UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SHARLENE PEREIRA PENICHE
STEPHANNI CRISTINNE FERRAREZI

ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPACTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO VIAS SOFTWARES ETAP E MATPOWER: PLANTA ATUAL E EXPANSÃO

CURITIBA
2018

SHARLENE PEREIRA PENICHE
STEPHANNI CRISTINNE FERRAREZI

ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPACTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO VIAS SOFTWARES ETAP E MATPOWER: PLANTA ATUAL E EXPANSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Dra. Elizete Maria Lourenço.

CURITIBA
2018

TERMO DE APROVAÇÃO

SHARLENE PEREIRA PENICHE
STEPHANNI CRISTINNE FERRAREZI

ESTUDO DE VIABILIDADE DE IMPACTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO VIAS SOFTWARES ETAP E MATPOWER: PLANTA ATUAL E EXPANSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Professora Dra. Elizete Maria Lourenço
Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR

_____

Eng. Luiz Antônio Belinaso
Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR

_____

Dr. Rafael Martins
Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR

Curitiba, 26 de Novembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

“Agradeço primeiramente a Deus por ter me proporcionado força e saúde para chegar até aqui e ter colocado pessoas especiais nesta caminhada, também agradeço a minha tia Jandira que é meu alicerce e sempre me apoiou e incentivou a estudar, sendo um grande exemplo de dedicação e amor, a Mirian, por ser minha prima, amiga e incentivadora em todos os momentos.

A Bel e ao Andi, por estarem me apoiando e ajudando no possível e por trazerem ao mundo o Min e o Beni, alegrias na minha vida.

Ao Du, por ser meu primo, amigo e incentivador, sempre que pode, e a Dani e Danielzinho, por mesmo distantes estarem torcendo por mim.

Aos amigos que fiz durante a faculdade que puderam tornar a caminhada mais leve. Em especial, Amanda, Luiz e Marcelle.

A Stephanni por ter sido minha dupla durante essa difícil jornada e por seu exemplo de força, coragem e competência. A nossa orientadora Elizete por ser essa pessoa excepcional e professora, por ter aceitado a tarefa de nos orientar. A banca, Luiz Antonio Belinasso e Rafael Martins pelas considerações e sugestões apresentadas.

Ao meu pai, Américo e minha mãe Antonia (in memorian) por me ajudarem no possível e não me impedir de viver meus sonhos.

Aos meus irmãos (Nati, Harry e Rodrigo) e minha sobrinha Barbará por torcerem por mim mesmo distantes.”

Sharlene

“Agradeço primeiramente a mim, pela coragem e força de mudar de curso, mesmo com todos dizendo o contrário. A força de ter cursado um curso integral e trabalhado em toda a jornada acadêmica, mesmo com alguns docentes, quase todas as vezes em que precisei de auxilio, dizendo que não era problema deles, sem fazer questão de tentar ajudar ou conversar. Agradeço por cada palavra, pois todas elas me fortaleceram e permitiram chegar onde estou e a concluir esse trabalho.

Agradeço aos meus pais, que apesar de todos os seus problemas, sempre me deram força e se preocuparam, da maneira como conseguiram, possibilitando minha contínua jornada de 7 anos dentro da UFPR. À minha mãe,

Marta, por todas batalhas para me trazer até aqui e ao meu pai que me acolheu desde meus 3 anos. À minha avó Aparecida, pela força de querer viver e mostrar sua eterna preocupação por mim, mesmo estando doente. E a todos os familiares que me deram força ao longo do tempo.

Agradeço ao Lucas de Moura Ribas e Marcelle Zatoni pelo convite para participar do DAEL em 2014, grandes amigos que levarei para vida toda. Ano turbulento, com uma gestão pequena, mas o começo da mudança. Oportunidade essa que abriu grandes portas para o desenvolvimento de minhas habilidades com diversas organizações de eventos, visitas técnicas, participação da atlética e aprendizado no gerenciamento de pessoas. Agradeço todas as pessoas que passaram por minha jornada no DAEL (Helena, Mylena, Naga, Morgana, Gab, Andressa, Munhoz, Raphael), por todos os conselhos e aprendizados. Sempre vesti a camisa desse time e por um tempo considerei a minha segunda família. Agradeço também a todos do diretório que no momento que mais precisei, demonstraram que somente estão com as pessoas por interesse. Vocês me ensinaram, principalmente, a escolher melhor quem anda ao meu lado.

Agradeço a todos que me auxiliaram nas crises de ansiedade e atualmente, crises de pânico. Agradeço em especial à minha atual namorada, Bianca Martins, por todas as palavras de conforto e noites mal dormidas em suas tentativas de me acalmar, as quais seguia, com dor e desespero. Aproveitando o momento, peço aqui que a Universidade abra espaço e dê valor para esse problema, pois há muitos discentes passando por isso e não é dada a devida importância ao assunto. Há necessidade desse cuidado já que o ambiente acadêmico proporciona e potencializa esses sentimentos aos discentes. Seja pelo método de avaliação, professores ou o próprio ambiente universitário e social.

Obrigada à DGA Engenharia pela oportunidade de ter me chamado para o primeiro estágio na área, em 2015, me auxiliando a ter conhecimento técnico e prático, pouco proporcionado em sala de aula, e mostrando o mundo das obras civis, o qual me apaixonei. Obrigada por todas as oportunidades desde então e pelas condições para terminar esse trabalho. Obrigada à EGNEX por disponibilizar todos os documentos e ideias para a conclusão deste trabalho.

Agradeço à Sharlene, por ter aceitado ser minha dupla nesse trabalho de conclusão de curso. Foi um longo caminho e você trilhou grande parte do curso

junto a mim. Obrigada por sua persistência, dedicação, fé e auxilio nos piores momentos da minha vida. Agradeço também à sua família que me acolheu por diversos dias para a conclusão do TCC.

Agradeço a nossa orientadora e professora Dra. Elizete Maria Lourenço por nos acolher desde o começo de 2018 e ter nos auxiliado com todo o trabalho, licença do software e suas ideias. E principalmente por toda a força nos dada.

Agradeço a todos os ex amigos, ex colegas, as ex namoradas. Todos fazem parte da pessoa que me tornei hoje, mesmo que não trilhemos mais os mesmos caminhos. Não importa se a separação ocorreu com marcas de dores ou alegrias, pois temos que aprender com ambas as situações e crescer. E graças à todos esses motivos aqui citados, o meu eu atual conseguiu concluir este documento.

E por fim, agradeço ao Universo e as energias cósmicas por permitir a existência de cada partícula aqui existente.”

Stephanni

“Não devemos ter medo dos confrontos...até os planetas se chocam e do caos nascem as estrelas.”

Charles Chaplin

RESUMO

Conforme se dá o aumento populacional, a demanda de consumo energético tem seu aumento significativo, a difusão da globalização e o acesso a itens de tecnológicos, são fatores contribuintes para o aumento do consumo energético mundial. Estes fatores, aliados à: mudança climáticas, escassez de chuvas, esgotamento dos combustíveis fósseis, e o alto custo da tarifa energética, explicitam a necessidade de fontes energéticas menos poluentes e independentes dos períodos de chuva que venham contribuir para não sobrecarregamento do sistema e a redução do uso de usinas térmicas. Diante deste cenário, a instalação de painéis fotovoltaicos tem sido alternativa viável de consumidores industriais e residenciais; a redução do custo dos painéis e as normas que regulamentam a geração distribuída vem contribuindo fortemente para o crescimento da geração fotovoltaica. Este novo perfil que consumidor que também produz energia tem um impacto no sistema elétrico, as proteções e a operação do sistema devem levar em conta este novo formato. Desta forma, este trabalho vem apresentar estudo de curto circuito e fluxo de potência de um sistema fotovoltaico de 180kwp, atentando a sua contribuição para o sistema de potência.

Palavras-chave: Geração Fotovoltaica, Fluxo de Potência, Curto Circuito, ETAP.

ABSTRACT

As population growth increases, the demand for energy consumption has increased significantly, the spread of globalization and access to technological items are contributing factors for increasing global energy consumption. These factors, coupled with: climate change, rainfall, fossil fuels depletion, and the high cost of energy tariffs, explain the need for less polluting energy sources independent from rainy seasons that may contribute to the overburdening of the system and reduction of the use of thermal plants.
Given this scenario, the installation of photovoltaic panels has been a viable alternative for industrial and residential consumers; the reduction of the cost of the panels and the norms that regulate the distributed generation has been contributing strongly to the growth of the photovoltaic generation. This new profile that consumer that also produces energy has an impact on the electrical system, the protections and the operation of the system must take into account this new format. In this way, this work presents a study of short circuit and power flow of a photovoltaic system of 180kwp, considering its contribution to the power system.

Key-words: Photovoltaic Generation. Power Flow. Short Circuit, ETAP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2015. 19
Figura 2 - Representação esquemática das componentes da radiação global. 22
Figura 3 - Custo do dólar por watt por ano. 23
Figura 4 - Etapas e prazos do procedimento de acesso que devem ser seguidos pelo consumidor, em azul, e pela concessionária, em vermelho. 26
Figura 5 - Representação da Geração distribuída residencial. 28
Figura 6 - Diagrama Unifilar de um SEP. 30
Figura 7- Representação de sequência positiva. 33
Figura 8 - Circuito equivalente cálculo de curto. 35
Figura 9 - Representação de curto circuito monofásico. 36
Figura 10 - Representação do SEP no sistema barra-ramo. 37
Figura 11 - Representação do modelo pi da linha de transmissão. 39
Figura 12 - Representação de transformador YY de dois enrolamentos. 40
Figura 13 - Representação do transformador no modelo pi. 40
Figura 14 - Representação de SEP de duas barras com variáveis envolvidas. 41
Figura 15 - Matriz das barras do sistema. 47
Figura 16 - Matriz dos geradores do sistema. 47
Figura 17 - Matriz das ligações do sistema. 48
Figura 18 - Interface do programa ETAP. 52
Figura 19 - Barra de ferramentas disponível para realizar as análises. 52
Figura 20 - Ícones para análise de fluxo de potência e curto circuito, respectivamente. 53
Figura 21 - Barra de ferramenta para o fluxo de potência. 54
Figura 22 - Barra com as funcionalidades para análise de curto circuito. 55
Figura 23 - Barra de ferramentas para inserção dos componentes AC e DC. . 55
Figura 24 - Diagrama Simplificado de ligações. 58
Figura 25 - Layout do software Solar View. 59
Figura 26 - Produção anual de energia via monitoramento. 59
Figura 27 - Geração máxima obtida às 14h45. 60
Figura 28 - Gráfico ilustrando o comparativo entre geração com consumo do sistema instalado. 62
Figura 29 - Inversor considerado para estudo de viabilidade econômica. 63

Figura 30 - Painéis solares já existentes na DIAM. 64
Figura 31 - Representação da inclinação dos painéis e distância entre as fileiras. 64
Figura 32 - Representação dos componentes para cálculo da distância mínima entre as fileiras dos painéis. 65
Figura 33 - Fator de espaçamento utilizado para o cálculo da distância entre as fileiras. 65
Figura 34 - Nova disposição dos painéis após a expansão do sistema de minigeração. 66
Figura 35 - Diagrama unifilar simplificado geral da DIAM. 67
Figura 36 - Simulação inicial do sistema simplificado via software ETAP. 68
Figura 37 - Simulação do fluxo de potência com contribuição nula. 68
Figura 38 - Segunda simulação do sistema atual, utilizando a modelagem dos eletrocentros. 69
Figura 39 - Simulação de fluxo de potência para segunda versão do sistema existente modelado. 70
Figura 40 - Dados da simulação de fluxo de potência do sistema na barra de geração e barra do QGBT para o sistema atual. 71
Figura 41 - Simulação de curto trifásico para a segunda versão do sistema modelado para o sistema atual. 71
Figura 42 - Contribuição de curto circuito trifásico na barra de falta da geração fotovoltaica para o sistema instalado. 73
Figura 43 - Sistema expansão, utilizando a modelagem dos eletrocentros. 74
Figura 44 - Simulação de fluxo de potência para o sistema expansão. 74
Figura 45 - Dados da simulação de fluxo de potência do sistema na barra de geração e barra do QGBT para o sistema expansão. 75
Figura 46 - Vista frontal do diagrama mecânico do quadro QDG-INVERSORES. 76
Figura 47 - Projeção de retorno investimento anual. 79
Figura 48 – Projeção de retorno financeiro mensal do sistema SFV. 80
Figura 49 - Comparativo entre investimento inicial e retorno acumulado. 80
Figura 50 - Preço dos SFC por faixa de potência. 81
Figura 51 - Layout Solar View com dados mensais de produção de energia. 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Representação das cargas conforme horário. 38
Tabela 2 - Informações da matriz BUS. 48
Tabela 3 - Informação da matriz GEN. 49
Tabela 4 - Informação da Matriz BRANCH. 49
Tabela 5 - Dados de geração e consumo mensal. 61
Tabela 6 - Comparação entre os dados do PRT-02 e ETAP para a planta existente sem geração. 72
Tabela 7 - Comparação entre os dados do PRT-02 e ETAP para a planta atual com geração. 72
Tabela 8 - Dados da simulação do sistema em expansão de curto circuito no ponto de entrega e na barra QGBT. 75
Tabela 9 - Precificação dos materiais a serem utilizados no projeto de expansão. 78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BT	Baixa Tensão
CdTe	Cadmium Telluride
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CIGS	Copper Indium Gallium Seleneide
CIS	Copper Indium Diselenide
CNPJ	Cadastro Nacional de Pessoa Física
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CPF	Cadastro de Pessoa Física
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETAP	Elictrical Power System Analysis software
EUA	Estados Unidos da América
GNU	General Public license
MATPOWER	Eletric Power System Simulation ans Optimization tools for Matlab and Octave
MT	Média Tensão
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PCH'S	Pequenas Centrais Hidrelétricas
REN	Resolução Normativa
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SFV	Sistema Fotovoltaico
TUSD	Tarifa de uso de Sistemas de Distribuição
TUST	Tarifa de uso do Sistemas de Transmissão
UC	Unidade Consumidora
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 OBJETIVOS 18

1.1.1 Objetivo Geral 18

1.1.2 Objetivo Específicos 18

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19

2.1 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA 19

2.2 ENERGIA SOLAR 20

2.2.1 Radiação Solar 21

2.2.2 Irradiância Solar 21

2.2.3 Irradiância Global 21

2.2.4 Histórico da Geração Fotovoltaica 22

2.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA 24

2.3.1 Histórico Regulamentação Geração Distribuída 24

2.3.2 Procedimentos para viabilização de acesso 25

2.3.3 Sistema de Compensação de Energia Elétrica 26

2.4 SISTEMAS DE POTÊNCIA 28

2.4.1 Diagrama Unifilar de um Sistema de Potência 30

2.4.2 Componentes Simétricas 30

2.4.3 Sistema Trifásico de Sequência Positiva 32

2.4.4 Sistema Trifásico de Sequência Negativa 34

2.4.5 Sistema Trifásico de Sequência Zero 34

2.5 CURTO CIRCUITO NO SISTEMÁ ELÉTRICO 34

2.5.1 Curto Circuito em Sistemas de Distribuição 35

2.6 FLUXO DE POTÊNCIA 36

2.6.1 Componentes básicos de um Sistema de Potência 37

2.6.2 Solução do Fluxo de Carga: Abordagem Linearizada e Método de Newton-Raphson 41
2.6.2.3 Método de Newton-Raphson 44
3 MATERIAIS E MÉTODOS 46
3.1 OCTAVE 46
3.1.1 Matpower 46
3.2 ETAP 18.0 49
3.2.1 Funcionamento 50
3.2.2 Licença 51
3.2.3 Ferramentas e componentes a serem utilizadas 51
4 SISTEMA ATUAL 57
4.1 MONITORAMENTO DO SISTEMA 58
5 EXPANSÃO 61
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS 67
6.1 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL 67
6.2 ANÁLISE DA SITUAÇÃO EXPANSÃO 73
6.3 ALTERAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A EXPANSÃO 76
6.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA 78
6.5 RETORNO DO INVESTIMENTO 78
6.6 COMPARATIVO ENTRE INVESTIMENTO INICIAL E RETORNO EM 25 ANOS 80
7 CONCLUSÃO 83
8 REFERÊNCIAS 85
ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA ATUAL 88
ANEXO B – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA EXPANSÃO 89

1 INTRODUÇÃO

A previsão do aumento da população mundial tem como consequência o aumento do consumo energético e, essa é também a realidade brasileira. Sabe-se que a curva de demanda energética teve modificações nos últimos anos no Brasil, tendo como principal fator o deslocamento do horário de pico para o período da tarde. Para suprir essa demanda, uma excelente alternativa consiste na utilização de fontes energéticas distintas que produzam energia nesses horários.

Devido ao barateamento do custo dos painéis solares, a geração fotovoltaica vem se tornando economicamente viável nos últimos anos e, muitos consumidores vem instalando esses sistemas em suas residências e indústrias como alternativa na redução da tarifa energética.

De acordo com a resolução normativa da ANEEL nº 687/2015 e nº786/2017, é regulamentado aos consumidores que instalam o sistema de geração em suas residências e utilizam o sistema elétrico da COPEL, injetarem o excedente gerado na rede, o qual é convertido em crédito de energia com validade de 60 meses. A utilização do crédito consiste em abater o consumo da própria unidade ou de outras unidades que possuam o mesmo CPF ou CNPJ já cadastrado na distribuidora. Essa normativa tem incentivado a instalação e expansão desses sistemas de geração, seja fotovoltaico ou PCH'S.

A inclusão desses sistemas de geração distribuída contribui para a alteração do comportamento do sistema elétrico, tanto variação da potência, como nos valores de curto circuito, devido a isto, é de extrema importância que se estude estes sistemas de potência, de forma a melhorar os níveis de tensão e parametrizar os elementos de proteção. Também é interessante que haja softwares para simulação desses sistemas. Os quais são utilizados por concessionárias de energia elétrica e empresas que realizam projetos de geração fotovoltaica.

Esse trabalho vem nesse sentido e apresenta o estudo de um sistema fotovoltaico de uma empresa paranaense. Esse sistema fotovoltaico tem capacidade de 180kWp e foi instalado na propriedade da empresa DIAM, pela EGNEX LTDA, com intuito de reduzir o custo da tarifa energética. O estudo desse sistema compreende aos valores de curto circuito e fluxo de potência,

utilizando os sofwares ETAP e Matpower, como também a capacidade de expansão do sistema de geração, levando em conta a área disponível e o consumo energético da empresa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho em questão consiste em modelar e simular um sistema fotovoltaico já existente a partir do pacote computacional ETAP buscando avaliar a contribuição deste sistema nas correntes de curto circuito bem como na distribuição do fluxo de potência e tensões da rede local.

Também será avaliada a capacidade máxima de expansão do sistema atual e viabilidade econômica dessa expansão.

1.1.2 Objetivo Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

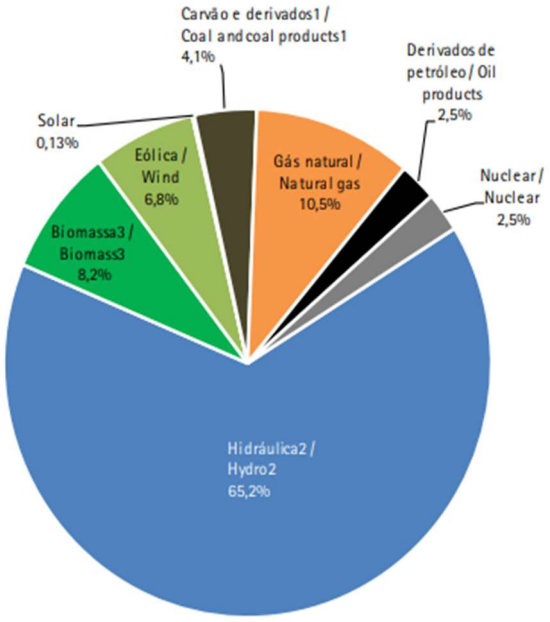
- Modelar e simular o sistema existente nos softwares ETAP e MATPOWER;
- Verificar as contribuições do fluxo de potência e curto circuito para o sistema modelado;
- Verificar capacidade física de expansão do sistema existente;
- Simular o sistema proposto no software ETAP e assim obter os dados de fluxo de potência e curto circuito;
- Avaliar a capacidade máxima de instalação de painéis de forma a suprir a demanda da fatura de energia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A matriz elétrica brasileira tem predominância renovável, sendo a hidrelétrica a principal fonte de geração, compondo 65,2% da energia elétrica ofertada, como apresentado na Figura 1. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2018, 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é resultante da soma dos montantes referentes a produção nacional mais as importações, é essencialmente de origem renovável.

Figura 1- Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2015.



Fonte: BEN (2018).

Em relação ao consumo final de energia, os setores: industrial, comercial e residencial, representam, juntos, cerca de 80,3% do consumo de energia no Brasil, em 2017. Os setores públicos, energético, agropecuário e transportes, participam com 17,3% restantes (BEN, 2018).

Neste mesmo ano, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica no Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou 157.112MW, registando um acréscimo de 6.775 MW.

Dentro do acréscimo da capacidade instalada, as centrais hidráulicas contribuíram com 3350 MW, 49,5% desse montante; enquanto as eólicas representaram 21,3% do aumento, com 2.159 MW.

Vale ressaltar a contribuição da potência instalada da geração fotovoltaica, que atingiu 935 MW em 2017, sendo um aumento significativo, quando comparada aos 24 MW de capacidade instalada em 2016.

Este aumento significativo deve-se, em grande parte, aos incentivos aos sistemas de micro e minigeração, através de ações regulatórias, tais como a possibilidade de compensar a energia excedente produzida por sistemas de menor porte. Em 2017, os sistemas de micro e minigeração distribuída alcançaram os patamares de 359,15 GWh, com potência instalada de 246,1 M W. Deste montante, a fonte solar fotovoltaica contribuiu com 165,87 GWh de geração e 174,5 MW de potência instalada, ou seja, aproximadamente 70% da capacidade instalada de micro e minigeração é advinda da fonte solar fotovoltaica.

2.2 ENERGIA SOLAR

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção de vida no Planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captações distintas de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica (CEPEL, 2014).

A energia solar fotovoltaica é obtida mediante a conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), tendo a célula fotovoltaica como instrumento principal dessa conversão.

As células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, e as tecnologias envolvidas na sua fabricação podem ser classificadas em três gerações. A primeira é subdividida em duas cadeias produtivas, que são: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), as quais representam mais de

85% do mercado, pois possuem uma tecnologia confiável e a melhor eficiência comercialmente disponível.

A segunda geração, denominada de filmes finos, é dividida em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) ou telureto de cádmio (CdTe). Possuem pequena competitividade de mercado, devido sua dificuldade com manuseio de material, pouco tempo de vida útil e baixo rendimento das células.

A terceira geração ainda está em fase de pesquisa, e não conta com produção em larga escala. É formada por células fotovoltaicas do tipo multijunção e para concentração, além de células sensibilizadas por corante e orgânicas ou polímeras.

2.2.1 Radiação Solar

É denominado radiação solar o processo no qual a energia proveniente do Sol atinge a superfície terrestre. Considerando a radiação solar que atinge a superfície terrestre e incide sobre uma superfície receptora para geração de energia, há a possibilidade de dividi-la por uma componente direta (ou de feixe) e por uma difusa. A radiação direta é aquela que provém diretamente do Sol. Já a difusa é proveniente de todas as direções e atinge a superfície após espalhamento pela atmosfera terrestre.

Caso a superfície esteja inclinada em relação a horizontal, haverá uma terceira componente de radiação, refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.).

A Figura 2 apresenta as componentes de radiação solar sobre uma superfície receptora, neste caso são os painéis solares, localizados no telhado.

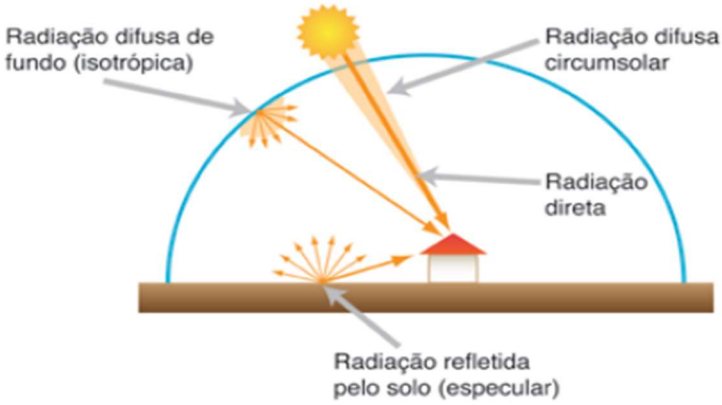
2.2.2 Irradiância Solar

É denominada irradiância solar a potência radiante incidente por unidade de superfície sobre um dado plano (CEPEL, 2014).

2.2.3 Irradiância Global

A Irradiação resultante das irradiações direta, difusa e refletida. (CEPEL, 2014).

Figura 2 - Representação esquemática das componentes da radiação global.



Fonte: Gazeta da Física (2016).

2.2.4 Histórico da Geração Fotovoltaica

O processo de obtenção de energia elétrica através da radiação solar é denominado efeito fotovoltaico. Em 1839 Edmond Becquerel observou o efeito fotovoltaico quando verificou diferença de potencial em placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas em um eletrólito, quando expostas a luz.

Posteriormente, em 1877, W G Adams e R.E.Day, fizeram uso das propriedades condutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz, ou seja, a primeira célula solar. A célula consistia em um filme de selênio depositado num substrato de ferro com um segundo filme de ouro, semitransparente, que servia como contato frontal.

Embora com baixa eficiência, em torno de 0,5%, no final do século XIX, o engenheiro alemão Werner Siemens comercializou células de selênio com fotômetros para máquinas fotográficas. Em 1883, tem-se a primeira célula solar fotovoltaica, desenvolvida pelo estadunidense Charles Fritts, com rendimento de 1%.

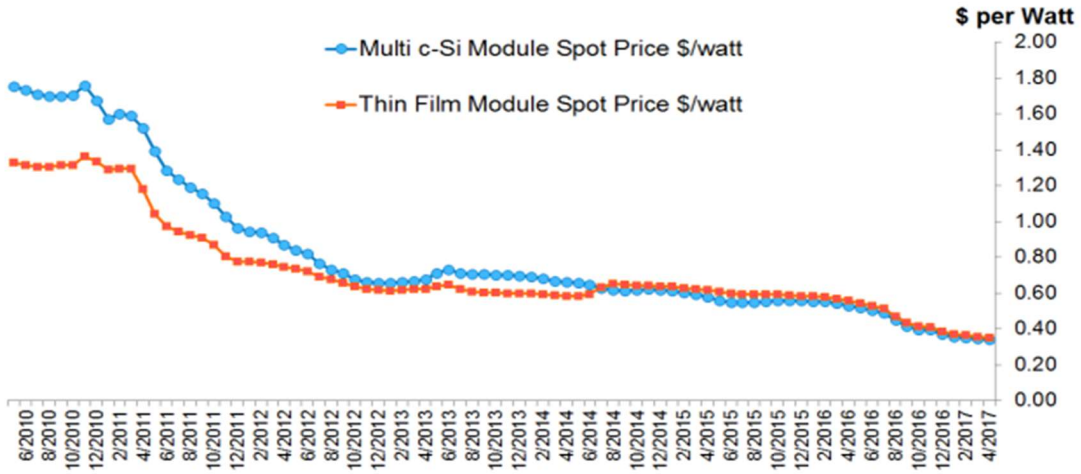
A primeira célula solar moderna teve início em 1953 quando Calvin Fuller, um químico do Bell Laboratories, desenvolveu um processo para introduzir impurezas em cristais de silício, com finalidade de controlar suas propriedades elétricas, este processo é denominado “dopagem”. Em 1954, foi criada a primeira célula fotovoltaica de silício pela empresa Bell Laboratories, localizada em New Jersey, nos Estados Unidos.

Inicialmente, a aplicação da energia fotovoltaica era exclusivamente espacial. Ao final da década de 50, nesta época satélites foram lançados ao espaço com módulos FV acoplados. As aplicações terrestres para energia fotovoltaica só foram difundidas na década de 70, impulsionadas pela crise energética vigente da época.

A crise de 70 provocou o aumento do interesse do estudo da tecnologia fotovoltaica, levando os EUA a incentivar projetos de pesquisa e desenvolvimento e criar a NREL (National Renewable Energy Laboratory). Esses investimentos possibilitaram grandes avanços na tecnologia fotovoltaica, nos materiais e inversores, além das legislações e incentivos fiscais para promover seu uso.

Na década de 60 as células eram feitas à mão e o custo de instalação chegava U$$1.000 (um mil dólares) por Watt. No entanto, até a última década, o custo de instalação dessa tecnologia diminuiu para menos de US$ 4 (quatro dólares) por Watt, em 2017 chegando a US$ 0,40 por Watt, conforme a Figura 3, o que a tornou uma fonte viável no mercado brasileiro (ANEEL, 2017)

Figura 3 - Custo do dólar por watt por ano.



Fonte: NREL (2017)

No Brasil, a instalação de usinas fotovoltaicas tem se mostrado viável, tendo em vista o crescente número de pedidos de novas outorgas recebidos pela SCG. Entre os fatores que contribuíram para atratividade do mercado brasileiro à exploração de Centrais Geradoras Fotovoltaicas, está a Resolução Normativa 481, de 17 de abril de 2012, a qual estabeleceu que os agentes geradores por fonte solar outorgados até 31 de dezembro de 2017, receberão 80% de desconto nas tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição - TUST e TUSD.

Entre os incentivos da geração fotovoltaica está a Resolução Normativa 482, de 17 de abril de 2012, que estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica.

2.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, que podem ser de fontes renováveis ou combustíveis fósseis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica.

A presença de pequenos geradores próximos às cargas pode trazer alguns benefícios ao sistema elétrico, dentre os quais se destacam: postergação no investimento de expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, baixo impacto ambiental; melhoria do nível de tensão da rede nos horários de carga pesada (horário de pico) e diversificação da matriz energética.

Porém, existem desvantagens quanto ao aumento de pequenos geradores na rede de distribuição, entre as quais estão: o aumento da complexidade de operação da rede, a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico, a eventual incidência de tributos e a necessidade de alteração dos procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes.

2.3.1 Histórico Regulamentação Geração Distribuída

Desde 17 abril de 2012, através da REN 482, a ANEEL implementou a criação do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, o consumidor pode gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

A REN 482, que foi alterada pela REN 687, é a Resolução Normativa que estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e outras providências.

Conforme o Artigo 2º da REN N° 482/2012:

> I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual 75kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.
>
> II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75kW e menor ou igual 5MW e que utilize cogeração qualificada.
>
> III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa.

2.3.2 Procedimentos para viabilização de acesso

A seção 3.7 do Módulo 3 Prodist estabelece os procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição, detalhados a seguir:

Para que a central geradora seja caracterizada como micro ou minigeração distribuída, são obrigatórias as etapas de solicitação e parecer acesso. A solicitação de acesso é o requerimento formulado pelo acessante (consumidor), e que, uma vez entregue à distribuidora, implica a prioridade de atendimento, de acordo com a ordem cronológica de protocolo.

A solicitação de acesso deve conter o formulário de solicitação de acesso para micro e minigeração distribuída.

O formulário específico para cada caso deve ser protocolado na distribuidora, juntamente com os documentos solicitados, para o nível de potência.

Caso a documentação esteja faltando, cabe a distribuidora recusar o pedido de acesso e notificar o acessante das informações pendentes, devendo o consumidor realizar uma nova solicitação, após a regularização das pendências indicadas.

Com o pedido aprovado, a distribuidora deverá emitir o parecer de acesso, um documento formal obrigatório apresentado pela acessada, sem ônus para o acessante, em que estão informadas as condições de acesso e os requisitos técnicos que permitam a conexão do acessante.

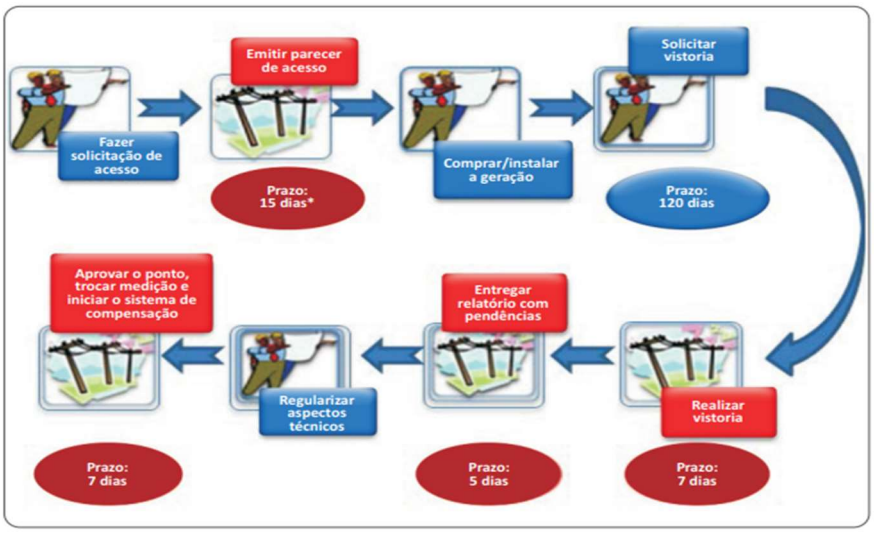
Caso haja necessidade de realizar obra para o atendimento, o parecer de acesso deve também apresentar o orçamento da obra, contendo os custos orçados, do encargo de responsabilidade da distribuidora e possível participação financeira do consumidor.

O prazo máximo para elaboração do parecer é de 15 dias para os casos de microgeração e de 30 dias para minigeração. Caso haja necessidade de obras de melhorias ou reforços no sistema de distribuição a ser acessado, esses prazos podem ser alterados.

Conforme estabelecido na seção 3.7 do PRODIST, o processo de acesso é simples e rápido, bem como os requisitos de proteção necessários para garantir a segurança das pessoas e a qualidade da energia injetada na rede. A Figura 4 apresenta as etapas do processo para solicitação.

Vale ressaltar que que a entrega dos documentos ANEEL para fim de registro é de responsabilidade da distribuidora.

Figura 4 - Etapas e prazos do procedimento de acesso que devem ser seguidos pelo consumidor, em azul, e pela concessionária, em vermelho.



Fonte: ANEEL (2016).

2.3.3 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

O conceito do Sistema de Compensação de Energia Elétrica foi trazido pela REN 482/2012. Nele, a energia excedente gerada pela unidade consumidora, através de micro e minigeração, seja injetada na rede da distribuidora.

Nos casos em que a energia injetada for maior que a consumida, o consumidor receberá em créditos em energia (kWh) que poderá ser utilizado para abater o consumo nos meses subsequentes ou em outro posto tarifário. Os créditos são válidos por 60 meses.

Existe a possibilidade de utilizar os créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro de uma determinada área de concessão, podendo ser caracterizada como: autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas UC's, em local diferente do ponto de consumo, definidas da seguinte forma:

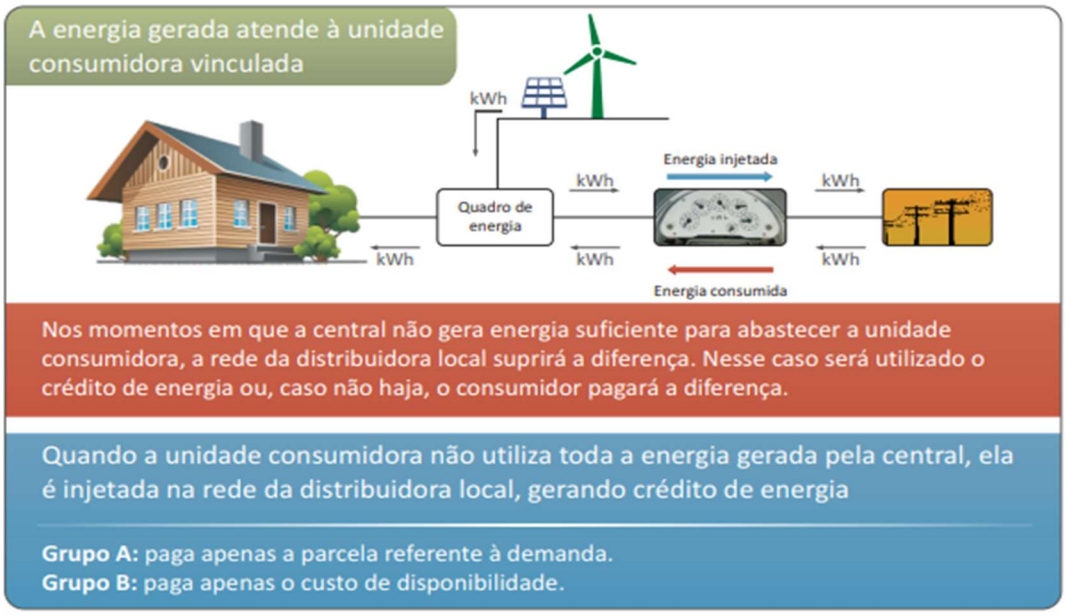
a) Geração Compartilhada: reunião de um conjunto de consumidores, incluídos dentro de uma mesma área de concessão ou permissão, através de consórcio ou cooperativa, constituída por pessoa física ou

jurídica, nas quais as unidades consumidoras com micro e minigeração terão endereço distinto das unidades consumidoras em que os créditos de energia serão compensados.

b) Autoconsumo remoto: caracterizado por UC’s na titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, ou pessoa física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das UC’s nas quais a energia excedente, casou houver, será compensada.
c) Condomínios solares: tem por característica a utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitui uma UC distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com mini ou microgeração distribuída, desde que essas unidades estejam localizadas em uma mesma propriedade ou propriedades vizinhas, não sendo permitida a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento.

Vale ressaltar que, para conexão em baixa tensão (grupo B), ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, deverá ser cobrado um valor mínimo do consumidor, em reais, referente ao custo de disponibilidade, sendo seu correspondente em capacidade: 30kWh (monofásico), 50kWh (bifásico) 100kWh (trifásico). De forma análoga, para consumidores em alta tensão (grupo A), será cobrado apenas a demanda contratada. A Figura 5, apresenta o processo de geração distribuída quanto injeção e consumo de energia residencial.

Figura 5 - Representação da Geração distribuída residencial.



Fonte: ANEEL (2016).

2.4 SISTEMAS DE POTÊNCIA

Devido a necessidade de garantir o fornecimento de energia, os sistemas elétricos são interligados, operando de forma complexa.

Assim, observando o ponto de vista de operação, é de interesse que se acompanhe o comportamento do sistema elétrico. Desta forma, para que se tenha um conjunto de informações que possam ser atualizadas e que possa observar o comportamento mediantes as alterações do sistemas, é de interesse que se faça uma representação através de uma modelagem do sistema, adequada ao tipo de estudo que será realizado.

Em um estudo de proteção, por exemplo, as correntes de curto-circuito são necessárias para parametrização dos dispositivos de proteção. Nos quesitos de operação e controle do sistema o fluxo de potência é de extrema importância.

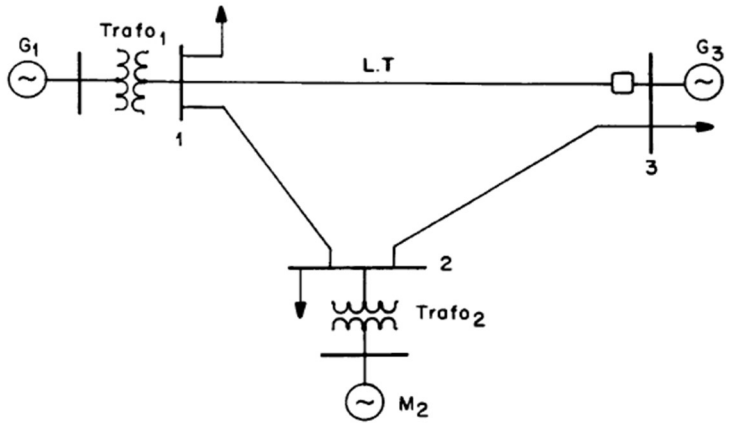
Para análise das correntes de curto circuito faz-se necessária uma modelagem específica do sistema, cada componente (transformadores, linhas, geradores) deverá ser modelado considerando seu comportamento mediante as correntes de curto circuito. Esta modelagem considera as simplificações feitas nos circuitos equivalentes dos componentes. A adequação da modelagem para curto circuito é feita com a utilização de componentes simétricas, o que leva à obtenção de três modelos de sistema: de sequência positiva, negativa e zero.

2.4.1 Diagrama Unifilar de um Sistema de Potência

O diagrama unifilar é uma representação simbólica de um sistema equilibrado trifásico.

Os elementos do sistema elétrico são representados por símbolos, a Figura 6, apresenta um exemplo de diagrama unifilar.

Figura 6 - Diagrama Unifilar de um SEP.



Fonte: Kindermann (2010).

2.4.2 Componentes Simétricas

Os sistemas elétricos em seu estado natural de operação são balanceados, na ocorrência de curto circuitos os sistemas perdem seu equilíbrio, dificultando os cálculos e as simulações de ocorrência.

Inicialmente era muito difícil se obter ferramentas de representação do sistema desbalanceado. Em 1915, Lebranc imaginou decompor as correntes trifásicas desequilibradas em três grupos, que seriam produzidos por três campos magnéticos, sendo:

a) Um campo magnético girando em uma direção;
b) Um campo magnético girando em direção oposta;
c) Um campo magnético estático, pulsatório.

A partir dessas ideias, em 1915, o Dr. C.L.Fortescue formulou uma ferramenta analítica que permitia a decomposição de qualquer sistema de “n” fases desequilibradas nas suas respectivas componentes simétricas equilibradas.

Posteriormente, a proposta de Fortescue foi adaptada e aplicada aos componentes do sistema elétrico de potência. Isto possibilitou a aplicação de todas as técnicas já conhecidas aos sistemas desbalanceados pelos curto circuitos, através das componentes simétricas.

E assim, com a utilização do computador, simulações no sistema elétrico viraram rotina.

2.4.2.1 Teorema de Fortescue

Através do teorema “Método de componentes simétricas aplicado à solução de circuito polifásicos” Fortescue estabeleceu que um sistema de “n” fasores desequilibrados poderia ser decomposto em “n” fasores equilibrados, que serão as componentes simétricas dos fasores originais. A expressão analítica para um sistema desequilibrado com n fases é dada por:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} + \ldots + V_{a(n-1)} \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} + \ldots + V_{b(n-1)} \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{b2} + V_{b3} + \ldots + V_{c(n-1)} \\ &\ldots \\ V_n &= V_{n0} + V_{n1} + V_{n2} + V_{n3} + \ldots + V_{n(n-1)} \end{aligned} \qquad (1)$$

O sistema desequilibrado original de sequência de fase a, b, c...n é representado pelos seus n fasores Va, Vb, Vc...Vn, que giram em velocidade síncrona na frequência da rede polifásica.

Cada um dos fasores é decomposto em n fasores, designados por componentes de sequência 0,1,2, 3..k.n-1. Com isto se obtém um conjunto de n sistema equilibrados.

Cada sequência é composta de n fasores equilibrados, isto é, de mesmo módulo e igualmente defasados.

A defasagem θk de dois fasores consecutivos do sistema de sequência k-ésima, é dada por:

$$\theta_k = k(\frac{2\pi}{n}) \quad (2)$$

Assim, tem-se as seguintes sequências:

a) Sequência Zero: é o conjunto de n fasores $V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}, \dots, V_{n0}$ de mesmo módulo e em fase, girando no mesmo sentido e velocidade síncrona do sistema original de n fases.
b) Sequência 1: é o conjunto de n fasores $V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}, \dots, V_{n1}$, de mesmo módulo , defasado em $\frac{2\pi}{n}$, girando no mesmo sentido e velocidade do sistema polifásico original.
c) Sequência 3: é o conjunto de n fasores $V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}, \dots, V_{n2}$, de mesmo módulo , defasado em $2(\frac{2\pi}{n})$, girando no mesmo sentido e velocidade do sistema polifásico original.
d) Sequêncis k-ésima: é o conjunto de n fasores $V_{ak}, V_{bk}, V_{ck}, \dots, V_{nk}$, de mesmo módulo , defasadas entre si em $k(\frac{2\pi}{n})$, girando no mesmo sentido e velocidade síncrona do sistema original.

Fisicamente, as sequências pares tem os seus conjuntos de sequência girando no sentido contrário aos da sequência de ordem ímpar.

2.4.2.3 Teorema de Fortescue a Sistemas Trifásicos

A formulação de Fortescue é válida para qualquer sistema com n fases, mas como o sistema elétrico adotado internacionalmente é o trifásico, os estudos serão com base em um sistema trifásico.

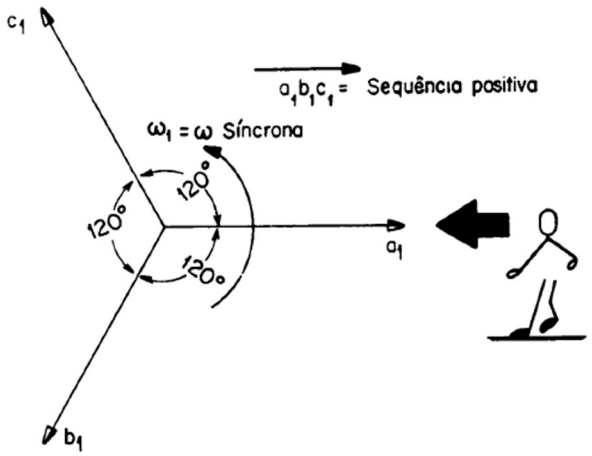
2.4.3 Sistema Trifásico de Sequência Positiva

É um conjunto de 3 fasores balanceados, que apresenta o mesmo módulo e defasados em 120°, com a sequência de fase idêntica à do 3Ø original desbalanceado.

O sistema trifásico original tem uma sequência de fase, que por conveniência será representada por abc, cujos fasores giram na velocidade síncrona.

A Figura 7 apresenta a simulação do observador que observa os fasores girando na sequência abc, que é a sequência positiva.

Figura 7- Representação de sequência positiva.



Fonte: Kindermann (2010).

Supondo que os fasores representados são tensões equilibradas, assim, pode-se escrever:

$$\begin{matrix} V_{a1} \\ V_{b1} = 1 \angle -120°.V_{a1} \\ V_{c1} = 1 \angle -240°.V_{a1} \end{matrix} \quad (3)$$

Em módulo, estas tensões apresentam valores iguais, ou seja:

$$V_{a1} = V_{b1} = V_{c1} \quad (4)$$

As tensões V_{b1} e V_{c1} foram expressas em função de V_{a1}, pois o sistema é equilibrado, então basta analisar uma única fase.

Em vez de usar o termo $a = 1\angle 120°$, é praxe, substituir este número complexo por uma representação literal, denominada ä, conhecida como operador rotacional.

Em função de a ficando:

$$\begin{matrix} V_{a1} \\ V_{b1} = a^2.V_{a1} \\ V_{c1} = a.V_{a1} \end{matrix} \quad (5)$$

2.4.4 Sistema Trifásico de Sequência Negativa

É um conjunto de 3 fasores equilibrados, girando numa sequência contrária à do sistema original desbalanceado, em velocidade síncrona, contrária da sequência positiva. Devido a isso os fatores b e c invertem, e assim:

$$\begin{matrix} V_{a2} \\ V_{b2} = a.V_{a2} \\ V_{c2} = a^2.V_{a2} \end{matrix} \quad (6)$$

2.4.5 Sistema Trifásico de Sequência Zero

É um conjunto de 3 fasores iguais, em fase, girando no mesmo sentido da sequência original desbalanceado, ou seja, da sequência positiva.

2.5 CURTO CIRCUITO NO SISTEMÁ ELÉTRICO

Um curto circuito, de maneira geral, pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental, geralmente de baixa impedância, entre dois ou mais pontos que normalmente estão em diferentes elétricos (Kindermann, 2010). O fato dos componentes do sistema (cabos, transformadores e equipamentos da rede) apresentarem valores reduzidos, a ocorrência de curto circuito pode resultar em grandes aumentos de corrente, causando danos aos equipamentos, caso não haja um sistema de proteção adequado.

O tipos de curto circuito que podem ocorrer são:

a) Trifásico
b) Bifásico
c) Fase-terra

As faltas podem ser classificadas como:

a) Temporária: ocorrer sem causar danos na rede elétrica. Após atuação da proteção, a operação do sistema volta a funcionar normalmente.

b) Falta permanente: falta em que, após a atuação dos sistema de proteção, é necessário que se faça reparos na rede para restabelecimento do fornecimento de energia.

2.5.1 Curto Circuito em Sistemas de Distribuição

Devido à característica desequilibrada dos sistemas de distribuição, as tensões e correntes se apresentam assimétricas. Os sistemas de distribuição podem ser modelados em termos de impedâncias trifásicas, transformadores e cargas. Para estudos de curto circuito tradicionais é considerada uma modelagem mais simplificada dos equipamentos.

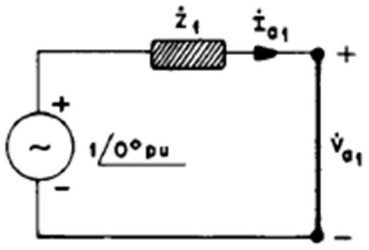
2.5.1.1 Cálculo da corrente de curto circuito

A base de cálculo do curto circuito é o teorema de Thevenin, começando por ser construir um equivalente da rede vista do ponto do defeito, com a correspondente determinação de uma impedância Z_{eq} e uma fonte de tensão em circuito aberto (Manoel Antônio Matos, 1996.

2.5.1.2 Curto Circuito Trifásico

O objetivo é apenas obter o módulo da corrente de curto-circuito. Como as correntes de curto-circuito 3ø são balanceadas, somente o modelo de sequência positiva é considerado. A Figura 8 apresenta o modelo equivalente para cálculo de curto circuito 3ø.

Figura 8 - Circuito equivalente cálculo de curto.



Fonte: Kindermann (2010).

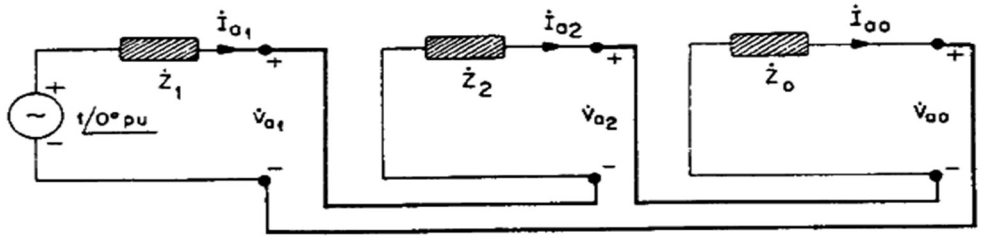
2.5.1.3 Curto Circuito Bifásico

O sistema de Distribuição geralmente está longe do gerador. Pode-se considerar que a impedância de sequência positiva Z_1é igual a impedância de sequência negativa Z_2.

2.5.1.4 Curto Circuito Monofásico

Para o curto circuito monofásico as impedâncias são conectadas em série, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Representação de curto circuito monofásico.



Fonte: Kindermann (2010).

2.6 FLUXO DE POTÊNCIA

Os estudos de fluxo de potência são fundamentais para a operação e planejamento da expansão de sistemas elétricos de potência, por determinar o estado de operação do sistema para uma determinada topologia e condição de carga.

Através deste são obtidas as tensões complexas em todas as barras do sistema e, se determina a distribuição dos fluxos de potência ativa e reativa através de linhas de transmissão e transformadores e as perdas do sistema.

O problema do fluxo de potência, ou fluxo de carga, é formulado considerando a modelagem estática da rede elétrica, portanto, pode ser representado por um conjunto de equações algébricas não lineares, sujeito a um conjunto de restrições operacionais da rede e de seus componentes.

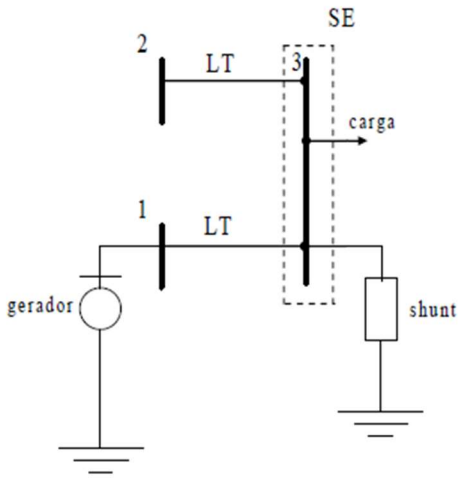
A análise tradicional de fluxo de potência se baseia na modelagem convencional da rede elétrica conhecida como modelagem barra-ramo, no qual os ramos das subestações são previamente determinados e as seções de barras de cada subestação são agrupadas, tornando-se uma única barra ou nó.

2.6.1 Componentes básicos de um Sistema de Potência

Os principais componentes a serem considerados no estudo de fluxo de potência são: gerador, carga, linha de transmissão, transformador e elemento shunt.

Na formulação convencional de fluxo de potência, a rede elétrica é modelada no nível de barramentos e ramos, conhecida como barra-ramo, onde as subestações são representadas por barras, ou nós, e linhas transmissão e transformadores são representados por ramos que interligam as barras do sistema, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Representação do SEP no sistema barra-ramo.



Fonte: (Raimundo 2005).

2.6.1.1 Gerador e Carga

No estudo de fluxo de potência, o nível de tensão gerada é especificada e a injeção de potência reativa necessária é obtida a partir da solução do problema do fluxo de potência, levando em conta os limites máximo e mínimo de capacidade de geração de potência reativa de cada máquina ou sistema de geração.

A carga é o componente que propõe dificuldades na sua modelagem nas ferramentas de análise de sistema de potência. Devido sua diversidade de elementos e possíveis variações diárias que não podem ser previstas. Para estudo de fluxo de carga em regime permanente, pode-se considerar que as mesmas apresentam, durante longas horas do dia, valores constantes e pré-definidos. Consideram-se 4 períodos distintos de carga, apresentados na tabela 1.

Tabela 1- Representação das cargas conforme horário.

Tipo de Carga	Horário	Dias
Carga mínima	0:00h às 6:00h e 22:00h às 24:00h	Domingos e Feriados
Carga Leve	0:00h às 6:00h e 22:00h às 24:00h	Dias úteis
Carga Leve	6:00h às 18:00h	Domingos e Feriados
Carga Média	6:00h às 17:00h	Dias úteis
Carga Média	18:00h às 22:00h	Domingos e Feriados
Carga Pesada	17:00h às 22:00h	Dias úteis

Fonte: (Raimundo, 2005)

É comum em estudos de fluxo de potência se modelar as cargas como potências ativa e reativa constantes, cujos valores dependem das considerações de carga mínima, leve, média e pesada mencionadas na tabela xxx (acima). A carga sempre absorve potência ativa. Apesar da característica indutiva das cargas mais comuns, como: motores de indução e reatores de iluminação, a potência reativa pode ser negativa, dependendo da potência capacitiva adicionada por algum elemento shunt, para correção do fator de potência, conforme os níveis estabelecidos em norma.

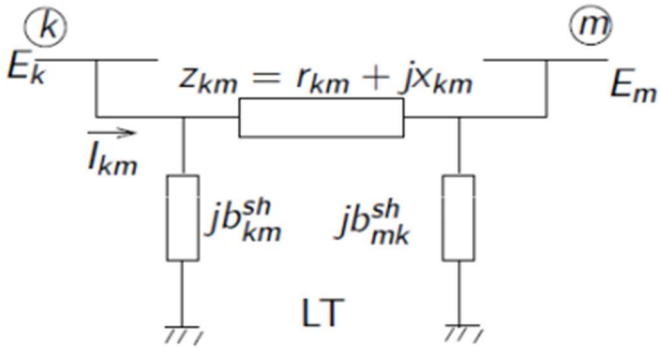
Nos cálculos de fluxo de carga, trabalha-se com a injeção de potência líquida na barra, podendo ser positiva, para os casos em que a geração seja maior em magnitude que a carga; negativa, caso a geração seja menor em magnitude do que a carga ou nula, quando não há geração ou carga conectada a barra ou as duas sejam equivalentes em grandeza.

2.6.1.2 Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão são elementos fundamentais nos sistemas de potência, tem como função realizar o transporte de energia elétrica da fonte geradora até as cargas. Na modelagem das linhas de transmissão usualmente é utilizado o modelo π, o qual é caracterizado por uma impedância série, que representa as perdas ativas e reativas, uma admitância em derivação, que representa o efeito capacitivo da linha.

O elemento série é constituído por uma resistência r_{km}, e reatância série x_{km}, a admitância shunt (derivação), representada pela susceptância b_{km}^{sh}, que no modelo π, é dividida em parte iguais, distribuídas em cada extremo da linha, a Figura 11, apresenta um modelo de linha de transmissão.

Figura 11- Representação do modelo pi da linha de transmissão.



Fonte: UTFPR

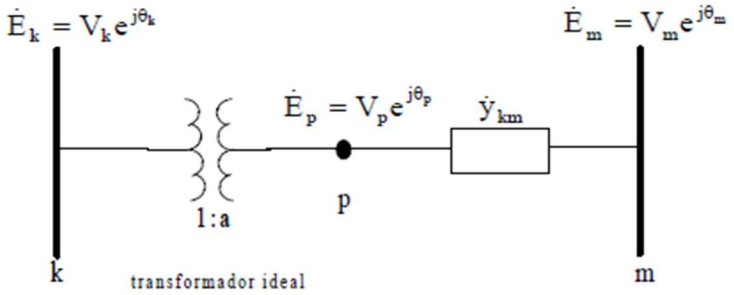
O estudo do fluxo de potência é a determinação das tensões complexas em todas as barras do sistema. Desta forma, os barramentos k e m, extremos da linha de transmissão, são associados tensões complexas.

2.6.1.3 Transformadores

Transformadores são elementos das redes elétricas que elevam, abaixam ou regulam o níveis de tensão das barras.

Para modelar um transformador de dois enrolamentos estrela-estrela (YY) utiliza-se um transformador ideal e um admitância y, conforme Figura 12.

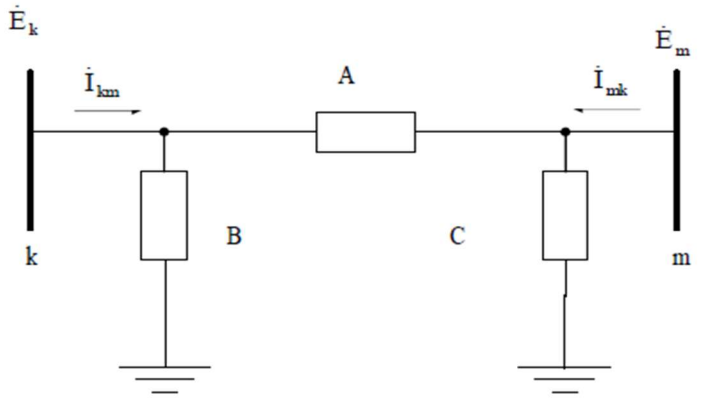
Figura 12- Representação de transformador YY de dois enrolamentos.



Fonte: Raimundo (2005).

A relação de transformação “a” é definida pela razão entre as tensões complexas das barras p e m. O transformador pode ser representado através de um circuito π equivalente, da mesma forma que as linhas de transmissão. A Figura 13 apresenta a representação do transformador no modelo π.

Figura 13 - Representação do transformador no modelo pi.



Fonte: Raimundo (2005).

A utilização de transformador com relações de espiras variáveis é uma das maneiras utilizadas pelas Concessionárias de energia para regulação das tensões nas barras das subestações.

2.6.2 Solução do Fluxo de Carga: Abordagem Linearizada e Método de Newton-Raphson

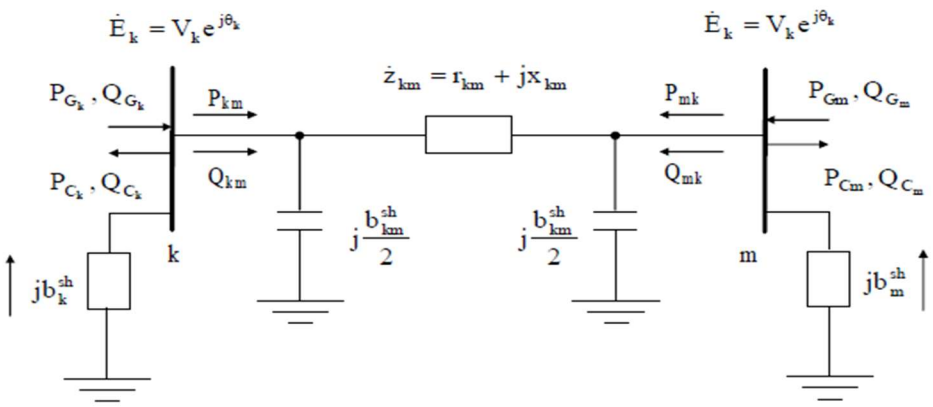
A função de um sistema de energia é de fornecer as potências ativas e reativas, necessárias às diversas cargas a ele ligadas. Durante o atendimento a carga, as tensões de barra devem permanecer entre os limites especificados, apesar das variações que podem ocorrer de forma imprevisível.

As equações determinam as injeções de potência ativa e reativa nas barras. Através dessas equações se tem o problema de fluxo de carga, nas quais se determina as tensões complexas nas barras do sistema.

2.6.2.1 Fluxo de Carga Não-Linear

A Figura 14 apresenta um SEP de duas barras onde estão variáveis envolvidas no problema de fluxo de potência.

Figura 14 - Representação de SEP de duas barras com variáveis envolvidas.



Fonte: Raimundo (2005).

Onde:

a) P_ge Q_g - representam as potências ativa e reativa geradas na barras.
b) P_ce Q_c - representam as potências ativa e reativa consumida na barras.
c) P_{km}e Q_{kn} - representam os fluxos de potência ativa e reativa da barra k para a barra m.
d) P_{mk}e Q_{mk} - representam os fluxos de potência ativa e reativa da barra m para a barra k.

As equações para cálculo de fluxo de potência, através dos elementos apresentados anteriormente, podem ser descritas pelas Equações 7 e 8 que são equações de injeção de potência ativa e reativa em uma barra qualquer.

$$P_k^{calc} = V_k\{\sum_{m\in k}[V_m(G_{km}\cos\theta_{km} + B_{km}\,\mathrm{sen}\,\theta_{km})]\} \quad (7)$$

$$Q_k^{calc} = V_k\{\sum_{m\in k}[V_m(G_{km}\,\mathrm{sen}\,\theta_{km} - B_{km}\cos\theta_{km})]\} \quad (8)$$

Conforme a Figura 14 pode-se observar que cada barra está relacionada a 6 variáveis, quais sejam V, θ, P_g, $Q_{g,}\, P_c$ e Q_c. As potências ativas e reativas consumidas em cada barra, P_c e Q_c são conhecidas. Entre as demais variáveis restantes para serem especificadas, duas precisam ser definidas para que o problema possa ser resolvido fazendo uso das equações 8 e 9. Assim, define-se os tipos de barra do sistema, da seguinte forma:

a) Barra tipo P_q - são aquelas onde as cargas (P_c e Q_c) são especificadas e o módulo e ângulo da tensão na barra (V e θ) são calculados;
b) Barra tipo P_v - são aquelas onde a potência ativa gerada (P_g) e o módulo da tensão na barra (V) são especificados, e a potência reativa gerada ($Q_{g,}$), e o ângulo da tensão na barra (θ) são calculados;
c) Barra tipo V_θ ou referência - são aquelas onde V e θ são especificados e P_g e Q_g são calculados.

2.6.2.2 Formulação Básica e Resolução pelo Método de Newton-Raphson

Para um sistema de NB barras, o problema do fluxo de carga pode ser decomposto em duas partes:

Na 1ª parte tem-se $2.\mathrm{NB}$ equações para as barras do tipo P_q e NB equações para as barras tipo P_v. Destas equações calculam-se as incógnitas V e θ para todas as barras.

Na 2ª parte tem-se NB equações para as barras tipo P_v com as quais se determina as potências Q geradas e mais 2 equações para cada barra de referência onde calculam-se as potências P e Q geradas para contrabalançar as perdas em uma barra por:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k^{calc} \tag{8}$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k^{calc} \tag{9}$$

Sendo:

a) ΔP – Vetor dos desvios de potência ativa;

b) ΔQ – Vetor dos desvios de potência reativa;

c) P_k^{esp} - Vetor das injeções de potência ativa especificados nas barras;

d) Q_k^{esp} - Vetor das injeções de potência reativa especificados nas barras;

e) P - Vetor das injeções de potência ativa calculados pela Equação (7);

f) Q - Vetor das injeções de potência reativa calculados pela Equação(8).

O objetivo do problema de fluxo de potência é calcular os módulos das tensões e seus respectivos ângulos, ou seja, pretende-se encontrar V_k e θ_k para as barras PQ, e θ_k para as barras PV. Dessa forma, o vetor de incógnitas é dado por:

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{V} \end{bmatrix} \tag{10}$$

Onde $\boldsymbol{\theta}$ é o vetor dos ângulos das tensões das barras P_q e P_v , , e V é o vetor dos módulos das tensões das barras P_q. Dessa forma, as equações algébricas não lineares, são definidas por:

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Delta P} \\ \boldsymbol{\Delta Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{P^{esp}} - \boldsymbol{P}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) \\ \boldsymbol{Q^{esp}} - \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{11}$$

Onde:

g) ΔP – Vetor dos desvios de potência ativa;

h) ΔQ – Vetor dos desvios de potência reativa;

i) P_k^{esp} - Vetor das injeções de potência ativa especificados nas barras;

j) Q_k^{esp} - Vetor das injeções de potência reativa especificados nas barras;

k) P - Vetor das injeções de potência ativa calculados pela Equação (7);

l) Q - Vetor das injeções de potência reativa calculados pela Equação(8).

Como esse sistema de equações algébricas não lineares não possui solução direta, o sistema deve ser resolvido através de métodos iterativo.

Após a solução do processo iterativo, calculam-se os valores das injeções de potência ativa e reativa na barra V_θ e a injeção de potência reativa das barras P_V.

Como mencionado anteriormente, o problema de fluxo de potência representado pelas Equações (10) e (11) deve ser resolvido por métodos interativos. O método de newton-Raphson será apresentado na próxima seção.

2.6.2.3 Método de Newton-Raphson

Seguirá a solução de um sistema de equações não lineares pelo método de Newton consiste em resolver o seguinte sistema de equações lineares a cada iteração (Monticelli):

$$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}^{v}) = -\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}^{v}) \cdot \Delta \boldsymbol{x}^{v}. \tag{12}$$

Onde:

a) $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x})$ – matriz Jacobiana associada ao sistema;

b) v – contador de iterações.

Sendo que o vetor de incógnitas, x, deve ser atualizado a cada iteração, ou seja, a aplicação do método de Newton para solução do problema de fluxo de potência, resulta na seguinte matriz Jacobiana (Monticelli):

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{V}, \boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta \boldsymbol{P})}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial(\Delta \boldsymbol{P})}{\partial \boldsymbol{V}} \\ \frac{\partial(\Delta \boldsymbol{Q})}{\partial \boldsymbol{\theta}} & \frac{\partial(\Delta \boldsymbol{Q})}{\partial \boldsymbol{V}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H} & \boldsymbol{N} \\ \boldsymbol{M} & \boldsymbol{L} \end{bmatrix}. \tag{13}$$

.

Assim, o sistema linear ser resolvido a cada iteração é dado por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{P} \\ \Delta \boldsymbol{Q} \end{bmatrix}^{v} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{H} & \boldsymbol{N} \\ \boldsymbol{M} & \boldsymbol{L} \end{bmatrix}^{v} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{\theta} \\ \Delta \boldsymbol{V} \end{bmatrix}^{v} \tag{14}$$

A atualização do vetor composto pelos módulos e ângulos das tensões é obtida a partir da correção alcançada pela solução do sistema da Equação (14), de forma que:

$$\boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^{v} + \Delta\boldsymbol{\theta}^{v} \quad (15)$$

$$\boldsymbol{V}^{v+1} = \boldsymbol{V}^{v} + \Delta\boldsymbol{V}^{v}. \quad (16)$$

Segundo Monticelli, Alcir José (1983), a aplicação do Método Newton-Raphson para a solução do fluxo de potência é dado pelo algoritmo a seguir e apresenta os seguintes passos:

1) Fazer $v = 0$ e escolhe valores iniciais dos ângulos e os módulos das tensões para as barras P_Q e P_V e para as barras P_Q respectivamente;
2) Calcular $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}^{v})$,isto é, para o subproblema 2 calclular o $P_k(\boldsymbol{V}^{v}, \boldsymbol{\theta}^{v})$ para as barras P_Q e P_V e $Q_k(\boldsymbol{V}^{v}, \boldsymbol{\theta}^{v})$ para as barrasP_Q. Além disso, calcular os desvios de injeção de potência $\Delta\boldsymbol{P}_k^{v}$ e $\Delta\boldsymbol{Q}_k^{v}$;
3) Testar convergência: se $\max\{|\Delta\boldsymbol{P}_k^{v}|\} \leq \varepsilon_P$ e $\max\{|\Delta\boldsymbol{Q}_k^{v}|\} \leq \varepsilon_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução $(\boldsymbol{V}^{v}, \boldsymbol{\theta}^{v})$; senão seguir para o passo (4);
4) Calcular a matriz jacobiana $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{V}^{v}, \boldsymbol{\theta}^{v})$;
5) Determinar a nova solução $\boldsymbol{\theta}^{v+1} = \boldsymbol{\theta}^{v} + \Delta\boldsymbol{\theta}^{v}$ e $\boldsymbol{V}^{v+1} = \boldsymbol{V}^{v} + \Delta\boldsymbol{V}^{v}$, sendo $\Delta\boldsymbol{\theta}^{v}$ e $\Delta\boldsymbol{V}^{v}$ determinados a partir da solução do sistema linear definido por:

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\theta} \\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}^{\boldsymbol{v}} = -[\boldsymbol{J}(\boldsymbol{V}^{v}, \boldsymbol{\theta}^{v})]^{-} \cdot \begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P} \\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}^{\boldsymbol{v}} \quad (17)$$

6) Fazer $v + 1 \rightarrow v$ e voltar ao passo (2).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As ferramentas a serem utilizadas serão os softwares para auxílio na análise do fluxo de potência e cálculo de curto circuito, desta forma possibilitando simular o sistema fotovoltaico já instalado e prever a expansão, também através de simulação.

O software a ser utilizado para a análise do fluxo de potência será um pacote de códigos para Matlab/Octave, o Matpower 6.0. Como não teve acesso a versão acadêmica do Matlab e é um software necessário adquirir licença, adotou se utilizar um programa gratuito capaz de realizar as mesmas atribuições, Octave.

Para a simulação do sistema fotovoltaico e cálculo de curto circuito será utilizado o software ETAP 18.0, este é um programa completo para projeto, simulação, operação, controle otimização e automação de geração, transmissão, distribuição e sistemas de energia industrial e necessita se possuir uma licença para uso.

3.1 OCTAVE

O GNU Octave é um software livre, possui linguagem aberta e pode receber contribuições de qualquer pessoa. Originalmente escrito por Eaton (1997) e diversos colaboradores.

O software livre possui diversas ferramentas para soluções numéricas de problemas como álgebra linear, determinação de raízes de equações, polinômios e integração de equações diferenciais.

Esse programa é muito utilizado em universidades, pois possuem diversas ferramentas numéricas e visualização gráfica.

3.1.1 Matpower

O Matpower é uma ferramenta bastante utilizada por pesquisadores e estudantes, desenvolvida pela cornell university. A sua distribuição é gratuita sob termos da GNU General Public License.

A ferramenta pode ser executada em ambiente Matlab ou Octave, e é utilizada para cálculo de fluxo de potência e otimização.

Através do Matpower pode ser simulado sistemas de pequeno, médio e grande porte por meio de algoritmos de cálculo de fluxo de potência. O software conta com vários casos de teste pré-prontos em sua biblioteca e podendo ser utilizado como base. Desta forma, a ferramenta possibilita simulações para análise de fluxo de potência e fluxo de potência ótima.

O matpower deve estar no mesmo diretório que o OCTAVE para que seu funcionamento tenha êxito e a extensão de seus arquivos são .m.

Os arquivos do matpower pode ser reconhecido pela sua extensão .m da qual define uma estrutura mpc. O documento é estruturado com dados de entrada sendo barra, gerador e ramo sendo matrizes, exceto base MVA que é um escalar. Cada linha da matriz refere se a uma barra, um gerador ou um ramo.

A matriz bus contém os dados das barras do sistema, figura 15. A matriz gen, os dados dos geradores (figura 16). Já a matriz branch (figura 17) contém os dados de linha do sistema.

Figura 15 - Matriz das barras do sistema.

```
%   MATPOWER

%% MATPOWER Case Format : Version 2
mpc.version = '2';

%%-----  Power Flow Data  -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 100;

%% bus data
% bus_i type  Pd  Qd  Gs  Bs  area  Vm  Va  baseKV  zone  Vmax  Vmin
mpc.bus = [
   1 3 50  30.99 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
   2 1 170 105.35  0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
   3 1 200 123.94  0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
   4 2 80  49.58 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
];
```

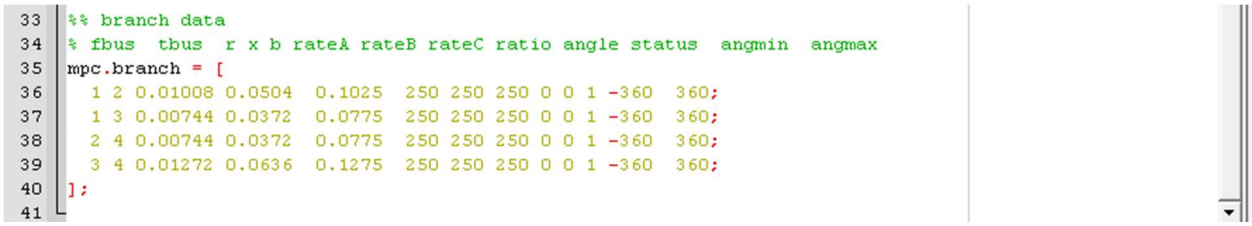
FONTE – AS AUTORAS (2018).

Figura 16 - Matriz dos geradores do sistema.

```
%% generator data
% bus Pg  Qg  Qmax  Qmin  Vg  mBase status  Pmax  Pmin  Pc1 Pc2 Qc1min  Qc1max  Qc2min  Qc2max  ramp_a
mpc.gen = [
   4 318 0 100 -100  1.02  100 1 318 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
   1 0 0 100 -100  1 100 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
];
```

FONTE – AS AUTORAS (2018).

Figura 17 - Matriz das ligações do sistema.



```
%% branch data
% fbus  tbus  r x b rateA rateB rateC ratio angle status  angmin  angmax
mpc.branch = [
   1 2 0.01008 0.0504  0.1025  250 250 250 0 0 1 -360  360;
   1 3 0.00744 0.0372  0.0775  250 250 250 0 0 1 -360  360;
   2 4 0.00744 0.0372  0.0775  250 250 250 0 0 1 -360  360;
   3 4 0.01272 0.0636  0.1275  250 250 250 0 0 1 -360  360;
];
```

FONTE – AS AUTORAS (2018).

Os dados das matrizes são divididos em tubulações, através das tubulações são inseridos as informações do sistema. A partir das tabela 2, 3 e 4 tem-se descritivo contendo abreviação de cada matrizes do arquivo de entrada do MATPOWER.

Tabela 2 - Informações da matriz BUS.

Abreviação	Tubulação	Descrição
bus_i	1	Número de barras
$type$	2	Tipo de barra. 1 para PQ, 2 PV, 3 referência
P_d	3	Potência ativa consumida, em MW
Q_d	4	Potência reativa consumida, em MVAr
G_s	5	Condutância shunt na forma de potência absorvida em mw
B_s	6	Susceptância shunt na forma de potência reativa injetada em MVar
$area$	7	Número da área da barra, em número inteiro
V_m	8	Magnitude de tensão, em p.u
V_a	9	Ângulo de tensão, em graus
$base_{kv}$	10	Tensão base da terra, em KV
$zone$	11	Zona de perda, em número inteiro
V_{max}	12	Tensão máximo em p.u
V_{min}	13	Tensão mínima, em p.u

FONTE – AS AUTORAS (2018).

Tabela 3 - Informação da matriz GEN.

Abreviação	Tubulação	Descrição
bus_i	1	Número de barra
P_g	2	Potência ativa gerada, em MW
Q_g	3	Potência reativa gerada, em MVAR
Q_{max}	4	Geração de potência reativa máxima, em MVAR
Q_{min}	5	Geração de potência reativa mínima em MVAR
V_g	6	Definição da magnitude de tensão
M_{base}	7	Potência base deste gerador, em MVA
$status$	8	Valor positivo para "em funcionamento" e negativo para "fora de serviço"
P_{max}	9	Geração de potência ativa máxima
P_{min}	10	Geração de potência ativa mínima
P_{c1}	11-21	Os demais dados não foram utilizados neste trabalho, sendo atribuídos valores máximos ou mínimos quando pertinente em cada caso

FONTE – AS AUTORAS (2018).

Tabela 4 - Informação da Matriz BRANCH.

Abreviação	Tubulação	Descrição
f_{bus}	1	De barra
t_{bus}	2	Para barra
r	3	Resistência r, em p.u
x	4	Reatância x, em p.u
b	5	Susceptância total da linha b, em p.u
$rate_A$	6	Rate A long term rating
$rate_B$	7	RateB long term rating
$rate_C$	8	Rate C emergency rating
$rate_o$	9	Razão nominal do transformador. Igual a 0 para linhas de transmissão
$angle$	10	Ângulo de atraso do transformador
$status$	11	Status da linha. 1 para em serviço, 0 para fora de serviço
ang_{min}	12	Diferença angular mínima entre as barras
ang_{max}	13	Diferença angular máxima entre as barras

FONTE – AS AUTORAS (2018).

3.2 ETAP 18.0

O ETAP - Eletrical Power System Analisys & Operation é uma ferramenta para análise de projetos e teste para sistemas de energia. Projetado e

desenvolvido para obter múltiplas visões com redes AC e DC, cabos, malhas de terra, painéis, arco, coordenação e seletividade de dispositivos de proteção e diagrama para sistemas de controle.

O software oferece o melhor e mais abrangente conjunto de soluções para o sistemas de energia oferecendo engenhara analítica especializada na análise, simulação, monitoramento, controle, otimização e automação de sistemas de energia elétrica (ETAP, 2018).

Através dos módulos de simulação, o ETAP pode utilizar dados em tempo real realizando monitoramento avançado, simulação em tempo real, otimização, sistemas de gerenciamento de energia e redução de carga em alta velocidade. Desta forma, se tornado uma ferramenta de análise abrangente.

3.2.1 Funcionamento

O programa virtualiza a operação do sistema elétrico, o tornando bem próximo do real. Um exemplo de operação virtual do ETAP, assim que se altera o status de operação de algum motor no sistema a ser simulado, o programa instantaneamente indica no diagrama na linha específica a mudança de cor indicando qualquer problema.

O software possui integração de dados, permitindo que com a mesma entrada de dados possa ser realizado, como por exemplo, análise de fluxo de potência ou análise da redução da capacidade de um cabo estando no mesmo sistema. Através dessa integração de dados fornece consistência e todo o sistema e assim, eliminando várias entradas e dados para um mesmo elemento e economizando tempo.

O uso do ETAP não requer treinamento inicial, e a empresa criadora do oferece vários vídeos online para aprendizagem em inglês.

Há uma variedade de opções para apresentar ou visualizar o sistema elétrico. Uma das ferramentas mais poderosas do software é a rede composta e os elementos motores. Através dos elementos compostos, esse recurso permite anexar graficamente elementos da rede dentro deles próprios. Como exemplo, pode se citar uma rede elétrica complexa da qual possuirá várias redes internamente e através dessa ferramenta mantém se um diagrama limpa e organizado exibindo o que o usuário deseja.

O software permite aos projetistas e engenheiros conceitualizam sistemas coletores, determinar o índice de força do vento e da energia solar fotovoltaica para a realização de conexão dessas redes. O ETAP inclui modelos abrangentes de energias renováveis combinados com cálculos de análise de sistemas de potência para simulação com precisão, análise preditiva, dimensionamento de equipamentos e verificação de campo de parques eólicos, parques solares e outros recursos de energia renovável distribuída. Essa ferramenta será utilizada neste presente trabalho.

3.2.2 Licença

O programa encontra se disponível através de demo com download através do site e serial para sua ampla utilização.

Através do programa demo, o usuário possuirá uma versão exemplificada e podendo usufruir de itens importantes disponíveis porém com restrições.

O programa licenciado, possui todas as ferramentas disponíveis completas para o usuário.

Neste presente trabalho, necessitou-se entrar em contato com a empresa desenvolvedora do software e solicitar formalmente via formulário enviado pela Operation Technology.

O processo de pedido da licença teve início em maio de 2018. A Professora e Orientadora Dr. Elizete Maria Lourenço solicitou a criadora a versão acadêmica para uso neste trabalho e assim sendo responsável pela licença no Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR.

O software foi enviado da Califórnia, onde é sediada a empresa e no final de junho recebido no DELT. A licença vem instalada em um único pen-drive, do qual para usufruir do programa deverá estar conectado anteriormente à abertura do software no computador.

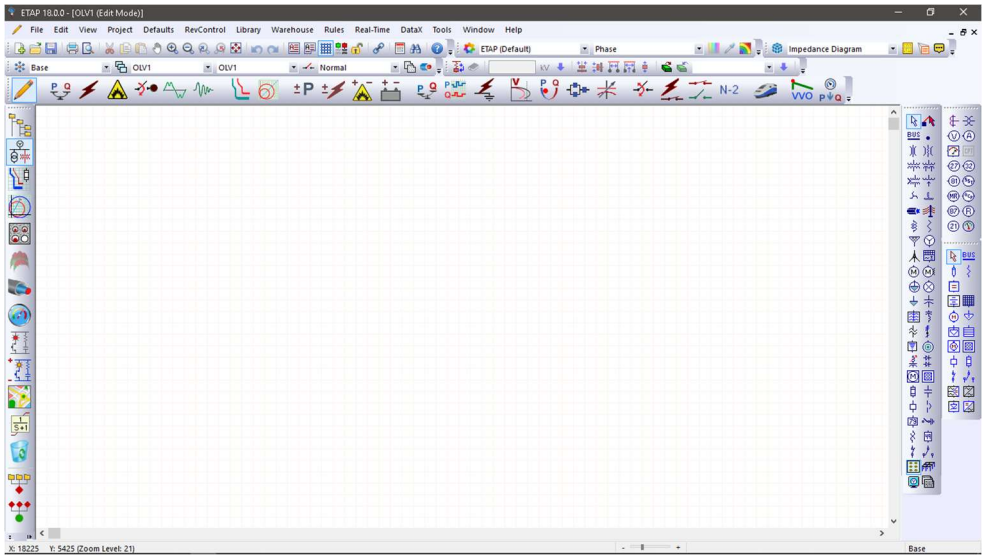
3.2.3 Ferramentas e componentes a serem utilizadas

O ETAP é um programa complexo para modelagem de sistemas elétricos e possibilitando a análise desde ao fluxo de potência, cálculo de curto circuito, estudo de harmônicos, coordenação e seletividade de proteção, análise de condutores, estudo de arco elétrico e entre outros.

Devido ao programa ser completo, optou-se por utilizar as suas ferramentas de fluxo de potência e cálculo de curto circuito. Desta forma, não foi necessária a utilização do Matpower como descrito inicialmente na proposta. O software ETAP atende todos os requisitos para o presente trabalho. Como os estudos relativos ao Matpower já haviam sido concluídos, as descrições dessa ferramenta foram mantidas nesse documento (vide Seção 1.1 do Capítulo 4).

O software possui uma interface simples, Figura 18, e de fácil entendimento para uso.

Figura 18 - Interface do programa ETAP.



Fonte - As Autoras (2018).

As ferramentas de análise são encontradas na barra superior, Figura 19. Através desta barra, tem-se todas as ferramentas disponíveis do software.

Figura 19 - Barra de ferramentas disponível para realizar as análises.

Fonte - As Autoras (2018).

Para o trabalho será utilizado a análise de curto circuito e análise de fluxo de potência do programa, com os ícones apresentados na Figura 20.

Figura 20 - Ícones para análise de fluxo de potência e curto circuito, respectivamente.

Fonte - As autoras (2018).

O fluxo de potência do software é simples de ser utilizado, ao clicar no ícone da análise de fluxo de potência no sistema abrirá uma nova barra no lado direito do programa, Figura 21. Para realizar a análise basta clicar no primeiro ícone da barra.

A ferramenta para análise de curto circuito é completa, podendo selecionar a barra da qual deseja a falta e o tipo de curto circuito desejado. Os tipos de curto são trifásico, fase-fase e fase terra. Para ter acesso a estas ferramentas, clica-se no ícone de curto circuito e o programa abrirá uma nova barra na lateral, Figura 22, direita do software.

Para a montagem do sistema, ou seja, criar barras, incluir cabos, transformadores, disjuntores, geração fotovoltaica, eólica, dispõe-se de uma barra de componentes. Essa barra se localiza no lado direito do software, Figura 23. Essa barra de componentes possui diversificação entre componentes a serem utilizados em rede AC e rede CC.

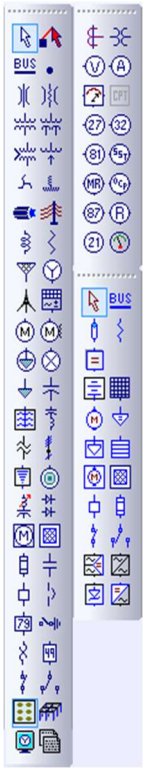
Figura 21 - Barra de ferramenta para o fluxo de potência.

Fonte - As Autoras (2018).

Figura 22 - Barra com as funcionalidades para análise de curto circuito.

Fonte - As autoras (2018).

Figura 23 - Barra de ferramentas para inserção dos componentes AC e DC.



Fonte - As autoras (2018).

Cada componente deverá ser preenchido conforme as necessidade do projeto e análise. Para todos os componentes necessita-se colocar especificações e especificamente para transformadores, subestação e geradores há necessidade de saber as impedâncias dos mesmos ou utilizar o modelo padrão do software.

Neste trabalho será utilizado componentes para subestação, transformadores, cabos, impedâncias, placa fotovoltaica, barras e inversores.

4 SISTEMA ATUAL

Os dados apresentados neste capítulo se referem ao sistema atual da EGNEX e foram disponibilizados pela empresa.

A empresa DIAM Brasil LTDA, localizada na Av. Guatupê, 2293 em São José dos Pinhais, conta com um sistema de geração fotovoltaico de aproximadamente 19,65 MWh por mês. O sistema foi instalado para atender a demanda de energia da unidade consumidora e eventualmente excedentes de energia são injetados na rede elétrica da COPEL, caso o sistema esteja gerando mais energia do que as cargas consumindo.

A entrada de energia existente acontece em média tensão na tensão de 13,8kV. O ramal de MT é direcionado a um poste dentro da propriedade do cliente, que contém um transformador trifásico à óleo de 300kVA - 13,8kV/220V/127V. A medição da energia e a proteção são feitas na baixa tensão sendo o disjuntor geral trifásico com corrente nominal de 800A.

Após a medição e proteção, os alimentadores 2x[3x95(50)T95)mm², em EPR 90°C, são levados a um quadro geral de Baixa Tensão (QGBT). O QGBT protege toda a instalação elétrica da indústria.

O QGBT, localizado no eletrocentro, possui disjuntor geral trifásico, em caixa moldada, de 800A. Composto por 2 disjuntores: 1 disjuntor trifásico, em caixa moldada, de 400A exclusivo para o sistema fotovoltaico; e 1 disjuntor trifásico, em caixa moldada, de 800A exclusivo para a proteção de um quadro geral existente dentro da indústria. A proteção contra surtos é realizada com 4 DPS de 175V e o quadro alimentado em 220/127V.

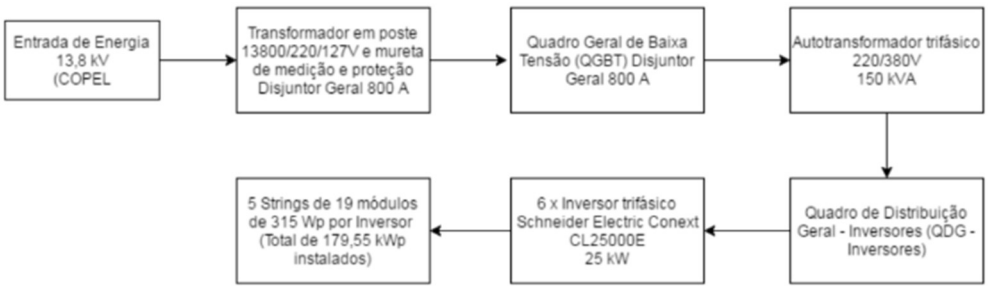
O Quadro de Geração Inverores (QDG INVERSORES), localizado no eletrocentro, possui disjuntor geral trifásico, em caixa moldada, de 250A. O quadro é composto por 6 disjuntores trifásicos, em caixa moldada, de 50A. Cada um dos disjuntores de 50A alimenta um inversor trifásico, exclusivamente. A proteção contra surtos é realizada com 4 DPS de 275V e alimentado em 380/220V.

Para adequar os níveis de tensão, há entre o QGBT e o QDG inversores um autotransformador trifásico 150kVA a seco, que transforma a tensão trifásica 380V para a tensão trifásica 220V.

O sistema é constituído por 570 painéis fotovoltaicos de 315 Wp cada, distribuídos em 30 arranjos de 19 painéis (Figura 24), que são conectados à rede da COPEL através de 6 inversores (CL 25000 E - Schneider Electric) de 25kW grid-tie conectados a um quadro elétrico. Após o QDG dos inversores há um autotransformador, do qual transforma a tensão de entrada de 380V para tensão de saída de 220V e toda a carga é alimentada.

As estruturas dos módulos fotovoltaicos estão instaladas em uma inclinação de 17° com relação ao solo. A instalação do sistema fotovoltaico na região permite a utilização de uma grande área com boa exposição ao som, com altura suficiente para amenizar problemas de sombreamento causados por obstáculos externos, como árvores, morros e encostas. Para melhor visualização fez-se um esquema simplificado das ligações do sistema, Figura 24.

Figura 24 - Diagrama Simplificado de ligações.



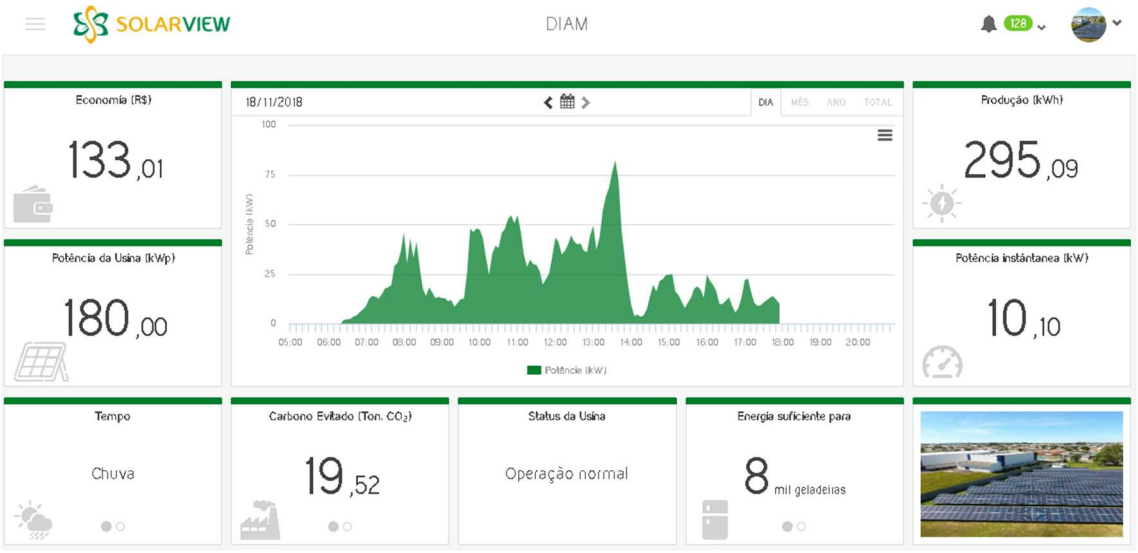
Fonte: Memorial descritivo do projeto de minigeração de 179,55kW (2017).

4.1 MONITORAMENTO DO SISTEMA

O sistema possui monitoramento online através do software SolarView. Este software possibilita o monitoramento e gestão de dados do sistema, desde ao consumo até a produção de energia a partir dos inversores. O acesso necessita de um login e senha dos responsáveis.

Através do monitoramento é possível saber a geração anual, mensal e diária. Também demonstra a economia anual, mensal e diária, Figura 25.

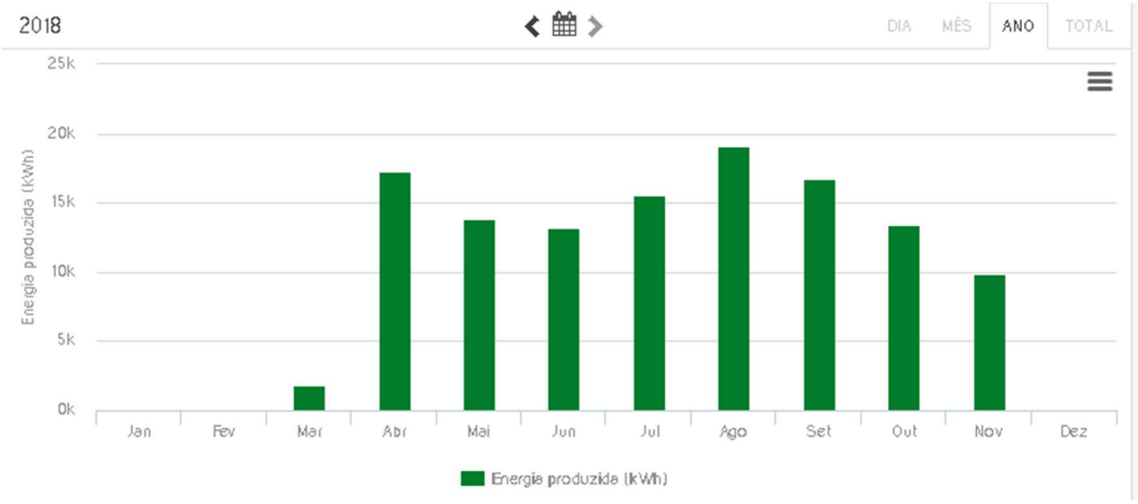
Figura 25 - Layout do software Solar View.



Fonte - Solar View (2018).

Através desse monitoramento, desde quando instalado na DIAM (março 2018) até a data de 18 de novembro de 2018 (quando este documento foi produzido), a mini geração forneceu um total de 156,88 mil kWh e economizou R$ 133,07 mil reais. Essa geração está ilustrada na Figura 26. O mês de agosto é o que mais gerou energia, cerca de 19,15 mil kWh e uma economia de R$ 8,63 mil reais mensal.

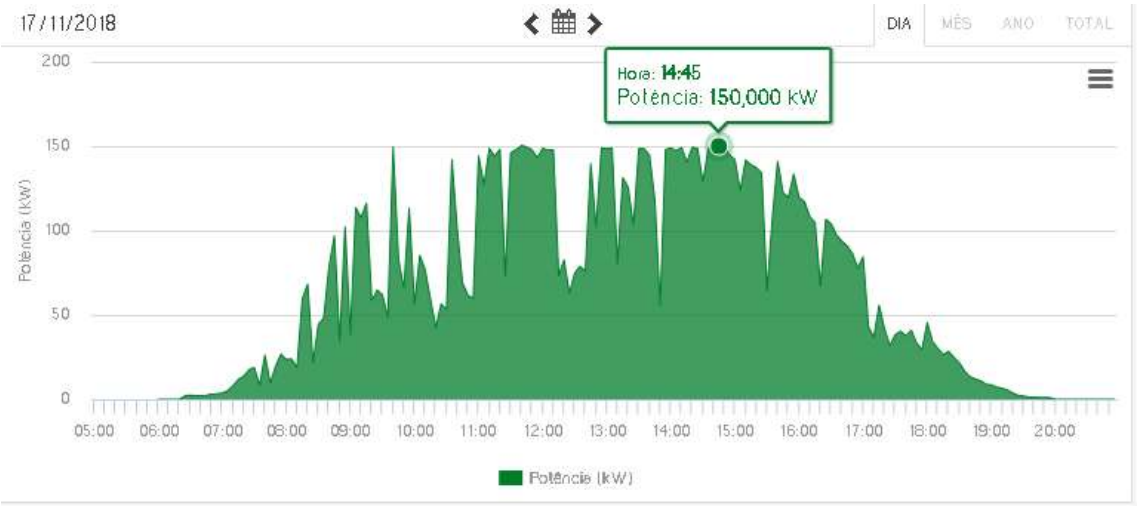
Figura 26 - Produção anual de energia via monitoramento.



Fonte - Solar View (2018).

No mês de novembro, no dia 17 o sistema alcançou a geração máxima às 14h45, Figura 27. Com geração de 1,05 mil kWh e uma economia diária de R$ 474,18 reais.

Figura 27 - Geração máxima obtida às 14h45.



Fonte - Solar View (2018).

5 EXPANSÃO

A empresa está classificada no grupo A4, atendida em 13,8kV e demanda mensal 113kW com consumo mensal de 40000kWh.

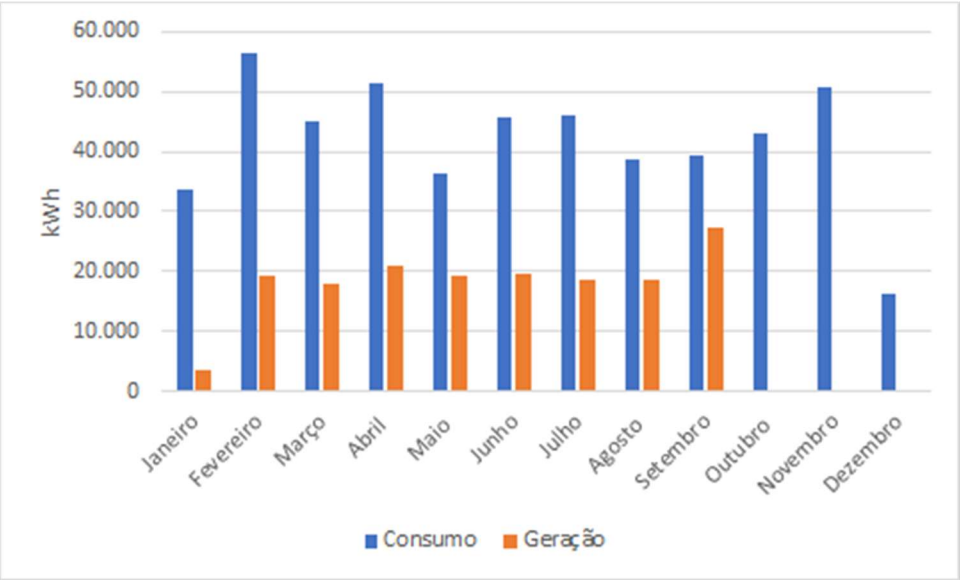
Tabela 5 - Dados de geração e consumo mensal.

Mês/Ano	Consumo (kWh)	Consumo R$	Geração (kWh)
Janeiro (2018)	33.635	R$ 24.423,00	3.489
Fevereiro (2018)	56.342	R$30.926,00	19.112
Março (2018)	45.047	R$24.882,00	18.024
Abril (2018)	51.392	R$26.711,88	20.898
Maio (2018)	36.317	R$21.128,00	19.437
Junho (2018)	45.649	R$28.709,00	19.451
Julho (2018)	45.888	R$28.961,00	18.595
Agosto (2018)	38.814	R$24.507,00	18.705
Setembro (2018)	39.374	R$21.945,00	27.213
Outubro (2017)	42.891	R$33.302,00	
Novembro (2017)	50.558	R$38.314,00	
Dezembro (2017)	16.141	R$16.296,00	

Fonte - DIAM (2018).

O gráfico da Figura 28 compara a geração com o consumo do sistema instalado.

Figura 28 - Gráfico ilustrando o comparativo entre geração com consumo do sistema instalado.



Fonte: As Autoras (2018).

Para os consumidores do grupo A (Alta tensão), possui um valor fixo de demanda contratada, ou seja, um limite de potência ativa que a distribuidora deve disponibilizar no ponto de entrega. Conforme o valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW). (COPEL). Devido a este limite, os cabos e elementos da rede, que atendem este consumidor, são projetados para este fluxo de potência ativa.

Desta forma, o sistema fotovoltaico dimensionado foi limitado pela demanda contratada, visto que em domingos e feriados, o sistema instalado não terá cargas significantes, pois a empresa não possui funcionamento nesses dias, e assim, injetando toda a energia gerada na rede.

A demanda contratada pela empresa é de 249kW (COPEL), para realização da expansão considerou-se 85% da demanda contratada. A qual é a margem considerada em projetos de geração fotovoltaica, visando não sobrecarregar o sistema, quando o fluxo de potência de geração for elevado (EGNEX), resultando em, aproximadamente, 212Kw. A potência instalada atual é de 180kW, descontando da potência total para atender o consumo desejado, tem-se 32kW de potência.

Para realização da expansão considera-se os painéis com potência de 315W, para atender a potência de 32kW, divide-se a potência desejada pela

potência por painel, resultando em 102 painéis, por questões de simplicidade de realização da compra, foi utilizado 105 painéis e assim, possuindo uma potência total de expansão conforme a Equação 18:

$$P_{total} = 105.315 = 33{,}075\ kW \tag{18}$$

Comercialmente, via catalogo da Schneider 2014, não encontrou-se inversor com potência de 32/33kW, para manter a coerência e especificações aproximadas do projetos anterior e assim, realizar a viabilidade econômica, considerou-se o inversor de 35kW, similar ao apresentado na Figura 29.

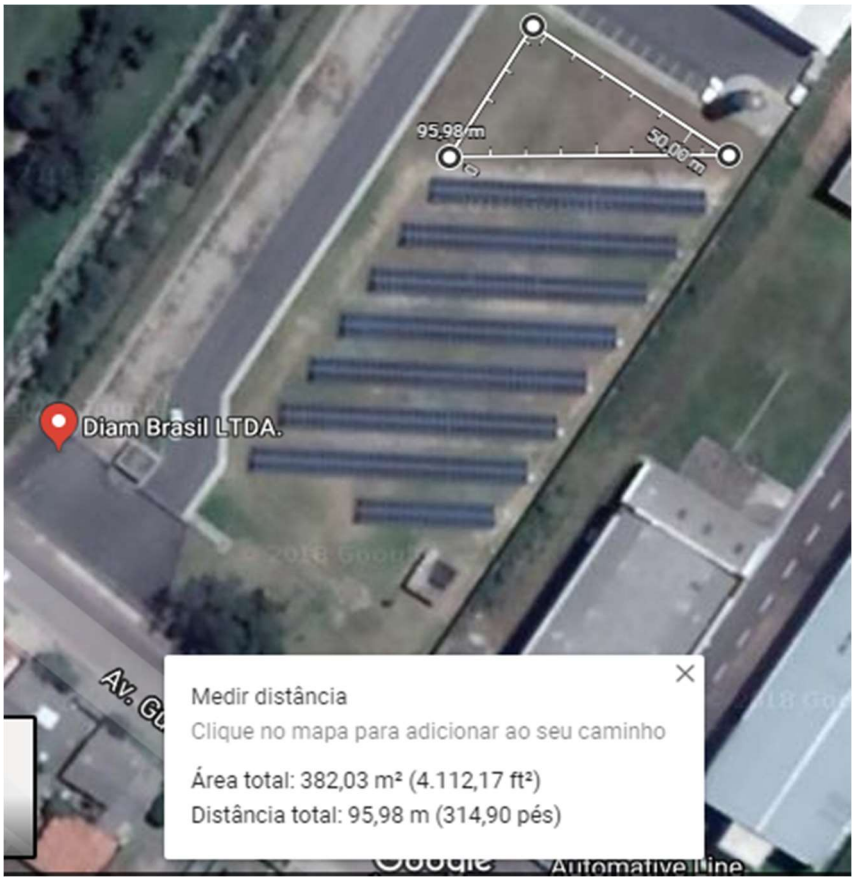
Figura 29 - Inversor considerado para estudo de viabilidade econômica.

Fonte: Catálogo de Inversores Schneider (201).

Será considerado o mesmo painel já utilizado na DIAM (Hareonsolar, HR-315W), possuindo potência de 315W, e conforme o Data Sheet (HR-300P-24/Ba-HR-330P-24/Ba) o painel possui área de 2 m². Assim, os 105 painéis ocupam uma área aproximada de 210 m².

A Figura 30, apresenta área disponível para instalação dos novos painéis. E assim, observar os 570 painéis já estão existentes.

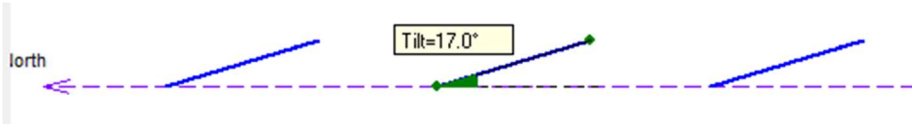
Figura 30 – Painéis solares já existentes na DIAM.



Fonte: Google Maps (2018).

Para questões de projeto, considera-se a inclinação de 17°, como apresentado na Figura 31, em relação ao solo, para evitar a interferência do sombreamento.

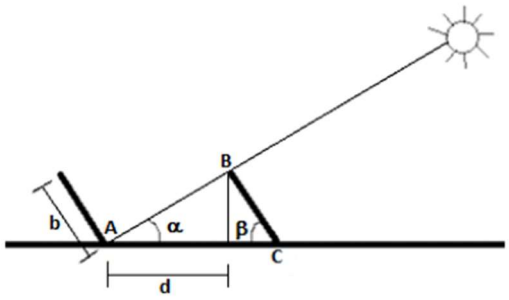
Figura 31 - Representação da inclinação dos painéis e distância entre as fileiras.



Fonte: EGNEX (2018).

Cada fileira contém comprimento de dois painéis, e a estrutura de sustentação é triangular, como mostra a Figura 32, assim possibilitando calcular a distância mínima entre as fileiras para que o sombreamento não interfira na geração dos painéis.

Figura 32 - Representação dos componentes para cálculo da distância mínima entre as fileiras dos painéis.



Fonte: UFRN (2018).

A distância entre as fileiras pode ser calculada através da Equação 19:

$$Dist_{fileiras} = F_e . H_o - H_m \quad (19)$$

Sendo:

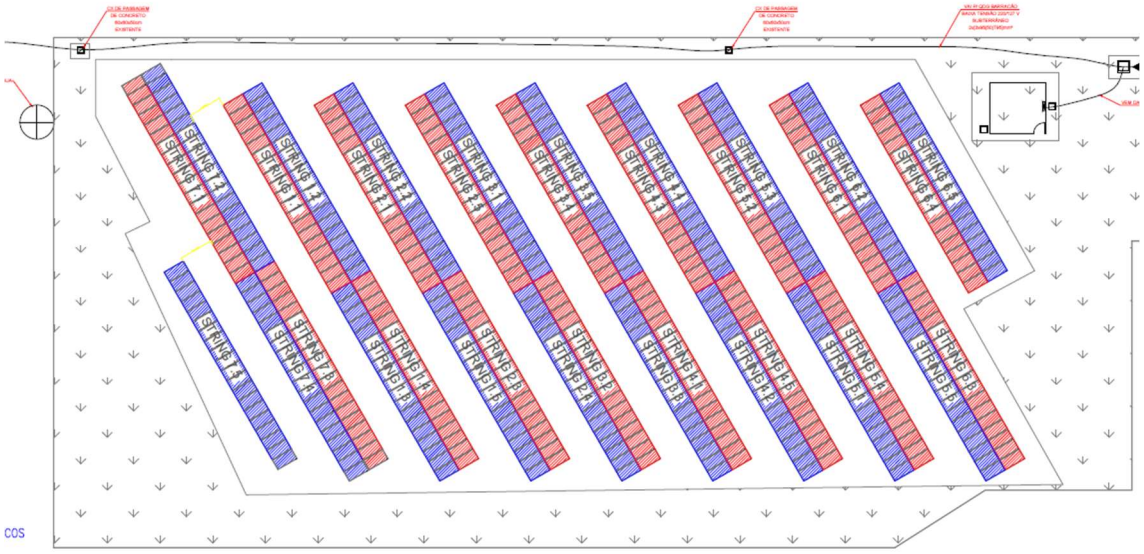
a) F_e = Fator de espaçamento obtido na Figura 33;
b) H_o = Altura do objeto;
c) H_m= Altura em relação ao nível do solo em que se encontram instalados os módulos.

Figura 33 - Fator de espaçamento utilizado para o cálculo da distância entre as fileiras.

Fonte: UTFPR (2006).

No projeto da planta atual considerou-se um espaçamento de 3 metros entre as fileiras, desta forma, mantivemos esse padrão, como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Nova disposição dos painéis após a expansão do sistema de minigeração.



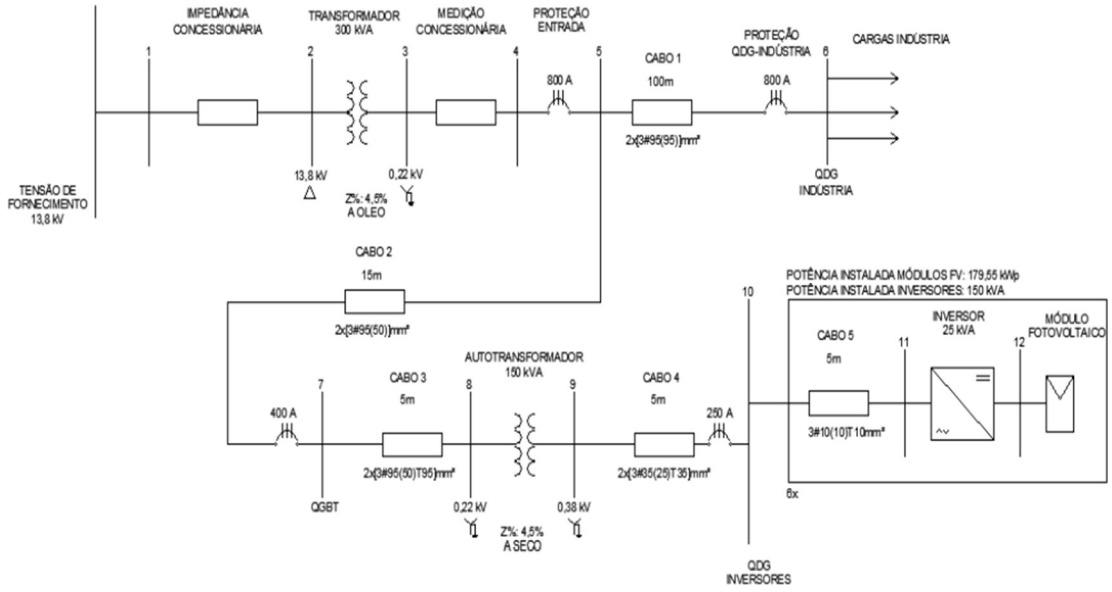
Fonte: EGNEX e Autoras (2018).

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 ANÁLISE DA SITUAÇÃO ATUAL

Inicialmente, utilizou-se o diagrama da empresa DIAM como base para simulação via software ETAP, como apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Diagrama unifilar simplificado geral da DIAM.

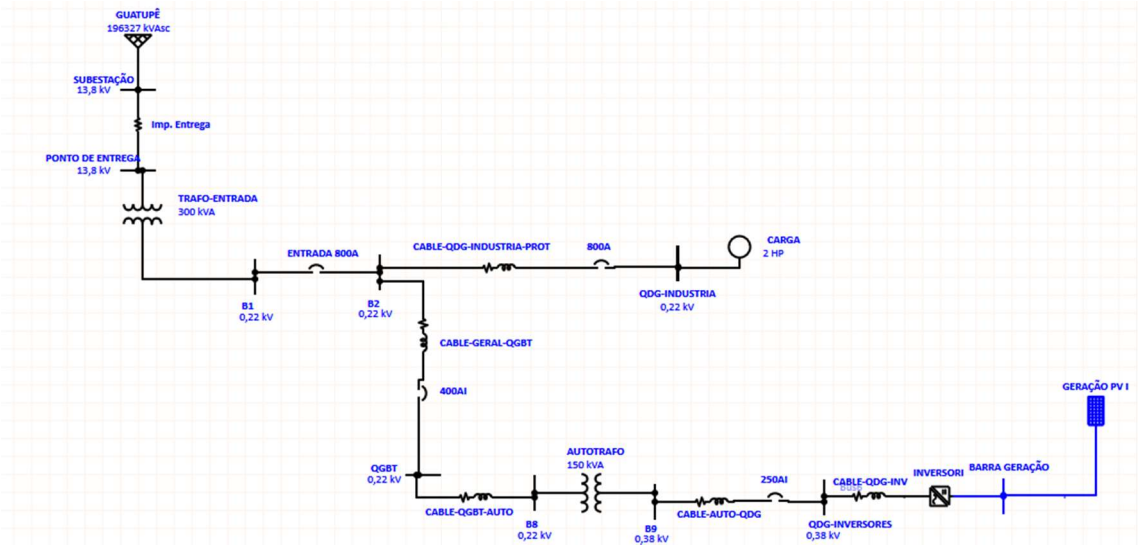


FONTE - Memorial de Cálculo das Correntes de Curto Circuito. Projeto de minigeração fotovoltaico conectado a rede 179,55kW. (2017)

A primeira simulação consistiu em acoplar os elementos conforme o diagrama simplificado, incluindo cabos, disjuntores, inversores e módulos fotovoltaicos, Figura 36. Para os inversores, utilizou o equivalente total com potência de 150kW e equivalente das strings dos painéis instalados totalizando 179,6kW.

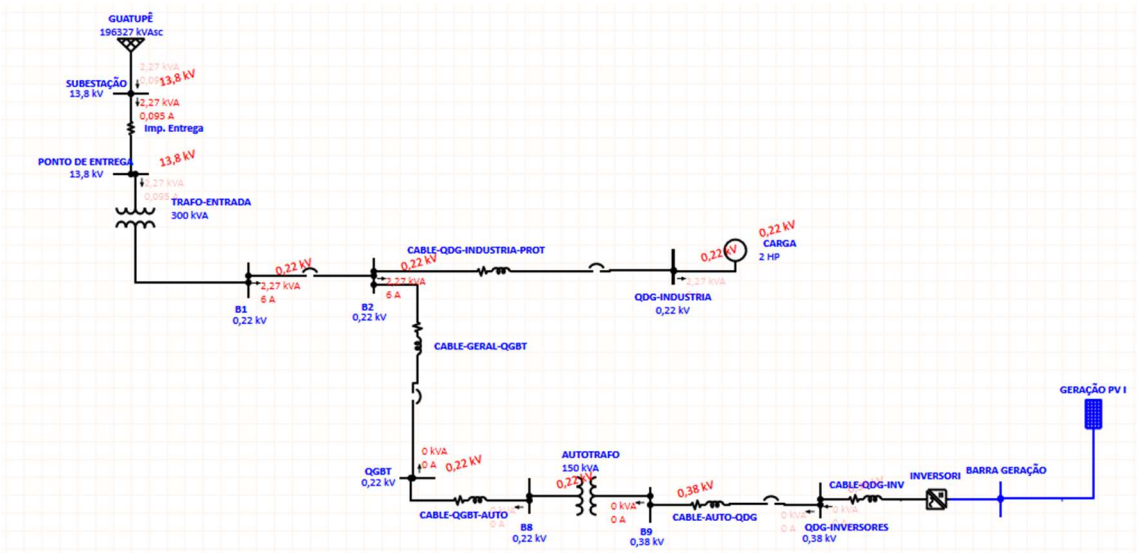
Após utilizar a ferramenta de fluxo de potência, percebeu-se que não havia contribuição de fluxo na minigeração, Figura 37, assim concluindo que haveria erros na modelagem do sistema.

Figura 36 - Simulação inicial do sistema simplificado via software ETAP.



FONTE - AS AUTORAS (2018)

Figura 37 - Simulação do fluxo de potência com contribuição nula.

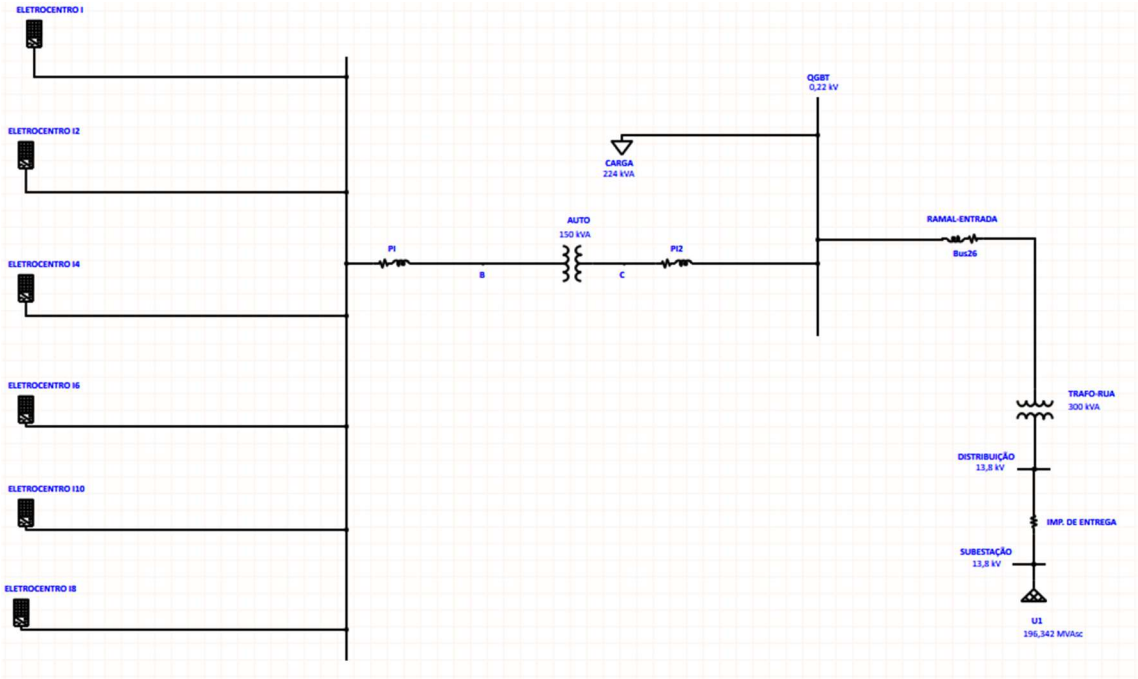


FONTE - AS AUTORAS (2018).

Realizando a análise do sistema inicial simulado, observou-se que o erro de fluxo apresentado era devido às limitações de tensão do inversor do qual era limitado para tensão DC de 1000V, mas o sistema totalizava tensão DC maior que a limite do inversor. Desta forma, realizou-se outra simulação utilizando como base o diagrama unifilar da geração fotovoltaica, Anexo A, e assim modelando o sistema com 6 strings e 95 painéis cada, a string conectada a 1 inversor de 25kW e limitando a tensão DC em 1000V.

Para a segunda tentativa, Figura 38, descobriu-se através das ferramentas do software que há modelo de placa fotovoltaica com inversor. Assim, formando um eletrocentro completo. Desta forma, separou-se em seis eletrocentros conforme disposto em diagrama unifilar. Os eletrocentros são compostos por strings com 19 painéis em série e 5 strings em paralelo. Cada string é ligada à um inversor de 25kW e com tensão DC limitada em 1000V. Após a barra de geração, foi modelado o autotransformador para ter-se tensão de 220V no QGBT.

Figura 38 - Segunda simulação do sistema atual, utilizando a modelagem dos eletrocentros.



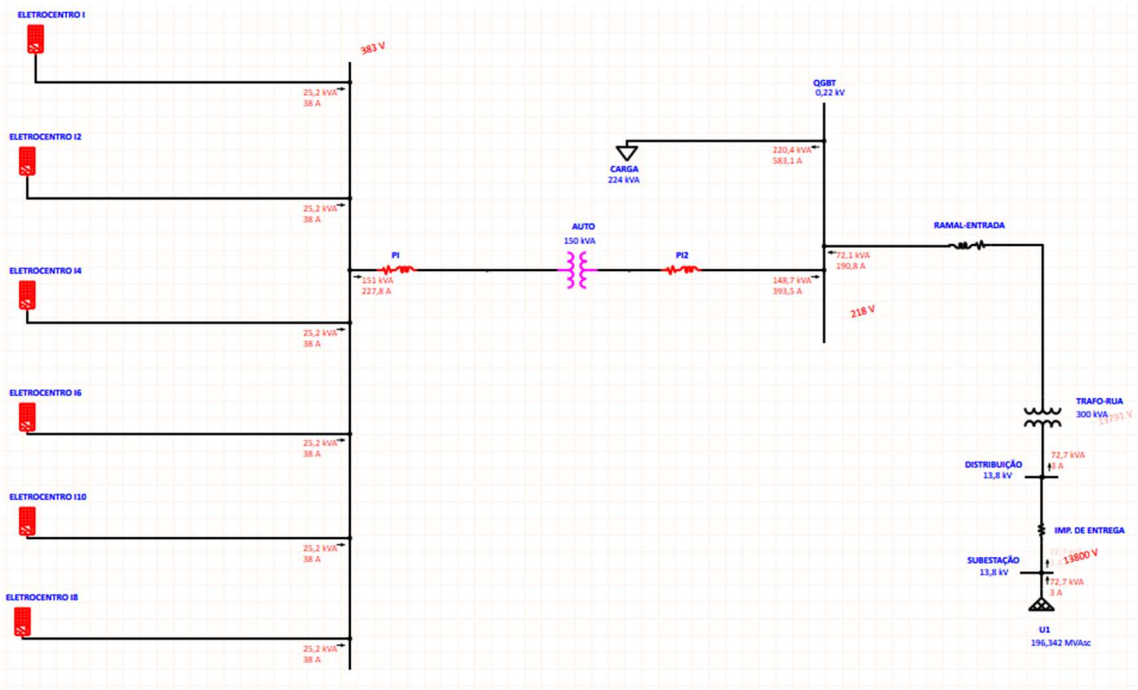
FONTE - AS AUTORAS (2018).

Nesta versão, modelou-se os cabos, transformadores, barras e a minigeração fotovoltaica. Através desta simulação, foi possível obter o fluxo de potência da geração e cálculo de curto circuito.

Para a simulação da carga diária da indústria, devido à falta de dados, utilizou-se a soma do consumo da fatura fora de ponta e na ponta (disponibilizado pela DIAM) e dividiu-se o total por 22 dias úteis (considerando abertura de segunda-feira à sexta-feira) e este valor dividido por 8 horas trabalhadas diárias (08h00 às 17h50). Portanto, utilizando uma carga diária de 224kW.

Novamente, iniciou-se a simulação para fluxo de potência do sistema modelado utilizando o método de Newton-Raphson, Figura 39, e através das modificações realizadas obteve-se fluxo provindo da geração fotovoltaica. Observa-se que o ETAP considera as melhores condições de geração para as placas, ou seja, o sistema operando com o máximo da capacidade dos inversores e eficiência das placas.

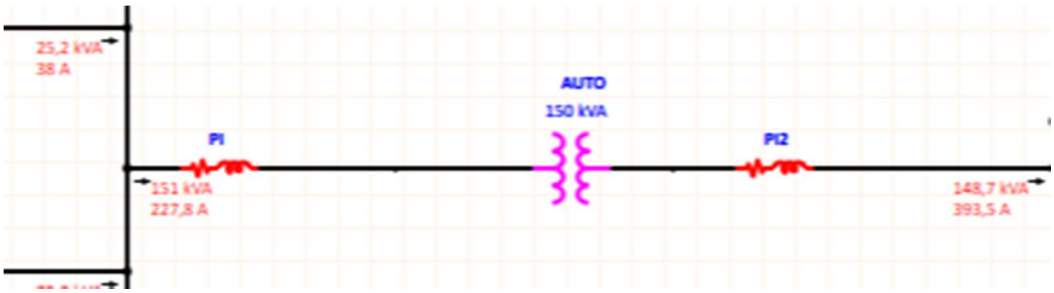
Figura 39 - Simulação de fluxo de potência para segunda versão do sistema existente modelado.



Fonte: AS AUTORAS (2018).

Conforme dados de fluxo fornecido pelo ETAP, Figura 40, cada eletrocentro contribui com corrente de 38A totalizando 227,8A de contribuição em 380V e um fluxo de 25,2kVA totalizando 151kVA. O sistema possui um autotransformador para baixar tensão de 380V para 220V, após a transformação, a contribuição total dos eletrocentros é de 148,7kVA e um fluxo de 393,5A na barra do QGBT.

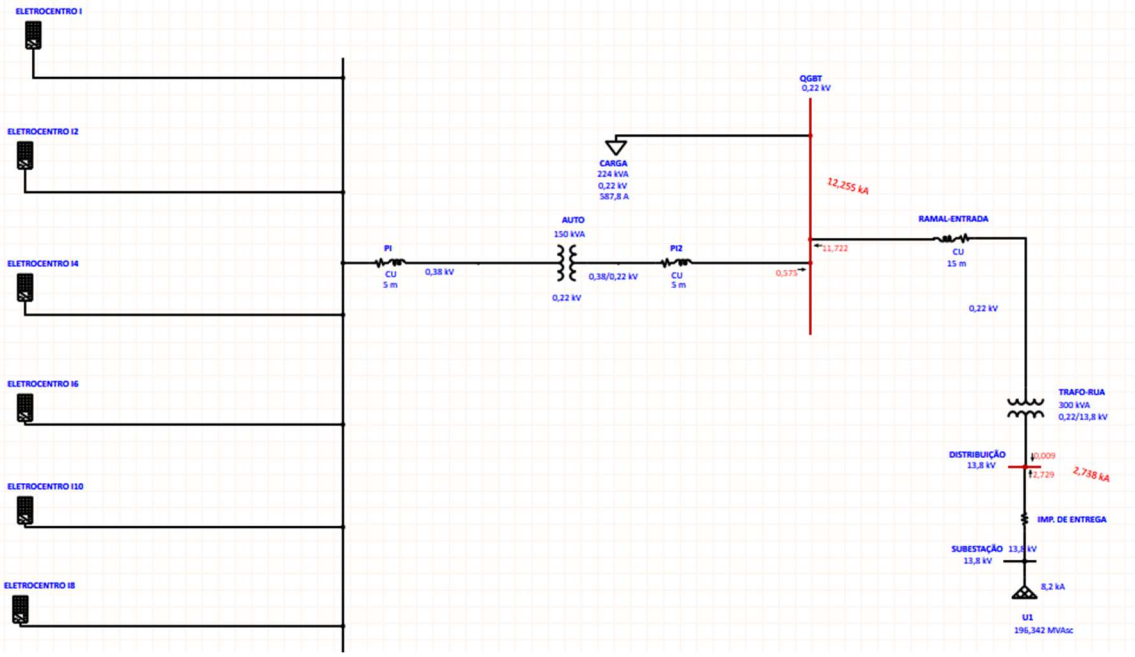
Figura 40 - Dados da simulação de fluxo de potência do sistema na barra de geração e barra do QGBT para o sistema atual.



Fonte: AS AUTORAS (2018).

Após a correção dos aterramentos para todos os componentes do sistema fotovoltaico e da indústria, iniciou-se conferência da modelagem para curto e assim verificando o curto circuito trifásico do sistema da barra da subestação até o ponto de entrega, Figura 41, fazendo uso dos dados fornecidos pela COPEL, no PRT-02, que é o documento que fornece os dados de impedância e curto circuito no sistema. Através desses valores, de impedância foi possível confirmar o curto circuito no ponto de entrega e verificar a funcionalidade do software.

Figura 41 - Simulação de curto trifásico para a segunda versão do sistema modelado para o sistema atual.



Fonte: AS AUTORAS (2018).

Considerando as barras de falta no ponto de entrega e a Barra QGBT os, resultados são apresentados na Tabela 6 e Tabela 7, de curto circuito trifásico, bifásico e monofásico.

Tabela 6 - Comparação entre os dados do PRT-02 e ETAP para a planta existente sem geração.

Sem Geração Fotovoltaica - Planta Atual				
Fonte	Local	Trifásico	Bifásico	Monofásico
PRT-02	Ponto de Entrega	2728 A	2363 A	998 A
ETAP	Ponto de Entrega	2729 A	2363 A	996 A

Fonte: AS AUTORAS (2018).

Posteriormente, obteve-se os valores de curto circuito no QGBT e comparou-se com os valores calculados no memorial de cálculo de curto circuito da empresa, os valores de curto circuito trifásico e bifásico estavam aproximados dos valores calculados, porém os valores de curto fase-terra estavam muito distantes. Para correção desses valores, revisou-se os valores de impedância e o aterramento dos transformadores.

Tabela 7 - Comparação entre os dados do PRT-02 e ETAP para a planta atual com geração.

Com Geração Fotovoltaica - Planta Atual				
Fonte	Local	Trifásico	Bifásico	Monofásico
Memorial	QGBT	13237 A	11542 A	7843 A
ETAP	QGBT	12255 A	10526 A	11718A
ETAP	Ponto de Entrega	2738 A	2370 A	1000 A

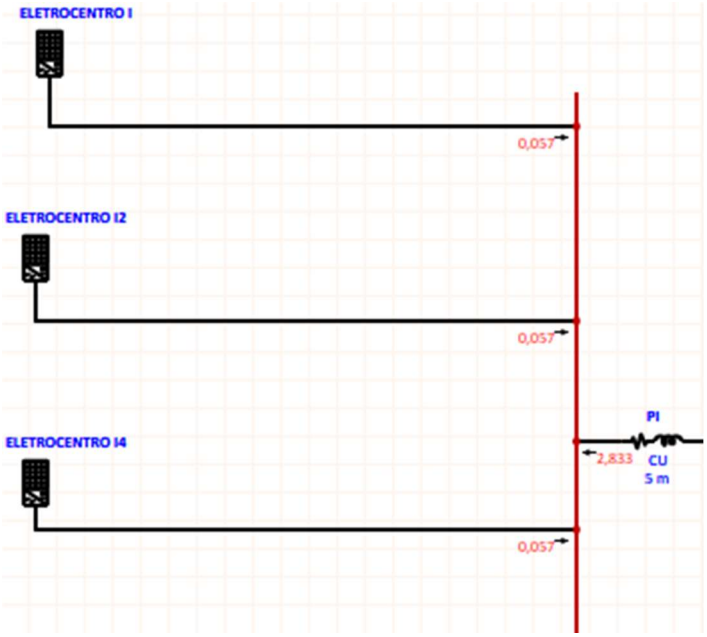
Fonte: AS AUTORAS (2018).

Analisando e comparando os dados obtidos no ETAP com o memorial de cálculo de curto circuito de projeto, percebe-se que os valores estão próximos. Para o curto circuito trifásico, bifásico e monofásico na barra do ponto de entrega os valores estão 99,79% idênticos. Para a barra do QGBT, o curto circuito trifásico possui 92,6% de proximidade, o curto bifásico com 91,2% e o curto monofásico com 50%.

Observando os dados de curto circuito monofásico na barra QGBT verifica-se que poderá ter erros na modelagem, hipoteticamente sendo falta de dados do sistema de aterramento da indústria e dos transformadores para a realização da simulação.

Para verificar a contribuição dos eletrocentros na barra mais próxima, colocou-se esta barra em falta, Figura 42, e obteve-se que cada eletrocentro contribui com uma corrente de curto trifásica de 57A.

Figura 42 - Contribuição de curto circuito trifásico na barra de falta da geração fotovoltaica para o sistema instalado.



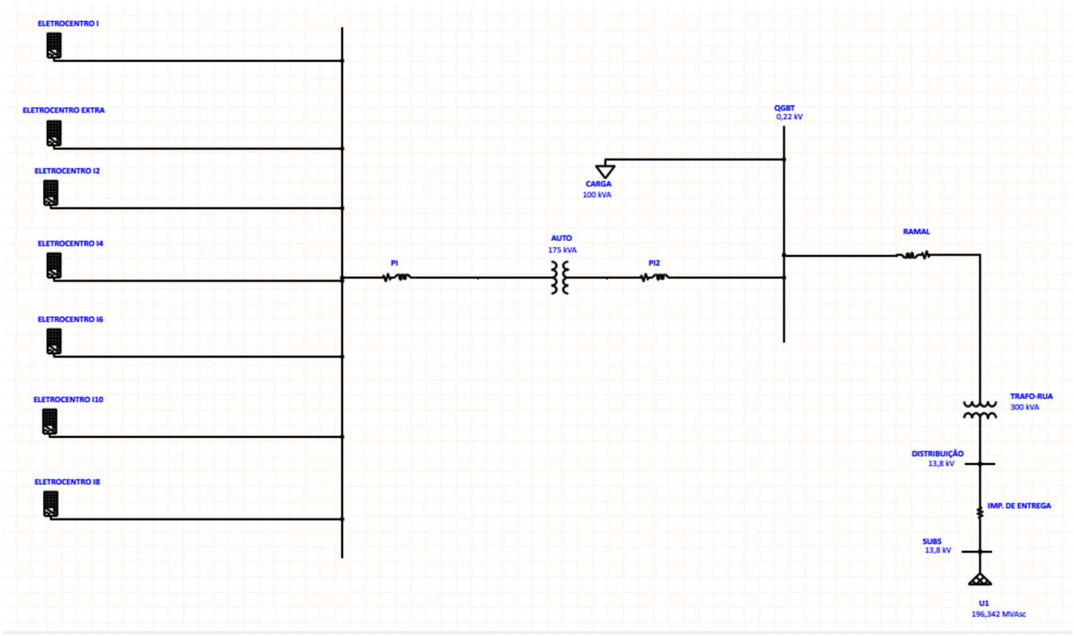
Fonte: AS AUTORAS (2018).

6.2 ANÁLISE DA SITUAÇÃO EXPANSÃO

Após projetar e calcular a expansão do sistema, foram realizadas simulações de curto circuito e fluxo de potência para o sistema em expansão. Para essa nova modelagem, Figura 43, acoplou-se um novo eletrocentro com strings totalizando 105 placas fotovoltaicas e um inversor de 35kW. Também considerou-se a troca do autotransformador para 175kVA devido à expansão.

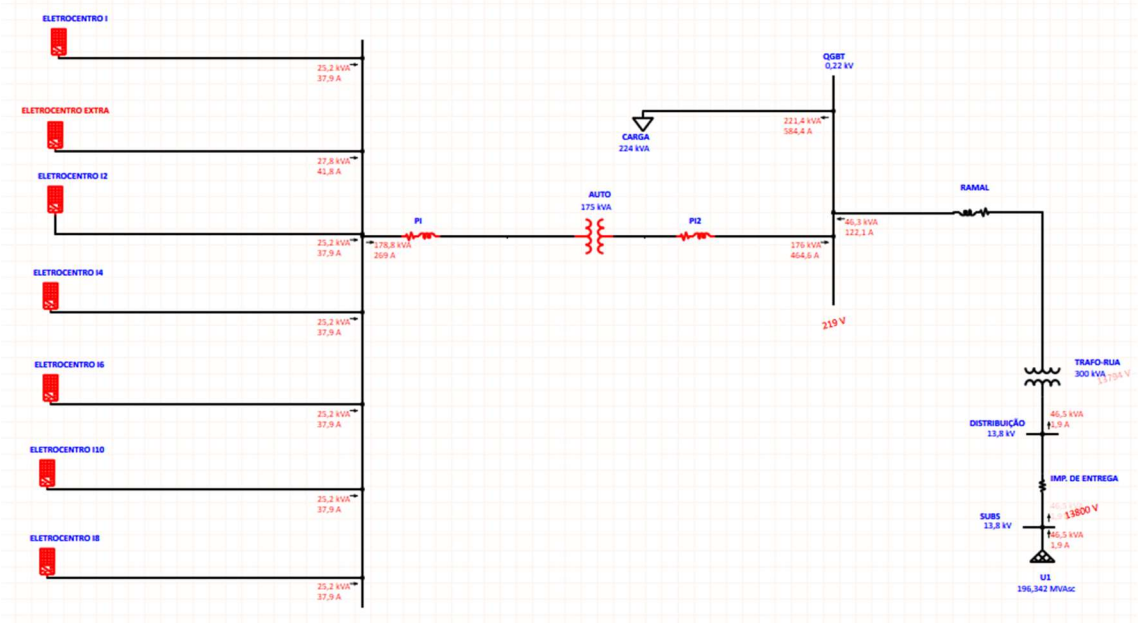
A simulação para fluxo de potência do sistema foi modelado utilizando o método de Newton-Raphson, Figura 44, e através das modificações realizadas desde a simulação inicial obteve-se fluxo provindo da geração fotovoltaica.

Figura 43 - Sistema expansão, utilizando a modelagem dos eletrocentros.



Fonte: AS AUTORAS (2018).

Figura 44 - Simulação de fluxo de potência para o sistema expansão.

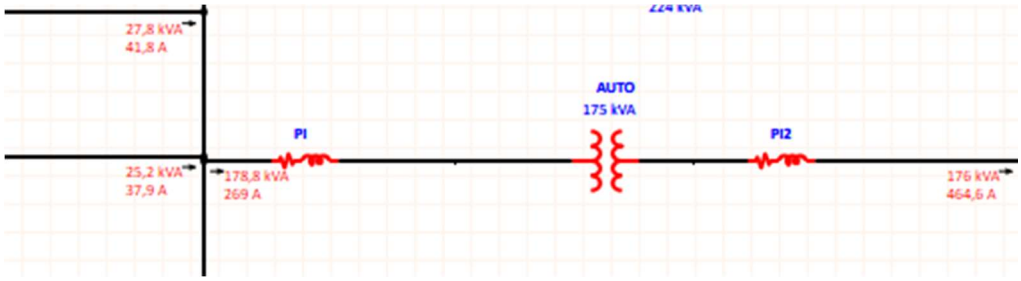


Fonte: AS AUTORAS (2018).

Conforme dados de fluxo fornecido pelo ETAP, Figura 45, os eletrocentros antigos contribuem com corrente de 37,9 e o eletrocentro extra com 41,8A totalizando 269 A de contribuição em 380V e um fluxo total de 178,8kVA. Após o autotransformador, a contribuição total dos eletrocentros é 176kVA para o fluxo e uma corrente de 464,6A na barra do QGBT. Através desta análise,

percebe-se a necessidade de verificar a capacidade dos cabos já instalados, quadro dos inversores, QGBT, disjuntores e autotransformador, pois ocorreu aumento significativo de potência gerada e corrente. Assim, podendo impactar diretamente da viabilidade econômica do projeto.

Figura 45 - Dados da simulação de fluxo de potência do sistema na barra de geração e barra do QGBT para o sistema expansão.



Fonte: AS AUTORAS (2018).

Para a simulação de curto circuito do novo sistema, considerou-se as barras de falta no ponto de entrega e a Barra QGBT. Os resultados de curto circuito trifásico, bifásico e monofásico são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Dados da simulação do sistema em expansão de curto circuito no ponto de entrega e na barra QGBT.

Com Geração Fotovoltaica - Expansão				
Fonte	Local	Trifásico	Bifásico	Monofásico
ETAP	Ponto de Entrega	2740 A	2371 A	1000 A
ETAP	QGBT	12365 A	10594 A	11775 A

Fonte: AS AUTORAS (2018).

Analisando e comparando os dados obtidos no ETAP com os dados simulados anteriormente, percebe-se que a expansão não possui um aumento significativo nas correntes de curto circuito. Na barra do ponto de entrega o curto trifásico variou 0,07%, o curto bifásico 0,04% e o curto monofásico 0%. Para a barra do QGBT, o curto circuito trifásico variou-se 0,89%, no curto bifásico 0,64 e para curto fase-terra variou 0,48%. Portanto, não afetando diretamente para a mudança do sistema de proteção na média tensão e baixa tensão.

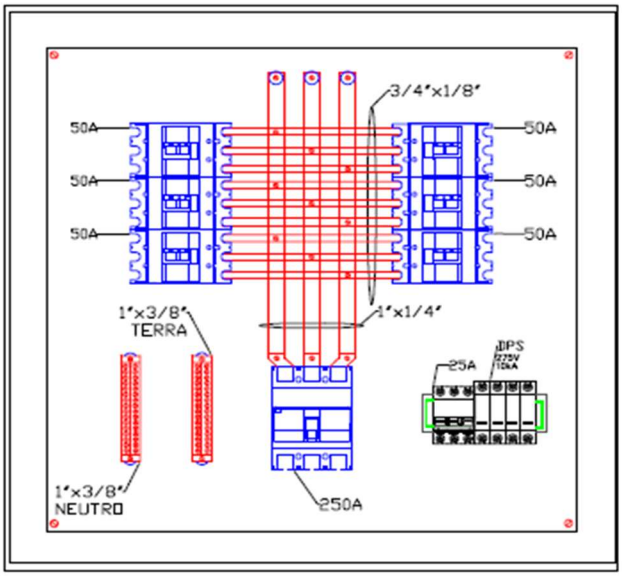
Esses dados de curto circuito e fluxo de potência serão utilizados para verificar o aumento da contribuição no sistema, e alteração dos elementos de proteção, autotransformadores e cabos.

6.3 ALTERAÇÕES NECESSÁRIAS PARA A EXPANSÃO

Com o novo eletrocentro, há a necessidade de adaptar o quadro QDG Inversores para a instalação de um disjuntor para proteção dos eletrocentros e inversores. Conforme o estudo de fluxo de potência demonstra, a máxima corrente de saída deste inversor é de 41,8A e portanto, necessita conectar 3 condutores carregados que saem do novo inversor até o quadro. Utilizando o mesmo método descrito no memorial, conforme a saída de corrente máxima do inversor e a capacidade de corrente pelo método utilizado para dimensionamento de cabo, o cabo 10mm² atende à demanda. Para a conexão desses cabos no QDG Inversores, deve-se utilizar um disjuntor trifásico de 50A.

Conforme diagrama do quadro QDG Inversores, Figura 46, percebe-se que não há espaço para alocar o novo disjuntor de proteção do novo eletrocentro. Desta forma, deve-se considerar uma caixa de instalação maior e refazer a montagem deste quadro e então alterando barramentos novos e alocando o novo disjuntor.

Figura 46 - Vista frontal do diagrama mecânico do quadro QDG-INVERSORES.



QDG - INVERSORES 380/220V
VISTA FRONTAL SEM PLACA DE PROTEÇÃO
DIMENSÕES EM mm

Fonte - Arquivo de Diagrama Quadros da EGNEX (2017).

Após essa alteração, será necessário modificar o disjuntor geral do quadro dos inversores. A proteção atual desse quadro, é constituída por um

disjuntor trifásico de 250 A, visto que, a soma das correntes dos 6 inversores atuais é de 222 A (Memorial descritivo do projeto de minigeração 179,55 kW, 2017). Com a expansão, a soma dos 7 inversores é de 269A e assim, ultrapassando a proteção instalada atualmente. Portanto, sendo necessário mudar o disjuntor geral desse quadro para 300A.

Devido à expansão, será necessário modificar o autotransformador para 175kVA. Esse valor de autotransformador não é vendido comercialmente, portanto adotou-se a troca para 200kVA na lista de material e para simulações 175kVA.

Como a geração aumentou, consequentemente a corrente do QDG Inversores até o autotraformador se alterou. Conforme o estudo de fluxo, percebe-se a corrente atual é de 269A e anteriormente possuía uma corrente máxima de 227,8A. Os cabos existentes nesse trecho são 2 cabos por fase de 35mm², considerando 3 condutores carregados, neutro de 25mm² e terra 25mm³. Considerando que o cabo 35mm² EPR 0,6/1kV possui capacidade de condução, pela NBR5410, no método de instalação em canaleta não ventilada com 3 condutores carregados é de 144A. Portanto, mesmo após a expansão, esse cabo que conduz energia até o primário em 380V do autotransformador não necessita ser alterado.

Para o secundário do autotransformador em 220V, tem-se uma nova corrente de 464,6 sendo entregue no QGBT. O cabo existe consiste de dois cabos de 95mm² por fase, neutro 50mm² e terra 95mm². Considerando a capacidade de condução do cabo EPR 0,6/1kV pela NBR5410 e o método de instalação em canaleta não ventilada, com três condutores carregados, o condutor possui uma corrente de condução máxima de 269A. Desta forma, não sendo necessário a troca do cabo para atender a nova corrente.

O quadro QGBT existente, possui um disjuntor trifásico de 400A. Para atender a nova geração é necessário trocar para disjuntor trifásico de 500A.

Todas estas alterações foram incluídas no arquivo diagrama unifilar da empresa EGNEX e disponibilizado no Anexo B.

6.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O projeto instalado, teve custo de aproximadamente R$500.000,000, fazendo o custeamento do mesmo projeto com valores atualizados, o custo total sairia por R$670.000,00 sem considerar a expansão.

A Expansão do sistema apresenta um custo de aproximadamente R$169.279,20, visto que será necessário trocar disjuntores geral do QDG inversores, o acréscimo de um disjuntor para os inversores e adequação; além do kit de painéis, inversor adicional para a expansão e troca do disjuntor geral que atende a minigeração no QGBT. Conforme a Tabela 9, percebe-se os custos e itens a serem trocados para viabilizar a nova instalação.

Tabela 9 - Precificação dos materiais a serem utilizados no projeto de expansão.

MATERIAL	Preço Total
Kit para instalação de um eletrocentro contendo 105 painéis e um inversor 35kW, mais cabos e conexões	R$ 149.440,00
Autotransformador de 200kVA 380/220V	R$ 10.580,00
Cabo 10mm² EPR 90° 0,6/1kV, Fabricante Corfio	R$ 698,75
PEAD 2 polegadas, Fabricante Kanalex	R$ 146,575
Adequação QDG - INVERSORES	R$ 1.300,00
Disjuntor Trifásico 500A, Cx. Moldada - Fabricante Schneider	R$ 4.127,50
Disjuntor Trifásico 320A, Cx. Moldada - Fabricante Schneider	R$ 2.580,77
Disjuntor Trifásico 50A, Cx. Moldada - Fabricante Schneider	R$ 405,58
Total	R$169.279,2

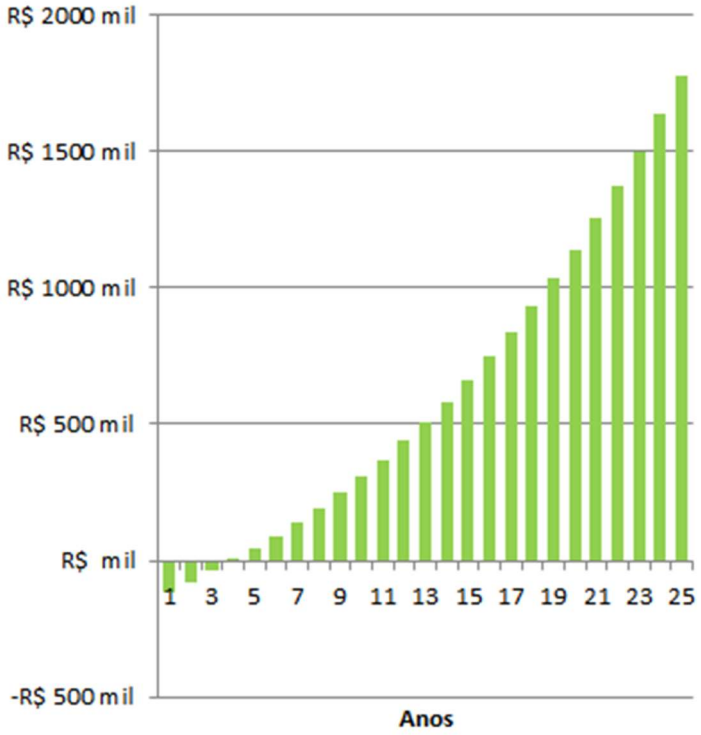
Fonte: AS AUTORAS (2018).

6.5 RETORNO DO INVESTIMENTO

Para simulação do investimento do projeto utilizou-se uma planilha de cotação utilizada pela empresa EGNEX, fazendo uso dos dados do sistema, como: consumo médio estimado, modelo e número dos painéis solares, modelo e número de inversores, inclinação em relação ao solo, localidade da instalação (latitude e longitude), obtêm-se valores de geração mês a mês, e o custo do sistema de geração fotovoltaica.

Nesta simulação de investimento, o custo do quilowatt é R$4,52, com tempo de retorno de aproximadamente 4 anos, a partir deste período o sistema tem rentabilidade total. O sistema tem vida útil de 25 anos, visto que a vida útil máxima dos painéis. A Figura 47, apresenta o retorno do investimento ano a ano. Portanto, a partir do 5 ano o sistema expansão acarretará em retorno financeiro e tendo seu acumulo até sua vida útil.

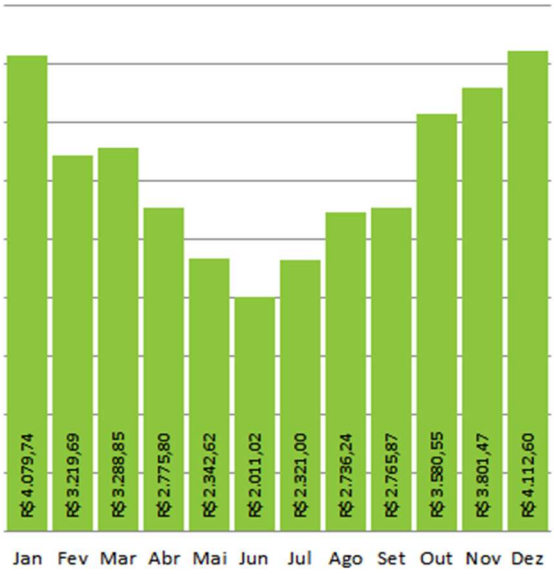
Figura 47 - Projeção de retorno investimento anual.



Fonte: AS AUTORAS (2018).

A Figura 48, apresenta a economia mês a mês, estimada pelos níveis de irradiação da localidade conforme o local que será instalado, bem como da potência total do sistema. Percebe-se que o acumulo financeiro, nas estação de verão (novembro. Dezembro, janeiro), é maior que nos outros meses.

Figura 48 – Projeção de retorno financeiro mensal do sistema SFV.

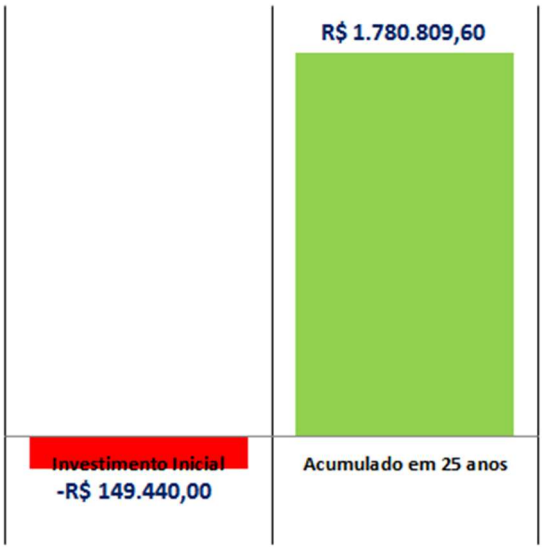


Fonte: AS AUTORAS (2018).

6.6 COMPARATIVO ENTRE INVESTIMENTO INICIAL E RETORNO EM 25 ANOS

Utilizando a planilha de cálculo do investimento SFV, fornecida pela EGNEX, tem-se os valores de retorno financeiro. A Figura 49, traz dados do custo inicial e o valor que poderá ser acumulado após 25 anos da instalação do sistema.

Figura 49 - Comparativo entre investimento inicial e retorno acumulado.



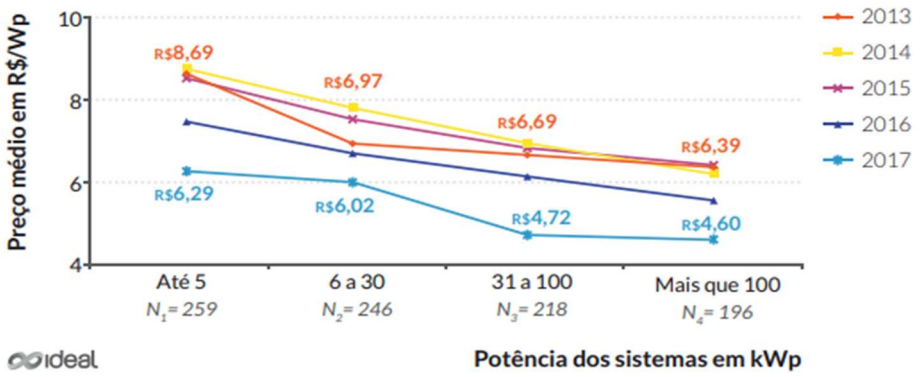
Fonte: AS AUTORAS (2018).

Simulando o sistema total, de 675 painéis para valores atualizados, tem-se o valor atual de R$697.170,00. O projeto existente, teve custo estimado de R$503.443,00, apresentando um aumento de 38,48%. Com este valor corrigido (2018) seria possível pagar o sistema anterior e a expansão do sistema. É importante ressaltar que o valor agregado considerado supõe condições ótimas de funcionamento do sistema, o qual precisa ser limpo anualmente, para que sua eficiência não seja comprometida.

Devido ao sistema estar superdimensionado, muitos cabos não necessitam ser alterados, deixando o custo da expansão reduzido. Outra questão a ser considerada é a projeção do custo quilowatt, caso o custo tenda a cair, é viável aguardar mais 1 ano e aplicar o dinheiro economizado com o sistema existente, no tesouro direto, ou outras aplicações, para assim fazer a expansão com o valor investido.

Segundo (ANEEL, 2017), o custo dos sistemas do quilowatt dos sistemas fotovoltaicos vem reduzindo com o passar dos anos, como pode ser observado na Figura 50.

Figura 50 - Preço dos SFC por faixa de potência.

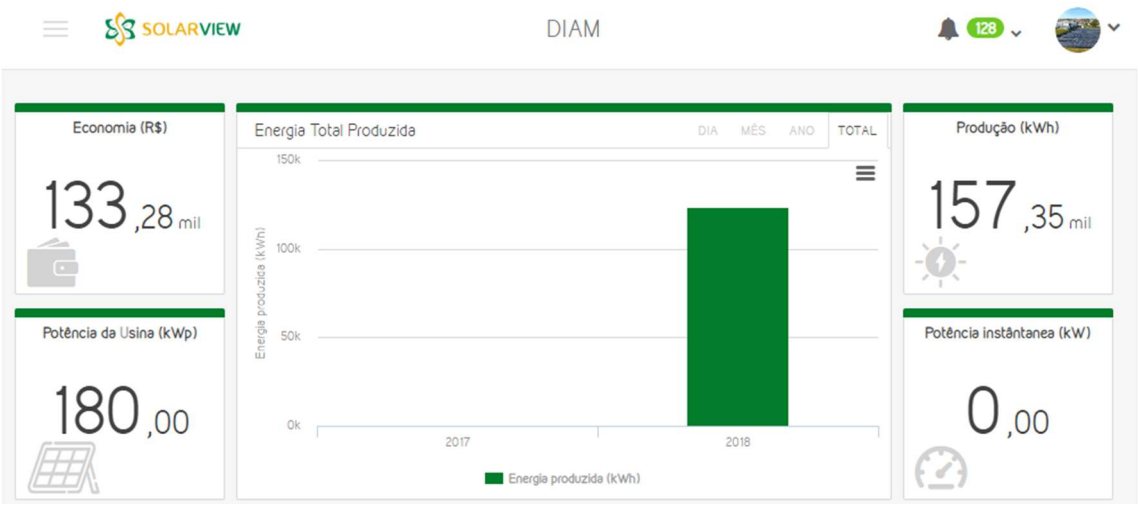


Fonte: ANEEL (2017).

Em 2017, o preço médio informado na Figura 50, para o custo de sistemas fotovoltaicos é de R$4,60. Seguindo a curva de tendência dos últimos 5 anos, a projeção é que o custo continue a reduzir para os anos seguintes.

Observando os dados do SolarView é possível constatar a economia que anual de R$133.280, até o momento.

Figura 51 - Layout Solar View com dados mensais de produção de energia.



Fonte: Solar View (2018).

Sabendo da economia obtida de Janeiro a Setembro, pode-se realizar a projeção de economia para um ano completo, este valor estimado é de, aproximadamente R$176.000,00. Uma alternativa interessante, será investir o valor economizado e fazer uso do ganho para pagar a expansão.

Utilizando um simulador de investimentos, tesouro direto, considerou-se o valor médio mensal de R$14.666,67 de investimento inicial, com aporte mensal de mesmo valor.

Assim, para esta simulação, em novembro de 2019 o valor bruto acumulado seria de R$198.152,11, comparada ao custo de R$169.279,18, este valor seria 17% superior ao custo total de projeto.

Com essas informações podemos constatar que a expansão é viável, porém pode ser realizada com a própria economia do projeto atual, desta forma aproveita-se o sistema existente e o valor economizado.

7 CONCLUSÃO

O deslocamento do pico de consumo energético das empresas e a escassez dos recursos fósseis são fatores contribuintes para o vislumbre de fontes que produzam energia nos horários de carga máxima, para que o sistema esteja menos sobrecarregado e menos poluente. A geração fotovoltaica se apresenta como alternativa viável, pois o horário de geração máxima é em torno das 14hrs e 15hrs. Além disso, é ambientalmente viável, pois em períodos de escassez de chuvas se torna uma alternativa para que se evite ao máximo o acionamento das usinas térmicas, que são mais custosas e poluentes.

Este trabalho se propôs a apresentar dados de um sistema de 180kWp, e calcular sua geração, fluxo de potência e valores de contribuição de curto circuito, simulando através do pacote computacional ETAP, visando a expansão do sistema, conforme a demanda contratada pela empresa DIAM. Inicialmente utilizamos 85% da demanda contratada na fatura de energia. Para esta demanda foram estimados 105 painéis adicionais. Pela área apresentada no google maps, observamos que há espaço para expansão, a partir daí, escolhemos o inversor de 35kW, e dimensionamos os cabos e disjuntores, os valores foram cotados e a expansão do sistema foi estimada em R$169.279,18.

Observando os dados de economia fornecidos pela DIAM e pelo software Solarview, obtivemos que a economia com a instalação do sistema atual seria de R$176.000,00, para um ano de reserva financeira. Utilizando estes dados, estimulamos uma média mensal de R$14.666,67. Devido ao sistema ser recente e estar sobredimensionado, optamos por investir o valor economizado em um fundo de investimento por um ano, e assim, no final de 2019 o pagamento da obra de expansão poderá ser realizado com o valor agregado da economia do projeto existente.

Em relação ao uso do software ETAP, verificamos a eficiência e inteligibilidade do software que apresentou valores precisos, e uma interface amigável. Com este é possível modelar um sistema completo, com dados detalhados e executar o cálculo de fluxo de potência para um nível de carregamento indicado, bem como executar a função de cálculo de curto circuito. Observamos que para a expansão os valores de contribuição foram pouco significativos na média tensão, em torno de 2 A. Porém na baixa tensão esses valores foram bem mais significativos, indicando a importância dessa análise.

Durante a modelagem do fluxo de potência observamos a eficácia do software, quanto ao seu relatório de erros, o qual indicava o ponto que necessitava correção. Devido ao fato não possuirmos dados diários de carga, ajustávamos cargas de valor estimado nas modelagens iniciais, quando a carga estimada era superior a geração o sistema não convergia, apresentando o problema no relatório de erros.

Como indicação de trabalhos futuros, conforme sugerido pela banca na primeira apresentação, vislumbramos a possibilidade de avaliar a interferência de harmônicos na rede, visto que o sistema possui muitos inversores. O software ETAP apresenta a opção de simulação de harmônicos, sendo uma ótima oportunidade para abrangência das ferramentas existentes e utilização do conhecimento adquirido no presente trabalho.

8 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024.** Nota técnica N° 00056/2017. Maio, 2017. Acesso em 27/08/2018.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Cadernos Temáticos ANEEL. Micro e Minigeração Distribuída**. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Maio. 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>. Acesso em 29/09/2018

Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL. **Resolução Normativa N°482.** Abril 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> Acesso em 20/06/2018.

Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL.O **Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica. 2017.** Disponível: <https://issuu.com/idealeco_logicas/docs/estudoidealmercadofv2017_web> Acesso: 20/11/2018.

Agência Nacional de Energia Elétrica. ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-3>. Acesso em 29/09/2018.

Schneider Eletric. Catalog Solar. 2014. Disponível em: http://solar.schneider-electric.com/CT20140923_SolarCatalog.pdf

Schneider Eletric. Catalogo de Preços. 2014. Disponível em: Versão impressa.

Ayrão, Vinícius. Como calcular FV para Cliente Grupo A. 2016. Disponível em: https://viniciusayrao.com.br/como-calcular-fv-para-clientes-do-grupo-a/. Acesso em: 15/11/2018.

Centro de Pesquisa de Energia Elétrica(CEPEL). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL, 2014**. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual_de_engenharia_fv_2014.pdf>. Acesso em 20/11/2018

Companhia de Energia do Paraná. COPEL. Micro e Minigeração. Disponível em: http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB57635122BA32D4B03257B630044F656. Disponível: 10/08/2018.

EGNEX. **Memorial de Cálculo das Correntes de Curto Circuito**. Projeto de minigeração fotovoltaico conectado a rede 179,55kW. Junho 2010

EGNEX. **Planilha de Orçamento de Sistemas Fotovoltaicos**. Novembro, 2018.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanço Energético Nacional 2018.** Disponível em:

ETAP. https://etap.com/. Acesso em: 18/03/2018.

ETAP**. Design, Analyse & Operaty Photovoltaic Powers Systems with ETAP**. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=Ar8Mi_yrAow. Acesso em: 20/10/2018.

Google Maps. Localização DIAM. Disponível em: https://www.google.com.br/maps/search/diam/@-25.4780987,-49.1479428,155m/data=!3m1!1e3 Acesso em: 15/03/2018.

Haeronsolar. Data Sheet. Disponível em: http://en.hareonsolar.com/index.php?c=content&a=show&id=518. Acesso: 10/11/2018

Kindemann, Geraldo. **Curto- Circuito. 5ª Edição. Porto Alegre: Sagra Luzzato, 2010.**

Magarreiro Clarisse, Freitas Sara; Brito C. Miguel. **Radiação e Energia Solar**. Disponível em: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119/article/993/pdf>. Acesso em 10/11/2018

Matos, Manuel António. Introdução ao Cálculo de Curto Circuitos Trifásicos Simétricos pela Norma CEI-909. 1996. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~mam/curtocircuitos.pdf> Acesso em: 10/11/2018.

National Renewable Energy Laboratory. U.S**. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark**: Q1 2017. Acesso em 27/09/2018.

Norma Brasileira de Instalações de Baixa Tensão. NBR5410. Disponível em: <https://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/normas%20e%20relat%F3rios/NRs/nbr_5410.pdf>. Acesso em 15/11/2018.

Companhia Paranaense de Energia Elétrica. COPEL. **PRT-02. Impedância Equivalente. 2017.**

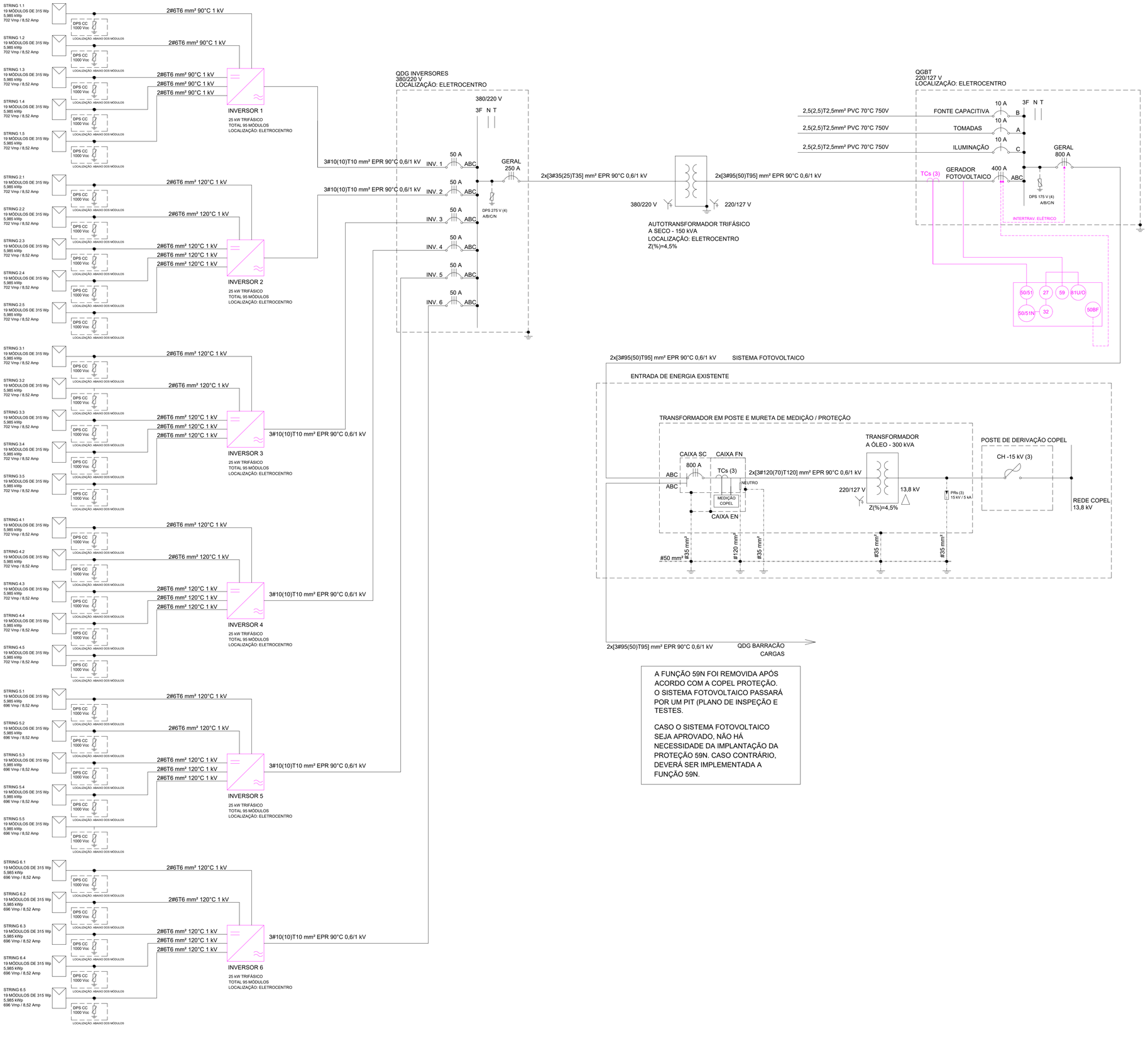
Raimundo R. Pinto Júnior**. Fluxo de Potência em Redes Modeladas no Nível de Subestação, 2005.**

Solar View. Disponível em: https://my.solarview.com.br/login. Acesso em: 01/08/2018.

Tesouro Direto**. Simulação de Investimento.** Disponível em: <http://www.tesouro.fazenda.gov.br/tesouro-direto-calculadora>. Acesso em: 17/11/2018.

UFRN. **Análise do Sombreamento entre Painéis Fotovoltaicos.** Disponível em: <http://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/viewFile/165/165>. Acesso em: 24/11/2018**.**

UTFPR. **Curso de Energia Solar Fotovoltaica**. 2006. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/mafinocchio/energia-solar/radiacao-solar/Curso%20Solar.pdf/view. Acesso em 22/11/2018.



A FUNÇÃO 59N FOI REMOVIDA APÓS ACORDO COM A COPEL PROTEÇÃO. O SISTEMA FOTOVOLTAICO PASSARÁ POR UM PIT (PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES.

CASO O SISTEMA FOTOVOLTAICO SEJA APROVADO, NÃO HÁ NECESSIDADE DA IMPLANTAÇÃO DA PROTEÇÃO 59N. CASO CONTRÁRIO, DEVERÁ SER IMPLEMENTADA A FUNÇÃO 59N.

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

NOTAS GERAIS

1. TODAS COTAS EM CENTÍMETROS, EXCETO QUANDO INDICADO
2. CADA INVERSOR DEVERÁ RECEBER 5 STRINGS DE 19 MÓDULOS
3. AS STRINGS DEVEM SER FORMADAS PELA CORRETA CONEXÃO ENTRE OS MÓDULOS
4. OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DEVEM SER MANUSEADOS POR PROFISSIONAIS CAPACITADOS E DEVIDAMENTE PROTEGIDOS, CONSIDERANDO OS MANUAIS E RECOMENDAÇÕES DO FABRICANTE
5. TODAS AS LIGAÇÕES COM EQUIPAMENTOS DEVERÃO SER FEITAS COM CONECTORES APROPRIADOS
6. CONSIDERANDO A NBR 5410:2004 ITEM 6.1.5.3, O CONDUTOR COM FUNÇÃO DE PROTEÇÃO DEVE SER IDENTIFICADO EXCLUSIVAMENTE NA COR VERDE OU VERDE-AMARELA.
7. A MÁXIMA TENSÃO DE ENTRADA DOS INVERSORES É DE 1000 V EM CORRENTE CONTÍNUA
8. ENTRADA EM MT COM TRANSFORMADOR EM POSTE E MEDIÇÃO EM BAIXA TENSÃO
9. MÓDULO FOTOVOLTAICO 315 Wp RENDIMENTO DE 16,16%
10. TODOS OS DISJUNTORES DEVERÃO SER DO TIPO TERMOMAGNÉTICO, CURVA CARACTERÍSTICA TIPO "C" DE CAIXA MOLDADA
11. PARA CONEXÕES DOS CABOS FLEXÍVEIS COM MEDIDORES, DISJUNTORES E BARRAMENTOS DEVERÃOSER UTILIZADOS CONECTORES DE COMPRESSÃO APLICADOS COM ALICATE ESPECÍFICO
12. O MEMORIAL DESCRITIVO É PARTE INTEGRANTE DESTE PROJETO
13. CONDUTORES IGUAL OU ACIMA DE #10mm² PODERÃO SER IDENTIFICADOS NAS EXTREMIDADES COM FITA ADESIVA
14. OS CABOS SOLARES DAS STRINGS DEVEM SER INDENTIFICADAS NAS PONTAS
15. UTILIZAR CABO SOLAR VERMELHO PARA O POLO POSITIVO E CABO SOLAR PRETO PARA O POLO NEGATIVO DOS CABOS EM CORRENTE CONTÍNUA
16. SEMPRE SEPARAR CABOS DE CORRENTE CONTÍNUA DOS CABOS DE CORRENTE ALTERNADA
17. TODA ESTRUTURA METÁLICA, NORMALMENTE NÃO ENERGIZADAS, DEVE SER ATERRADA
18. CONFORME NTC 903100 ITEM 5.2.1k, EM INSTALAÇÕES COM GERAÇÃO PRÓPRIA, JUNTO À MEDIÇÃO, DEVERÁ SER INSTALADA UMA PLACA COM OS DIZERES: "PERIGO - GERAÇÃO PRÓPRIA"
19. ENTRADA DE ENERGIA EXISTENTE

SIMBOLOGIA

———	Cabos em corrente contínua (CC)
———	Cabos em corrente alternada (CA)
- - - - - - - -	Condutor Neutro (N), bitola conforme indicado
— — — —	Cabos Terra (T), bitola conforme indicado
	Inversor trifásico 25 kW saída 380/220 V, ref. Schneider Conext CL 25000E
	Módulo Fotovoltaico 315 Wp dimensões (AxLxP) 99,1x196,6x5cm
	Dispositivos de Proteção contra Surtos, conforme indicado
	Chave fusível unipolar (fornecimento COPEL)
	Transformador trifásico, conforme indicado
	Disjuntor termomagnético tríplar de baixa tensão
	Transformador de corrente para medição/proteção

CUIDADO
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA
COPEL

INSTALAR NA ENTRADA DE SERVIÇO JUNTO ÀS CAIXAS DE MEDIÇÃO E PROTEÇÃO A PLACA DE ADVERTÊNCIA, CONFORME DESENHO (210x100mm)

PLACA DE ADVERTÊNCIA
SEM ESCALA

REV.	DESCRIÇÃO	DATA	EXEC.	VERIF.	APROV.
3	ALTERAÇÃO COMANDO RELÉ ATUAÇÃO NO DISJUNTOR GERAL DO QGBT	25/08/2017	J.M	J.M	J.G
0	EMISSÃO INICIAL	28/03/2017	J.M	J.M	J.G

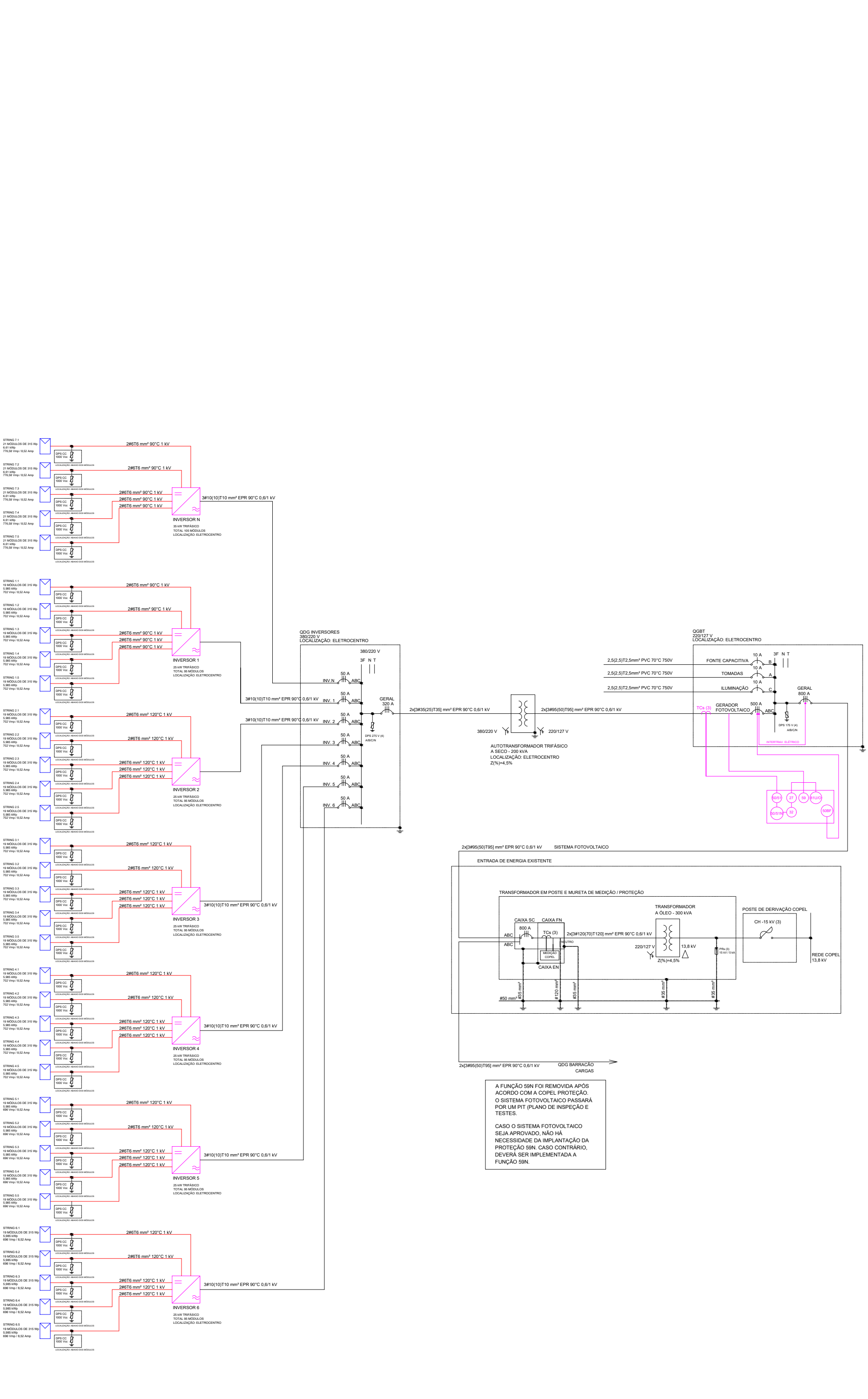
EGNEX

RESP. TÉC. DO PROJ: JANIO DENIS GABRIEL
Nº CREA: 143287- D / PR
ENDEREÇO: Rua Francisco Braga, 187 - 81510-190 - Curitiba - PR
TELEFONE: 41 4042 3334 | www.egnex.com

CLIENTE:	MÃO COLORIDA	**ART:**	20173101986
PROJETO:	DIAGRAMA UNIFILAR	**DESCRIÇÃO:**	Diagrama Unifilar do Projeto
LOCAL DA OBRA:	*Av. Guatupé, 2293 São José dos Pinhais - PR*		

ESCALA: SEM ESCALA	**DATA:25/08/2017**	**APROV.: J.G**	**PÁG.: 03/09**

ISO A1
594x841



A FUNÇÃO 59N FOI REMOVIDA APÓS ACORDO COM A COPEL PROTEÇÃO. O SISTEMA FOTOVOLTAICO PASSARÁ POR UM PIT (PLANO DE INSPEÇÃO E TESTES.

CASO O SISTEMA FOTOVOLTAICO SEJA APROVADO, NÃO HÁ NECESSIDADE DA IMPLANTAÇÃO DA PROTEÇÃO 59N. CASO CONTRÁRIO, DEVERÁ SER IMPLEMENTADA A FUNÇÃO 59N.