

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

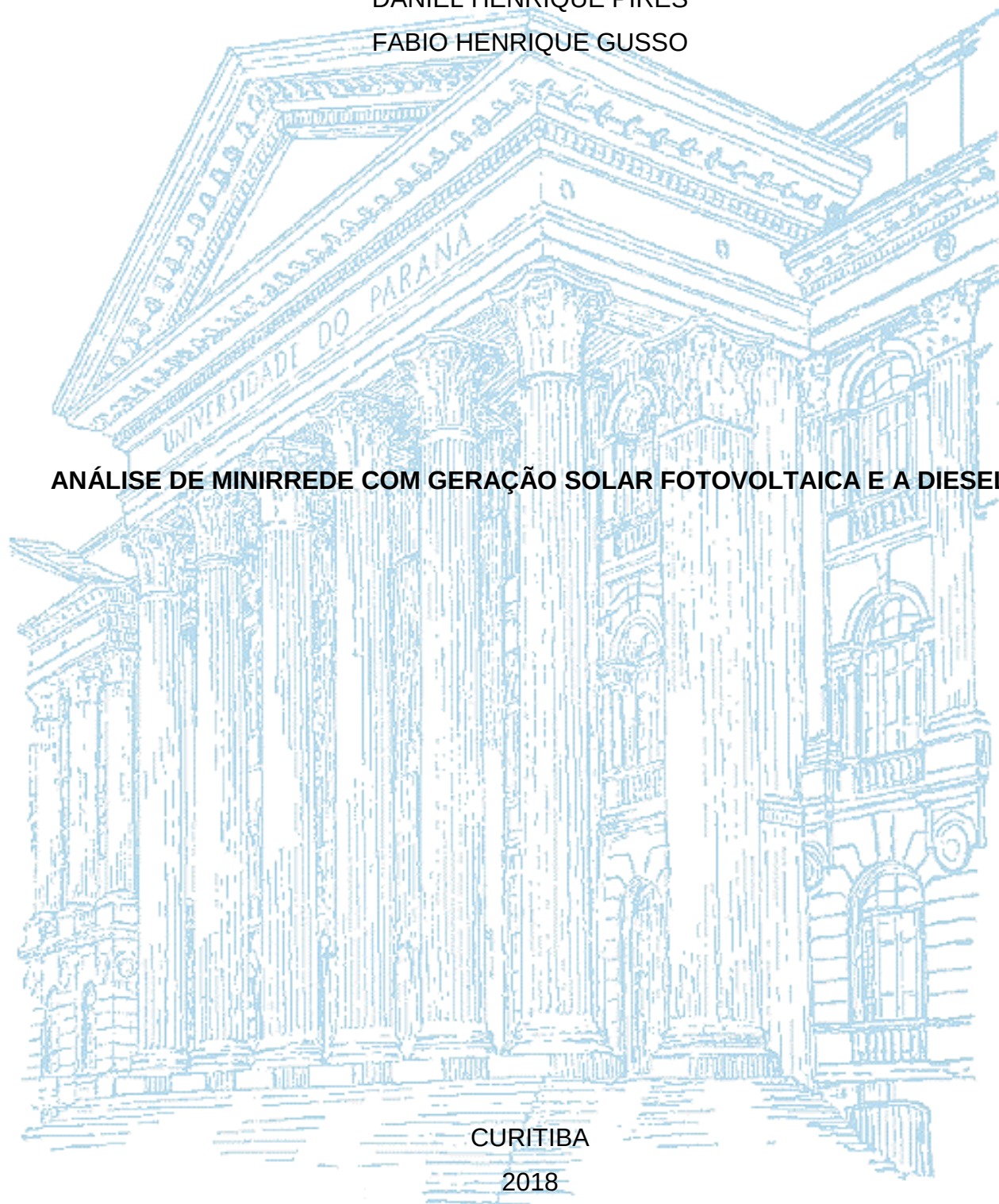
DANIEL HENRIQUE PIRES

FABIO HENRIQUE GUSSO

ANÁLISE DE MINIRREDE COM GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E A DIESEL

CURITIBA

2018



DANIEL HENRIQUE PIRES
FABIO HENRIQUE GUSSO

ANÁLISE DE MINIRREDE COM GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E A DIESEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina TE – 105 – Projeto de Graduação, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, ao Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava

CURITIBA
2018

TERMO DE APROVAÇÃO

DANIEL HENRIQUE PIRES

FABIO HENRIQUE GUSSO

ANÁLISE DE MINIRREDE COM GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA E A DIESEL

Trabalho de Conclusão de Curso
aprovado como requisito parcial à
contenção do título de Engenheiro
Eletricista, ao Departamento de
Engenharia Elétrica, Setor de
Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná, pela seguinte banca
examinadora:

Prof. Dr. Roman Kuiava
Orientador – Departamento de Eng. Elétrica – UFPR

Prof. Dr. Mateus Duarte Teixeira
Departamento de Eng. Elétrica – UFPR

M.Sc. Antonio Rubens Baran Junior
Departamento de Eng. Elétrica – UFPR

Curitiba, 04 de dezembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos aos pais, que sempre ofereceram o máximo de apoio e carinho possível durante nossa vida acadêmica. Gratidão aos professores, especialmente ao nosso orientador Prof. Dr. Roman Kuiava, que desde o primeiro encontro sempre foi muito prestativo e se mostrou disposto a nos ajudar. Por fim, um agradecimento especial aos amigos e às namoradas, que estiveram sempre presentes, nos trazendo alegrias e forças nos momentos difíceis dessa jornada.

“A coisa mais bela que podemos
experimental é o mistério. Essa é a fonte de
toda a arte e ciências verdadeiras.”

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade realizar análises sobre o comportamento da rede elétrica do campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná considerando a instalação da nova usina solar fotovoltaica de 1 MWp, com previsão para 2019.

Para isso, a rede de eletrificação foi modelada, levando em conta suas formas de injeção de potência (Alimentador Prado, Gerador diesel NPDEAS e futura Planta Solar Fotovoltaica), cargas e linhas de distribuição. A potência demandada foi medida em horários de uso mais intenso da carga instalada e, sobre ela, foi feita uma análise estocástica para avaliar condições de operação em função de mudanças nas cargas.

As análises foram divididas em dinâmica e estática, sendo que a primeira está relacionada a transitórios que possam ocorrer durante o funcionamento, como curto-circuito e alterações na geração fotovoltaica. Essas simulações foram realizadas através do software MATLAB, com a ferramenta Simulink. O modo estático se relaciona ao fluxo de potência resolvido com script para Matpower, no qual, através do Método de Monte Carlo, foi aplicada uma condição estocástica, tanto na geração quanto na carga, para que se obtenham diversos pontos de operação. Essas análises foram realizadas levando em consideração os critérios de qualidade de energia estabelecidos pelo Módulo 8 do Prodist - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. E as conclusões obtidas foram que a inserção a nova planta FV não irá causar impactos negativos na rede elétrica do campus.

Palavras-chave: Fluxo de Potência Estocástico, Geração Solar Fotovoltaica, Qualidade de Energia, Método de Monte Carlo.

ABSTRACT

This paper's goal is to analyze the behavior of the electrical system of Universidade Federal do Paraná's Centro Politécnico campus, considering the incoming 1 MWp solar farm in 2019.

In order to do this, the electrical grid of the campus was modeled, considering power injection (Prado bus, NPDEAS' diesel generator, Solar Farm), distribution lines and loads. The power demand was measured at moments of intense use, and, on top of it, a stochastic analysis was made to evaluate operational conditions due to load alterations.

The analysis were splitted into dynamic and steady states, the first being related to transients that may occur during operation, like short-circuits and changes in photovoltaic generation. These simulations were performed through MATLAB software, with the Simulink tool. The steady state is related to the power flow solution, solved with a script running Monte Carlo's Method in Matpower, in which uncertainties were applied, both in generation and in loads, to obtain several points of operation. These analysis were carried out taking into account the power quality standards established by Prodist's Module 8 - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. The conclusions obtained were that the insertion of the new photovoltaic plant will not cause negative impacts on the campus' electrical grid.

Keywords: Stochastic Power Flow, Photovoltaic Generation, Power Quality, Monte Carlo Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Renderização da Usina Fotovoltaica.....	15
Figura 2 - Como funciona o sistema fotovoltaico.....	20
Figura 3 - Etapas da fabricação de um painel fotovoltaico.	21
Figura 4 - Classificação de painéis fotovoltaicos.....	23
Figura 5 - Esquemático simplificado de inversor monofásico.....	23
Figura 6 - Sequência de chaveamento dos transistores.	24
Figura 7 - Malha de controle.....	25
Figura 8 – Modelo π	32
Figura 9 - Métodos de avaliação de Fluxo de Carga.....	35
Figura 10 - Conexões Fluke 434 - Ponteiras de tensão e alicates de corrente.	36
Figura 11 - Fluke 434 em modo de Potência e Energia.	37
Figura 12 - Unifilar da rede elétrica do campus.....	39
Figura 13 - Blocos de Linha, Transformador e Carga.	41
Figura 14 – Parcela do diagrama da Usina Solar Fotovoltaica.....	42
Figura 15 – Esquemático do Gerador a diesel.	42
Figura 16 - Esquemático no Simulink.....	43
Figura 17 - Percentual de carga em relação à potência do transformador do alimentador	46
Figura 18 - Densidade de probabilidade em relação ao transformador do alimentador.	47
Figura 19 - Densidade de probabilidade de geração fotovoltaica.....	48
Figura 20 - Tensão (p.u.), θ ($^{\circ}$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento da Subestação.	49
Figura 21 - Tensão (p.u.), θ ($^{\circ}$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada.....	50
Figura 22 - Tensão (p.u.), θ ($^{\circ}$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do DELT.....	51
Figura 23 - Tensão (p.u.), θ ($^{\circ}$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do NPDEAS.	52
Figura 24 - Tensão (p.u.), θ ($^{\circ}$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento da Planta FV.....	53

Figura 25 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada.....	53
Figura 26 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do DELT e Planta FV.	54
Figura 27 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do NPDEAS.	55
Figura 28 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada e NPDEAS.....	56
Figura 29 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada.....	57
Figura 30 - Resultados do fluxo de potência sem a planta fotovoltaica.....	59
Figura 31 - Resultados do fluxo de potência com a planta fotovoltaica.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do gerador síncrono do NPDEAS.	18
Tabela 2 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.	29
Tabela 3 – Estratificação das VTCD.	30
Tabela 4 - Fatores de Ponderação e Impacto base.	31
Tabela 5 - Dados obtidos com as medições.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	-	Porcentagem
°C	-	Graus Celsius
A	-	Ampère
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
COPEL	-	Companhia Paranaense de Energia
CP	-	Centro Politécnico
FV	-	Fotovoltaica
GD	-	Geração Distribuída
Hz	-	Hertz
kV	-	Quilovolt
kVA	-	Quilovoltampere
kW	-	Quilowatt
kWh	-	Quilowatt-hora
kWh/m ² .dia	-	Quilowatt-hora por metro quadrado em um dia
kWh/mês	-	Quilowatt-hora por mês
NBR	-	Norma Brasileira Regulamentar
NPDEAS	-	Núcleo de Pesquisas e Desenvolvimento de Energia Autossustentável
rpm	-	Rotação por minuto
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná
V	-	Volt
V _{rms}	-	Tensão Eficaz
W	-	Watt
W/m ²	-	Watt por Metro Quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	GERAÇÃO A COMBUSTÃO	18
2.2	GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA.....	19
2.2.1	Tecnologias	21
2.2.2	Controle	23
2.3	QUALIDADE DE ENERGIA.....	25
2.3.1	Critérios em regime permanente	27
2.3.2	Critério em regime transitório	28
2.4	FLUXO DE CARGA.....	31
2.4.1	Formulação matemática e resolução.....	32
2.4.2	Fluxo de carga estocástico	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	RECURSOS NECESSÁRIOS	36
3.2	REDE ELÉTRICA DO CAMPUS POLITÉCNICO	38
3.3	MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DO CAMPUS.....	40
3.4	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	43
4	TESTES E RESULTADOS.....	49
4.1	ANÁLISES DINÂMICAS	49
4.1.1	Curto-circuito monofásico na barra 3.....	50
4.1.2	Variação de radiação.....	53
4.1.3	Saída do gerador a diesel.....	55
4.1.4	Saída da planta solar.....	56
4.2	ANÁLISE ESTOCÁSTICA	49
5	CONCLUSÕES	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXOS	64

1.	DIAGRAMA UNIFILAR DO CENTRO POLITÉCNICO	64
2.	DADOS DE ENTRADA DO MATPOWER.....	65
3.	PROGRAMAÇÃO PARA SIMULAÇÕES	67

1 INTRODUÇÃO

As vantagens da geração distribuída (GD) são várias e visíveis, principalmente nos aspectos econômicos e ambientais, uma vez que a principal fonte primária de energia nas GDs é proveniente de fontes renováveis. Outra questão benéfica da descentralização é a redução significativa de gastos com o transporte de energia, bem como suas perdas por efeito Joule que estão diretamente ligadas com as longas distâncias das usinas de geração de energia elétrica e dos centros de consumo. Porém essa nova abordagem do sistema elétrico implica em novos desafios técnicos, sendo necessários novos estudos e pesquisas na área de sistemas de potência para estabelecer estratégias de operação que permitam manter o sistema operando de forma segura, com a presença de usinas de diferentes características operacionais e localizadas em diversos pontos da rede. Está claro, portanto, que a complexidade do planejamento e operação, bem como as ações de manutenção e as medidas de segurança a serem tomadas aumentam, pois a dificuldade ou até mesmo a complexidade da gestão de energia aumenta à medida que mais agentes (geradores, transmissores, consumidores, etc), novas tecnologias e forças socioeconômicas são incluídos nos Sistemas Eletro-Energéticos. (Benedito, Sistemas Elétricos de Potência)

Sob o ponto de vista da operação de redes de distribuição, dentre as desvantagens da GD, uma delas está na característica radial destas redes, onde os fluxos de potência ativa e reativa fluem do lado de potencial de tensão mais elevado para um mais baixo. Com a inserção de GD, a rede de distribuição deixa de ser um circuito apenas com cargas passivas para se tornar um circuito ativo, fazendo com que o fluxo de potência não dependa apenas da diferença de tensão entre os pontos do sistema, mas também dependa dos geradores e cargas conectadas na rede. Isso ocasiona alguns impactos relacionados ao perfil de tensão, à proteção, à manutenção e à estabilidade em regime permanente e dinâmico.

Os estudos propostos neste trabalho de conclusão de curso (TCC), visam avaliar os impactos referentes a estabilidade em regime permanente e em regime dinâmico da rede elétrica do Campus Centro Politécnico (CP) da UFPR devido a inserção de um sistema de geração solar fotovoltaica de 1 MW, o que qualifica como minigeração distribuída, além de um gerador a diesel de 50 kW localizado no NPDEAS/UFPR. Além disto, tendo em vista a característica estocástica da geração solar fotovoltaica, propõe-se neste TCC a implementação computacional de uma

metodologia de fluxo de potência estocástico (FPE), cujos resultados serão comparados a aqueles provenientes do fluxo de potência determinístico (FPD).

Os recursos para a instalação da planta de geração solar fotovoltaica no campus CP da UFPR são provenientes da Chamada Pública VPDE 001/2017 na qual a Universidade foi contemplada com a oportunidade de desenvolver alguns projetos na área de eficiência energética e geração distribuída, atendendo o que determina a Lei nº. 9.991, 24 de julho de 2000. Dentre os projetos aprovados está a troca de cerca de 40 mil lâmpadas de diversos *campi* da universidade e também a instalação da maior usina fotovoltaica do estado do Paraná, constituída de 3160 painéis com capacidade de geração de 1132 MWh por ano, o que se estima uma economia de R\$1,46 milhão anualmente com energia elétrica. (MUNHOZ & KLENK, 2017)

O projeto da usina, representado na Figura 1, foi elaborado por professores dos setores de Tecnologia e de Ciências Exatas juntamente com especialistas da Fundação da UFPR (Funpar) e receberam aprovação da Agência nacional de Energia Elétrica. Assim, se espera para os próximos anos, uma rede monitorada por uma central de controle dentro do campus Centro Politécnico, viabilizando pesquisas nas áreas de eficiência energética, geração distribuída e energias renováveis.

Figura 1 - Renderização da Usina Fotovoltaica



FONTE: PARENTE, OLIVEIRA, LEANDRO, VILELA, DIAS, KUIAVA & DEMONTI (2017).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral é simular e analisar o comportamento dinâmico e em regime permanente da minirrede do Campus Centro Politécnico (CP) da UFPR baseada em geração solar fotovoltaica e a diesel.

1.1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral foi necessário:

- Aprimorar a representação do diagrama unifilar do alimentador Prado e da rede elétrica do Campus CP da UFPR, com o gerador diesel do NPDEAS e a inserção da planta solar fotovoltaica, com o levantamento cargas dos alimentadores;
- Implementação do diagrama unifilar da minirrede do campus CP no software MATLAB com auxílio da ferramenta SIMULINK via *toolbox* SIMPOWERSYSTEMS;
- Análise dinâmica – com simulações no domínio do tempo - da minirrede com perfil de carga cotidiano e diferentes condições operacionais, visando avaliar critérios relevantes à qualidade de energia;
- Análise estática (fluxo de carga) via implementação computacional, em ferramenta Matpower e por elaboração de script no MATLAB, para análise estocástica de fluxo de carga, levando em consideração incertezas nas cargas e na geração solar fotovoltaica.

1.2 JUSTIFICATIVA

Por ser um tema emergente na atualidade, a implementação de usinas fotovoltaicas ainda é um tema em desenvolvimento. Portanto, para maior entendimento, são necessários estudos e análises de sistemas reais para estudo de dados e problemas empíricos. Após a implementação da usina solar no campus, que

será referência nacional em sustentabilidade, diversos estudos relacionados começarão a surgir em decorrência do acesso facilitado ao sistema.

Atualizar o diagrama elétrico e realizar o levantamento do consumo do campus é o primeiro passo para esse avanço, que significa “mapear o meio” em que será instalada a nova unidade geradora, visto que toda geração de energia tem como finalidade atender as cargas que estão instaladas.

O ponto principal – a análise do fluxo de carga – é fundamental no planejamento de qualquer sistema de potência, pois viabiliza diversas análises mais profundas sobre condições de desempenho, controle e supervisão dos mesmos. A análise estocástica trará uma ideia dos limites de funcionamento da usina e permitirá análises mais minuciosas sobre temas como: sistemas de proteção, cálculos de curto-circuito, balanceamento de cargas e variações dos parâmetros da rede.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GERAÇÃO A COMBUSTÃO

O Centro Politécnico possui diversos geradores síncronos a combustão na sua extensão, porém, com exceção do gerador do grupo NPDEAS – Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Autossustentável – todos eles são projetados para operar apenas em casos de falta de energia da concessionária. Como nessa circunstância a planta fotovoltaica não estará em operação, visto que os inversores têm proteção anti-ilhamento, o único gerador que trará impactos para o funcionamento da rede juntamente com a geração solar é o próprio gerador do NPDEAS.

Esse gerador também foi inicialmente projetado para suprir faltas, com um limite de trabalho de 200 horas anuais. Porém, para fins de pesquisa, o regime de operação do mesmo poderá ser alterado, entrando em operação a qualquer momento.

As especificações como marca, modelo, considerações construtivas e de operação podem ser verificadas na Tabela 1. Informações essas que foram retiradas do manual do equipamento.

Tabela 1 - Dados do gerador síncrono do NPDEAS.

Características do Gerador a Diesel	
Fabricante	MAQUIGERAL
Modelo	12 W
Motor	Diesel MWM D229/4
Fator de Potência	0,8
Potência	55 kVA
Ciclo do Motor	4 Tempos
Número de Cilindros	4 em linha
Sistema de Injeção	Automático Bosch
Partida	Elétrica com Motor de Arranque
Lubrificação	Forçada por Engrenagem
Tensões Nominais	220/127 V
Frequência	60 Hz
Aspiração	Natural
Nível de Ruído a 1 metro	105 dB
Rotação	1800 rpm
Alternador de Carga da Bateria	12 V
Alternadores	Trifásicos de 4 polos
Arrefecimento	Radiador com Ventilador no Eixo
Consumo de Combustível	11,9 L/h
Densidade do Diesel	840 g/cm ³

FONTE: ADAMATTI & JUNIOR (2017).

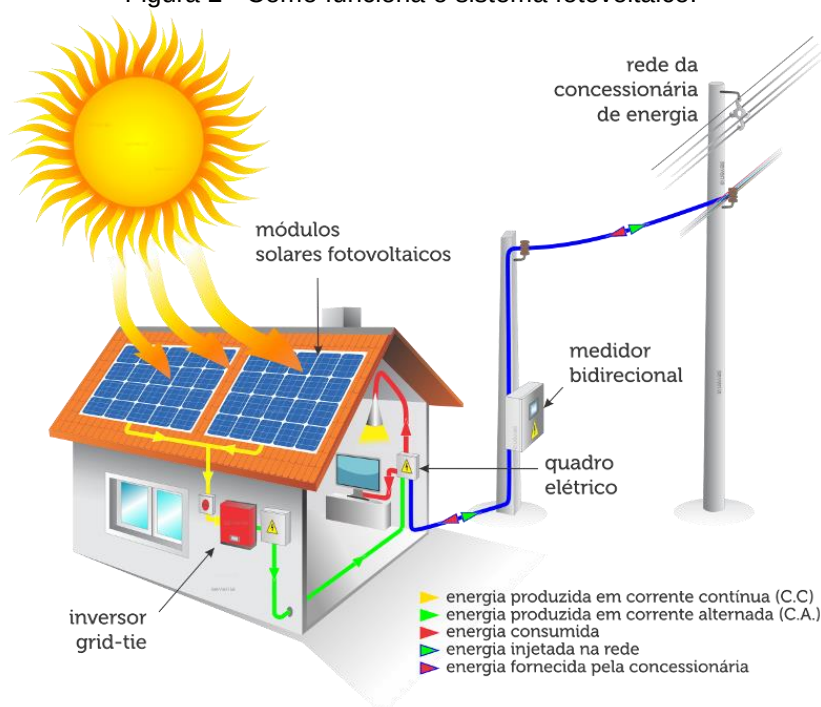
2.2 GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

A geração da energia fotovoltaica começa nos painéis solares, matrizes de várias células de silício dispostas em série e paralelos. Graças ao efeito fotoelétrico, descoberto em 1887 por Henrich Hertz, a incidência de luz solar nessas células gera um movimento contínuo dos elétrons livres presentes no semicondutor, a chamada corrente contínua.

Para que essa energia possa ser utilizada em casas ou indústrias, deve ser readequada para corrente alternada, conforme as normas da concessionária de energia local – no caso da usina do Centro Politécnico, atendida pela Copel, em 60 Hz e 220 V de tensão de linha. Para isso, são utilizados os inversores de frequência, equipamento vital para a adequação da tensão em um sistema de corrente contínua. Através de chaves eletrônicas, esses equipamentos conseguem transformar a tensão contínua dos painéis em uma onda senoidal quase perfeita, que trabalha em perfeita sincronia com o sistema de distribuição da concessionária e também atuam na proteção do sistema como um todo, interrompendo curto-circuitos e correntes de fuga.

Uma vez transformada para corrente alternada, essa energia está pronta para ser injetada nas cargas para as quais o sistema foi planejado, através dos quadros de distribuição, conforme mostra a Figura 2. Como a energia provinda dos painéis não pode ser armazenada (a não ser que o sistema conte com um banco de baterias, que não é o caso), todo o excedente é injetado na rede da concessionária e, quando isso acontece, a unidade consumidora é recompensada com “créditos de energia”, que podem ser utilizados futuramente para compensar falta de geração nos meses seguintes. Esse excedente é registrado pelo medidor bidirecional, que nada mais é que um medidor de energia normal com a habilidade de medir também a energia que sai da UC e é injetada na rede.

Figura 2 - Como funciona o sistema fotovoltaico.



FONTE: PORTAL SOLAR (2018).

Antes de se instalar uma usina fotovoltaica, é necessário analisar vários aspectos do ambiente onde ela será inserida. Começando pela necessidade de energia elétrica, respeitando as normas da ANEEL, como as resoluções normativas nº 482/2012 e 685/2015, e também as normas da concessionária local; depois é analisado o espaço físico onde os painéis serão alocados, visando à eficiência da geração e a minimização dos custos de materiais e de instalação, na medida do possível, mas sempre respeitando os limites da engenharia para garantir segurança e confiabilidade de operação. (ANEEL, 2012) (ANEEL, 2015)

A primeira parte do projeto, que trata do suprimento da energia elétrica, é geralmente calculada e simulada em *softwares* especializados para projetos de sistemas fotovoltaicos. Neles, o projetista entra com os dados dos equipamentos que pretende utilizar – painéis, inversores, cabos, transformadores, entre outros – e o programa, através de uma base de dados de cada equipamento, faz uma série de iterações considerando a intensidade e o ângulo de incidência de raios solares nos módulos, dia após dia, para todos os meses do ano considerando os valores médios de irradiação no local, provenientes de alguma base de dados meteorológica.

2.2.1 Tecnologias

A tecnologia mais utilizada hoje em dia é o cristal de silício, onde um lingote de silício é cortado em fatias muito finas, chamadas *wafers*, que são tratadas quimicamente para virarem as células fotovoltaicas que conhecemos hoje (Figura 3). Essas células são dispostas num substrato, conectadas em série umas às outras e emolduradas em um quadro de alumínio com vidro temperado e antirreflexo para formar um módulo. Esse processo de produção é bastante complexo e explica o motivo dessa tecnologia ainda ter um custo inicial bastante elevado. No entanto, é o que apresenta melhor relação custo-benefício atualmente, visto que têm rendimentos de aproximadamente 18% - relativamente altos para os padrões de hoje - onde cada painel de 72 células consegue gerar em torno de 360 W de potência. Os painéis a serem instalados na usina do campus serão de 315 Wp, o que quer dizer que, ao nível de irradiação padrão na superfície da Terra (1000 W/m^2), conseguem gerar 315 W, representando uma eficiência de 15,75%.

Figura 3 - Etapas da fabricação de um painel fotovoltaico.



FONTE: PORTAL SOLAR (2018).

Dependendo do processo de fabricação, pode-se obter células monocristalinas ou policristalinas, cada uma com suas características próprias. Os painéis a serem implementados na usina solar do Centro Politécnico são do tipo Policristalino, que tem uma característica de geração ligeiramente menor que os monocristalinos, uma vez que cada *wafer* contém mais de uma camada de átomos de material semicondutor, o que faz com que a incidência de radiação não seja uniforme na superfície da célula toda. Esse arranjo pode ser identificado a olho nu: as células policristalinas são

azuladas e com “manchas”, que são as próprias imperfeições na estrutura molecular, enquanto as monocristalinas são pretas e de tom uniforme. (PORTAL SOLAR, 2018)

A usina é, então, dividida em vários conjuntos de módulos ligados em série, chamados *strings*, que serão conectados ao inversor por um par de cabos de corrente contínua. Geralmente se utilizam os chamados cabos solares, que são cobertos por uma camada de XLPE 120°C, material que possui uma boa característica isolante, devido a tensão elevada das *strings*; é resistente a água, radiação UV e outras intempéries, visto que podem ficar expostos ao clima, o que garante um maior tempo de vida útil do sistema (NEXANS, 2018).

Várias *strings* são combinadas em paralelo, resultando em um trecho de circuito com corrente bastante elevada (porém de mesma tensão), que é conectado ao inversor. O próprio equipamento conta com um controlador MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), que analisa informações sobre a rede em que está conectado e a fonte geradora para conseguir fornecer o máximo de potência para o sistema dadas as atuais condições de funcionamento, em termos de radiação e temperatura. O controlador sempre irá tentar fazer com que o inversor opere com fator de potência mais próximo possível da unidade, ajustando os níveis de corrente e de tensão provenientes dos painéis para que não haja perda de potência.

Novas tecnologias estão em fase de desenvolvimento e ainda não são vistas com muita frequência nos dias de hoje, tanto de inversores quanto de células fotovoltaicas, como é o caso das células de multi-junção, que apresentam rendimentos muito maiores, da casa dos 35%. Essa tecnologia ainda é inviável devido ao seu elevado custo de produção, mas acredita-se que daqui a 5 a 10 anos ela comece a ganhar espaço no mercado, substituindo as atuais células de silício cristalino. A Figura 4 apresenta a evolução da tecnologia de células fotovoltaicas desde 1976 até 2016.

Figura 4 - Classificação de painéis fotovoltaicos

CLASSES	ÍNDICE DE MÓDULO	
	SILÍCIO CRISTALINO	FILMES FINO
A	$EE > 13,5$	$EE > 9,5$
B	$13,5 \geq EE > 13,0$	$9,5 \geq EE > 7,5$
C	$13,0 \geq EE > 12,0$	$7,5 \geq EE > 6,5$
D	$12,0 \geq EE > 11,0$	$6,5 \geq EE > 5,5$
E	$EE < 11,0$	$EE < 5,5$

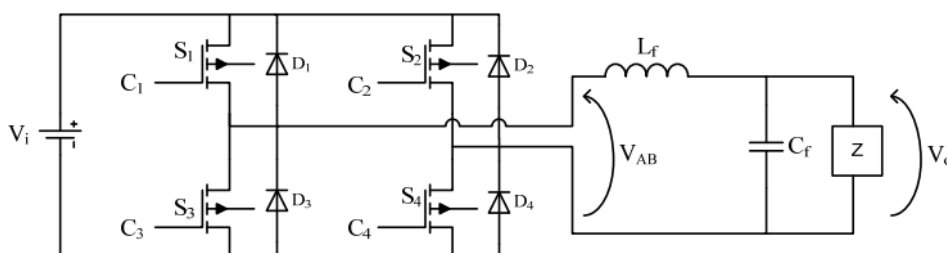
FONTE: INMETRO (2017)

Já em relação aos inversores, uma inovação que começou a ganhar espaço no último ano é o microinversor. Esse equipamento, diferente dos inversores de *strings*, é instalado diretamente no módulo e operando exclusivamente para ele, ou seja, há um microinversor para cada painel. A vantagem dele é que, quando um painel é coberto por sombras, ele não vai prejudicar o funcionamento da *string* inteira, como acontece nos sistemas em que as placas são conectadas umas às outras, mas sim ajustar instantaneamente seu MPPT para aquelas dadas condições de sombreamento daquele módulo. (PORTAL SOLAR, 2018)

2.2.2 Controle

O funcionamento de um inversor de frequência *grid-tie* é baseado na modulação de um sinal contínuo, tendo como referência um sinal senoidal, ou seja, o inversor precisa estar conectado à uma rede para poder transformar a energia CC para CA. A Figura 5 representa o circuito simplificado de um inversor monofásico.

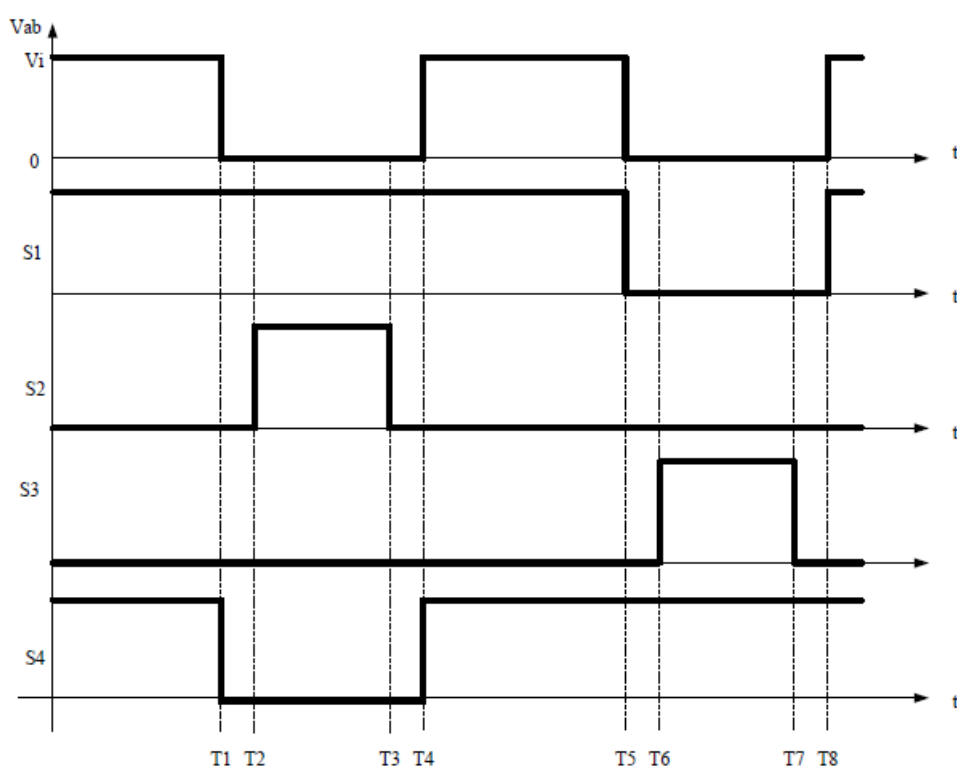
Figura 5 - Esquemático simplificado de inversor monofásico.



FONTE: BARBI, I. (2007).

A transformação de CC para CA é realizada através de uma sequência de pulsos de alta frequência aplicados nas portas dos transistores para gerar uma onda que tenha o mesmo valor fundamental da alimentação da rede, no caso, 127/220 V e 60 Hz. O processo é feito em oito etapas básicas, intercalando o funcionamento das chaves para fazer com que a corrente flua pela carga nos dois sentidos, simulando um ciclo senoidal completo. Os sinais aplicados nas portas dos transistores durante um ciclo completo é apresentado na Figura 6, a seguir.

Figura 6 - Sequência de chaveamento dos transistores.



FONTE: BARBI, I. (2007).

É válido observar que os gráficos de $S1$, $S2$, $S3$ e $S4$ são sinais de tensão aplicados nas portas dos transistores, ou seja, quando está em nível alto, significa que o transistor está conduzindo. Assim, ao se analisar o sinal de referência, é possível reproduzi-lo através da modulação PWM, de frequência muito maior que a da rede. Variando os tempos de comutação dos transistores, é possível variar a razão cíclica da tensão que é aplicada na carga, que é representada por:

$$D = \frac{\Delta T}{T_s} \quad (1)$$

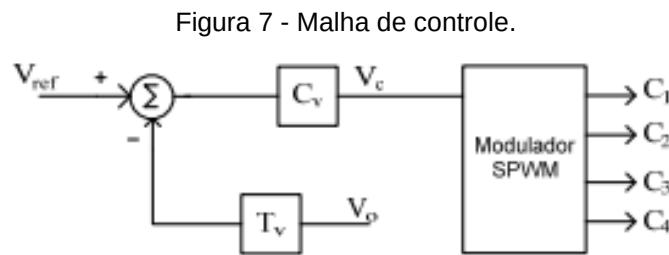
Onde ΔT é o tempo em que a carga está sendo alimentada pela tensão da fonte e T_s é o período desse ciclo de 8 etapas e vale notar que $0 < D < 1$. Isso representa, instantaneamente, uma porcentagem da tensão da fonte que está sendo aplicada na carga.

Logo, a tensão na carga pode ser descrita por:

$$V_{AB} = V_i \cdot f(D) \quad (2)$$

Em que $f(D)$ é uma função de um múltiplo inteiro da tensão CC da fonte, que adequará o nível de tensão para o da rede em que o inversor estará conectado, multiplicado por uma função senoidal, que adequará a frequência. Essa função senoidal é resultante de uma variação de da razão cíclica D projetada para operar na frequência amostrada da rede.

A malha de controle, então, pode ser representada pela Figura 7.



FONTE: BARBI, I. (2007).

Onde o modulador SPWM é o responsável por transformar uma onda quadrada de razão cíclica variável e controlada por um compensador C_v nos pulsos sequenciais da Figura 6.

2.3 QUALIDADE DE ENERGIA

Falar de transmissão e fornecimento de energia elétrica para suprir uma demanda implica em falar de quais os critérios necessários para suprir essa demanda, ou seja, que confiabilidade o sistema precisa garantir para que as necessidades das cargas sejam atendidas. As concessionárias de energia precisam garantir que os seus

clientes tenham o produto que eles compraram (energia elétrica), nos padrões que lhes foram estabelecidos, como por exemplo, a tensão e frequência da rede constantes. Todos os sistemas elétricos, tanto de geração quanto de transmissão, são afetados por alterações de carga e esse impacto irá causar oscilações na rede. O quanto esse impacto afetará o produto final entregue para o cliente são definidos pelos critérios de qualidade de energia impostos pela ANEEL, no Módulo 8 do *Prodist* (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) (PRODIST, 2017).

Como o sistema de geração de energia contratado pela concessionária também está sujeito a imperfeições, ela é quem deve conferir segurança para os clientes, assim projetam seu sistema de distribuição de energia, que até então era em modelo radial e vem migrando para um para um modelo em anel (*loop*), para atender os requisitos de proteção. Porém, as novas centrais geradoras que se conectam à rede da concessionária são particulares, o que significa que elas devem garantir proteção e operabilidade à rede da concessionária também. Para isso, cada concessionária define suas normas de operação e todos aqueles que desejarem ter acesso a essa rede, devem obedecer a determinados requisitos impostos para que seja permitido o acesso desse cliente à rede. E como este tipo de inversor solar da usina do CP utiliza a rede elétrica como referência de operação (inversor *grid-tie*), o sistema obrigatoriamente deve cumprir os requisitos da NTC-01 da Copel para que entre em funcionamento.

Essa imposição de operação da concessionária é regulamentada pela ANEEL, maior órgão aos quais as concessionárias devem obedecer.

O inversor de frequência para geração solar fotovoltaica, por sua natureza de chaveamento eletrônico, já causa um pequeno impacto no funcionamento da rede, pois a geração senoidal não é analógica, mas sim composta de ondas quadradas representando um funcionamento senoidal. Aliando isso às questões de oscilações devido a alterações de carga e o fato de a proteção da rede de distribuição não estar mais dependendo somente da concessionária de energia, mas também de outros alimentadores distribuídos pela malha; implica em uma atenção especial para os sistemas de monitoramento e proteção.

2.3.1 Critérios em regime permanente

Como mencionado no item anterior, o Módulo 8 do Prodist define a qualidade de energia em regime permanente nos seguintes aspectos: tensão, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de frequência. Cada um deles tem sua explicação detalhada com embasamento científico, porém aqui serão apresentados somente os dados para o caso do Centro Politécnico.

O campus tem sua entrada de energia em tensão de 13,8 kV, por sua vez, segundo o item 2.3.3 do Módulo 8:

- O valor eficaz (ou rms, sigla do inglês para média quadrática) de tensão no ponto de conexão do campus com a rede deve permanecer entre 95% e 105% do valor contratado, ou seja, 13,1 e 14,5 kV;
- O fator de potência, calculado com a equação 3:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3)$$

Sendo P a potência ativa [W] e Q a potência reativa [VAr], deve estar compreendido entre 1 e 0,92 (capacitivo ou indutivo);

- As distorções harmônicas não podem exceder os limites de:
 - 8% do valor de tensão da frequência fundamental para distorção geral;
 - 2% do valor de tensão da frequência fundamental para as componentes pares não múltiplas de 3;
 - 6% do valor de tensão da frequência fundamental para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e;
 - 5% do valor de tensão da frequência fundamental para as componentes múltiplas de 3.
- O desequilíbrio de tensão, calculado por:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (4)$$

Sendo V_- e V_+ , respectivamente, a magnitude de tensão das sequências negativa e positiva da frequência fundamental, deve ser abaixo de 2%.

- A frequência deve permanecer entre 59,9 Hz e 60,1Hz em operações normais ou, em casos de distúrbios na rede, os geradores devem reestabelecer a frequência entre 59,5 Hz e 60,5 Hz em até 30 s (PRODIST, 2017).

2.3.2 Critério em regime transitório

Como critério de qualidade com produto em regime transitório, levantado pelo Módulo 8 do Prodist, temos as Variações de Tensão de Curta Duração, conhecidas como VTCD. Esse critério tem como finalidade enquadrar desvios na amplitude do valor eficaz da tensão em períodos de tempo inferiores a três minutos. Já as variações de tensão durante transitórios devem permanecer na faixa que varia de 56,5 Hz a 66 Hz, segundo o capítulo 7 deste Módulo.

Podendo ser classificadas como variações momentâneas ou temporárias, onde para as momentâneas as variações podem ser enquadradas em períodos que variam entre 166 ms e 3 s e para as temporárias em períodos entre 3 s e 3 minutos.

A classificação ainda leva em conta a amplitude da tensão em relação à tensão de referência, sendo possível verificar todas as classificações na tabela abaixo.

Tabela 2 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração.

Classificação	Denominação	Duração	Amplitude da tensão em relação à referência (p.u)
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	$IMT \leq 3 \text{ s}$	Inferior a 0,1
	Afundamento Momentâneo de Tensão	$166 \text{ ms} \leq AMT \leq 3 \text{ s}$	$0,1 \leq AMT \leq 0,9$
	Elevação Momentânea de Tensão	$166 \text{ ms} \leq EMT \leq 3 \text{ s}$	$1,1 \leq EMT$
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	$3 \text{ s} \leq ITT \leq 180 \text{ s}$	Inferior a 0,1
	Afundamento Temporário de Tensão	$3 \text{ s} \leq ATT \leq 180 \text{ s}$	$0,1 \leq ATT \leq 0,9$
	Elevação Temporária de Tensão	$3 \text{ s} \leq ETT \leq 180 \text{ s}$	$1,1 \leq ETT$

FONTE: Prodist – Módulo 8.

Além dessas denominações e classificações, outros indicadores são associados às VTCDs, são eles Amplitude do evento da de VTCD (V_e), Duração do evento de VTCD (Δt_e), Frequência de ocorrência de eventos de VTCD (f_e), Fator de Impacto (FI) e Fator de Impacto base (FI_{base}). E a fim de estratificar as ocorrências, nove regiões são definidas conforme a intensidade e duração de cada evento. Regiões essas definidas de A até I conforme a seguinte tabela.

Tabela 3 – Estratificação das VTCD.

Amplitude (pu)	Duração								
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min)		
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I					
(1,10 - 1,15]									
(0,85 - 0,90]	REGIÃO A								
(0,80 - 0,85]									
(0,70 - 0,80]	REGIÃO B	REGIÃO D		REGIÃO G					
(0,60 - 0,70]									
(0,50 - 0,60]	REGIÃO C								
(0,40 - 0,50]									
(0,30 - 0,40]	REGIÃO E			REGIÃO F					
(0,20 - 0,30]									
(0,10 - 0,20]									
< 0,10									

FONTE: Prodist – Módulo 8.

O Fator de Impacto, que tem a finalidade de caracterizar a severidade do evento de VTCD é obtido com a resolução equação 5.

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} x f_{pi})}{FI_{BASE}} \quad (5)$$

Sendo as variáveis, f_{ei} – a frequência de ocorrência dos eventos de VTCD (para períodos de medição de 30 dias consecutivos), f_{pi} – o fator de ponderação para cada região de sensibilidade (estabelecida pela estratificação dos eventos) e FI_{BASE} – o fator de impacto base, pré-determinados pela ANEEL no Módulo 8, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores de Ponderação e Impacto base.

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (f_p)	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		$1,0\text{ kV} < V_n < 69\text{ kV}$	$69\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

FONTE: Prodist – Módulo 8.

Para o sistema de distribuição de baixa tensão não são estabelecidos valores de referência para VTCD. No entanto, para os sistemas de média e alta tensão, o valor de referência do indicador Fator de Impacto, apurado por medição apropriada no período de 30 (trinta) dias consecutivos, é de 1,0 p.u.

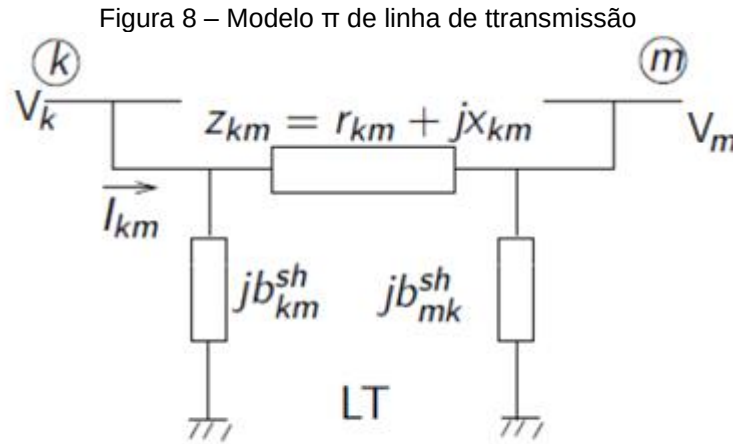
2.4 FLUXO DE CARGA

O estudo de fluxo de carga é de vital importância quando se trata de planejar um sistema elétrico de maneira eficiente com boas condições de controle e operação. O fluxo de carga, ou também conhecido como fluxo de potência se resume basicamente na determinação do estado de rede, com a magnitude das tensões nodais e ângulos de fase, e injeções de potência ativa e reativa junto com a distribuição do fluxo dessas potências para as cargas. Essa análise traz um conjunto de equações e inequações algébricas que expressa um estado estacionário da rede.

Por isso, a fim de trazer um cenário de melhores condições para o novo sistema de geração do *campus* CP, o fluxo de potência deve ser estabelecido para as cargas já existentes nas instalações da UFPR. Contudo, para se realizar essas simulações, o sistema elétrico deve ser modelado, levando em conta a localização das cargas, balanceamento das mesmas, formas de geração, características das linhas de distribuição e possível perfil de demanda das cargas.

2.4.1 Formulação matemática e resolução

Um dos métodos mais comuns para se calcular o fluxo de potência em um sistema de distribuição é o método da matriz Y barra. Esse nome é dado em razão do método de modelagem das linhas de transmissão que conectam as cargas aos geradores, que são modeladas de acordo com a Figura 8.



FONTE: ADAPTADO DE BENEDITO, R. (2003).

Onde:

$$Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} + jb_{km} \quad (6)$$

Considerando conservação das potências ativa e reativa em cada nó e aplicando a Lei de Kirchhoff das correntes aos nós do sistema, obtemos as seguintes equações gerais do fluxo de potência:

$$P_{km} = g_{km} V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} - b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (7)$$

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_{km}^{sh}) V_k^2 + V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (8)$$

Onde P e Q representam os fluxos de potência ativa e reativa de uma barra k para uma barra m ; g e b representam, respectivamente, a condutância e susceptância da linha que liga essas barras; θ_k e θ_m , o ângulo dos fasores de tensão, em relação à barra de referência e θ_{km} a diferença angular entre as duas barras em questão. Desprezando as perdas do sistema de transmissão, considerando as tensões nas barras iguais a 1 p.u e aproximando o valor de $\sin \theta_{km} = \theta_{km}$ para ângulos próximos de 0° , chegamos à equação linearizada do fluxo de potência:

$$P_{km} = -b_{km} * (\theta_k - \theta_m) \quad (9)$$

Ou seja, para diferença angular próxima de zero entre uma barra e outra, o fluxo de potência depende basicamente da diferença angular entre as duas barras em questão, que normalmente é o que se vê na prática, em linhas de transmissão, devido às suas características elétricas que representam baixa impedância.

As barras, por sua vez, são definidas por quatro parâmetros: magnitude e ângulo da tensão nodal (V_k e θ_k) e injeções de potência ativa e reativa na barra (P_k e Q_k). Para cada barra presente, duas dessas variáveis são conhecidas e as outras duas são incógnitas. Essas são divididas em três categorias: PQ, PV e Referência.

Barras de carga são chamadas PQ, onde se conhece os parâmetros P e Q (V e θ são as incógnitas). Analogamente, as barras de geração são chamadas de PV, onde se conhece a potência ativa gerada e a magnitude da tensão. Por fim, tem-se a barra de referência, que usualmente adota-se a maior unidade geradora do sistema, onde naturalmente sabemos a magnitude de tensão, porém define-se para ela a angulação de 0° , logo, todas as outras vão estar defasadas em relação à essa.

Para resolver esse problema, uma maneira bastante eficaz de se fazê-lo é computacionalmente, através do método iterativo de Newton, onde o método faz diversas iterações acerca da matriz Jacobiana, que relaciona o fluxo de potência em uma barra com as potências de todas as barras adjacentes a ela. O método consiste em estimar as raízes de um polinômio por meio de aproximações de retas tangentes a pontos próximos da raiz, sendo o primeiro escolhido arbitrariamente.

2.4.2 Fluxo de carga estocástico

Resolver o problema do fluxo de potência significa entender o que está acontecendo na rede para aquele determinado ponto de operação (determinada distribuição de carga e geração). Podemos, então, estimar diversos pontos de operação e resolver o novo problema do fluxo de potência para entender o comportamento de determinada rede sob diferentes condições.

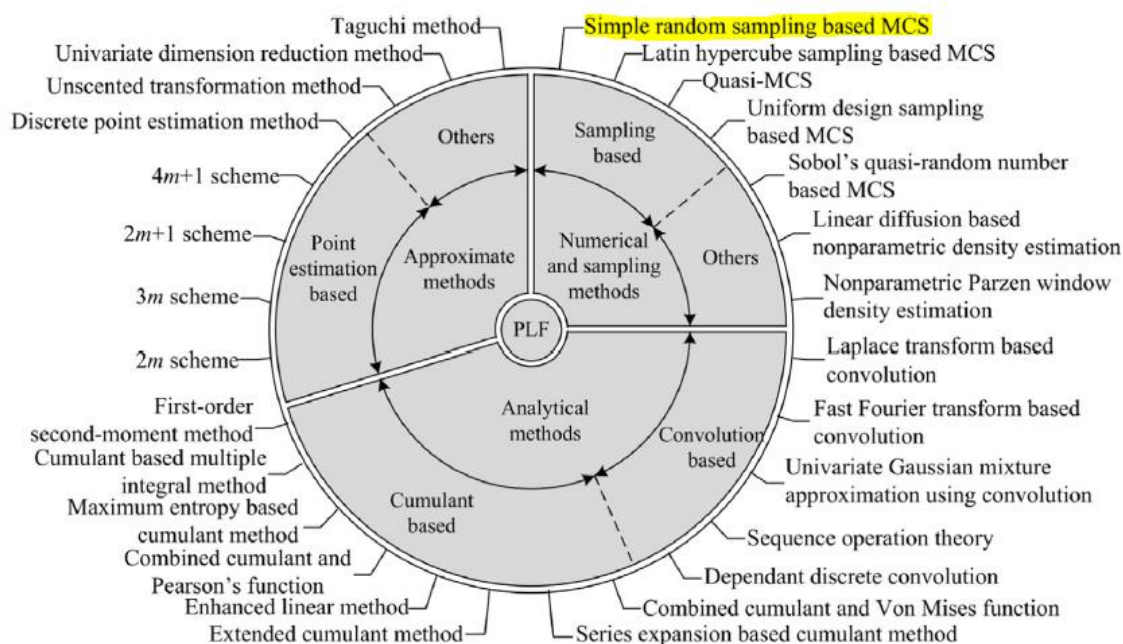
A rede elétrica do campus, em breve, contará com a adição de uma grande unidade geradora fotovoltaica, que representará um barramento forte, porém, a geração de potência não é controlada, mas sim fortemente dependente da condição de radiação solar incidente nos módulos, que caracteriza um comportamento bastante variável, porém previsível dentro de certos limites.

Analogamente, grandes cargas dentro do campus podem ser ligadas e desligadas sem muita previsibilidade para o sistema. Certas aulas ou experimentos podem demandar grandes quantidades de potência quando ligados. Assim como comumente, em instalações domésticas, se observa uma diminuição no fluxo luminoso das lâmpadas quando ligamos um chuveiro elétrico, esse afundamento de tensão também ocorre a nível de sistemas de distribuição e podem impactar a rede do campus. Para prever a operabilidade do sistema, é razoável fazer um estudo estatístico sobre quanto essa carga pode variar, dentro da utilização usual do campus; e também sobre quanto a geração solar pode variar de acordo com o nível de radiação incidida nos painéis.

Com esses parâmetros definidos, pode se fazer vários cálculos para diferentes combinações de cargas e de geração e analisar faixas de valores dentre os quais os indicadores se comportam, como por exemplo: o módulo das tensões nas barras, os ângulos em relação à barra de referência e as injeções de potência. A esse método de análise de resultados baseado em amostragens aleatórias massivas se dá o nome de Método de Monte Carlo (MMC), que há muito tempo tem sido usado para obter aproximações numéricas de funções complexas em que não é viável obter uma solução analítica/determinística.

O MMC é um método numérico, geralmente utilizado para modelos complexos e não-lineares, com diversas variáveis aleatórias associadas. Ele não é o método mais rápido para se computar dados em comparação a outros existentes (ver Figura 9), porém é fácil de ser implementado e serve como referência para comparação com outros devido à sua alta precisão.

Figura 9 - Métodos de avaliação de Fluxo de Carga



FONTE: JENA, PRUSTY (2016)

As incertezas podem ser facilmente implementadas, tanto em cargas como em geradores, por meio de distribuição normal, com seus parâmetros sendo modelados por um valor médio e um desvio padrão. Para as cargas, o valor médio geralmente provém de dados históricos de consumo, enquanto o desvio padrão é estipulado em valores entre $\pm 5\%$ a $\pm 10\%$; enquanto que para a geração solar fotovoltaica, a modelagem pode ser feita de diversas maneiras, cada uma levando em consideração alguns parâmetros. Um dos modelos aceitos leva em conta a irradiação global horizontal e temperatura dos módulos.

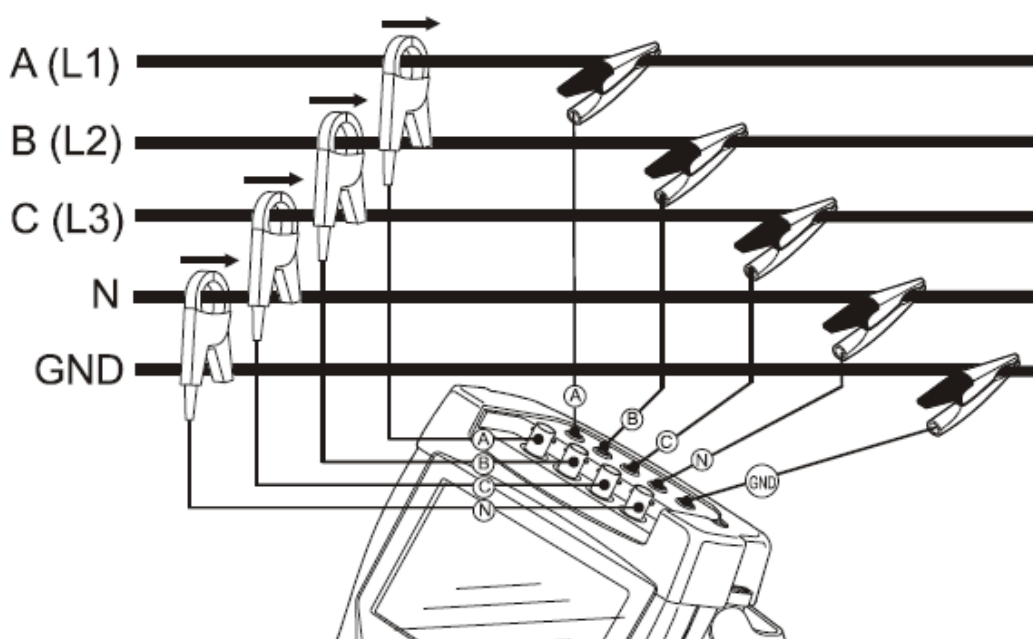
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 RECURSOS NECESSÁRIOS

A fim de se obter um panorama atual das instalações elétricas, perfil de carga e comportamento na presença de transitórios é necessário o uso de alguns equipamentos e ferramentas. Primeiramente, o perfil de carga do campus foi levantado através do uso de um analisador de rede, chamado Fluke 434.

O DELT – Departamento de Engenharia Elétrica – possui um analisador de rede Fluke modelo 434. O dispositivo conta com cinco ponteiros de tensão e quatro alicates de corrente para se conectar a sistemas trifásicos com neutro e terra, conforme mostra a Figura 10. Com quatro ponteiros tipo alicate amperímetro para até 400 A e uma ponteira para 2000 A, o uso do equipamento teve o intuito de conseguir dados de potências ativas, potências reativas, potências aparentes e fatores de potência, dados esses instantâneos, para assim obter um possível comportamento da carga do campus Centro Politécnico da UFPR. Mas, além dessas grandezas, com o analisador de rede Fluke 434 é possível verificar diversos outros parâmetros e singularidades da rede analisada como, forma de onda de perfil, tensão/corrente/frequência, reduções e aumentos, harmônicos, oscilações, desequilíbrio, forma de onda de transientes e interrupções.

Figura 10 - Conexões Fluke 434 - Ponteiros de tensão e alicates de corrente.



FONTE: GUIA DO USUÁRIO FLUKE 434 (2004).

O analisador de rede possui diversas configurações de circuito como trifásico estrela com neutro aterrado, delta isolado, monofásico mais neutro, entre outras formas de arranjo. Assim é necessário realizar esses ajustes para diferentes tipos de medição. Na tela do equipamento é possível visualizar o esquemático de ligação das pontes para corrente e tensão, além das pontes de terra, o que facilita no momento da aferição.

O equipamento dispõe de um *display* colorido e, quando operado no modo de potência e energia, ilustra as medições em forma de tabela com as seguintes referências:

- Potência Ativa;
- Potência Reativa;
- Potência Aparente;
- Fator de Potência;
- Corrente eficaz;
- Tensão eficaz;

Valores esses referentes a cada fase e ao total do sistema, conforme exemplificado pela Figura 11.

Figura 11 - Fluke 434 em modo de Potência e Energia.



FONTE: Os Autores (2018).

A partir dos dados obtidos com esse equipamento, foi possível atualizar o sistema modelado no Simulink, ferramenta desenvolvida pela MathWorks, que

consiste em um ambiente gráfico programável necessária para simular e analisar sistemas dinâmicos. Sua principal interface é uma ferramenta de diagramação em blocos e um conjunto de bibliotecas personalizáveis, que oferece integração completa com o ambiente MATLAB.

Outro recurso do MATLAB que teve um papel fundamental no desenvolvimento desse trabalho foi o Matpower, pacote de código aberto de *scripts* e arquivos desenvolvidos por pesquisadores da Universidade de Cornell – Nova Iorque. Ele é utilizado para a resolução de fluxo de potência linearizado e não linearizado através dos métodos de Newton, Gauss-Seidel, entre outros.

3.2 REDE ELÉTRICA DO CAMPUS POLITÉCNICO

O sistema elétrico do Campus Centro Politécnico é constituído por 16 circuitos de distribuição, esses oriundos do ramal de entrada do campus, que por sua vez é energizado através do Alimentador Prado – rede aérea e subterrânea da Av. Comendador Franco – por meio da Subestação Capanema.

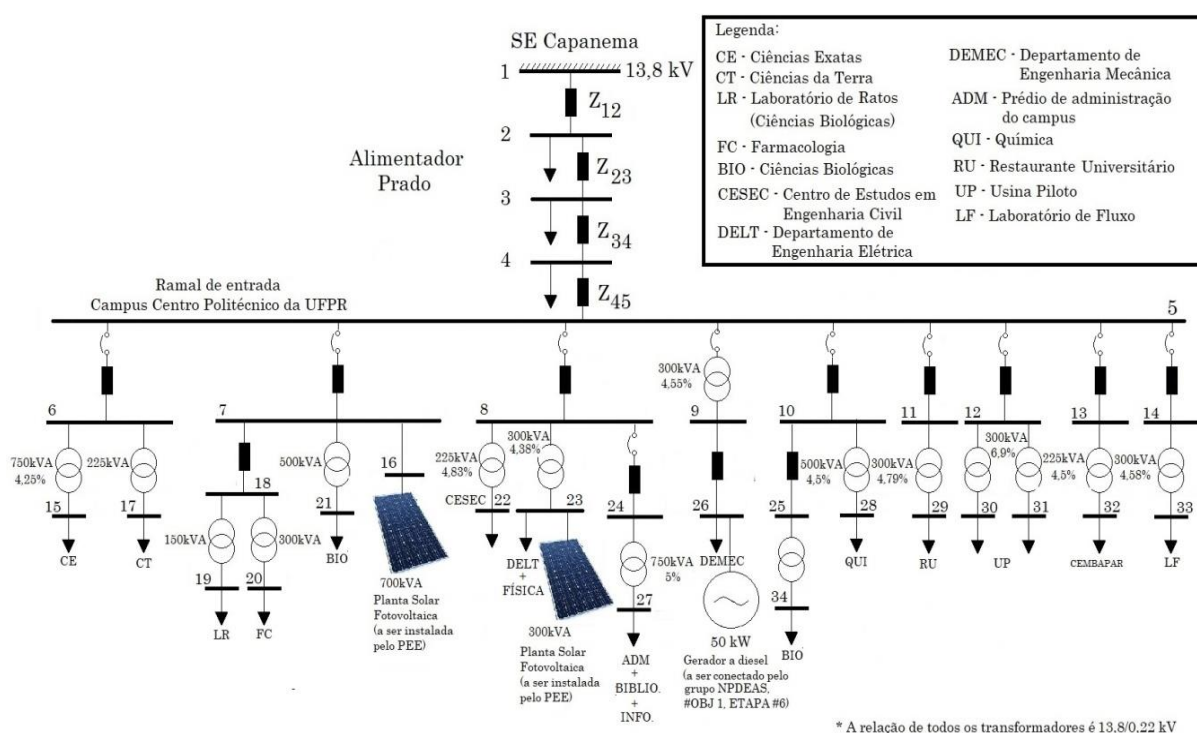
Tendo em vista os diversos prédios do CP, os circuitos de distribuição se ramificam por transformadores (13,8 kV / 0.22 kV), aqueles nomeados, conforme a última revisão de uma série de documentos que representam o unifilar do Campus Politécnico, da seguinte maneira:

1. Cabine primária Biológicas I;
2. Cabine primária Biológicas II;
3. Cabine primária CESEC;
4. Cabine primária Laboratório de Fluxos;
5. Cabine primária DELT;
6. Cabine primária Administração;
7. Cabine primária Química;
8. Cabine primária Piloto I;
9. Cabine primária Piloto II;
10. Cabine primária CEMBAPAR;
11. Cabine primária RU;
12. Ciências Exatas;
13. Ciências da Terra;

- 14. Cabine Farmacologia
- 15. Cabine Laboratório de Ratos.
- 16. Cabine DEMEC;

Sendo assim, possível de ser representado pela Figura 12, e também pelo Anexo 6.1, onde pode ser visualizado com melhor legibilidade. Com ele é possível verificar em quais barramentos ocorrerá as injeções de potências, tanto de origem solar fotovoltaica quanto de origem por combustão.

Figura 12 - Unifilar da rede elétrica do campus.



FONTE: KUIAVA, R. (2017).

A geração fotovoltaica tem, na saída dos inversores, uma tensão de linha igual a 380 V e passa por uma unidade de transformação que eleva a tensão para o nível de distribuição do campus, 13,8 kV, diminuindo o nível de corrente para minimizar as perdas por efeito joule na distribuição.

Devido à constante ampliação do campus, é difícil se documentar cada atualização do circuito de energia do CP. Assim, algumas informações foram obtidas de forma não documental, como a potência dos transformadores do bloco de Ciências Exatas e Ciências da Terra, impedâncias de transformadores, além de medidas de comprimento de linhas de distribuição.

3.3 MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DO CAMPUS

O problema raiz desse trabalho se resume em realizar um levantamento das cargas que estão distribuídas pelo Centro Politécnico, com essa aquisição é possível aplicar esses dados em um modelo computacional da rede implementado no software MATLAB. Com essa implementação é possível se obter o fluxo da energia elétrica que circula no circuito do campus, e assim, sendo possível simular diferentes condições de geração e carga para analisar o comportamento da rede.

Para a modelagem da rede foi preciso estipular os parâmetros físicos das linhas de distribuição, transformadores e geradores. Além disso, foi realizado uma série de medições das potências instantâneas e fator de potência para em horários de consumo habitual. Durante esse processo tivemos auxílio do Técnico Antônio Cristovão Vieira Santos, o qual nos acompanhou nas medições durante os meses de agosto e setembro de 2018. As medições foram realizadas em horários em que o consumo de energia em cada alimentador é mais elevado. Por exemplo, o ramal de alimentação do Restaurante Universitário teve sua medição realizada durante o almoço, após as lavadoras de louças estarem ligadas. Os valores obtidos durante o período de medições podem ser visualizados na Tabela 5, essas grandezas estão representando o equivalente trifásico do sistema elétrico do campus.

Tabela 5 - Dados obtidos com as medições.

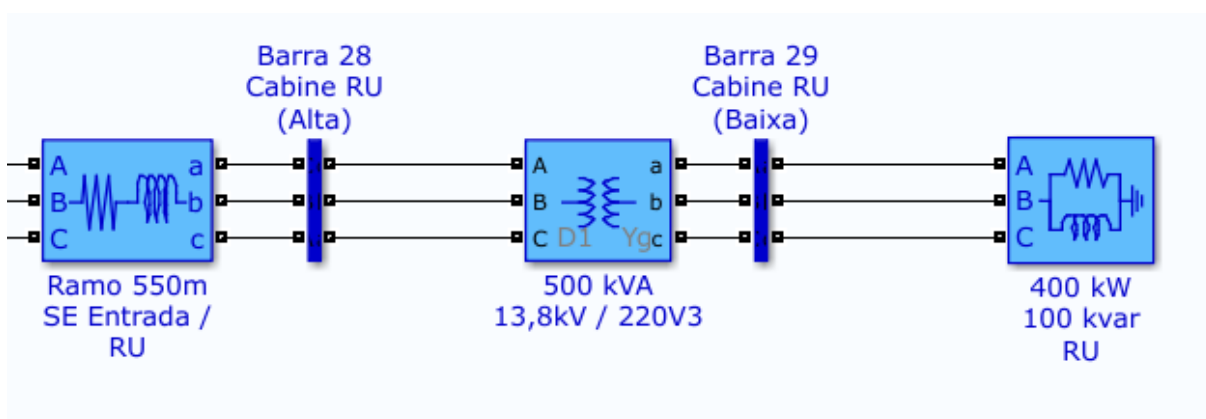
Alimentador	Transformador [kVA]	P[kW]	Q[kvar]	S[kVA]	FP	% da carga
Cesec	225	92,2	9,2	92,7	0,99	41,2
Lamir	300	25,8	2,8	26	0,99	8,67
DELT	300	85,2	1,62	89,61	0,95	29,87
ADM	750	219	49	224	0,98	29,87
Química	500	129,5	32,3	133	0,97	26,6
Usina Piloto1	300	28,6	23,6	38	0,75	12,67
Usina Piloto2	300	106,6	32,8	112,2	0,95	37,4
Cembapar	500	132,6	9,6	134,4	0,99	26,88
RU	500	150,8	22,4	152,4	0,99	30,48
Biológicas 1	500	168	56	177	0,95	35,4
Biológicas 2	500	122	31	126	0,97	25,2
Ciências Exatas	300	89,95	3,15	90	1	30
Farmacologia	300	7	1,1	7,2	0,97	2,4
Laboratório de ratos	300	47,4	26,1	60,9	0,78	20,3
Ciências da Terra	300	17,8	1,8	17,9	0,99	5,97

O diagrama de blocos do sistema elétrico do campus Politécnico é composto, basicamente, por blocos que modelam matematicamente:

- As cargas, por suas potências ativa e reativa;
- As linhas de transmissão, por suas resistências e indutâncias;
- Os transformadores, por suas resistências e reatâncias;
- Os geradores síncronos, por suas reatâncias, potência e frequência;
- A planta solar, por sua potência;

Como pode ser exemplificado pelos blocos de linha, transformador e carga mostrados na Figura 13.

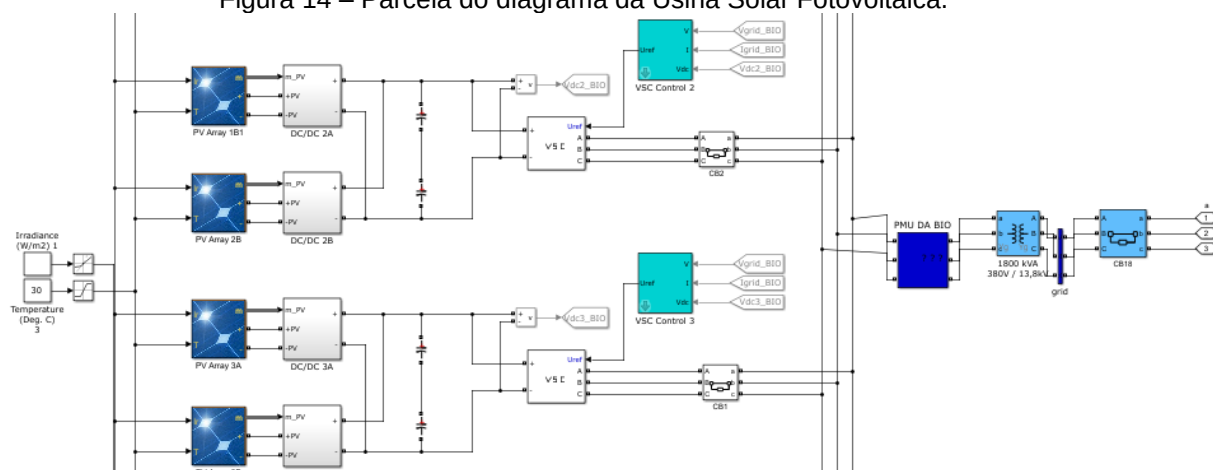
Figura 13 - Blocos de Linha, Transformador e Carga.



FONTE: KUIAVA, R. (2017).

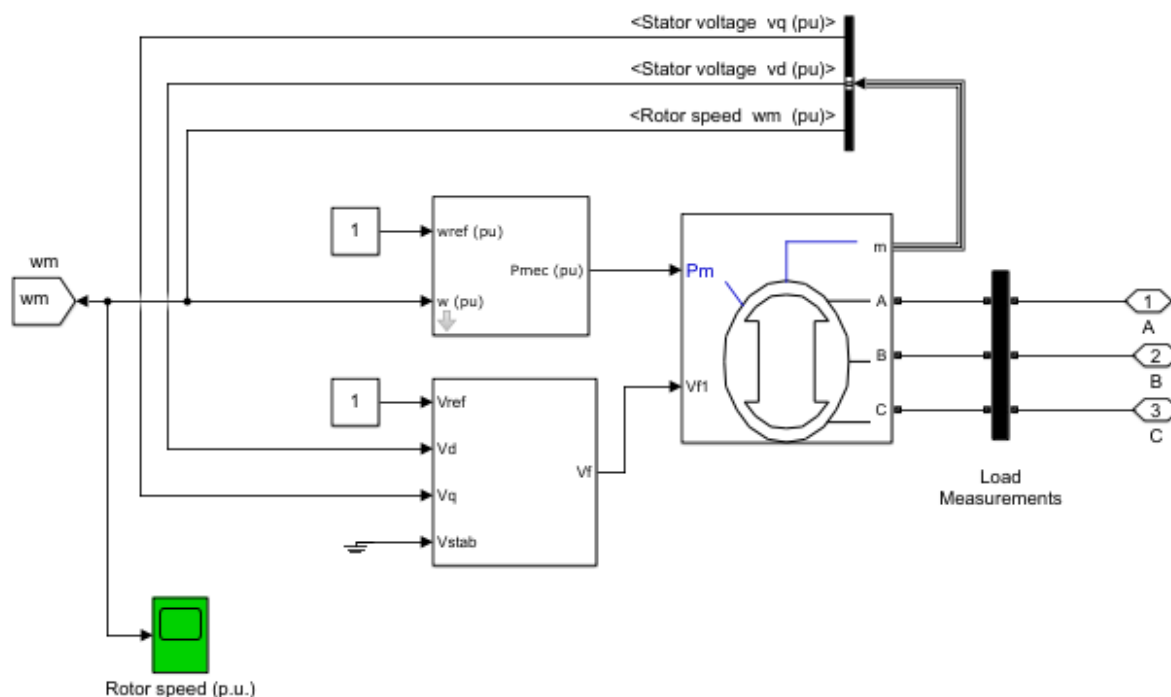
Nesse diagrama é possível acessar os blocos de geração solar fotovoltaica e geração a diesel, representados nas Figuras 14 e 15. No esquemático da planta FV nota-se a existência dos blocos de entrada das placas solares, que representam os estados de radiação e temperatura em que as placas irão operar. Analogamente, o bloco que representa o gerador à combustão é representado pela sua potência mecânica e a tensão terminal.

Figura 14 – Parcela do diagrama da Usina Solar Fotovoltaica.



FONTE: KUIAVA, R. (2017).

Figura 15 – Esquemático do Gerador a diesel.



FONTE: KUIAVA, R. (2017).

O software, então, calcula iterativamente o comportamento do sistema ao longo do período desejado, sob determinadas circunstâncias, considerando as conexões definidas pelo usuário entre os blocos. Para cada passo de tempo, uma série de iterações é feita para chegar aos resultados de corrente, tensão e frequência nos nós que conectam os elementos

A implementação conta com blocos PMU – *Phasor Measurement Unit* - que monitoram variações de componentes com sequência positiva, de circuitos trifásico balanceados e não balanceados. O bloco tem como parâmetros de saída dados relativos à tensão em p.u, ao ângulo de fase em graus e à frequência em Hertz e como parâmetros de entrada, sinais trifásicos em pu.

Esses PMUs foram alocados em cinco diferentes barras, para assim se obter um amplo panorama do sistema simulado. Estão relacionados abaixo os barramentos onde foram posicionados os blocos de medição.

- Subestação – barramento da Subestação Capanema, a qual alimenta energeticamente o campus;
- Entrada CP – barramento da entrada do campus, o qual distribui para os demais ramais;
- DELT – barramento do Departamento de Engenharia Elétrica;
- Planta FV – barramento onde a futura Usina fará a injeção de potência;
- NPDEAS – barramento onde o gerador diesel está instalado;

Inicialmente foi feita uma análise dinâmica sobre como o sistema responde às seguintes ocorrências: uma falta monofásica no alimentador principal com variadas operações de geração; uma queda brusca de geração solar fotovoltaica, oriunda de variações na radiação recebida pelos módulos, saída de operação do gerador a diesel do NPDEAS e saída da planta solar do setor de Biologia.

Com o intuito de simular uma situação adversa, foi aplicado no barramento 3 um curto-circuito monofásico. Essa barra está localizada fora do campus, ainda na Avenida Comendador Franco. Foi escolhido esse barramento para receber o curto-circuito, pois como as linhas de distribuição do campus são predominantemente subterrâneas, sendo assim menos suscetíveis a esse tipo de perturbação. O curto-circuito teve 500ms de duração, quando uma chave trifásica atua e isola a perturbação do restante do circuito. Essa chave opera para simular o que o sistema de proteção do circuito de distribuição faria em uma situação real.

Para o caso da variação da geração da planta solar fotovoltaica, foram aplicados duas mudanças nos dados de entrada dos painéis, os quais representam a incidência de radiação sobre as placas. De um estado inicial onde a radiação estaria

em 100%, ela sofre uma queda para 40% e instantes depois uma elevação para 80%. Essa alteração na radiação pode ser observada como um sombreamento momentâneo em um dia ensolarado. Situações como essa serão rotineiras quando a usina entrar em operação, devidos às condições meteorológicas locais.

O sistema de geração diesel presente no NPDEAS tem como funcionalidade o uso experimental de diferentes tipos de combustíveis, dessa maneira a entrada e saída do gerador de operação será algo corriqueiro. Portanto, a simulação de saída desse bloco de geração é um ponto importante que deve ser analisado. Apesar da potência desse gerador ser ínfima comparada à dimensão do CP.

No caso da simulação da saída da planta solar fotovoltaica, essa situação se torna algo de grande importância, pois o bloco de geração possui uma potência considerável. Como esse sistema será dependente da alimentação da concessionária para ter uma referência para a geração, a saída de operação da planta se mostra como algo pouco provável, sendo possível em caso de atuação da proteção dos inversores de frequência ou pela própria falta de tensão oriunda da concessionária.

Cada ocasião foi simulada em uma janela de tempo com duração de até 3 segundos, nas quais há uma ocorrência na rede em determinado momento diferente do inicial, pois foi necessário desprezar certo período inicial de instabilidade até que o software encontrasse o ponto de equilíbrio do sistema, certificando que o sistema está operando em regime permanente.

Para a análise estocástica do fluxo de potência, utilizou-se do método de Monte Carlo, no qual um número muito significativo de simulações são feitas, com uma infinidade de possibilidades de operação, como por exemplo, diferentes níveis de radiação e de carga. Considerando a demora, foi elaborado um script para salvar automaticamente os resultados de cada passo e repetir a simulação, assim possibilitando que o computador trabalhe ininterruptamente até obter todos os resultados. No caso, todas simulações terão como resultados matrizes de tensão, ângulo de fase e frequência onde cada linha representará uma barra do sistema e cada coluna será um novo caso, com novos parâmetros considerados.

Para implementar o Método de Monte Carlo de maneira simples, utilizou-se a ferramenta de código aberto Matpower, a qual faz o cálculo do fluxo de potência a partir de matrizes de entrada, que contém as informações sobre as barras, linhas e geradores (ANEXO 6.2). Nessas matrizes foram inseridas as faixas de incerteza para as cargas e geração de energia da planta fotovoltaica.

A faixa de valores de carga foi modelada como uma função de densidade de probabilidade normal, com base nas medições *in loco*, em que segundo a Tabela 5, pode se observar um valor médio de 28,87% de potência em relação ao transformador de cada alimentador e um desvio padrão de 8%, conforme mostra a Figura 17. Os três alimentadores com carregamento menor que 10% (Ciências da terra, Farmacologia e Lamir) foram desconsiderados no cálculo da média e do desvio padrão por apresentarem grande diferença em relação aos outros, possivelmente por causa de terem sido medidos em instantes em que haviam poucas cargas conectadas à rede. A função densidade de probabilidade das cargas, então, segue a distribuição normal da Figura 18.

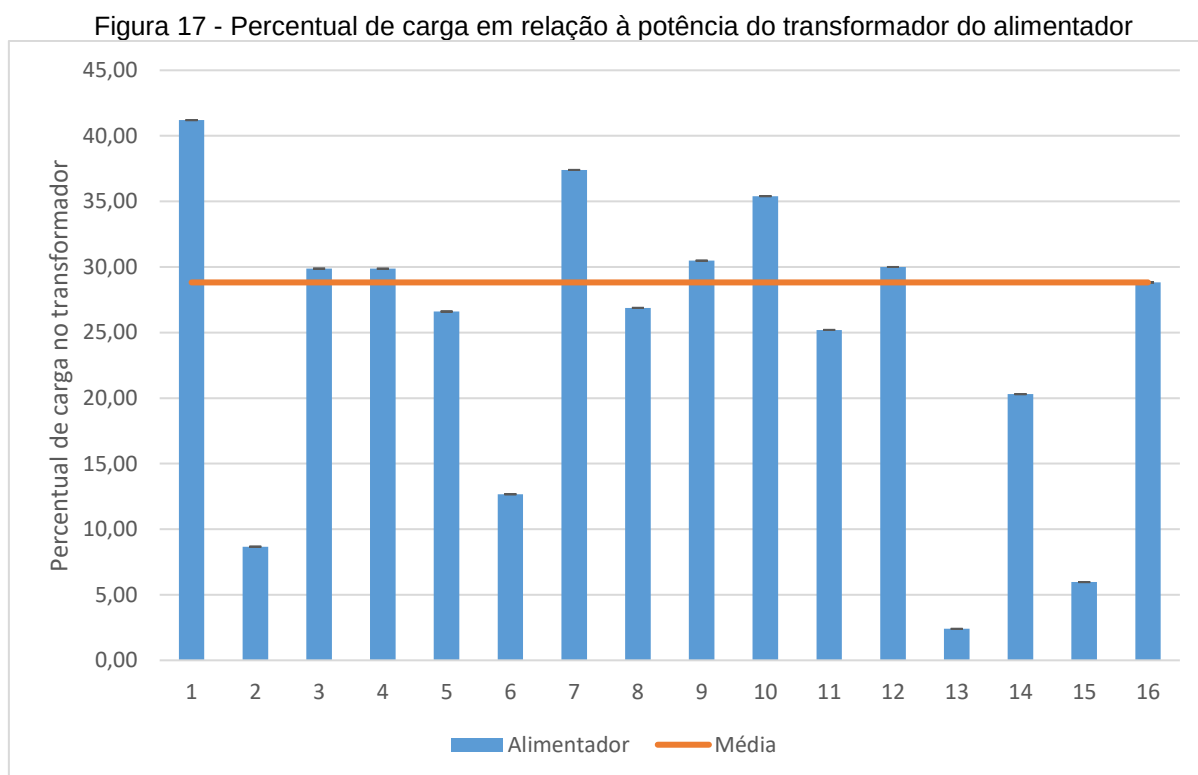
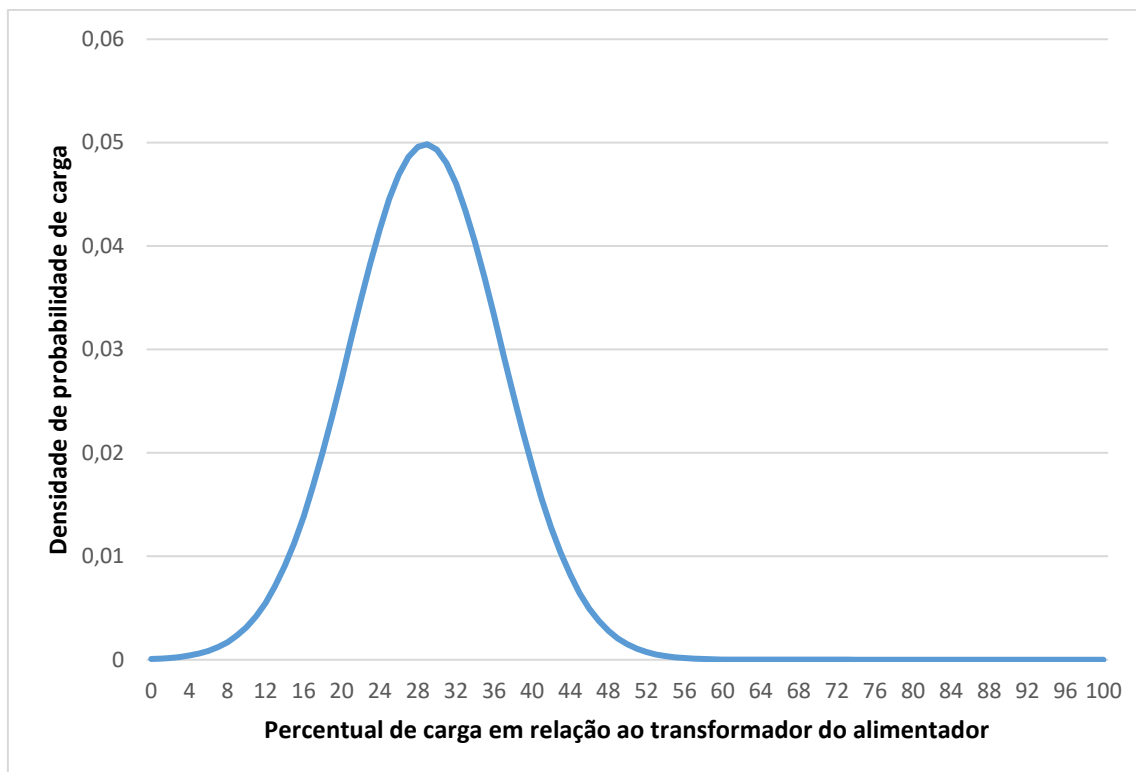
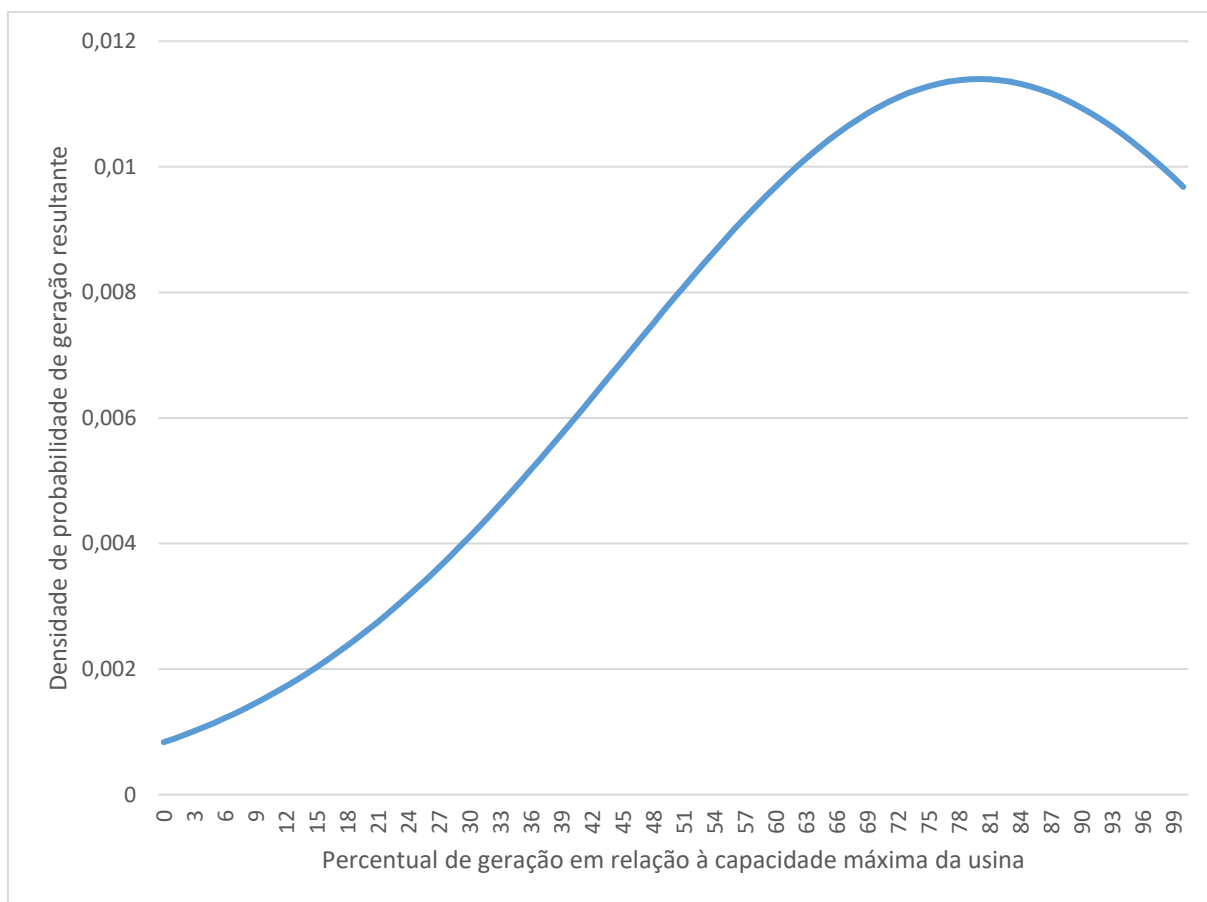


Figura 18 - Densidade de probabilidade em relação ao transformador do alimentador.



A faixa de valores de geração solar foi atribuída como um valor médio de 80% da sua potência nominal ($1000 \times 0,8 = 800$ kW), com um desvio padrão de 35%. Isso garante uma probabilidade grande de que as simulações façam com que ela opere em uma potência elevada, porém também é possível que não esteja gerando energia alguma. A densidade de probabilidade da potência gerada pode ser observada na Figura 19.

Figura 19 - Densidade de probabilidade de geração fotovoltaica.



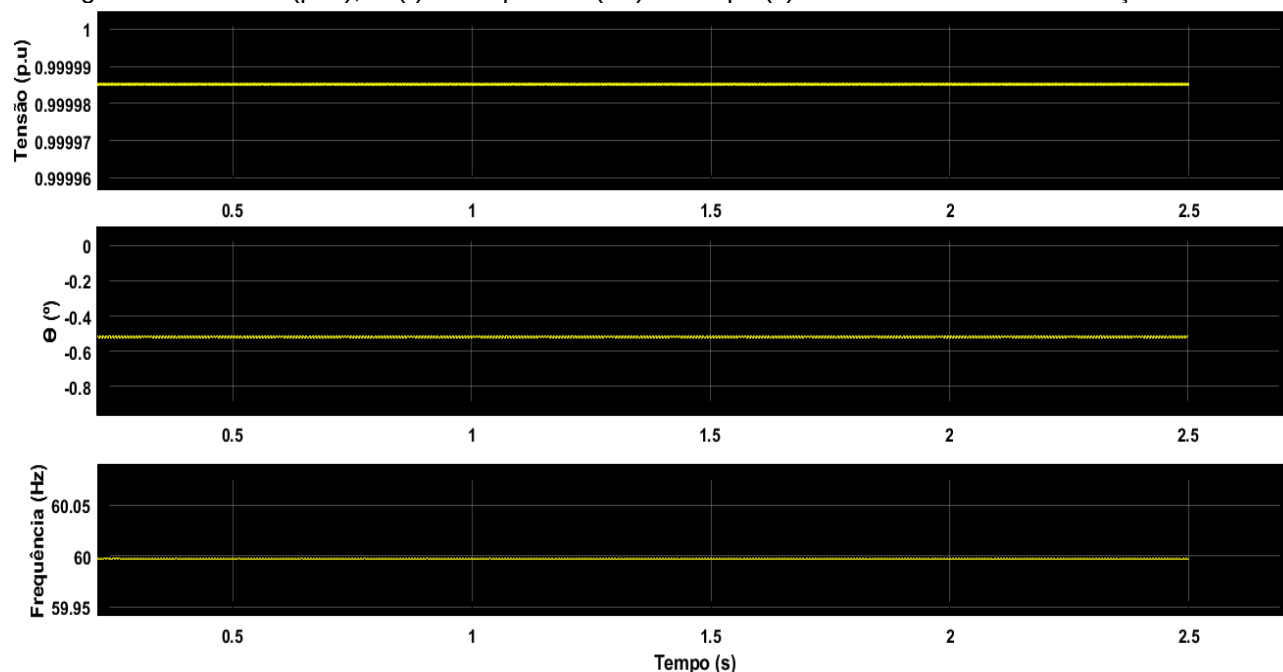
4 TESTES E RESULTADOS

4.1 ANÁLISES DINÂMICAS

A partir da implementação via software MATLAB, através da ferramenta Simulink, foram simulados alguns possíveis transitórios que a rede elétrica do campus possa sofrer. Para as análises foram usados como parâmetros base as condições de tensão e frequência estabelecidos pelo Modulo 8 do Prodist, que refere-se à qualidade de energia. Nas subseções seguintes estão cada um desses momentos de transatório sendo analisados separadamente.

Para evitar repetição nas análises de todas as PMUs da Subestação do Capanema, os resultados foram resumidos em um único gráfico, uma vez que em todas as simulações não houve alterações. O perfil de tensão, ângulo e frequência permaneceram estáticos, observado na Figura 20, por se tratar de uma subestação que alimenta um circuito grande da cidade de Curitiba. Assim, perturbações dessa natureza não causam variações, assim podendo ser considerado com um barramento infinito, devido a sua capacidade de geração.

Figura 20 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento da Subestação.



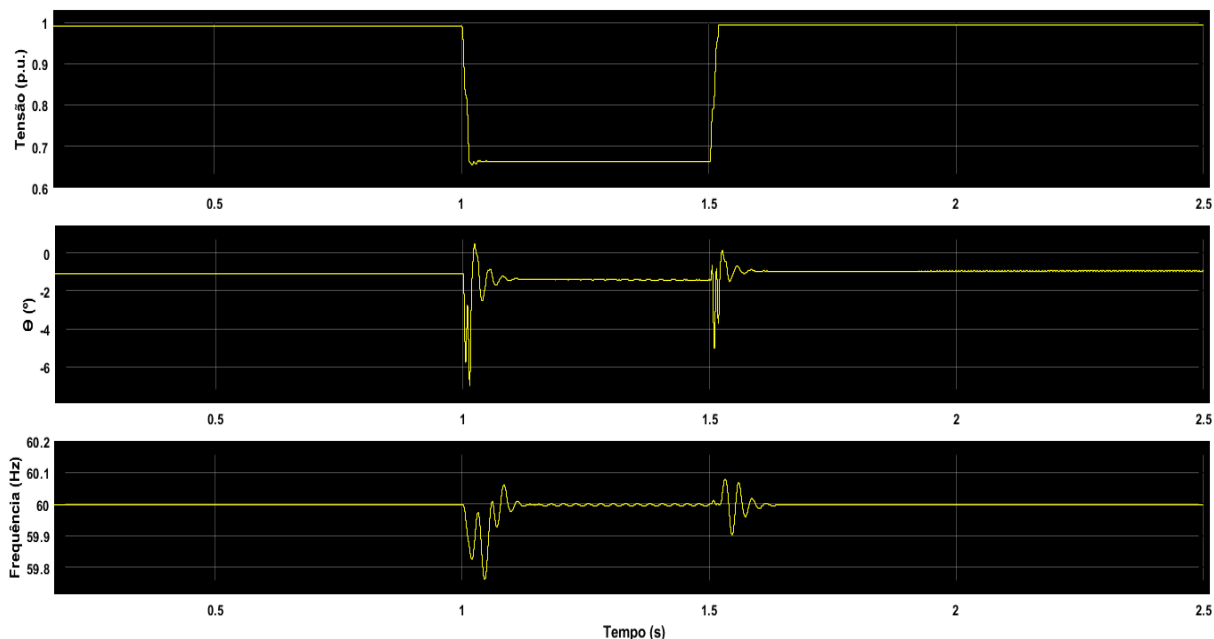
4.1.1 Curto-circuito monofásico na barra 3

Na sequência serão analisados os resultados de tensão, ângulo e frequência provenientes de cada PMU instalada na rede. Foram definidos quatro casos para a aplicação do curto-circuito, primeiramente ocorrendo com o sistema sem o gerador diesel e sem a planta fotovoltaica, o segundo caso foi aplicado com a o gerador diesel operando, após foi simulado o curto-circuito com as duas fontes de geração, diesel e fotovoltaica, em operação, e por último a falta acontecendo somente com a planta FV operando.

Contudo, foi notado que tanto a planta FV, quanto o gerador diesel não tiveram influência sobre a resposta ao curto-circuito, tendo em conta os requisitos de qualidade de energia estabelecidos pelo Prodist. Dessa maneira, foi levado em conta para essa análise o caso em que o gerador diesel e a planta fotovoltaica estão ligados ao circuito do campus.

- PMU Entrada do Campus:

Figura 21 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada.



Como é possível de se notar na Figura 21, no instante em que ocorre a perturbação, o nível da tensão sofre uma redução para em torno de 0,66 pu, no instante em que a perturbação ocorre, o que representa a falta de uma das fases. Essa mudança na magnitude da tensão pode ser classificada como uma VTDC –

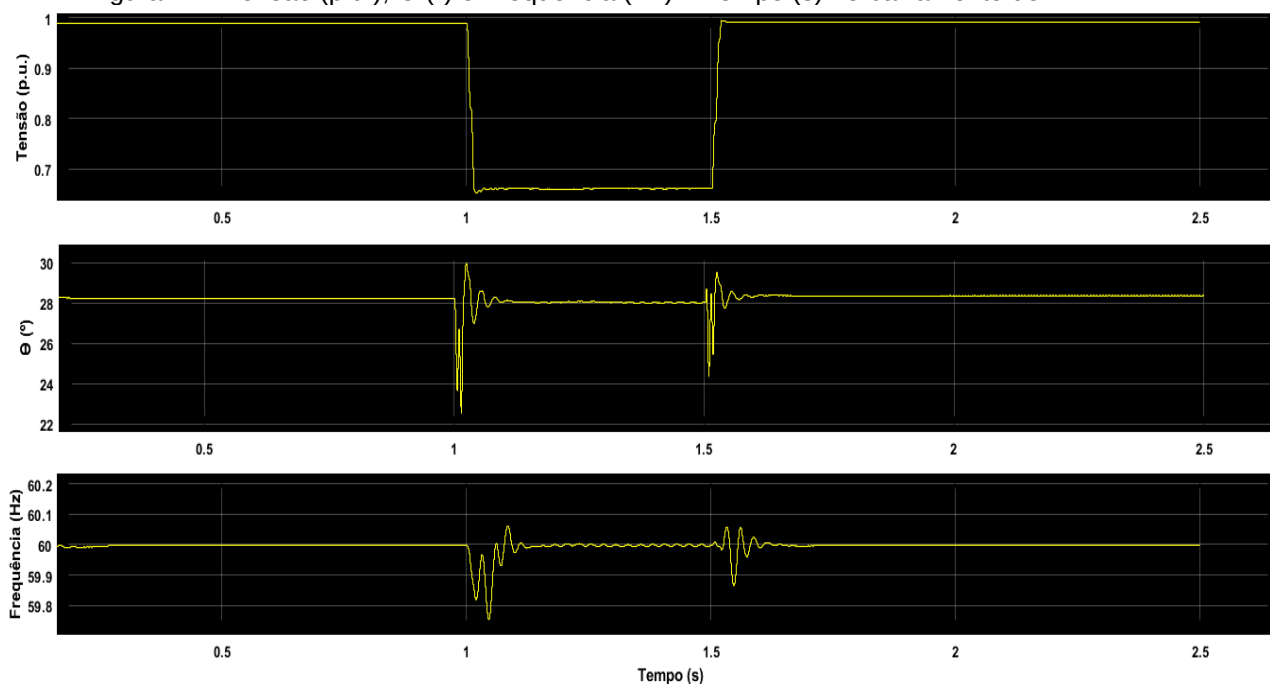
Afundamento Momentâneo de Tensão, pois a mesma retorna a normalidade em menos de 3s e tem o módulo da variação dentro da faixa estabelecida pelo Prodist.

Com relação ao ângulo, ocorre uma variação máxima de sete graus voltando à condição de regime permanente 150 ms após o curto-circuito ser aplicado. Avaliando o último gráfico, durante a ocorrência, a frequência atinge valor mínimo de 59,78 Hz e um máximo de 60,08 Hz, aproximadamente, o que se enquadra nos parâmetros de oscilação da frequência estabelecido no módulo 8 do Prodist., no qual se tem como 56,5 Hz o valor mínimo e 66 Hz como valor máximo.

Dessa maneira, pode-se avaliar como um comportamento dentro das normalidades. Com suas variações de tensão, ângulo e frequência dentro dos padrões esperados.

- PMU DELT

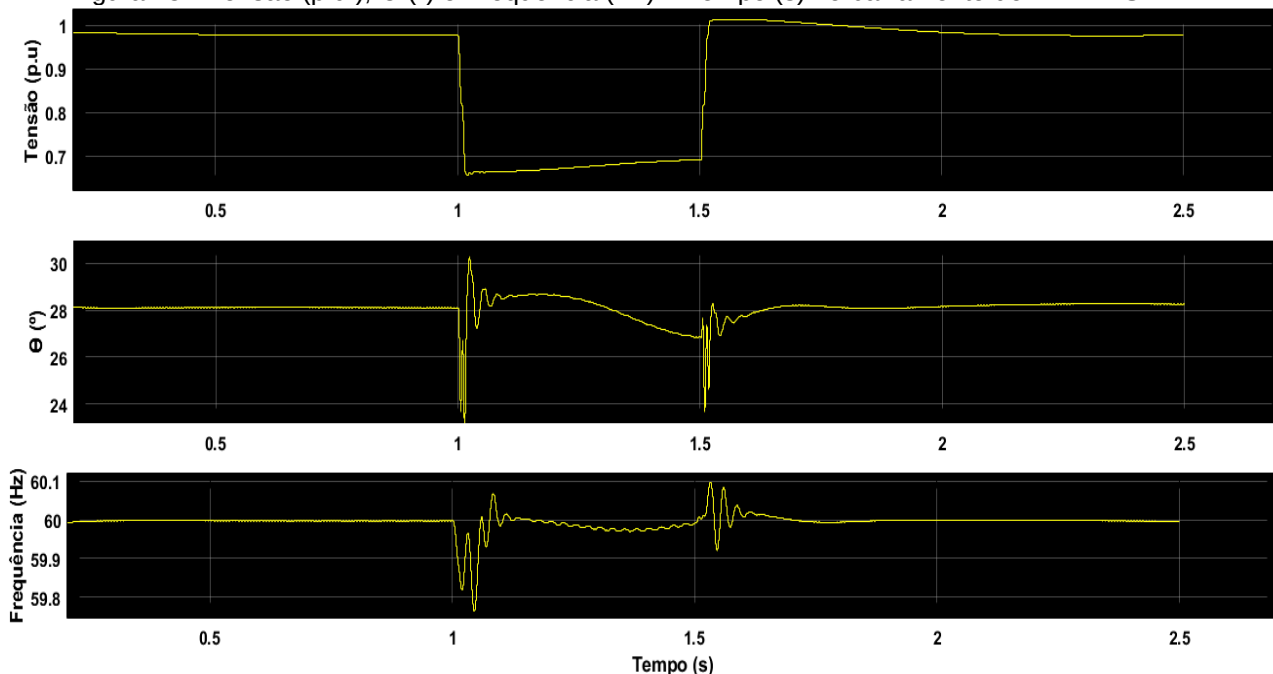
Figura 22 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do DELT.



Similarmente ao comportamento do barramento de entrada do campus, analisado no item anterior, o curto-circuito monofásico, aplicado no barramento três, resultou no transitório que pode ser verificado na Figura 22. Parâmetros de tensão, ângulo e frequência não apresentaram variações fora das faixas de tolerância.

- PMU NPDEAS

Figura 23 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do NPDEAS.

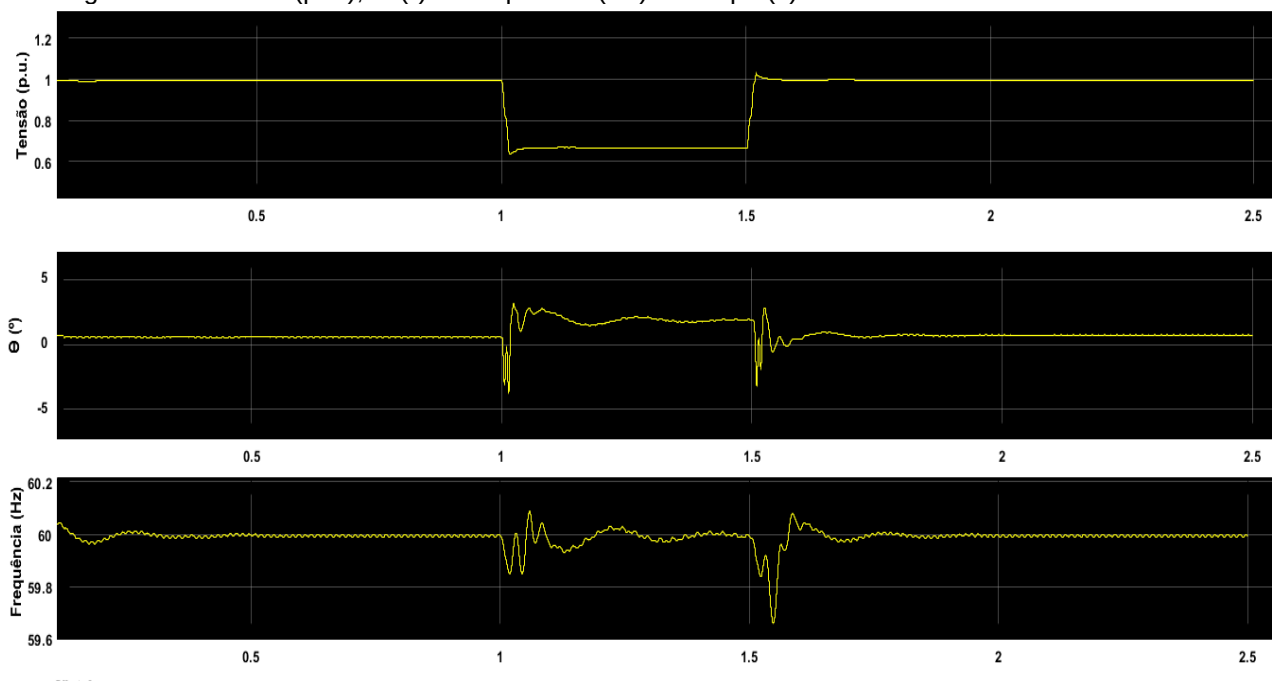


De maneira similar aos outros barramentos, o módulo da tensão é reduzido para cerca de 2/3 da tensão nominal, porém devido a esse bloco ser constituído de um gerador diesel, o a inércia desse tipo de máquina rotativa faz com que a resposta ao distúrbio ocorra de maneira mais lenta, evidenciando-se componentes de frequências mais baixas durante os transitórios, como é observado na Figura 23. Enquanto a variação angular atinge valor máximo de $4,5^\circ$, a variação na frequência chegou a apresentar um valor mínimo de 59,75 Hz, sendo assim um comportamento dentro da normalidade.

- PMU Planta FV

Levando em consideração que a Usina FV opera de maneira *on-grid*, a tensão dos inversores de frequência segue o perfil da barra de referência, porém, com esse tipo de perturbação o sistema de proteção atuaria, retirando a usina de operação. O comportamento do ângulo e da frequência não apresentam variações relevantes, observável na Figura 24.

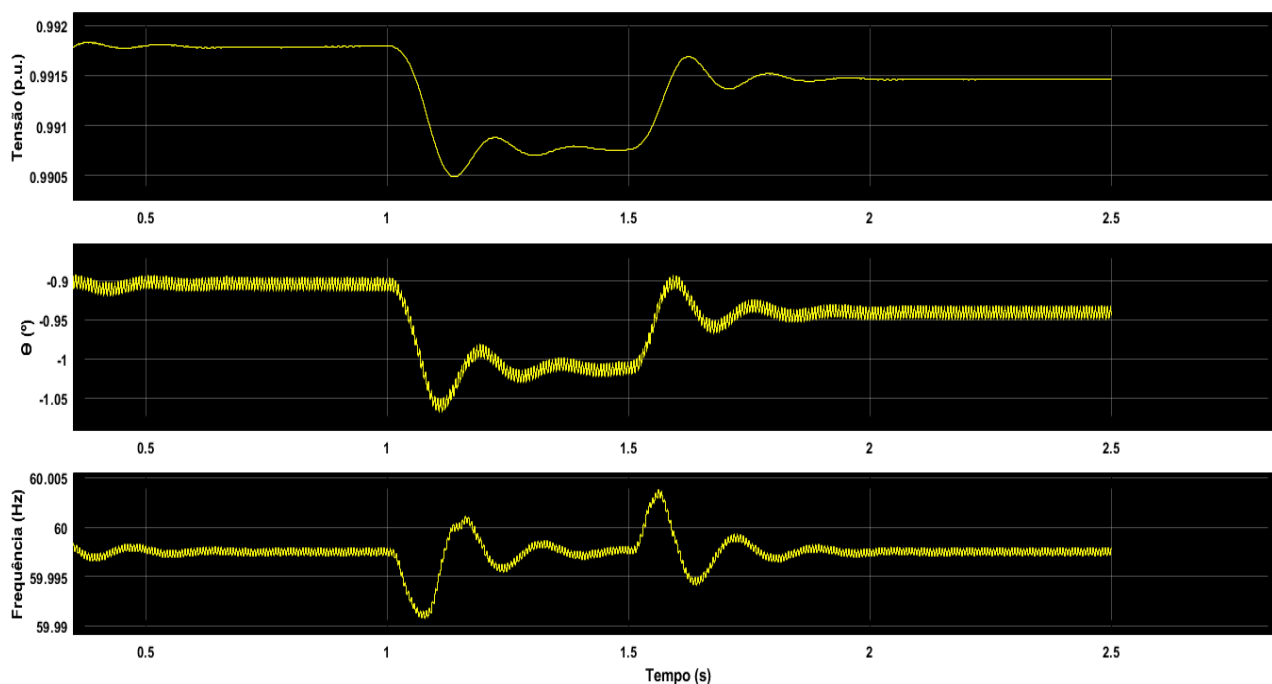
Figura 24 - Tensão (p.u.), θ (°) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento da Planta FV.



4.1.2 Variação de radiação

- PMU ENTRADA DO CAMPUS

Figura 25 - Tensão (p.u.), θ (°) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada.

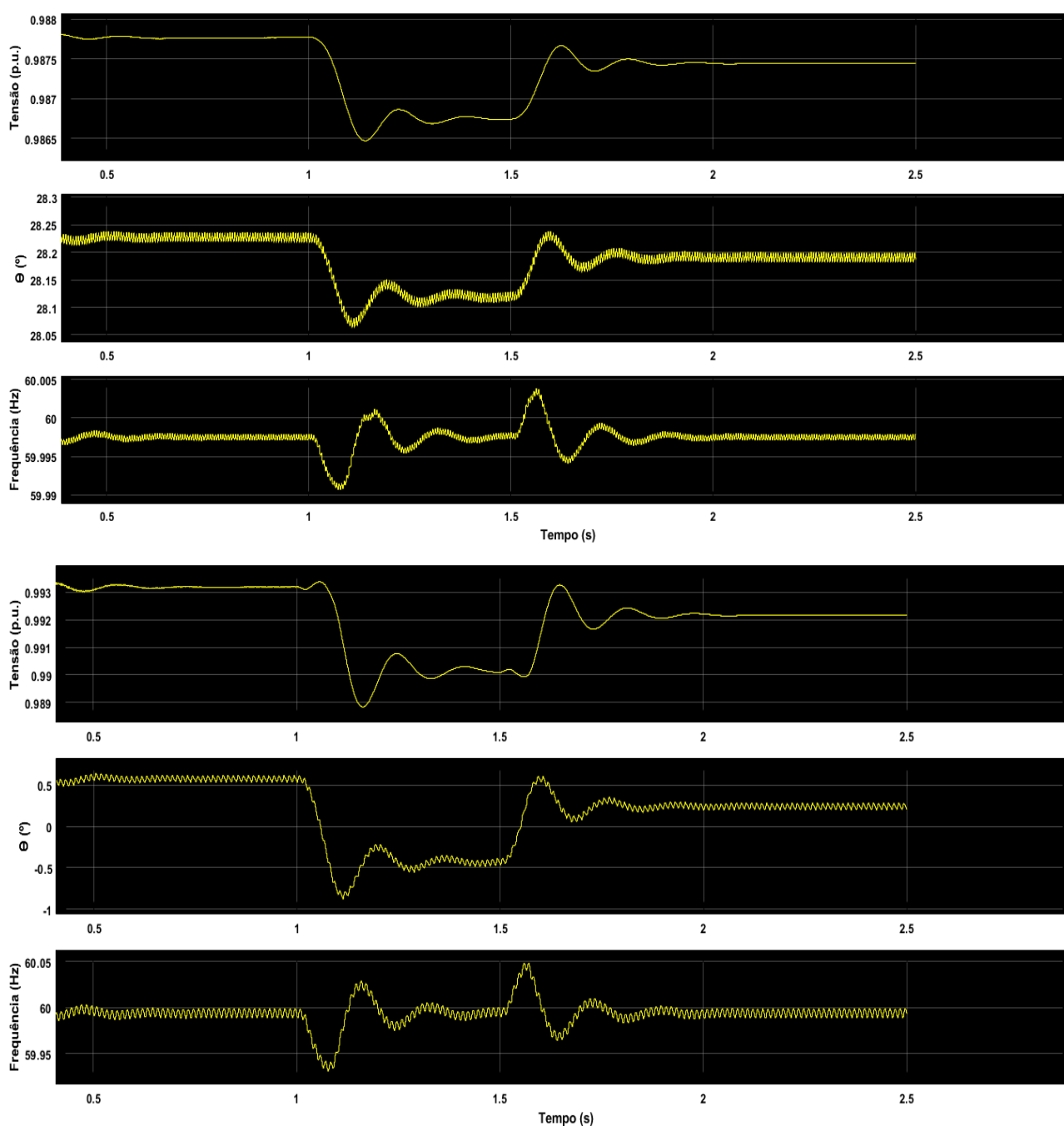


Para esse caso de simulação foi aplicado uma variação inicial de 100% para 40% de irradiação incidente sobre as placas fotovoltaicas, após 500 ms a irradiação é elevada para 80%. Como mostrado na Figura 25, as perturbações são aceitáveis.

- PMU do DELT e PMU da Planta FV

O perfil das variações é o mesmo do barramento de Entrada, com mudança na magnitude da tensão na ordem de 10^{-3} p.u. O ângulo varia de maneira similar, porém como o PMU do DELT está relacionado ao lado de baixa tensão, as variações ocorrem próximo ao ângulo de 28° , já com o PMU da planta FV ocorrem próximo ao ângulo de 0° , conforme Figura 26. Variações de frequência estão dentro da faixa estabelecida como aceitável.

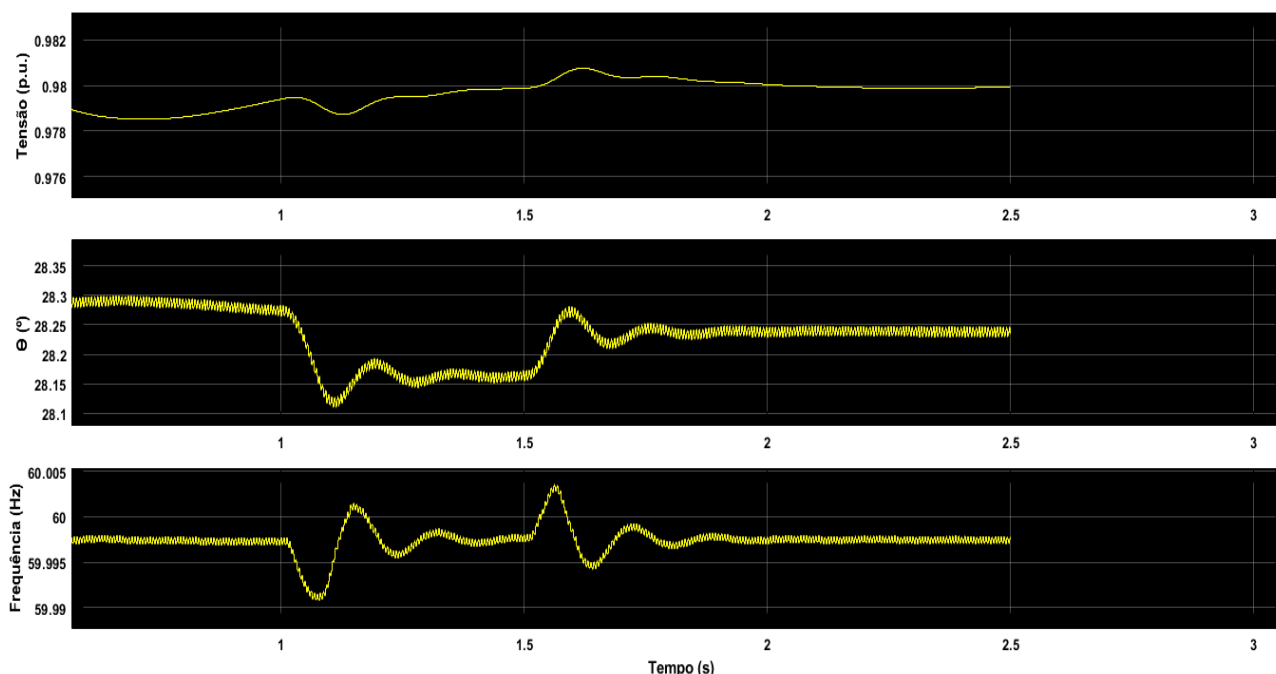
Figura 26 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do DELT e Planta FV.



- PMU NPDEAS

De maneira similar à simulação de curto-circuito, o barramento do NPDEAS mostrou uma resposta mais lenta na ocorrência de perturbações e variações. E como logo foi simulado duas variações em um espaço de tempo de 500 ms, o sistema não chegou a operar em regime permanente antes da segunda variação de irradiação. Como mostra a Figura 27, os parâmetros de ângulo e frequência variaram igualmente aos do barramento de entrada, tendo seus valores dentro da normalidade.

Figura 27 - Tensão (p.u.), Θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento do NPDEAS.



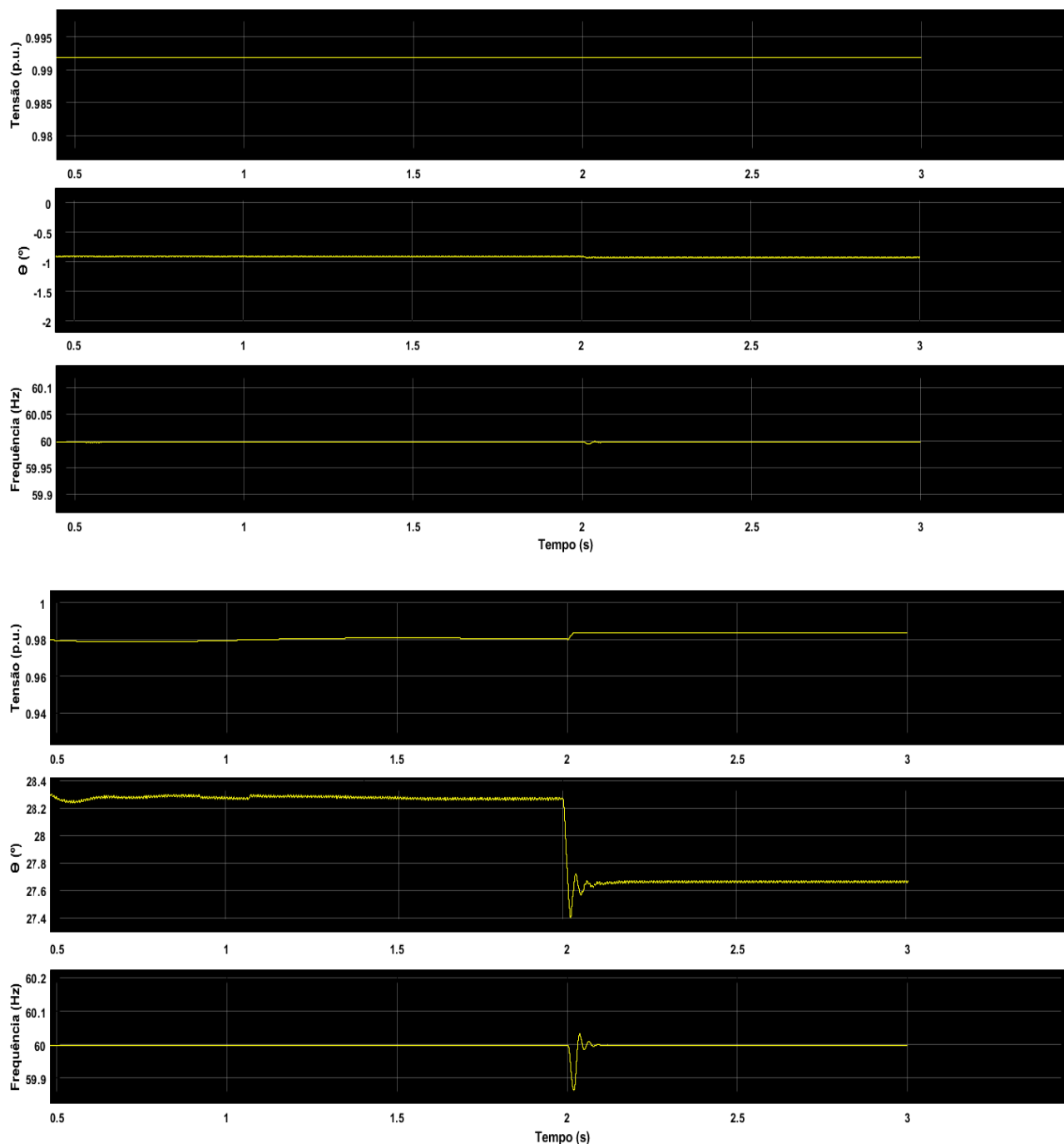
4.1.3 Saída do gerador a diesel

Nessa simulação foi estabelecido que no instante de 2 s ocorreria a retirada do gerador diesel do barramento do NPDEAS, e como pode ser observado na Figura 28 (superior) não ocorrem variações significativas nos parâmetro de tensão, ângulo e frequência no barramento de Entrada do campus. Isso se deve a potência pouco relevante do gerador se comparado com o circuito de alimentação proveniente da concessionária.

Com relação ao PMU NPDEAS, ocorre um pequeno aumento na magnitude da tensão, o mesmo registrou uma perturbação na frequência no instante em que ocorre

a retirada do gerador, Figura 28 (inferior), essa variação encontra-se dentro dos limites aceitáveis e com duração de 0,1 s.

Figura 28 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada e NPDEAS.

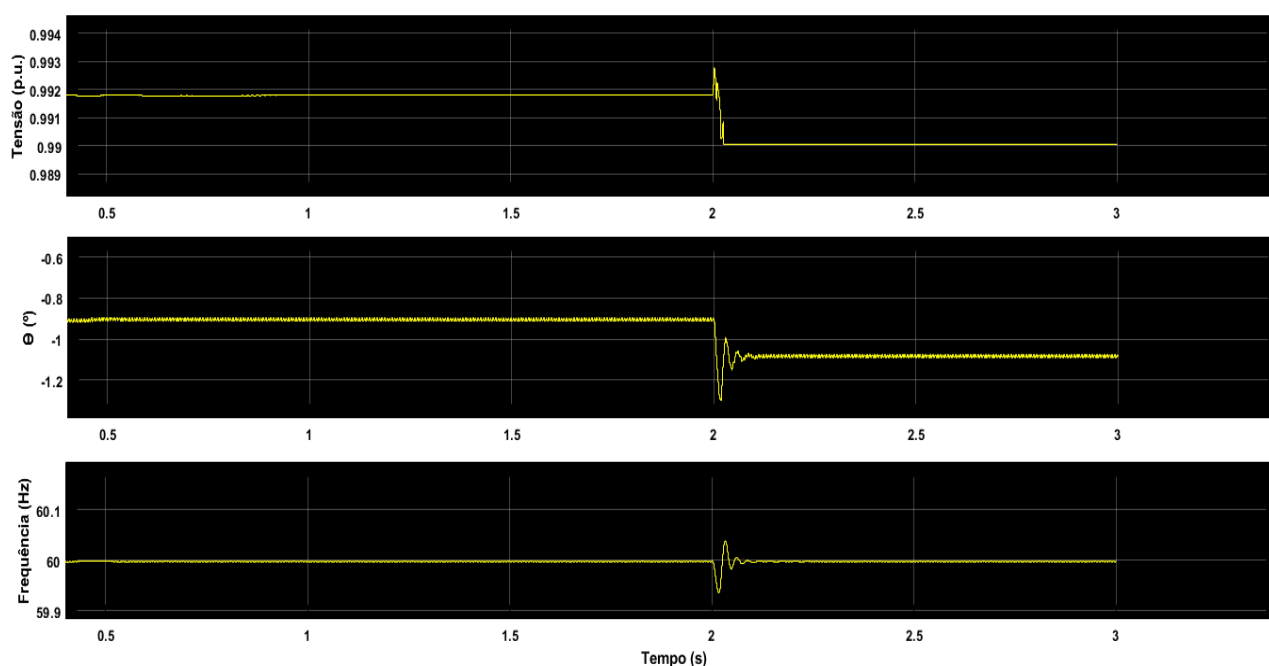


4.1.4 Saída da planta solar

Nessa simulação uma chave trifásica manobra a saída da planta solar fotovoltaica no instante de tempo 2 s e, como o PMU que monitora o barramento da planta é intrínseco ao bloco de geração, não é possível se obter dados desse

barramento, porque não há convergência no método iterativo quando a planta FV está desacoplada. Sendo assim, foi levado em consideração somente monitoramento do barramento de entrada do campus, no qual ocorre oscilações na tensão, ângulo e frequência, conforme mostrado na Figura 29. A manobra da planta FV da rede elétrica do campus resulta em um comportamento aceitável, levando em conta os critérios de qualidade de energia do Módulo 8 do Prodist e, pode-se inferir que o mesmo perfil ocorra nos barramentos à jusante.

Figura 29 - Tensão (p.u.), θ ($^\circ$) e Frequência (Hz) x Tempo (s) no barramento de Entrada.



4.2 ANÁLISE ESTOCÁSTICA

Analizando os resultados das simulações, expressos nas Figuras 30 e 31, percebe-se uma influência pequena da planta fotovoltaica nas magnitudes e ângulos das tensões das barras escolhidas. Isso se deve ao fato de a potência da usina solar ser muito pequena em relação a carga total instalada no campus, fornecendo relativamente pouca energia comparada à Subestação Capanema.

No entanto, os resultados obtidos condizem com as expectativas, pois observa-se uma leve diminuição principalmente na angulação dos barramentos, que é o fator de maior influência no fluxo de potência, como visto no capítulo 2. Essa alteração de cerca de 1° , em relação ao barramento de referência, representa justamente essa

injeção distribuída no sistema, indicando que a concessionária está suprindo menos energia.

A leve alteração de amplitude de tensão – da ordem de 0,001% - é muito menos significativa que de ângulo para o fluxo de potência, porém, já era esperada, conforme indicaram as simulações dinâmicas da saída de operação da planta fotovoltaica.

Figura 30 - Resultados do fluxo de potência sem a planta fotovoltaica.

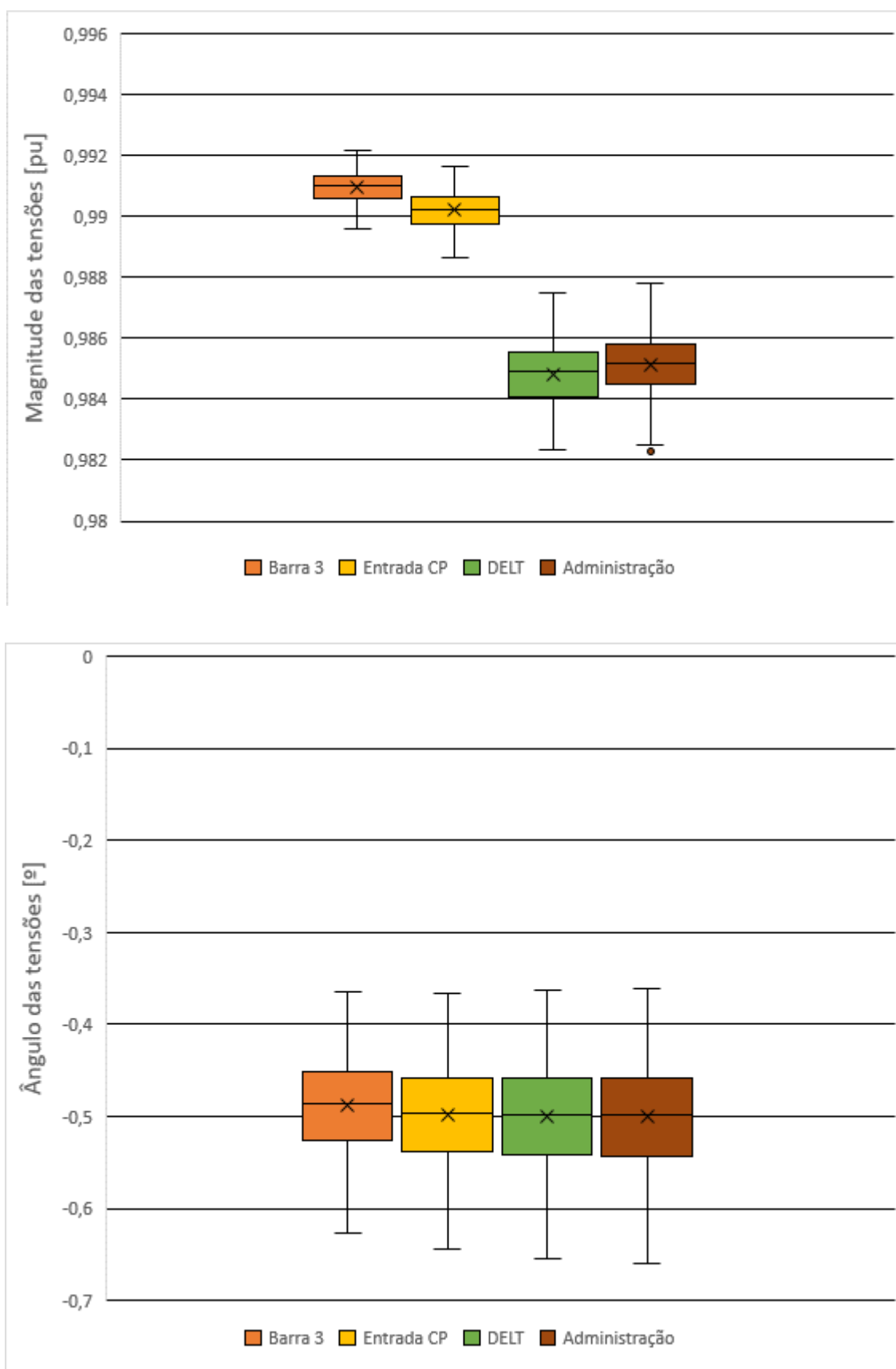
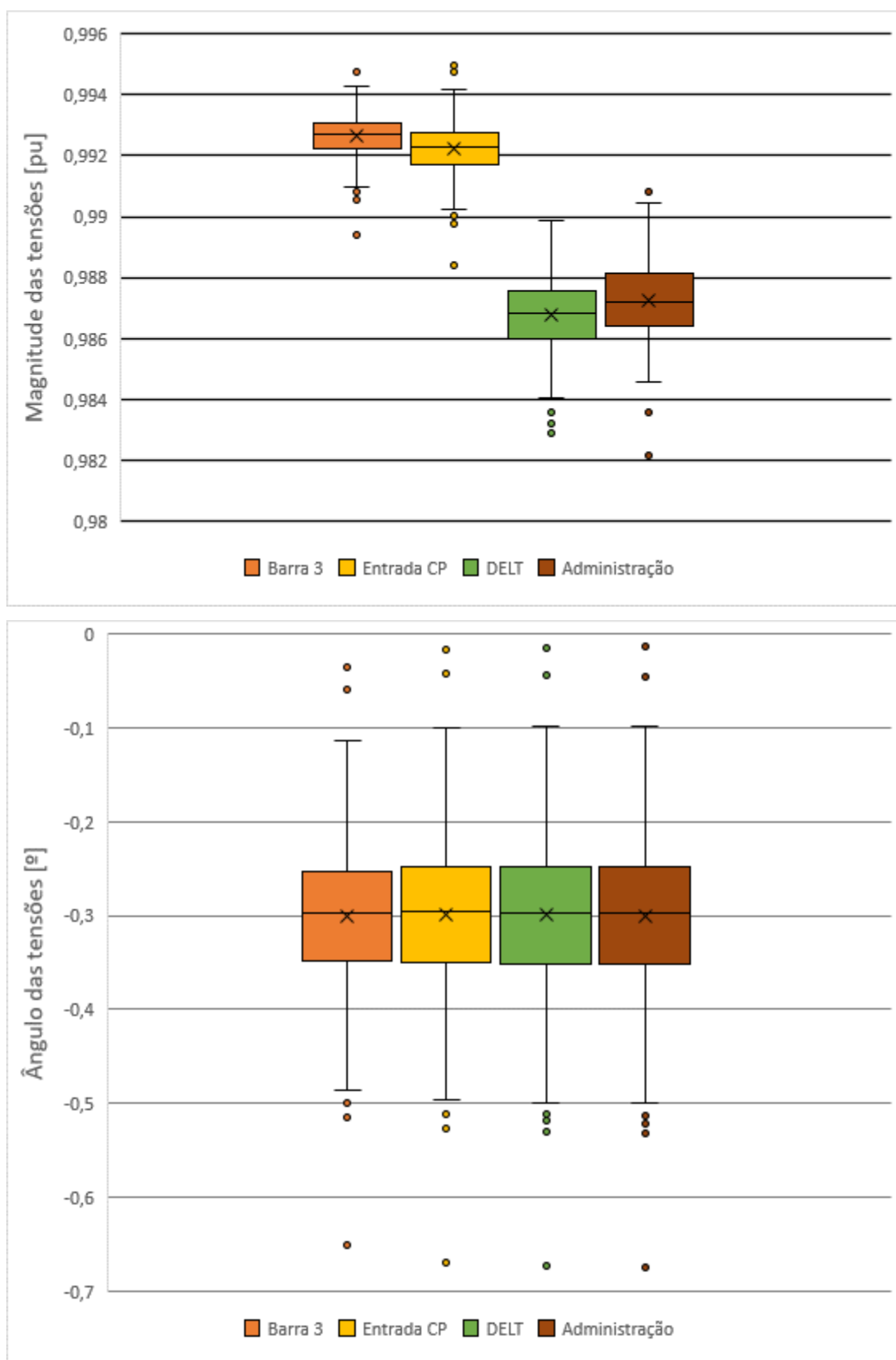


Figura 31 - Resultados do fluxo de potência com a planta fotovoltaica.



5 CONCLUSÕES

Após o estudo, foi possível concluir que a entrada da usina fotovoltaica de 1 MW em operação não irá impactar a rede do alimentador Prado, nos termos de qualidade de energia impostos pela ANEEL, no Módulo 8 do Prodist, tanto em variações de curta duração como em operação em regime permanente. Esse perfil já era esperado, visto que a entrada de energia do Centro Politécnico está conectada a um barramento consideravelmente forte, em região urbanizada, próximo a uma subestação.

Além disso, pelo fato da demanda do campus ser de mais de 6 MW, pela soma de potências dos transformadores, mesmo que a usina saia de operação, essa falta é instantaneamente suprida pela concessionária, visto que o ramal de entrada já é preparado para um fluxo de potência dessa magnitude.

Analogamente, a inserção do gerador a diesel do NPDEAS não trará perturbações significativas, visto que o mesmo foi dimensionado para atender somente a carga instalada nos laboratórios do grupo. Essa potência representa somente cerca de 0,2% da demanda global do CP.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesse trabalho podem ser relevantes a estudos relacionados com geração distribuída, energia fotovoltaica, sistemas híbridos de geração, fluxo de potência estocástico, entre outros temas. Algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Após instalação da nova usina, validar os dados obtidos com esse trabalho sobre o comportamento da minigeração através das PMUs distribuídas pelo campus;
- Realizar estudos econômicos quanto a implementação desse sistema de geração distribuída;
- Análise dinâmica levando em consideração critérios de proteção.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica). **Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios**. *Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios*. Brasília, DF, 2017.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10899: Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2016.

ADAMATTI, F. & JUNIOR, O. **Estudo de sistema híbrido de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos, biodiesel e painel fotovoltaico para uso rural e urbano**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Revisão 10, 2018.

ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional PRODIST, Módulo 3 – Qualidade da Energia Elétrica**, Revisão 10, 2018.

ANEEL, **Resolução Normativa nº482/2012 – Condições Gerais Para Acesso a Geração Micro ou Mini Distribuída**, 17 de Abril de 2018.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 685**. Brasil, 2015.

Barbi, I. **Projeto de Inversor monofásico**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

B.R. PRUSTY, D. JENA. **A critical review on probabilistic load flow studies in uncertainty constrained power systems with photovoltaic generation and a new approach**. Department of Electrical & Electronic Engineering, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal, India, 2016.

Benedito, R. A. (s.d.). *Página do Professor*. Fonte: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Acesso em 10 de 09 de 2018, disponível em

<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito/planejamento-de-sistemas-energeticos/aulas>

Benedito, R. A. (s.d.). *Página do Professor*. Fonte: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Sistemas Elétricos de Potência. 4. *Fluxo de Potência (de Carga)*. Acesso em 10 de 09 de 2018, disponível em <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito/>

Copel. (s.d.). *Chamada Pública VPDE 001/2017*. Acesso em 15 de 10 de 2018, Acesso em 15 de 10 de 2018, disponível em <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Ffornecedores%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F9616F53411A8980A832580B3005B3856>

Fluke Corporation. **Fluke 433/434: Three Phase Power Quality Analyzer**. Holanda, 2004.

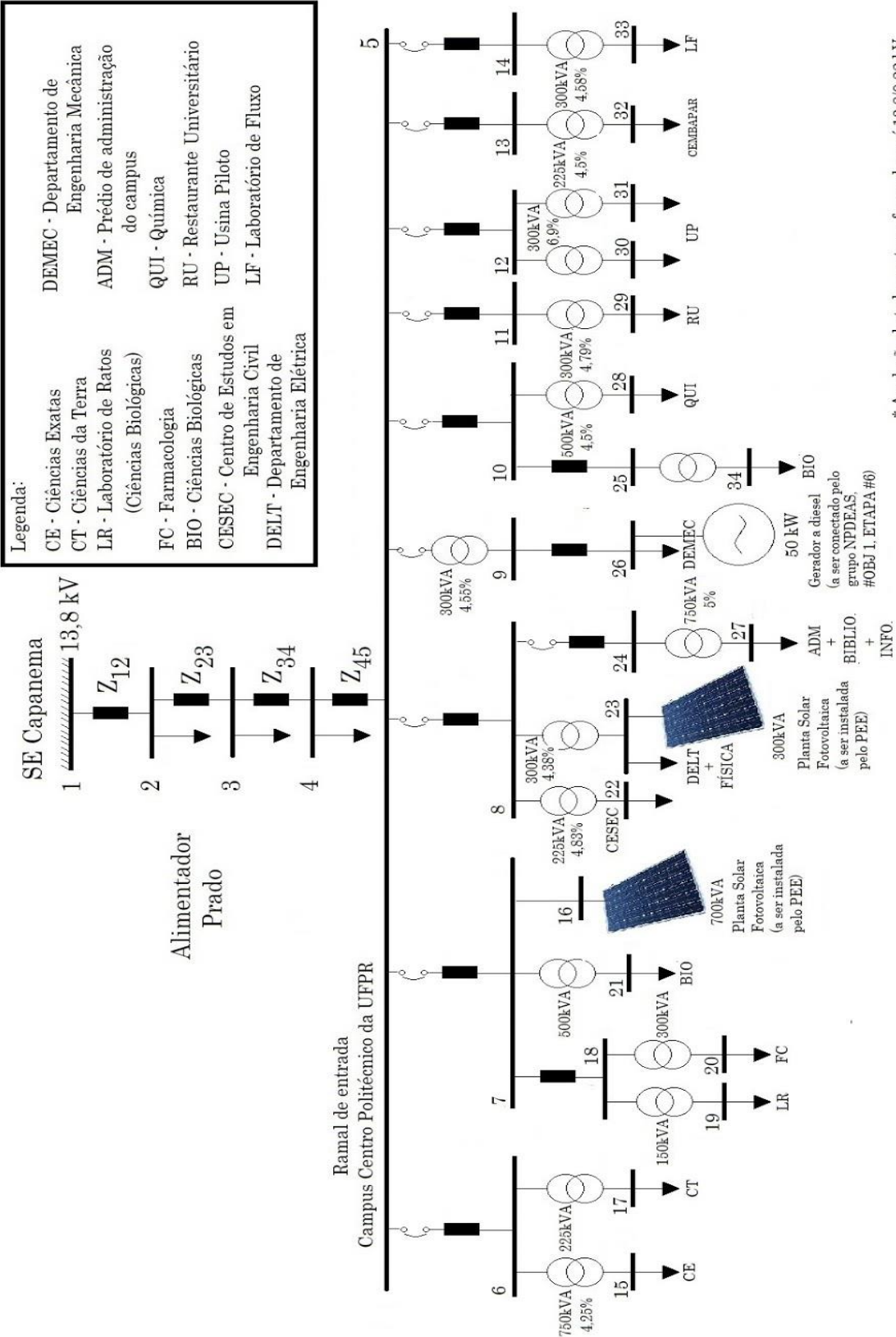
Munhoz, A., & Klenk, L. (208 de Setembro de 2017). *UFPR terá a maior usina solar fotovoltaica do Paraná*. Acesso em 03 de 08 de 2018, disponível em Portal UFPR: <http://www.ufpr.br/portalufpr/noticias/ufpr-tera-a-maior-usina-solar-fotovoltaica-do-parana/>

PORTAL SOLAR LTDA. (s.d.). *Micro Inversor Solar Grid Tie*. Acesso em 15 de 09 de 2018, disponível em Portal Solar: <https://www.portalsolar.com.br/micro-inversor-solar-grid-tie.html>

R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, “**Matpower: SteadyState Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education,**” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, 2011.

ANEXOS

1. DIAGRAMA UNIFILAR DO CENTRO POLITÉCNICO



2. DADOS DE ENTRADA DO MATPOWER

```
function mpc = casoPoli

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

%%----- Power Flow Data -----%%
%% system MVA base
mpc.baseMVA = 1;

%%bus_data
%bus_i type P Q Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax
Vmin
mpc.bus = [
1 3 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
2 1 0.8 0.3 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
3 1 0.7 0.25 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
4 1 0.5 0.15 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
5 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
6 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
7 1 0.081216+randn*0.0423
0.0294774718047529+randn*0.00442162077071294 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
8 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
9 1 0.20304+randn*0.10575 0.0736936795118822+randn*0.0110540519267823
0 0 2 1 0 0.22 1 1.05 0.95
10 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
11 1 0.13536+randn*0.0705
0.0491291196745881+randn*0.00736936795118822 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
12 1 0.13536+randn*0.0705
0.0491291196745881+randn*0.00736936795118822 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
13 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
14 1 0.081216+randn*0.0423
0.0294774718047529+randn*0.00442162077071294 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
15 1 0.081216+randn*0.0423
0.0294774718047529+randn*0.00442162077071294 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
16 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
17 1 0.13536+randn*0.0705
0.0491291196745881+randn*0.00736936795118822 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
18 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
19 1 0.060912+randn*0.031725 0.0221081038535646+randn*0.0033162155780347
0 0 2 1 0 0.22 1 1.05 0.95
20 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
21 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
22 1 0.081216+randn*0.0423
0.0294774718047529+randn*0.00442162077071294 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
23 1 0 0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
24 1 0.081216+randn*0.0423
0.0294774718047529+randn*0.00442162077071294 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
25 1 0.081216+randn*0.0423
0.0294774718047529+randn*0.00442162077071294 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
26 1 0 0+randn*0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05 0.95
```

```

27 1 0.13536+randn*0.0705
0.0491291196745881+randn*0.00736936795118822 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
28 1 0+randn*0 0+randn*0 0 0 1 1 0 13.8 1 1.05
0.95
29 1 0.13536+randn*0.0705
0.0491291196745881+randn*0.00736936795118822 0 0 2 1 0 0.22
1 1.05 0.95
];

%% generator data
%bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2
Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max ramp_agc ramp_10 ramp_30 ramp_q apf
mpc.gen = [
1 999 2 999 -999 1 1 1 999 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0;
20 0.046 0 0 0 1 1 1 0.046 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0;
];

%% branch data
%bus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
angmin angmax
mpc.branch = [
1 2 0.00007826086957 0.0002754883428 0 0 0 0 0 0 1 -
360 360;
2 3 0.001883170552 0.003639219702 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
3 4 0.00007707151859 0.0001037203319 0 0 0 0 0 0 1 -
360 360;
4 5 0.000315831758 0.0001457939509 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
5 6 0.001052772527 0.0004859798362 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
6 7 0.001 0.161 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
6 8 0.0004912938458 0.0002267905902 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
8 9 0.001 0.05666666667 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
5 10 0.002809808864 0.001299989852 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
10 11 0.001 0.115 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
10 12 0.001 0.115 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
10 13 0.0006316950221 0.0002915920592 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
13 14 0.001 0.15266666667 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
13 15 0.001 0.15266666667 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
5 16 0.0002281007141 0.001052958128 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
16 17 0.001 0.115 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
5 18 0.0007369407687 0.0003401907357 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
18 19 0.001 0.21555555556 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
19 20 1.450413223 0.6950968473 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
5 21 0.0006667559336 0.000307626653 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
21 22 0.001 0.15266666667 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
5 23 0.001403696702 0.0006479757551 0 0 0 0 0 0 1 -360
360;
23 24 0.001 0.23 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;
23 25 0.001 0.23 0 0 0 0 1 30 1 -360 360;

```

```

5    26    0.001228234615    0.0005669515665    0    0    0    0    0    0    1    -360
360;
26   27    0.001    0.09    0    0    0    0    1    30    1    -360    360;
5    28    0.001930082966    0.0008908107713    0    0    0    0    0    0    1    -360
360;
28   29    0.001    0.0958    0    0    0    0    1    30    1    -360    360;
];

```

3. PROGRAMAÇÃO PARA SIMULAÇÕES

```

simulacoes = 300;
V = zeros(29,simulacoes);
A = zeros(29,simulacoes);

for iteracao=1:1:simulacoes

    res=runpf(casoPoli);

    V(:,iteracao)= res.bus(:,8);
    A(:,iteracao)= res.bus(:,9);
    P(:,iteracao)= res.bus(:,3);
    Q(:,iteracao)= res.bus(:,4);

end

```