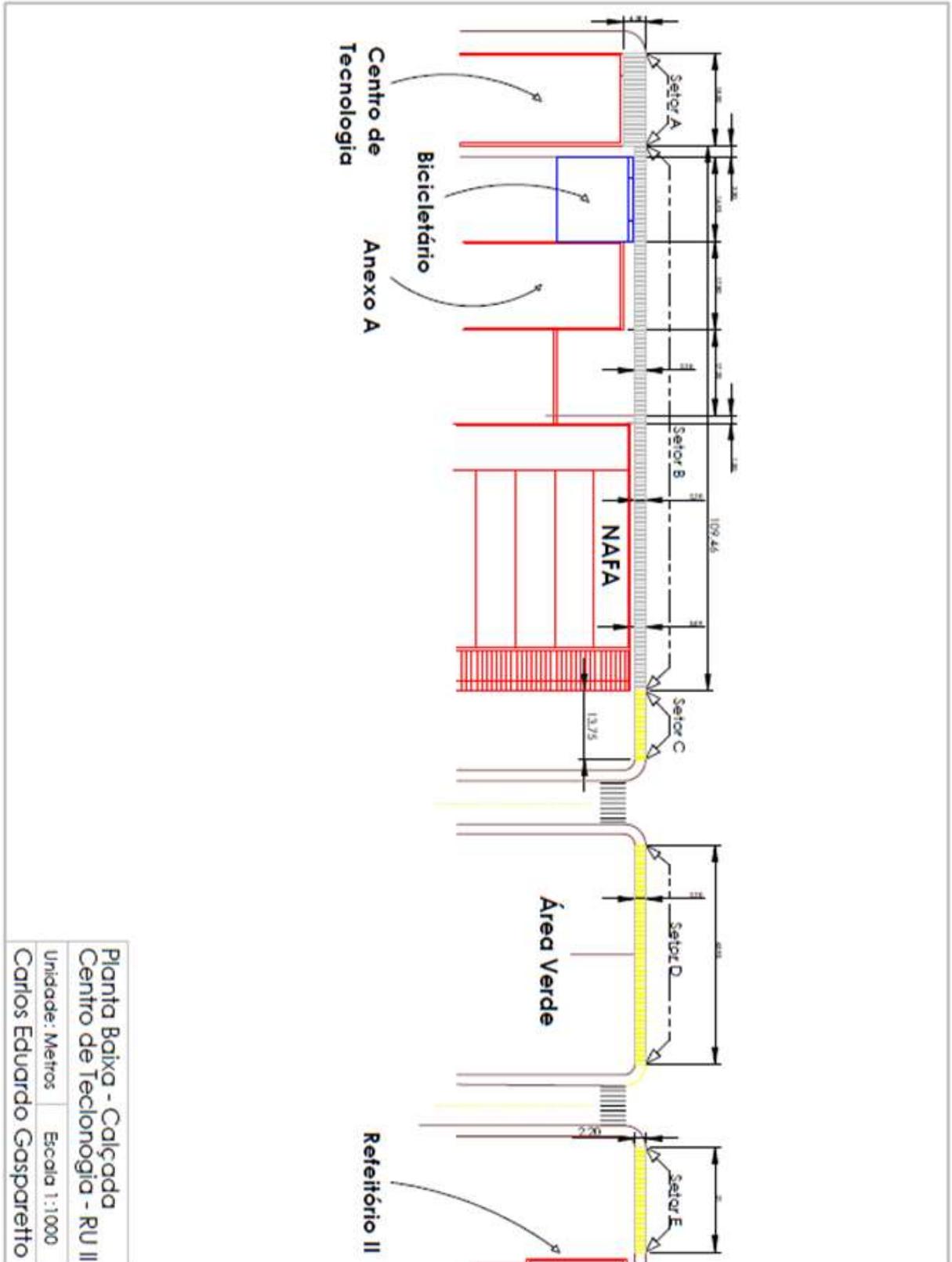
VALE, A. M. *et al.* Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida”. **Energy Policy**, Juiz de Fora, v. 108, p. 292-298, set. 2016.

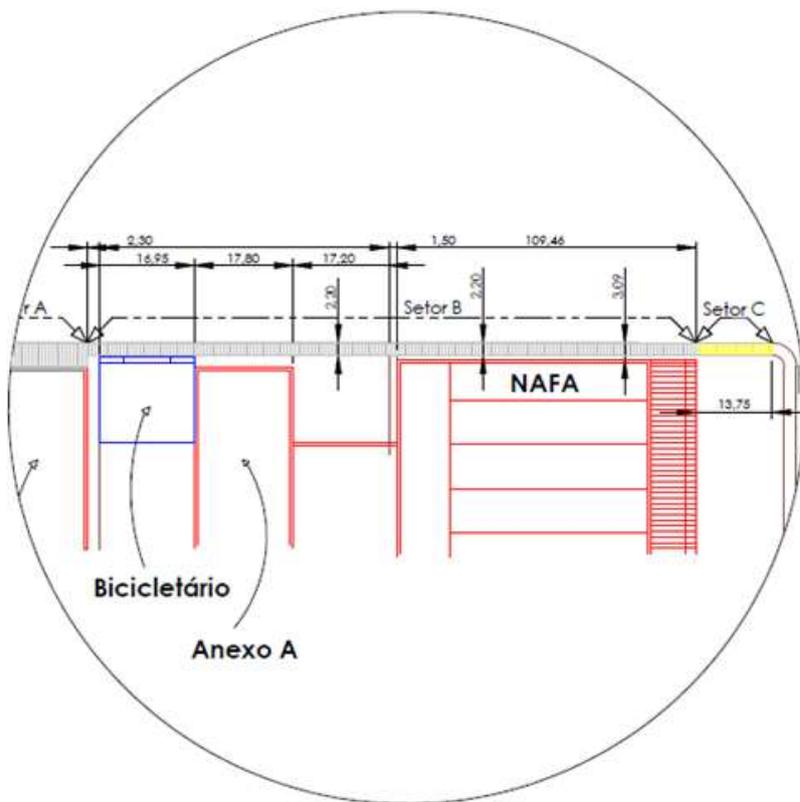
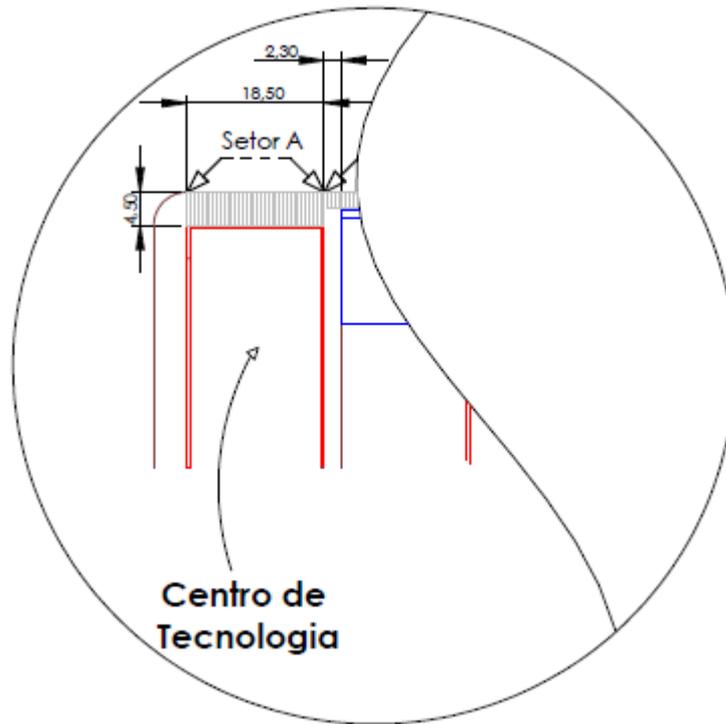
VARELLA, F.; GOMES, R. D. M.; JANUZZI, G. M. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: panorama da atual legislação**. Campinas: International Energy Initiative, 2009.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica**. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

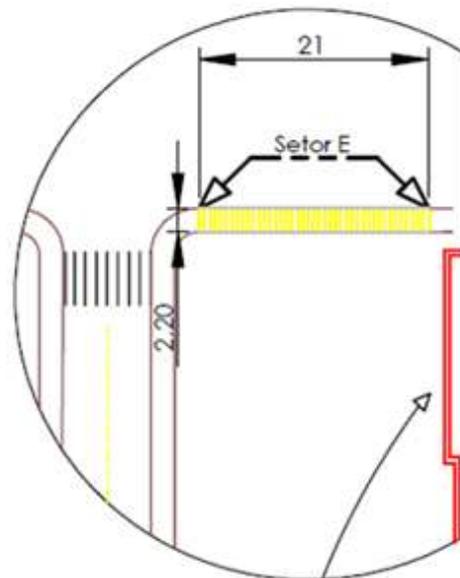
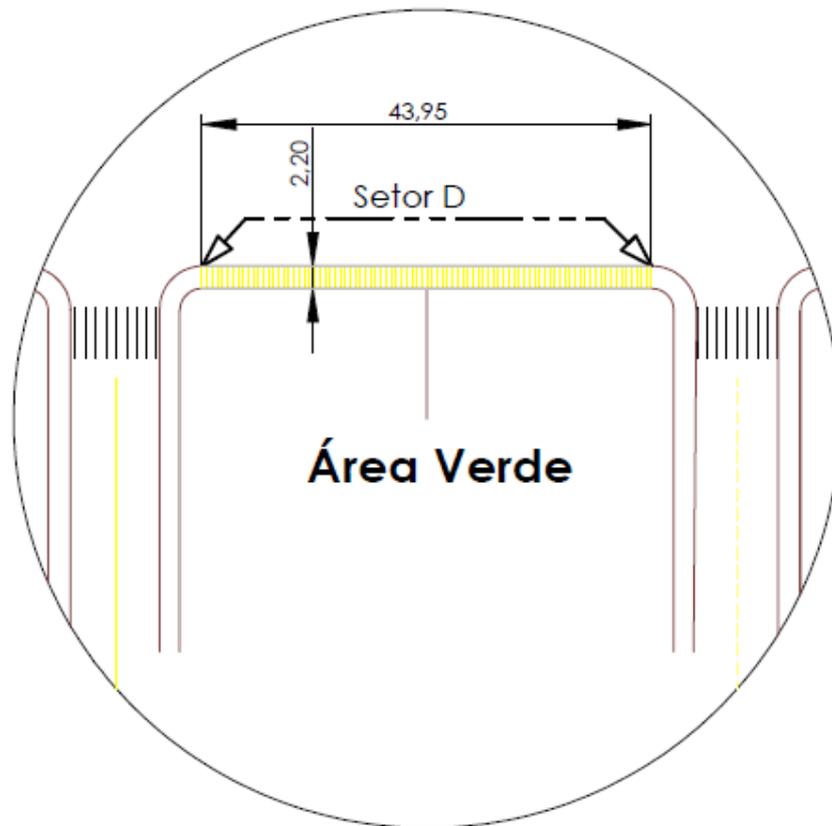
ZOMER, C. D. **Megawatt Solar: geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em meio urbano e conectada à rede elétrica**. Estudo de caso: Edifício Sede da Eletrosul, Florianópolis - Santa Catarina. 2010. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

APÊNDICE A - ÁREA ABRANGENTE DA ESTRUTURA



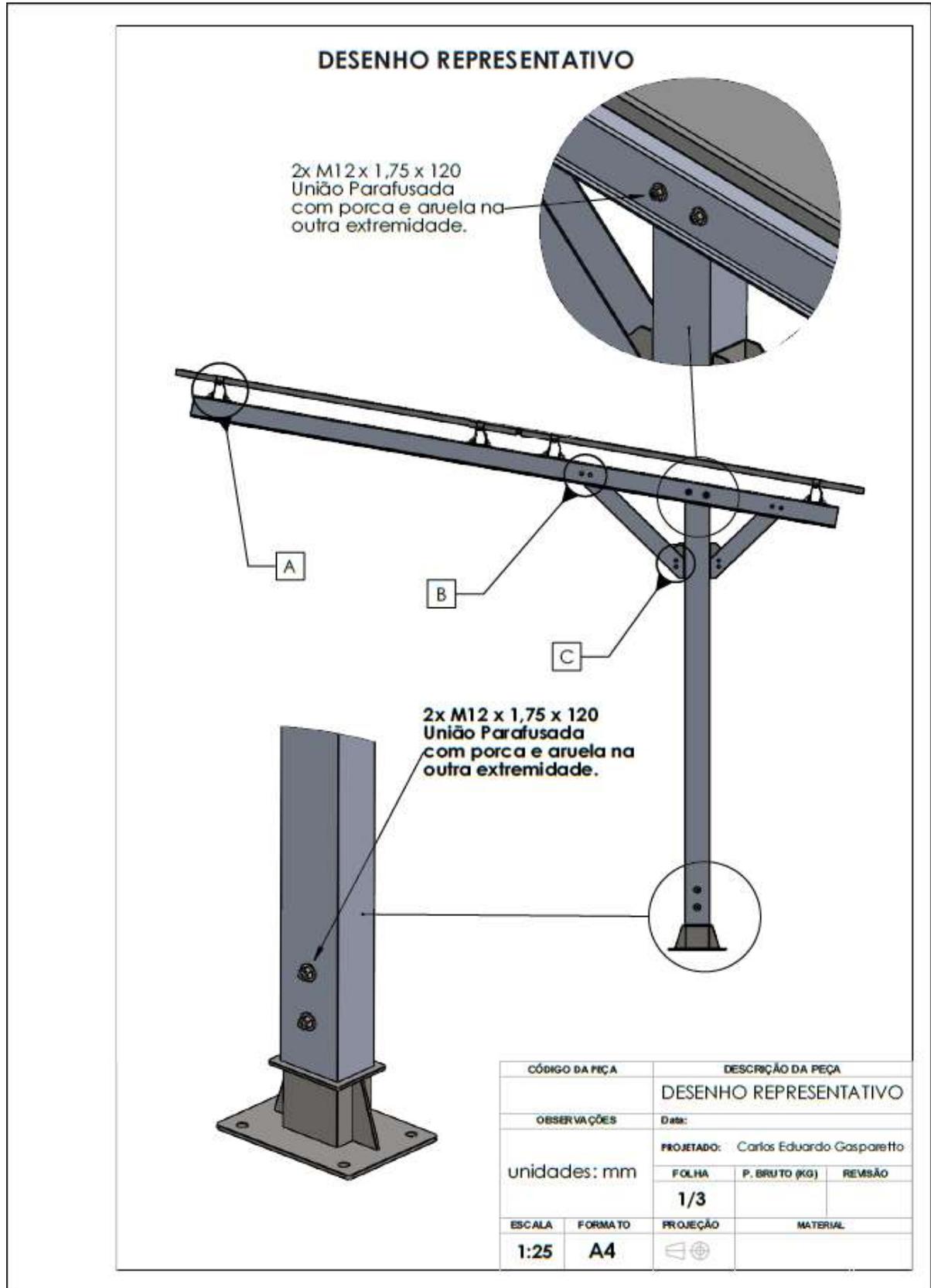


Planta Baixa - Calçada
Centro de Tecnologia - RU II
Unidades: Metros | Escala 1:1000
Carlos Eduardo Gasparetto

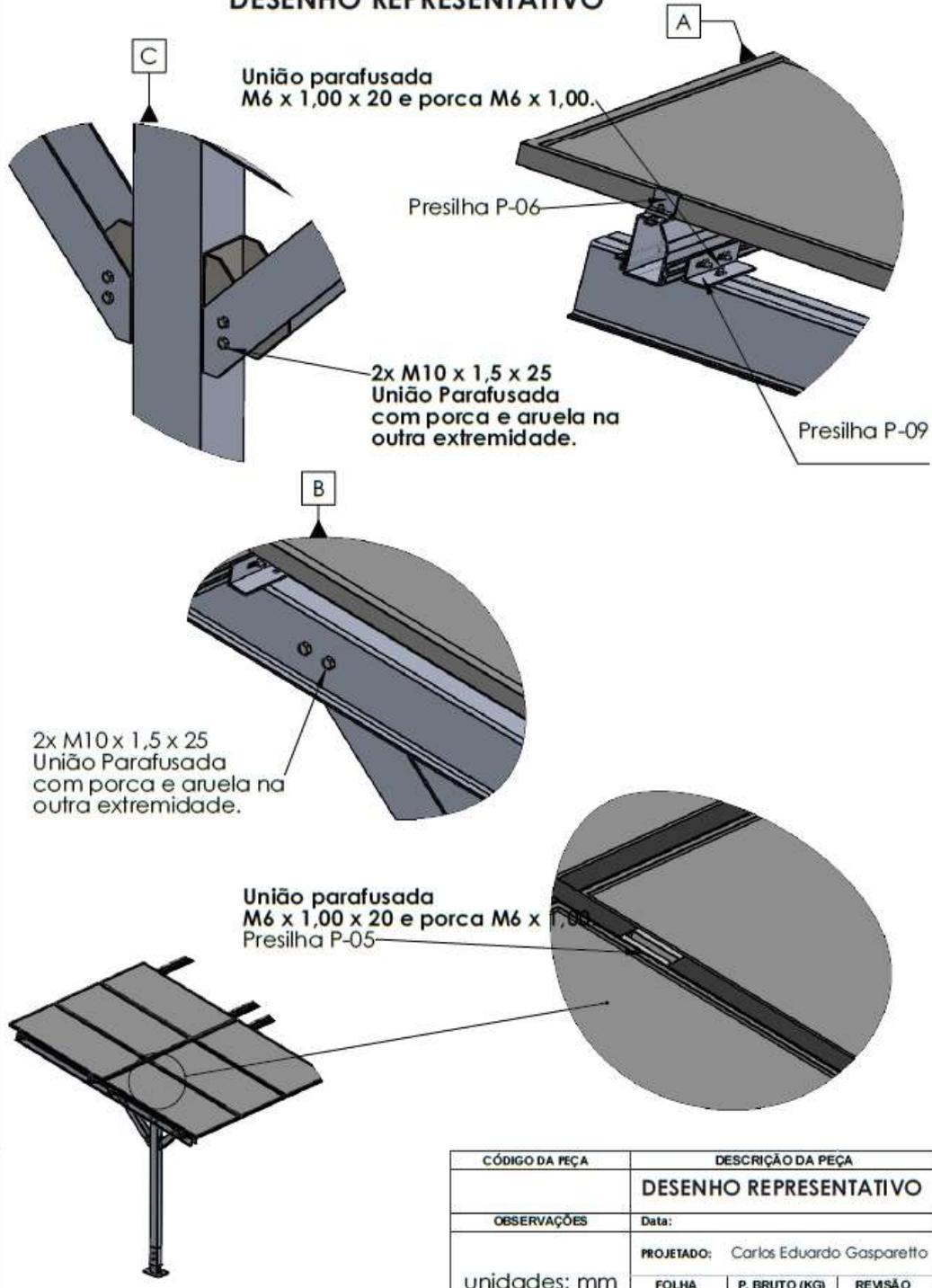


Planta Baixa - Calçada
Centro de Tecnologia - RU II
Unidades: Metros Escala 1:1000
Carlos Eduardo Gasparetto

APÊNDICE B - DESENHOS REPRESENTATIVO

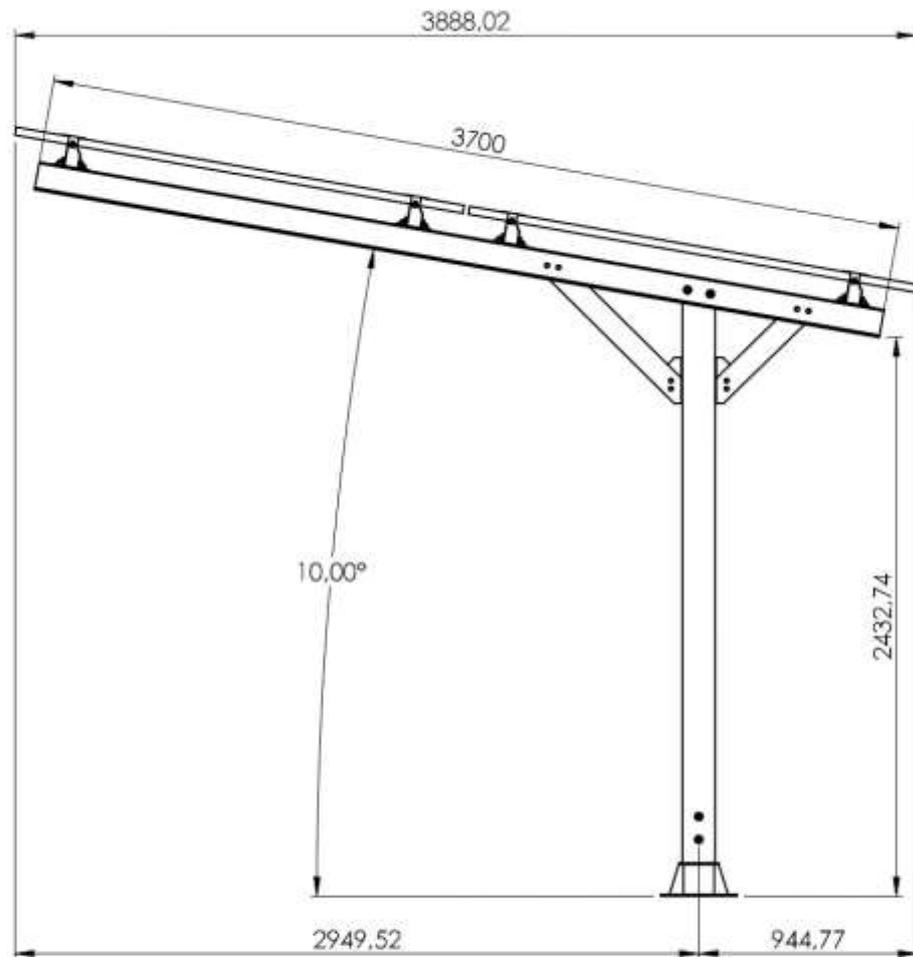


DESENHO REPRESENTATIVO



CÓDIGO DA PEÇA		DESCRIÇÃO DA PEÇA	
		DESENHO REPRESENTATIVO	
OBSERVAÇÕES		Data:	
unidades: mm		PROJETADO: Carlos Eduardo Gasparetto	
		FOLHA	P. BRUTO (KG)
		2/3	
ESCALA	FORMATO	PROJEÇÃO	MATERIAL
1:25	A4		

DESENHO REPRESENTATIVO



CÓDIGO DA PEÇA		DESCRIÇÃO DA PEÇA		
		Dimensões Principais		
OBSERVAÇÕES		Data:		
unidades: mm		Carlos Eduardo Gasparetto		
		FOLHA	P. BRUTO (KG)	REVISÃO
		3/3		
ESCALA	FORMATO	PROJEÇÃO	MATERIAL	
1:25	A4			

APÊNDICE C - CENÁRIO D

VERMELHA PATAMAR 2											
Período	Período	Consumo	Cenário 4								
o	o	KW	Manutenção	Receita	Líquido	PD	Payback	TIR	VPL		
0	0	0	R\$ -		-R\$ 278.980,86	-R\$ 278.980,86	-R\$ 278.980,86	-R\$ 278.980,86	-R\$ -	-R\$ 278.980,86	
1	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 274.640,58	-R\$ 274.617,44	-98,44%	-R\$ 274.640,58		
2	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 270.323,32	-R\$ 270.254,03	-86,69%	-R\$ 270.323,32		
3	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 266.028,94	-R\$ 265.890,61	-72,34%	-R\$ 266.028,94		
4	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 261.757,34	-R\$ 261.527,19	-60,09%	-R\$ 261.757,34		
5	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 257.508,40	-R\$ 257.163,77	-50,37%	-R\$ 257.508,40		
6	0	662	R\$ 1.800,00	R\$ 4.363,42	R\$ 2.563,42	-R\$ 255.025,46	-R\$ 254.600,36	-45,14%	-R\$ 255.025,46		
7	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 250.821,45	-R\$ 250.236,94	-37,85%	-R\$ 250.821,45		
8	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 246.639,74	-R\$ 245.873,52	-32,50%	-R\$ 246.639,74		
9	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 242.480,20	-R\$ 241.510,11	-28,29%	-R\$ 242.480,20		
10	0	662	R\$ -	R\$ 4.363,42	R\$ 4.363,42	-R\$ 238.342,71	-R\$ 237.146,69	-24,88%	-R\$ 238.342,71		
58	4	662	R\$ -	R\$ 5.403,06	R\$ 5.403,06	-R\$ 54.259,81	-R\$ 15.483,48	-0,18%	-R\$ 54.259,81		
59	4	662	R\$ -	R\$ 5.403,06	R\$ 5.403,06	-R\$ 50.311,54	-R\$ 10.080,42	-0,12%	-R\$ 50.311,54		
60	4	662	R\$ 2.848,01	R\$ 5.403,06	R\$ 2.555,05	-R\$ 48.454,34	-R\$ 7.525,36	-0,09%	-R\$ 48.454,34		
61	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 44.333,45	-R\$ 1.825,78	-0,02%	-R\$ 44.333,45		
62	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 40.234,40	R\$ 3.873,80	0,04%	-R\$ 40.234,40		
63	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 36.157,09	R\$ 9.573,38	0,10%	-R\$ 36.157,09		
64	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 32.101,40	R\$ 15.272,96	0,16%	-R\$ 32.101,40		
65	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 28.067,22	R\$ 20.972,54	0,21%	-R\$ 28.067,22		
66	5	662	R\$ 2.351,20	R\$ 5.699,58	R\$ 3.348,39	-R\$ 25.709,79	R\$ 24.320,32	0,24%	-R\$ 25.709,79		
67	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 21.718,28	R\$ 30.020,51	0,29%	-R\$ 21.718,28		
68	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 17.747,93	R\$ 35.720,09	0,34%	-R\$ 17.747,93		
69	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 13.798,63	R\$ 41.419,67	0,39%	-R\$ 13.798,63		
70	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 9.870,28	R\$ 47.119,25	0,43%	-R\$ 9.870,28		
71	5	662	R\$ -	R\$ 5.699,58	R\$ 5.699,58	-R\$ 5.962,76	R\$ 52.818,83	0,47%	-R\$ 5.962,76		
72	5	662	R\$ 2.351,20	R\$ 5.699,58	R\$ 3.348,39	-R\$ 3.679,35	R\$ 56.167,21	0,50%	-R\$ 3.679,35		
73	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 399,02	R\$ 62.179,59	0,54%	R\$ 399,02		
74	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 4.455,77	R\$ 68.191,97	0,58%	R\$ 4.455,77		
75	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 8.491,00	R\$ 74.204,34	0,61%	R\$ 8.491,00		
76	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 12.504,83	R\$ 80.216,72	0,65%	R\$ 12.504,83		
77	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 16.497,38	R\$ 86.229,09	0,68%	R\$ 16.497,38		
78	6	662	R\$ 2.480,23	R\$ 6.012,38	R\$ 3.532,15	R\$ 18.830,49	R\$ 89.761,24	0,70%	R\$ 18.830,49		
79	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 22.780,81	R\$ 95.773,62	0,74%	R\$ 22.780,81		
80	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 26.710,18	R\$ 101.785,99	0,77%	R\$ 26.710,18		
81	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 30.618,72	R\$ 107.798,37	0,80%	R\$ 30.618,72		
82	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 34.506,53	R\$ 113.810,74	0,83%	R\$ 34.506,53		
83	6	662	R\$ -	R\$ 6.012,38	R\$ 6.012,38	R\$ 38.373,73	R\$ 119.823,12	0,85%	R\$ 38.373,73		
84	6	662	R\$ 2.480,23	R\$ 6.012,38	R\$ 3.532,15	R\$ 40.633,58	R\$ 123.355,27	0,87%	R\$ 40.633,58		
85	7	662	R\$ -	R\$ 6.342,34	R\$ 6.342,34	R\$ 44.669,86	R\$ 129.697,61	0,90%	R\$ 44.669,86		
86	7	662	R\$ -	R\$ 6.342,34	R\$ 6.342,34	R\$ 48.684,73	R\$ 136.039,94	0,92%	R\$ 48.684,73		
87	7	662	R\$ -	R\$ 6.342,34	R\$ 6.342,34	R\$ 52.678,32	R\$ 142.382,28	0,95%	R\$ 52.678,32		
88	7	662	R\$ -	R\$ 6.342,34	R\$ 6.342,34	R\$ 56.650,73	R\$ 148.724,62	0,97%	R\$ 56.650,73		
280	23	662	R\$ -	R\$ 14.910,81	R\$ 14.910,81	R\$ 605.956,50	R\$ 1.681.054,88	1,76%	R\$ 605.956,50		
281	23	662	R\$ -	R\$ 14.910,81	R\$ 14.910,81	R\$ 609.303,55	R\$ 1.695.965,68	1,76%	R\$ 609.303,55		
282	23	662	R\$ 6.151,02	R\$ 14.910,81	R\$ 8.759,79	R\$ 611.259,44	R\$ 1.704.725,47	1,76%	R\$ 611.259,44		
283	23	662	R\$ -	R\$ 14.910,81	R\$ 14.910,81	R\$ 614.571,09	R\$ 1.719.636,28	1,76%	R\$ 614.571,09		
284	23	662	R\$ -	R\$ 14.910,81	R\$ 14.910,81	R\$ 617.865,18	R\$ 1.734.547,09	1,76%	R\$ 617.865,18		
285	23	662	R\$ -	R\$ 14.910,81	R\$ 14.910,81	R\$ 621.141,80	R\$ 1.749.457,90	1,76%	R\$ 621.141,80		
286	23	662	R\$ -	R\$ 14.910,81	R\$ 14.910,81	R\$ 624.401,04	R\$ 1.764.368,70	1,76%	R\$ 624.401,04		
287	23	662	R\$ -	R\$ 14.910,81	R\$ 14.910,81	R\$ 627.643,01	R\$ 1.779.279,51	1,76%	R\$ 627.643,01		
288	23	662	R\$ 6.151,02	R\$ 14.910,81	R\$ 8.759,79	R\$ 629.537,49	R\$ 1.788.039,30	1,76%	R\$ 629.537,49		
289	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 632.921,20	R\$ 1.803.768,42	1,76%	R\$ 632.921,20		
290	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 636.286,97	R\$ 1.819.497,54	1,76%	R\$ 636.286,97		
291	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 639.634,89	R\$ 1.835.226,66	1,76%	R\$ 639.634,89		
292	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 642.965,06	R\$ 1.850.955,77	1,77%	R\$ 642.965,06		
293	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 646.277,57	R\$ 1.866.684,89	1,77%	R\$ 646.277,57		
294	24	662	R\$ 6.488,59	R\$ 15.729,12	R\$ 9.240,53	R\$ 648.213,28	R\$ 1.875.925,42	1,77%	R\$ 648.213,28		
295	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 651.490,75	R\$ 1.891.654,54	1,77%	R\$ 651.490,75		
296	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 654.750,84	R\$ 1.907.383,66	1,77%	R\$ 654.750,84		
297	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 657.993,65	R\$ 1.923.112,78	1,77%	R\$ 657.993,65		
298	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 661.219,26	R\$ 1.938.841,90	1,77%	R\$ 661.219,26		
299	24	662	R\$ -	R\$ 15.729,12	R\$ 15.729,12	R\$ 664.427,76	R\$ 1.954.571,02	1,77%	R\$ 664.427,76		
300	24	662	R\$ 8.290,97	R\$ 15.729,12	R\$ 7.438,15	R\$ 665.936,99	R\$ 1.962.009,16	1,77%	R\$ 665.936,99		