

Matheus Cotta Oliveira

**AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO DE PMU
FRENTE AOS CRITÉRIOS DA NORMA IEEE C37.118.1**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica e Eletrônica da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Miguel Moreto

Florianópolis
2019

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

Oliveira, Matheus Cotta

Avaliação de um modelo de simulação de PMU frente
aos critérios da norma IEEE C37.118.1 / Matheus
Cotta Oliveira ; orientador, Miguel Moreto, 2019.
94 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Engenharia Elétrica.
3. Unidade de Medição Fasorial. 4. PMU. 5.
Sincrofasores. I. Moreto, Miguel. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Matheus Cotta Oliveira

**AValiação DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO DE PMU
FRENTE AOS CRITÉRIOS DA NORMA IEE C37.118.1**

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 11 de Julho de 2019.

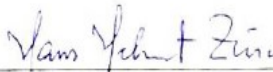


Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em
exercício

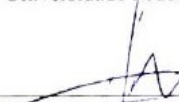
Banca Examinadora:



Prof. Miguel Moreto, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Hans Helmut Zurn., Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Elétric. Dante Edson Sifuentes Quiroz, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a meus pais e irmão, além de meus amigos e colegas de classe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao apoio incondicional de minha família, meu pai, Marcos, minha mãe, Edna, e irmão, Bruno, que estiveram comigo, ainda que distantes, desde o início me dando todo o apoio e suporte necessários para esta caminhada, além de serem os principais responsáveis por minha educação colocando-a como prioridade sempre.

Estendo meus agradecimentos aos professores que foram os pivôs para a transmissão de todo o conhecimento durante a graduação, e de maneira especial ao meu orientador que foi fundamental para o presente estudo, Prof. Dr. Miguel Moreto, que me recebia sempre disposto a me guiar e sanar as dúvidas, além de dar apoio em todas as etapas do processo de composição deste trabalho.

Aos amigos que fiz durante este tempo, meu muito obrigado por darem toda a força durante os momentos mais pesados e por trazerem sempre a alegria de suas companhias sem as quais tudo seria muito mais difícil e sem graça. Não posso deixar de citar os nomes daqueles que me acompanharam mais perto: Tiago, Júlia, Gabi, Neto, Elisa, Fernando, Raphael, Murilo, Gabriel, Rodrigo, Salengue e Vitor.

Por fim, a Deus, toda honra e glória.

“Mera mudança não é crescimento. Crescimento é a síntese de mudança e continuidade, e onde não há continuidade não há crescimento”
(C.S Lewis)

RESUMO

A fim de avaliar a utilização de uma PMU no ambiente de simulação do Matlab, o presente trabalho de conclusão de curso, visa estudar o funcionamento de uma Unidade de Medição Fasorial, sua origem e aplicações e como sua implementação é de grande relevância no cenário atual e futuro do Sistema Elétrico, tanto brasileiro como mundial. Devido à necessidade de medições precisas, o equipamento de estudo é regido pela norma IEEE C37.118.1-2011 que consta da definição de conceitos e testes para averiguação dos padrões mínimos exigidos para um funcionamento adequado. Utilizando-se do Simulink, os ensaios sugeridos foram aplicados no bloco de PMU deste software em três casos diferentes e, assim, foram feitas as devidas análises e conclusões sobre os resultados obtidos.

Palavras-chave: Unidade de Medição Fasorial, Sincrofasores, Simulação em Matlab.

ABSTRACT

In order to evaluate the use of a PMU in the Matlab simulation environment, the present final course paper aims to study the functioning of a Phasor Measurement Unit, its origins and applications and how its implementation is of great relevance in the current and future scenario in the Brazilian and worldwide Electrical System. Due to the need for precise measurements, the equipment is under the IEEE C37.11.1-2011 standard, which defines the concepts and tests for the minimal measurements required for an adequate operation. Using Simulink, the tests were applied to the PMU block provided in this software on three different scenarios, and thus, the appropriate conclusions and analysis were made regarding the results.

Keywords: Phasor Measurement Unit. Synchrophasors. Matlab Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação gráfica de um fasor	21
Figura 2 – Sinal no domínio do tempo e representação fasorial	22
Figura 3 - Representação de Sincrofasor	23
Figura 4 – Referência de fase dada pelo 1PPS do <i>clock</i> (a) cossenóide (b) senóide	23
Figura 5 – Estrutura básica de uma PMU	24
Figura 6 – Esquema de estrutura de um SMF	25
Figura 7 – Representação Gráfica do critério de TVE	28
Figura 8 – TVE em função da magnitude para diferentes erros de fase.....	29
Figura 9 – TVE em função da fase para diferentes erros de magnitude.....	29
Figura 10 – Exemplo de análise gráfica para medição de <i>Overshoot</i> e tempo de atraso.....	36
Figura 11 – Exemplo de análise gráfica do tempo de resposta de TVE.	37
Figura 12 – Estrutura interna do bloco de PMU do Simulink.....	39
Figura 13 – Estrutura genérica de PLL	40
Figura 14 – Estrutura do PLL utilizado no bloco de PMU do Simulink.....	40
Figura 15 – Esquema interno do bloco de PLL no Simulink	41
Figura 16 – Esquema interno do bloco PLL-Driven do Simulink	42
Figura 17 – Estrutura do sistema desenvolvido para análise da PMU no Simulink	46
Figura 18 – Interior do bloco de “Conversão complexo”	46
Figura 19 – Bloco <i>Three-Phase Programmable Generator</i> e sua configuração.....	47
Figura 20 – Gráfico da medição de abc da fonte	48
Figura 21 – Gráfico da medição de magnitude, fase e frequência da PMU	48
Figura 22 – Medição gráfica do sinal abc da fonte quando da modulação de amplitude em 1s com frequência de modulação de 2 Hz	53
Figura 23 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando da modulação de amplitude em 1s com frequência de modulação de 2 Hz.....	53
Figura 24 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando da modulação de fase em 1s com Frequência de Modulação de 2 Hz	55
Figura 25 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado um rampa de frequência de -1Hz de 0,5 a 4,5s.....	57
Figura 26 – Medição gráfica da tensão quando aplicado um degrau de magnitude de 0,1	59
Figura 27 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de magnitude 0,1	59
Figura 28 – Medição gráfica de magnitude quando aplicado um degrau de magnitude de -0,1	60
Figura 29 – Medição gráfica do ângulo quando aplicado um degrau de 10°	60
Figura 30 – Medição gráfica de FE quando aplicado um degrau de 10°	61
Figura 31 – Medição gráfica de RFE quando aplicado um degrau de 10°	61
Figura 32 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado um ruído de variância de 1e-6.	62

Figura 33 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de amplitude de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no caso com ruído de baixa variância (linha amarela: medição da PMU, linha roxa: referência).....	66
Figura 34 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de fase de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no caso com ruído de baixa variância (linha amarela: medição PMU e linha roxa: medição da referência).	68
Figura 35 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma rampa de frequência -1Hz de 0,5 a 4,5s no caso com ruído de baixa variância (linha amarela: medição PMU e linha roxa: medição da referência).	69
Figura 36 – Medição gráfica de magnitude quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com ruído de baixa variância	71
Figura 37 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com ruído de baixa variância	71
Figura 38 – Medição gráfica do ângulo quando aplicado um degrau de 10° no caso com ruído de baixa variância.....	72
Figura 39 – Medição gráfica de FE quando aplicado um degrau de 10° no caso com ruído de baixa variância.....	72
Figura 40 – Medição gráfica de RFE quando aplicado um degrau de 10° no caso com ruído de baixa variância.....	73
Figura 41 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado um ruído de variância de 1e-3.....	73
Figura 42 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de amplitude de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no caso com alta variância.....	78
Figura 43 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de fase de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no Caso 3 (linha amarela: medição PMU e linha roxa: medição da referência).....	79
Figura 44 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma rampa de frequência -1Hz de 0,5 a 4,5s no Caso 2(linha azul: medição PMU e linha roxa: medição da referência).....	81
Figura 45 – Medição gráfica de magnitude quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com alta variância	82
Figura 46 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com alta variância.....	83
Figura 47 – Medição gráfica do ângulo quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância.....	83
Figura 48 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância.....	84
Figura 49 – Medição gráfica de FE quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância.....	84
Figura 50 – Medição gráfica de RFE quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxas de Reportagem em frames por segundo.....	31
Tabela 2 – Testes de Regime Permanente com requisitos de TVE Máximo	33
Tabela 3 – Testes de Regime Permanente com requisitos de FE e RFE máximos	33
Tabela 4 – Especificações do teste de modulação de amplitude e fase.	34
Tabela 5 – Especificações do teste de rampa de frequência.....	34
Tabela 6 – Especificação do teste de degrau com os requisitos para tempo de resposta do TVE, tempo de <i>delay</i> e <i>overshoot/undershoot</i> Máximos	35
Tabela 7 – Especificação do teste de degrau com os requisitos para tempo de resposta de FE e RFE.....	36
Tabela 8 – Medições de faixa de frequência do tipo P no caso sem ruído	49
Tabela 9 – Medições de faixa de frequência do tipo M no caso sem ruído.....	49
Tabela 10 – Medições de magnitude de tensão do tipo P no caso sem ruído....	50
Tabela 11 – Medições de magnitude de tensão do tipo M no caso sem ruído ..	50
Tabela 12 – Medições de ângulo de fase no caso sem ruído.....	51
Tabela 13 – Medições de distorção harmônica no caso sem ruído	51
Tabela 14 – Medições do teste fora de banda a no caso sem ruído.....	52
Tabela 15 – Medições do teste de modulação de amplitude do Tipo P no caso sem ruído.....	53
Tabela 16 – Medições do teste de modulação de amplitude do tipo M no caso sem ruído.....	54
Tabela 17 – Medições do teste de modulação de fase do tipo P no caso sem ruído	55
Tabela 18 – Medições do teste de modulação de fase do tipo M no caso sem ruído	56
Tabela 19 – Medições do teste de rampa do tipo P de 0,5 a 4,5s no caso sem ruído	57
Tabela 20 – Medições do teste de rampa do tipo M de 0,5 a 10,5s no caso sem ruído.....	57
Tabela 21 – Medições do teste de degrau de amplitude no caso sem ruído	58
Tabela 22 – Medições do teste de degrau de fase no caso sem ruído	58
Tabela 23 – Medições do teste de faixa de frequência do tipo P no caso com ruído de baixa variância	63
Tabela 24 – Medições do teste de faixa de frequência do tipo M no caso com ruído de baixa variância.....	63
Tabela 25 – Medições do teste de magnitude de tensão do Tipo P no caso com ruído de baixa variância	64
Tabela 26 – Medições do teste de magnitude de tensão do Tipo M no caso com ruído de baixa variância.....	64
Tabela 27 – Medições do teste de ângulo de fase no caso com ruído de baixa variância	65
Tabela 28 – Medições de distorção harmônica no caso com ruído de baixa variância	65

Tabela 29 – Medições do teste fora de banda no caso com ruído de baixa variância	66
Tabela 30 – Medições do teste de modulação de amplitude para o tipo P no caso com ruído de baixa variância.....	67
Tabela 31 – Medições do teste de modulação de amplitude para o tipo M no caso com ruído de baixa variância.....	67
Tabela 32 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo P no caso com ruído de baixa variância.....	68
Tabela 33 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo M no caso com ruído de baixa variância.....	69
Tabela 34 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo P no caso com ruído de baixa variância.....	70
Tabela 35 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo M no caso com ruído de baixa variância.....	70
Tabela 36 – Medições do teste de degrau de amplitude no caso com ruído de baixa variância	70
Tabela 37 – Medições do teste de degrau de fase no caso com ruído de baixa variância	70
Tabela 38 – Medições do teste de faixa de frequência do Tipo P no caso com alta variância	74
Tabela 39 – Medições do teste de faixa de frequência do tipo M no caso com alta variância	75
Tabela 40 – Medições do teste de magnitude de tensão do tipo P no caso com alta variância	75
Tabela 41 – Medições do teste de magnitude de tensão do tipo M no caso com alta variância.....	76
Tabela 42 – Medições do teste de ângulo de fase no caso com alta variância...	76
Tabela 43 – Medições de distorção harmônica no caso com alta variância.....	77
Tabela 44 – Medições do teste fora de banda no caso com alta variância	77
Tabela 45 – Medições do teste de modulação de amplitude para o Tipo P no caso com alta variância.....	78
Tabela 46 – Medições do teste de modulação de amplitude para o tipo M no caso com alta variância.....	79
Tabela 47 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo P no caso com alta variância.....	80
Tabela 48 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo M no caso com alta variância.....	80
Tabela 49 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo P no caso com alta variância.....	81
Tabela 50 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo M no caso com alta variância.....	81
Tabela 51 – Medições do teste de degrau de amplitude no caso com alta variância	82
Tabela 52 – Medições do teste de degrau de fase no caso com alta variância...	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DFT – *Discrete Fourier Transform*
FE – *Frequency Error*
GPS – *Global Positioning System*
IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
LPF – *Low Pass Filter*
PD - *Phase Detector*
PDC -*Phasor Data Concentrator*
PID - *Proportional-Integral-Derivative*
PMU – *Phasor Measurement Unit*
PLL - *Phase Locked Loop*
PPS – *Pulsos por segundo*
RFE – *Rate of Change of Frequency Error*
RMS - *Root Mean Square*
ROCOF – *Rate of change of frequency*
SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*
SCDFT – *Symmetrical Component Discrete Fourier Transform*
SMF – *Sistema de Medição Fasorial*
THD – *Total Harmonic Distortion*
TVE - *Total Vector Error*
VCO – *Voltage Controlled Oscillator*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTO	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2	UNIDADE DE MEDIÇÃO FASORIAL	21
2.1	INTRODUÇÃO	21
2.2	SINCROFASORES	21
2.3	PMU E O SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL	24
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
3	NORMA IEEE STD C37.118.1-2011 E IEEE STD	
C37.118.1A-2014		27
3.1	INTRODUÇÃO	27
3.2	APRESENTAÇÃO DE CONCEITOS.....	28
3.2.1	Erro Total de Vetor (TVE)	28
3.2.2	Frequência e ROCOF	30
3.2.3	Amostragem	31
3.3	CLASSIFICAÇÕES DE PMU.....	31
3.4	DESCRIÇÃO DOS TESTES.....	32
3.4.1	Testes de regime permanente	32
3.4.2	Testes dinâmicos	33
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
4	SIMULAÇÃO DE PMU NO MATLAB	39
4.1	INTRODUÇÃO	39
4.2	BLOCO PMU	39
4.2.1	Bloco PLL	40
4.2.2	Bloco PLL-Driven	42
4.3	CONSIDERAÇÕES.....	42
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	45
5.1	INTRODUÇÃO	45

5.2	ESTRUTURA DO SISTEMA SIMULADO	45
5.3	CASO 1: CONDIÇÃO SEM RUÍDO	48
5.3.1	Teste de faixa de frequência – caso sem ruído.....	49
5.3.2	Teste de magnitude de tensão – caso sem ruído	50
5.3.3	Teste de ângulo de fase – caso sem ruído	50
5.3.4	Teste de distorção harmônica – caso sem ruído	51
5.3.5	Teste de interferência fora de banda – caso sem ruído....	52
5.3.6	Teste de modulação– caso sem ruído	52
5.3.6.1	Teste de modulação de amplitude– caso sem ruído	52
5.3.6.2	Teste de modulação de fase – caso sem ruído	54
5.3.7	Teste de rampa – caso sem ruído.....	56
5.3.8	Teste de degrau – caso sem ruído	58
5.4	CASO 2: CONDIÇÃO COM RUÍDO DE BAIXA VARIÂNCIA	62
5.4.1	Teste de faixa de frequência – caso com ruído de baixa variância	62
5.4.2	Teste de magnitude de tensão – caso com ruído de baixa variância	64
5.4.3	Teste de ângulo de fase – caso com ruído de baixa variância	65
5.4.4	Teste de distorção harmônica – caso com ruído de baixa variância	65
5.4.5	Teste de interferência fora de banda – caso com ruído de baixa variância	65
5.4.6	Teste de modulação– caso com ruído de baixa variância	66
5.4.6.1	Teste de modulação de amplitude– caso com ruído de baixa variância	66
5.4.6.2	Teste de modulação de fase – caso com ruído de baixa variância	68
5.4.7	Teste de rampa – caso com ruído de baixa variância	69
5.4.8	Teste de degrau – caso com ruído de baixa variância.....	70

5.5	CASO 3: CONDIÇÃO COM RUÍDO DE ALTA VARIÂNCIA	73
5.5.1	Teste de faixa de frequência – caso com ruído de alta variância	74
5.5.2	Teste de magnitude de tensão – caso com ruído de alta variância	75
5.5.3	Teste de ângulo de fase - caso com ruído de alta variância	76
5.5.4	Teste de distorção harmônica – caso com ruído de alta variância	76
5.5.5	Teste de interferência fora de banda – caso com ruído de alta variância	77
5.5.6	Teste de modulação– caso com ruído de alta variância ...	77
5.5.6.1	Teste de modulação de amplitude - caso com ruído de alta variância	78
5.5.6.2	Teste de modulação de fase - caso com ruído de alta variância	79
5.5.7	Teste de rampa - caso com ruído de alta variância	81
5.5.8	Teste de degrau – caso com ruído de alta variância.....	82
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – ALGORITMOS UTILIZADOS	91

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O Sistema Elétrico está em constante evolução, esta surge para adaptar-se ao contexto de cada cenário diferente com seus desafios e problemas que se apresentam devido a mudanças, majoritariamente, no consumo e nas novas demandas que se criam ao longo do tempo, afinal, não é surpresa alguma que o perfil de uso do consumidor é diferente a cada ano que se passa. Sendo assim, é natural que a rede elétrica cresça cada vez mais e assim se torne mais complexa, com muitas variáveis que, diante da busca por custos cada vez mais baixos e eficiência alta é de extrema importância buscar o mínimo erro possível. Há de se destacar que a depender do erro, este pode causar efeitos catastróficos como, a título de exemplo, apagões.

Foi no cenário de um *blackout* que o elemento principal de estudo deste trabalho deu seus primeiros passos. O apagão de 1965, que afetou o nordeste dos Estados Unidos, levou interesse a muitas áreas de estudo em sistemas de potência e uma das mais importantes foi no quesito de monitoramento da rede. Estimadores estáticos foram desenvolvidos para fornecer estimações em tempo real do estado do sistema, de modo que fosse possível tomar medidas contingenciais diante de certos eventos. A tecnologia da época ainda não era suficiente para medições simultâneas em tempo real com altíssimos números de dados, então essas medições eram descritas como aproximações do que era o verdadeiro estado da rede [1]. Com o advento de tecnologias mais avançadas, os pesquisadores da Virginia Tech desenvolveram métodos de cálculo para medição fasorial em tempo real que eram sincronizadas a uma referência de tempo precisa advinda do GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global). A este tipo de medição se dá o nome de Sincrofasores. De acordo com [1] isso foi possível graças ao uso de algoritmos que possibilitaram, por exemplo, o cálculo de componentes simétricos de tensão e corrente através da SCDF (Symmetrical Component Discrete Fourier Transform – Componente Simétrica da Transformada Discreta de Fourier), que em suma, junto à sincronização de GPS possibilitou a criação do primeiro protótipo do que hoje chamamos de Unidade de Medição Fasorial (PMU).

Atualmente o sistema elétrico pelo mundo passa por um ambiente de mudanças onde se busca cada vez mais a eficiência e sustentabilidade tanto econômica como ambiental em âmbitos acadêmicos e comerciais. E de modo a se adaptar a isso muitas pesquisas têm sido feitas em diversas

áreas em busca de uma diminuição dos impactos socioambientais. Isso é bem claro se analisarmos a ascensão das fontes renováveis (atrelada ao esgotamento dos combustíveis fósseis). Há alguns anos, incentivos tecnológicos, econômicos e ambientais estão transformando o sistema elétrico nas áreas de geração, transmissão, distribuição e uso final de energia através da descentralização da rede. O conceito que tem modernizado e inovado esse ambiente é conhecido por microrrede. Esse conceito está associado ao uso da geração distribuída que adapta a geração de energia com base na necessidade da carga local. De modo geral, é um grupo local de fontes e cargas que de acordo com suas características podem: operar conectadas com a rede central e quando necessário desconectar-se operando de modo totalmente ilhado[2].

O crescimento da geração distribuída é evidente, e sua integração ao sistema elétrico como um todo o torna mais complexo. Por meio deste conceito, a potência já não circula somente no sentido de atender a demanda do consumidor, ela também pode percorrer um caminho de volta à rede, pois há a possibilidade de geração de energia e assim alimentação de potência ao sistema. A distribuição agora pode ser bidirecional e devido à integração das fontes de geração distribuídas se faz mais do que necessário uma boa monitoração, automação e controle do sistema com o fim de conhecer, com a maior precisão e atenção possível, as variáveis do sistema e assim executar as ações devidas.

Para monitorar a microrrede de forma eficiente as Unidades de Medição Fasorial (PMUs) têm potencial para desempenhar um importante papel nos sistemas elétricos de distribuição por meio dos fasores com medidas temporalmente sincronizadas de tensão e corrente em vários locais do sistema, oferecendo assim inúmeras possibilidades para estimar o estado de uma rede de distribuição [2].

Entretanto, as PMUs ainda possuem um custo relativamente elevado e são mais utilizadas nas redes “principais”, por isso com o objetivo de reduzir o custo de implementação, pesquisas têm sido feitas para que essa tecnologia possa ser utilizada também em microrredes. Certos estudos apresentam uma proposta de plataforma open source para se desenvolver PMUs com base em um computador com uma placa de aquisição de dados [3]; em outro trabalho [4] avalia-se o desempenho de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada para redes de distribuição. Vale destacar um destes estudos [5] que mostra o desenvolvimento de uma Unidade de Medição Fasorial de baixo custo com o intuito de ser utilizada em redes elétricas inteligentes. Há de se mencionar que os requisitos para a aplicação em microrredes são mais exigentes que na

transmissão pois, dentre outros motivos, por exemplo, possui defasagens angulares menores.

Seja pelo pontapé inicial dado pelo apagão de 1965 até chegarmos ao presente da geração distribuída das microrredes e toda esta integração com o sistema, as PMUs são pontos essenciais para compor a rede atual. Por utilizarem uma fonte eficaz de sincronização, fornecida pelo sistema GPS, as PMUs viabilizam a realização da medição de grandezas fasoriais em instalações geograficamente distantes, a uma taxa de até 60 medidas por segundo e com precisão angular adequada aos requisitos das aplicações [6].

Neste contexto, afim de regular este instrumento, a IEEE propôs normas que ditam como este deve funcionar de modo a medir os dados da maneira mais precisa possível no sistema e que são aplicadas nas PMUs comerciais bem como neste estudo.

1.2 OBJETIVOS

Através deste trabalho, almeja-se realizar um estudo acerca do comportamento de uma PMU no ambiente de simulação do programa computacional MATLAB. O Simulink incluiu em sua biblioteca no ano de 2017 um bloco de PMU para ser utilizado em simulações. Portanto, este trabalho visa, de modo geral, analisar o funcionamento desta PMU. Para tal, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Estudar sobre o conceito de PMU e suas aplicações.
- Consultar a Norma estabelecida para as Unidades de Medição Fasorial e os testes propostos.
- Analisar detalhadamente a estrutura do bloco de PMU do Simulink
- Simular a PMU dentro das propostas explicitadas na Norma de modo a testar se o comportamento condiz com os limites pedidos, tanto em ambiente controlado como em casos simulando possíveis ruídos da rede.
- Comparar e analisar os resultados obtidos com o intuito de avaliar o desempenho do bloco simulado.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está segmentado em seis capítulos, e um apêndice que consta com os algoritmos utilizados.

O capítulo dois é composto de uma revisão do conceito de PMU, detalhando seu funcionamento e como se dá a aplicação em um sistema elétrico.

No capítulo três apresenta-se as normas IEEE utilizadas na regulamentação das Unidades de Medição Fasorial, mencionando-se alguns conceitos e equacionamentos utilizados, além da descrição e explicação aprofundada dos testes a serem realizados.

Já no capítulo 4 demonstra-se o ambiente de simulação utilizado, detalhando o funcionamento e construção do bloco principal e seus componentes.

O quinto capítulo apresenta a estrutura utilizada nas simulações bem como todos os resultados relevantes dos testes realizados nos três casos simulados. Também é analisado e discutido algumas medições importantes.

Finalmente, o sexto capítulo condensa o que de principal foi discutido e observado durante o estudo e conclui o presente trabalho.

2 UNIDADE DE MEDIÇÃO FASORIAL

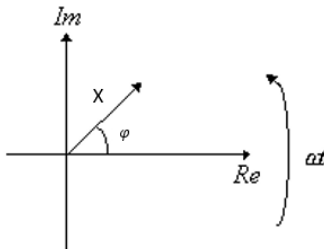
2.1 INTRODUÇÃO

Uma PMU é um equipamento utilizado para fazer a estimação de magnitude e fase de tensão ou corrente em uma rede elétrica, na forma de fasores, utilizando-se de uma fonte de tempo comum para sincronização que se dá através do *Global Positioning System* (GPS), permitindo que as medições possam ser feitas em tempo real mesmo com variados pontos de medida, em distâncias e locais diferentes no sistema onde estão instalados [7]. Além disso, as PMUs também possibilitam a leitura da frequência na rede. Em geral, este dispositivo pode reportar até 60 medições por segundo, diferente, por exemplo, do método SCADA que entrega uma medição a cada 2 ou 4 segundos. Pode-se notar que as PMUs realmente são uma evolução de relevância no atual cenário dinâmico do setor elétrico, entretanto para compreender melhor o funcionamento delas é necessária a apresentação de alguns conceitos. A base consiste no entendimento dos Sincrofasores.

2.2 SINCROFASORES

Fasor pode ser descrito como um vetor girante que descreve um módulo e fase representados num plano complexo. Para esta definição toma-se que a frequência deve ser constante, no caso do Sistema Elétrico brasileiro, 60Hz.

Figura 1– Representação gráfica de um fasor



Fonte: Autoria própria

Um sinal cossenoidal pode ser definido como:

$$x(t) = X * \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Onde X corresponde ao valor de pico do sinal, ω é a frequência angular em *rad/s* e tem como valor $\omega = 2\pi f$, onde f é a frequência do sinal em *Hertz*.

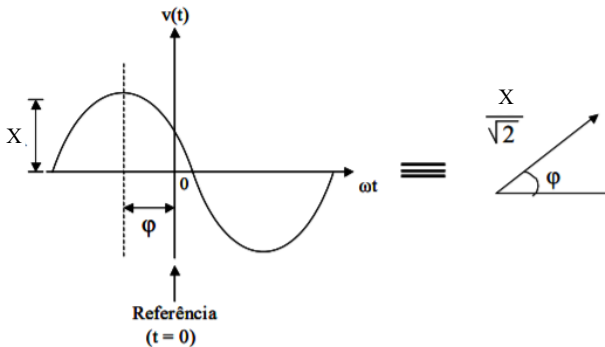
O ângulo φ indica o valor de defasagem do sinal com relação à referência (geralmente $t=0$ e frequência constante).

De acordo com [8], a Equação (1) pode ser descrita também utilizando-se do valor RMS (*Root Mean Square*) ou Valor Eficaz como apresentado nas Equações 2 e 3, e na figura 2:

$$\dot{X} = \left(\frac{X}{\sqrt{2}}\right) * e^{j\varphi} \quad (2)$$

$$\dot{X} = \left(\frac{X}{\sqrt{2}}\right) \leftarrow \varphi \quad (3)$$

Figura 2 – Sinal no domínio do tempo e representação fasorial



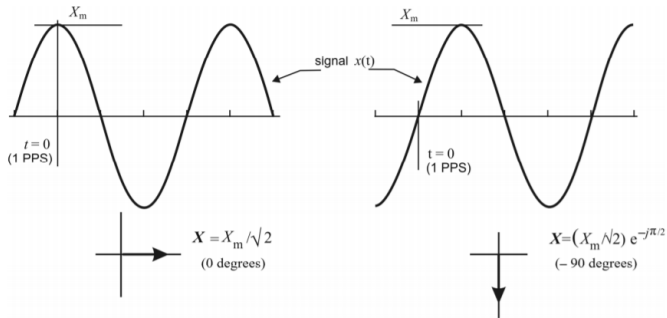
Fonte: Adaptado de [9]

Que passando de coordenada polar para retangular seria:

$$\dot{X} = \frac{X}{\sqrt{2}} * \cos(\varphi) + j \frac{X}{\sqrt{2}} * \sen(\varphi) \quad (4)$$

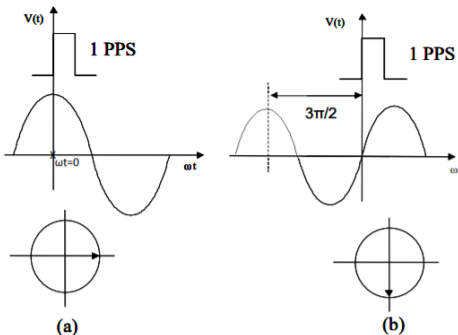
O fasor pode ainda ter ângulos positivos e negativos que são tomados com relação ao sentido anti-horário e horário, respectivamente, da rotação do vetor no plano. Como a medição pode ser feita em diferentes locais, estes fasores devem utilizar uma única referência para que estejam sincronizados e assim surge o termo Sincrofasores, representado na Figura 3.

Figura 3 - Representação de Sincrofator



Fonte: Adaptado de [8]

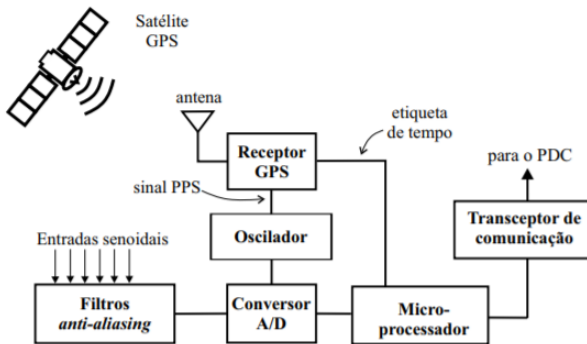
Da norma que regulamenta as PMUs, o ângulo φ é a defasagem na frequência nominal do sistema sincronizada ao *Universal Time Coordinated* (UTC – Tempo Universal Coordenado). Tendo o máximo de um sinal cossenoide em $t=0$, toma-se o ângulo do sincrofator como referência no primeiro PPS (pulso por segundo) e assim é estabelecido o número de fasores emitidos pela PMU em cada PPS, que em termos gerais é demonstrado na Figura 4. A sincronização feita pelo GPS fornece etiquetas de tempo que são utilizadas pelo sincrofator de modo a identificar todas as medições feitas pelo dispositivo. O modo de funcionamento da sincronização com GPS não será abordado neste trabalho, porém toda a documentação dos métodos utilizados para esse efeito consta na norma IEEE Std C37.118.1.

Figura 4 – Referência de fase dada pelo 1PPS do *clock* (a) cossenoide (b) senoide

Fonte: [9]

De modo geral, uma PMU tem como composição básica os elementos representados no diagrama da Figura 5, conforme a norma IEEE. O sinal analógico de entrada é primeiramente filtrado por um filtro *anti-aliasing* para evitar erros relacionados ao efeito de *aliasing*. Da filtragem, o sinal passa por um conversor analógico-digital para transformá-lo em digital utilizando-se da sincronização fornecida pelo sistema de GPS, que é recebido por uma antena e decodificado pelo receptor que toma o sincronismo da amostragem de 1PPS feita pelo PLL (*Phase Locked Loop*). Feita a conversão, o sinal é então processado por algoritmos utilizando métodos de cálculo, como Transformada Discreta de Fourier (DFT) e assim é computada as medidas dos fasores que serão enviadas, através de links para o Concentrador de Dados Fasoriais (PDC).

Figura 5 – Estrutura básica de uma PMU



Fonte: [5]

2.3 PMU E O SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL

Da norma em [8], é um equipamento que mede módulo de tensão e corrente, fase, frequência e variação de frequência utilizando-se de sincrofasores a partir de GPS para a referência de tempo, possibilitando o monitoramento de diversos pontos em tempo real.

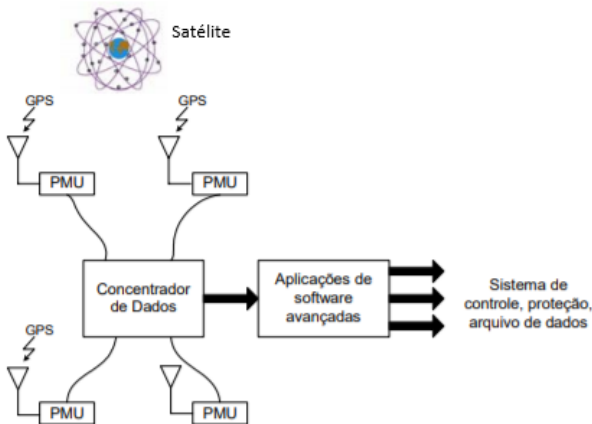
As inúmeras medições de cada módulo instalado em diversos locais, separados às vezes por distâncias significativas, precisam ser ligados a alguma forma de monitoramento e concentrados de forma que possam ser registradas em tempo real ou em registros de eventos atípicos. Para isso as PMUs na rede elétrica fazem parte de um sistema mais complexo composto por outros equipamentos que fazem o elo entre dados e toda a rede elétrica, o Sistema de Medição Fasorial (SMF).

Além do elemento deste trabalho, integram o SMF, as estações de recepção do sinal de GPS, o PDC, links de comunicação que recebem e transmitem informações entre PMU e PDC e softwares que, dentre outras funções disponibilizam as informações para o controlador ou operador daquela rede [9].

O PDC é o responsável por agrupar as informações recebidas através dos canais de comunicação de cada PMU, interligada a este PDC. A informação chega dessincronizada por conta desta comunicação assíncrona, então o concentrador coloca em ordem os dados coletados de acordo com as etiquetas de tempo advindas de cada unidade, a fim de que as medições possam ser reportadas para disponibilizar o estado da rede para alguma tela de um operador.

A arquitetura mais comum do SMF está demonstrada na Figura 6, onde múltiplas PMUs se encontram em barramentos na rede, todas recebendo o sinal de GPS, e que através de um *link* enviam as informações coletadas para um PDC central. Entretanto, outros tipos de esquemas são propostos com PMUs nas subestações, um Concentrador intermediário opcional nos centros controladores das concessionárias e outro PDC principal no centro com a responsabilidade de reunir todas as informações advindas das PMUs. Desse modo, com mais de um PDC, haveria redundância, trazendo assim maior confiabilidade, porém com um custo maior [9].

Figura 6 – Esquema de estrutura de um SMF



Fonte: [17]

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido às características já mencionadas pode-se vislumbrar a relevância da unidades de medição fasorial no setor elétrico. Ainda que não esteja totalmente presente na maioria das redes por ser uma tecnologia relativamente nova e possuir um custo elevado, a tendência é que nos próximos anos o uso seja cada vez mais propagado, afinal suas aplicações são das mais diversas tanto no âmbito de tempo real com estimação de fase, monitoramento de potência, controle do sistema, gestão de fluxo, proteção adaptativa e identificação de perturbações e faltas, como no âmbito *off-line* trazendo análises de eventos e validação de modelos do sistema. Vale destacar também sua importância para a geração distribuída em *Smartgrids* por exemplo quando da detecção de ilhamento.

A título de comparação, o sistema SCADA de monitoramento e medição faz uma estimação da diferença de fase entre tensões em pontos com certa distância. Já no que tange às PMUs, pode-se dizer que existe uma medição precisa que facilita o controle e detecção das características da rede em tempo real, o que é essencial para a tomada de decisões do operador, por exemplo. De modo geral, esta tecnologia é extremamente útil para supervisionar, monitorar e controlar os sistemas de potência modernos. Integrado ao uso dos PDCs e variados *softwares* as informações provenientes das PMUs podem ajudar a resolver problemas e fornecer uma concepção mais ampla do comportamento das redes, algo tão pertinente em um setor que precisa de segundos para tomar uma decisão indispensável.

3 NORMA IEEE STD C37.118.1-2011 E IEEE STD C37.118.1A-2014

3.1 INTRODUÇÃO

Com a popularização das PMUs surgiu-se a necessidade de regulamentação das mesmas para que os fabricantes pudessem entregar as medições efetivas com o menor erro possível. Segundo [10] o primeiro documento feito pela IEEE foi o Std 1344-1995, onde se definiu alguns protocolos para a sincronização de dados ainda que não houvesse especificação de critérios para avaliar-se o desempenho. Já em 2005, foi emitido a norma Std C37.118-2005 que inclui a definição dos conceitos de sincrofases e o de Erro Total do Vetor (TVE – *Total Vector Error*), além de atualizar o formato de emissão de dados da norma anterior. No ano de 2011, foi lançada a norma de principal base para este estudo, a Std C37.118.1-2011, que surgiu da necessidade da aplicação de medições fasoriais em condições de distúrbio na rede. Destaca-se nesse documento, esclarecimentos da definição de sincrofasor, expansão dos conceitos de TVE e os testes relacionados, além da adição de testes que levam em consideração variação de temperatura, introdução de ensaios de desempenho dinâmico e o desenvolvimento de limites e características de medição de frequência e ROCOF (*Rate of change of Frequency* – Taxa de variação de frequência). Vale mencionar que um segundo documento também foi publicado em conjunto. A norma Std 37.118.2TM-2011, é a parte que trata da comunicação de dados. Porém, mesmo com todos os esforços para a padronização, a C37.118.1-2011, apresentou algum problemas e com isso, em 2014 foi feito um *Amendment*, que segundo [11] busca corrigir a questão da descrição de medição de latência que não condizia com os testes pedidos, alterou o intervalo de exclusão do teste de rampa e mudou requerimentos de frequência e ROCOF afim de adequar-se à tecnologia corrente.

Este capítulo tem como intuito descrever os principais pontos da norma em vigor, aprofundando-se na caracterização dos testes propostos tendo em vista serem estes os fios condutores que serão utilizados no presente estudo.

3.2 APRESENTAÇÃO DE CONCEITOS

Para dar prosseguimento a este trabalho e aos testes apresentados, faz-se necessário apresentar alguns conceitos relevantes introduzidos na norma. São eles: TVE, FE, ROCOF, RFE e as taxas de *report*.

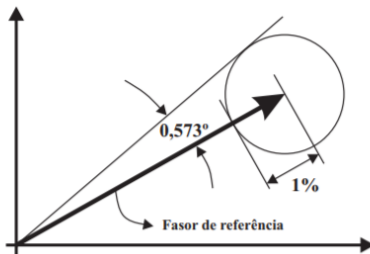
3.2.1 Erro Total de Vetor (TVE)

Com o intuito de descrever a precisão da medição do sincrofator, levando-se em conta que os erros neste podem ser devidos a equívocos na magnitude, fase ou em ambos, foi criado o conceito de TVE. O *total vector error* representa a diferença entre a referência de um sincrofator teórico, ou ideal, e a estimação da unidade sendo testada no mesmo instante de tempo. Esta medida combina o erro proveniente de todas as fontes possíveis, incluindo sincronização de tempo, ângulo e estimação de erro de magnitude do fasor. O TVE é definido pela Equação 5:

$$TVE(n) = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r(n) - X_r(n))^2 + (\hat{X}_i(n) - X_i(n))^2}{(X_r(n))^2 + (X_i(n))^2}} \quad (5)$$

Onde $\hat{X}_r(n)$ e $\hat{X}_i(n)$ são as partes real e imaginárias da unidade sendo testada e $X_r(n)$ e $X_i(n)$ são as partes real e imaginárias da fonte de referência. Na maioria dos casos, como será abordado mais adiante, as PMUs devem manter o valor de TVE menor do que 1%, ou seja, quando o erro de fase é nulo, o erro máximo de magnitude deve ser 1%, ou quando o erro de magnitude for nulo, o erro de fase precisa estar abaixo de $0,573^\circ$ [8] conforme Figura 7.

Figura 7 – Representação Gráfica do critério de TVE

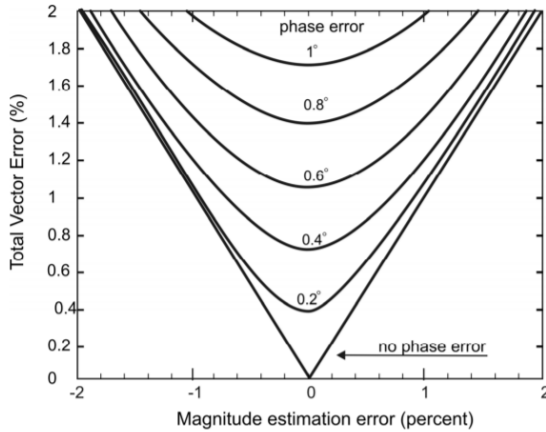


Fonte: [5]

Para melhor compreensão do TVE, o apêndice de [8] inclui a Figuras 8 e 9, que demonstram a variação deste erro como função da

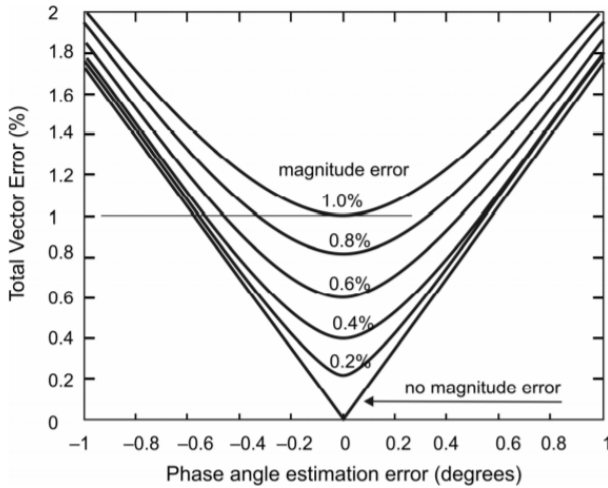
magnitude para diferentes valores de erro de fase e a Figura 9 que representa a variação de TVE como função da fase para variados erros de magnitude.

Figura 8 – TVE em função da magnitude para diferentes erros de fase



Fonte: [8]

Figura 9 – TVE em função da fase para diferentes erros de magnitude



Fonte: [8]

3.2.2 Frequência e ROCOF

Sendo um sinal cossenoidal dado pela Equação 6:

$$x(t) = X_m \cos(\Psi(t)) \quad (6)$$

Tem-se que a frequência é definida por:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} * \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (7)$$

A taxa de variação de frequência, ROCOF, é dada pela Equação 8:

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt} \quad (8)$$

Ou,

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} * \frac{d^2\Psi(t)}{dt^2} \quad (9)$$

Como os sincrofasores são calculados em relação à frequência nominal da rede (f_0), pode-se fazer:

$$\Psi(t) = \omega_o t + \varphi(t) = 2\pi f_o t + \varphi(t) \quad (10)$$

Assim, a fórmula de frequência pode ser reescrita como:

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = f_0 + \Delta f(t) \quad (11)$$

Onde $\Delta f(t)$ é o desvio da frequência relacionado à nominal, e por fim, reescreve-se ROCOF segundo a Equação 12:

$$ROCOF(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2(\varphi(t))}{dt^2} = \frac{d\Delta f(t)}{dt} \quad (12)$$

Os valores do erro de frequência e ROCOF são representados utilizando-se os critérios de Erro de Frequência (FE – *Frequency Error*) e erro de ROCOF (RFE – *ROCOF Frequency Error*) e são expressos segundo as Equações 13 e 14, em Hz e Hz/s, respectivamente, e representam o erro, em módulo, da diferença entre o valor esperado e estimado.

$$FE = |f_{real} - f_{medido}| = |\Delta f_{real} - \Delta f_{medido}| \quad (13)$$

$$RFE = \left| \frac{df_{real}}{dt} - \frac{df_{medido}}{dt} \right| \quad (14)$$

3.2.3 Amostragem

Segundo [8] o Sincrofasor, frequência e ROCOF devem ser reportadas sob uma mesma taxa constante, F_s , que é um número inteiro de vezes por segundo quando a taxa é maior que 1 por segundo, ou um número inteiro de segundos entre medições quando a taxa de medição é igual ou inferior a 1 por segundo. Em suma, a taxa de reportagem define o número de fasores transferidos por segundo. A Tabela 1 indica as taxas F_s indicadas para 50 e 60 Hz que podem ser escolhidas pelo usuário.

Tabela 1 – Taxas de Reportagem em frames por segundo

System frequency	50 Hz			60 Hz					
Reporting rates (F_s —frames per second)	10	25	50	10	12	15	20	30	60

Fonte: [8]

Para este trabalho, a taxa de 60 fps, na frequência nominal da rede elétrica brasileira de 60 Hz, foi escolhida.

3.3 CLASSIFICAÇÕES DE PMU

No documento IEEE Std C37.118.1-2011 é definido dois tipos de Unidade de Medição Fasorial, são elas o Tipo P e o M. A primeira tem como foco as aplicações de resposta rápida, como proteção. Já o segundo tipo é indicado para situações que não necessitam velocidade de resposta e é utilizada para medições analíticas pois possui precisão maior, porém com mais *delay*. Estas informações são importantes, pois todos os testes de conformidade são divididos para cada tipo de classificação e a PMU deve passar no teste de sua classe para ser considerada compatível. No presente trabalho serão feitos os testes para os dois tipos, P e M.

3.4 DESCRIÇÃO DOS TESTES

Com os principais conceitos apresentados, esta seção tratará dos testes a serem feitos, descritos pela norma [8] em conjuntos com as alterações realizadas por [11].

Quando não forem explicitamente indicadas as variações, os ensaios devem ser feitos tomando as condições de referência, que é o valor da quantidade sendo testada quando esta não estiver sendo variada. As referências de todos os testes são:

- Tensão nominal
- Corrente nominal
- Frequência nominal
- Tensão, corrente, fase e frequência constantes
- Distorção Harmônica Total (THD <0,2% da fundamental)
- Todos os sinais de interferência <0,2% da fundamental.

Além disso, condições de temperatura e humidade são explicitadas, porém para este estudo que se dá em ambiente de simulação, elas não são relevantes.

A duração dos testes deve transcorrer por no mínimo 5 segundos, a não ser quando explicitado alguma diferença específica. O mesmo se aplicará para este trabalho.

Os ensaios são divididos em duas categorias: ensaios em regime permanente e ensaios dinâmicos, cada qual com suas especificações como serão apresentados a seguir.

3.4.1 Testes de regime permanente

De modo a verificar as medições desta seção, são REALIZADOS ensaios que se caracterizam por ter X_m , ω e φ e as demais quantidades envolvidas, fixas durante o período de medição. As tabelas 2 e 3 indicam os testes a serem feitos, adaptados da norma (já alterado para F_s de 60 fps). Vale mencionar que as alterações feitas em [11] já estão inclusas.

Tabela 2 – Testes de Regime Permanente com requisitos de TVE Máximo

Teste	Referência	Tipo P		Tipo M	
		Faixa de variação	TVE Máx (%)	Faixa de variação	TVE Máx (%)
Faixa de Frequência	60 Hz	± 2 Hz	1	± 5 Hz	1
Tensão	1 pu	80 a 120%	1	10 a 120%	1
Ângulo de fase	constante	±π rad	1	±π rad	1
Distorção Harmônica	<0,2%THD	1%, cada harmônica até a 50ª	1	10%, cada harmônica até a 50ª	1
Interferência Fora de Banda	<0,2% da magnitude	-	-	10% da magnitude	1,3

Fonte: Adaptado de [8]

Tabela 3 – Testes de Regime Permanente com requisitos de FE e RFE máximos

Teste	Referência	Tipo P			Tipo M		
		Faixa de variação	FE Máx	RFE Máx	Faixa de variação	FE Máx	RFE Máx
Faixa de Frequência	60 Hz	± 2 Hz	0,005 Hz	0,4 Hz/s	± 5 Hz	0,005 Hz	0,1 Hz/s
Distorção Harmônica	<0,2%THD	1%, cada harmônica até a 50ª	0,005 Hz	0,4 Hz/s	10%, cada harmônica até a 50ª	0,005 Hz	-
Interferência Fora de Banda	<0,2% da magnitude	-	-	-	10% da magnitude	0,01 Hz	-

Fonte: Adaptado de [8] e [11]

Deve-se explicar que para o teste de interferência fora de banda, a norma explicita que afim de avaliar se o filtro *anti-aliasing* da PMU exerce devidamente seu papel de suprimir as componentes de frequência próximas à metade da frequência de Nyquist sem interferir nos resultados, este teste consiste em aplicar uma senóide de frequência única ao sinal fundamental na magnitude explicitada sendo variada em um intervalo abaixo (até 10 Hz) e acima da banda de passagem ($2xf_0$) até a segunda harmônica. A frequência da rede é regida pela equação abaixo, onde f_0 é a frequência nominal do sistema (60 Hz), f_{in} é frequência fundamental do sinal de entrada do teste e F_s é a taxa de reportagem (60 fps).

$$f_0 - 0,1 \left(\frac{F_s}{2} \right) \leq f_{in} \leq f_0 + 0,1 \left(\frac{F_s}{2} \right) \quad (15)$$

3.4.2 Testes dinâmicos

São descritos três testes dinâmicos para aplicação nas PMUs, de modo geral são realizados pela variação do sinal quando de sua magnitude, ângulo de fase ou frequência durante o tempo de aplicação do ensaio, onde segundo [10], têm como objetivo, por exemplo, a avaliação da estimação de frequência segundo sua capacidade de convergir a um

sinal que varia no tempo. O primeiro teste almeja avaliar a largura de banda de medição através da modulação tanto em amplitude como em frequência.

O ensaio de modulação é realizado com ω , k_x (fator de modulação de amplitude) e k_a (fator de modulação de ângulo de fase) nas faixas de frequência especificadas na Tabela 4. A modulação de frequência será variada em passos de 0,2 Hz, e um tempo de estabilização é permitido para prevenir que efeitos de transitório afetem a medição.

Tabela 4 – Especificações do teste de modulação de amplitude e fase.

Nível de Modulação	Referência	Tipo P				Tipo M			
		Faixa de variação	TVE Máx	FE Máx	RFE Máx	Faixa de variação	TVE Máx	FE Máx	RFE Máx
$k_x = 0,1; k_a = 0$	Magnitude 1 pu; f nominal	Frequência de modulação 0.1 a	3%	0,06	2,3	Frequência de modulação 0.1 a	3%	0,3	14
		2 Hz	3%	0,06	2,3		5 Hz	3%	0,3
$k_x = 0; k_a = 0,1 \text{ rad}$	Magnitude 1 pu; f nominal								

Fonte: Adaptado de [8] e [11]

O segundo teste tem como alvo a avaliação do desempenho da Unidade Medição Fasorial durante uma rampa na frequência do sistema. O objetivo é avaliar o desempenho da PMU quando de uma variação linear de frequência. Há de se comentar que os limites de TVE, FE e RFE podem ser ultrapassados durante um tempo de transição tanto antes como depois da rampa chegar a um limite de intervalo de frequência ou um ponto onde ROCOF muda, por isso, com o intuito de evitar leituras indesejada causadas por sinais onde a frequência está fora do filtro passa faixa ou da variação súbita de ROCOF, a norma recomenda utilizar um intervalo de exclusão para observação dos máximos de cada grandeza, sendo diferenciadas para o tipo P e M. O intervalo corresponde diretamente a um intervalo de frequência e pode ser calculado como:

$$F_{\text{exclusão}} = R_f * \frac{n}{F_s} \quad (16)$$

Onde n é o tipo P ou M (2 e 7, respectivamente), R_f é a taxa da rampa e F_s é a taxa de reportagem.

Tabela 5 – Especificações do teste de rampa de frequência

Referência	Taxa de Rampa (Rf)	Tipo P				Tipo M			
		Intervalo da rampa	TVE Máx	FE Máx	RFE Máx	Intervalo da rampa	TVE Máx	FE Máx	RFE Máx
Magnitude 1 pu, f nominal	$\pm 1 \text{ Hz/s}$	$\pm 2 \text{ Hz/s}$	1%	0,01 Hz	0,4 Hz/s	$\pm 5 \text{ Hz/s}$	1%	0,01 Hz	0,2 Hz/s

Fonte: Adaptado de [8] e [11]

Para o caso avaliado neste trabalho, com $F_s = 60 \text{ fps}$, e $R_f = 1 \text{ Hz/s}$ temos que para o Tipo P:

$$F_{\text{exclusão}} = 1 * \frac{2}{60} = 0,0333 \quad (17)$$

Portanto, o intervalo de avaliação será na faixa de frequência de 58,033 Hz a 61,967 Hz, para o Tipo P. Já, no Tipo M. O intervalo avaliado dever ser de 55,117 Hz a 64,883 Hz.

$$F_{\text{exclusão}} = 1 * \frac{7}{60} = 0,1167 \quad (18)$$

O terceiro, e último ensaio, é o de degrau de amplitude e fase. Para compreensão, faz-se necessário introduzir alguns conceitos que devem ser observados: tempo de resposta e tempo de atraso.

Segundo [8] o tempo de resposta é o tempo de transição entre duas medidas de regime permanente antes e depois do degrau ser aplicado. É determinado como a diferença entre o tempo em que a medida “sai” de um limite de precisão e o tempo em que volta e se estabiliza. Já o Tempo de atraso é definido como o intervalo de tempo entre o instante que o degrau é aplicado e o tempo de medição que o parâmetro associado atinge um valor intermediário entre o valor inicial e final em regime permanente. O objetivo é avaliar se as etiquetas de tempo do sincrofator estão devidamente compensadas pelo atraso de filtragem do sistema, afim de que o atraso seja próximo de zero.

Tabela 6 – Especificação do teste de degrau com os requisitos para tempo de resposta do TVE, tempo de *delay* e *overshoot/undershoot* Máximos

Especificação do Degrau	Referência	Tipo P			Tipo M		
		Tempo de Resposta (s)	Tempo de Delay (s)	Overshoot/undershoot Máx	Tempo de Resposta (s)	Tempo de Delay (s)	Overshoot/undershoot Máx
Magnitude = 10%; $k_x = \pm 0,1$; $k_a = 0$	Nominal no início ou final do degrau	$2/f_0$	$1/(4 * F_s)$	5% da magnitude do degrau	$7/F_s$	$1/(4 * F_s)$	10% da magnitude do degrau
Ângulo = 10%; $k_x = 0$; $k_a = \pm \pi/18$	Nominal no início ou final do degrau	$2/f_0$	$1/(4 * F_s)$	5% da magnitude do degrau	$7/F_s$	$1/(4 * F_s)$	10% da magnitude do degrau

Fonte: Adaptado de [8] e [11]

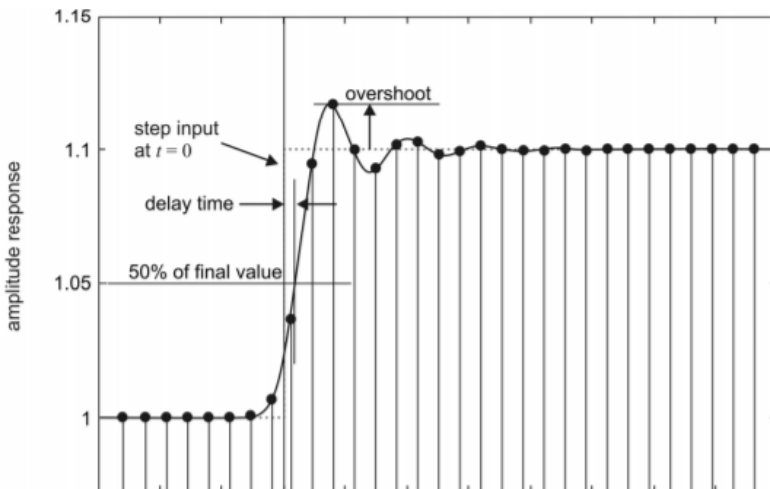
Tabela 7 – Especificação do teste de degrau com os requisitos para tempo de resposta de FE e RFE.

Especificação do Degrau	Referência	Tipo P		Tipo M	
		Frequência	ROCOF	Frequência	ROCOF
		Tempo de Resposta (s)	Tempo de Resposta (s)	Tempo de Resposta (s)	Tempo de Resposta (s)
Magnitude = 10%; $k_x = \pm 0,1$; $k_a = 0$	Nominal no início ou final do degrau	4,5/ f_o	6/ f_o	14/ F_s	14/ F_s
Ângulo = 10%; $k_x = 0$; $k_a = \pm \pi/18$	Nominal no início ou final do degrau	4,5/ f_o	6/ f_o	14/ F_s	14/ F_s

Fonte: Adaptado de [8] e [11]

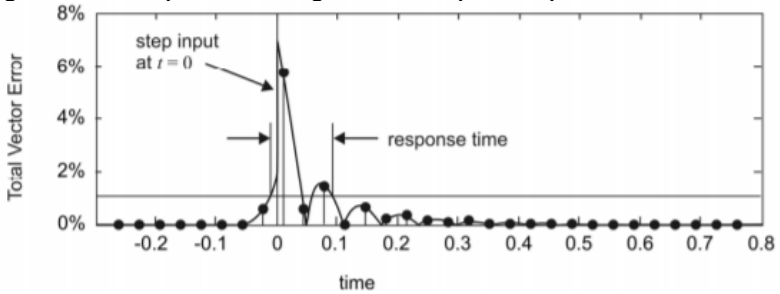
Das tabelas, k_x é o tamanho do degrau de magnitude e k_a é o tamanho do degrau de fase. Ainda, com o objetivo de compreensão dos valores a serem avaliados, a norma apresenta o exemplo das Figuras 10 e 11, onde, pela análise gráfica, está demonstrado como encontrar o tempo de atraso e *overshoot* (Figura 10) e o tempo de resposta para cada grandeza, TVE, FE e RFE, representada na Figura 11 por TVE.

Figura 10 – Exemplo de análise gráfica para medição de *Overshoot* e tempo de atraso.



Fonte: [8]

Figura 11 – Exemplo de análise gráfica do tempo de resposta de TVE.



Fonte: [8]

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há de se salientar que os testes são apresentados no Capítulo 5 e as devidas observações específicas serão retomadas quando das alterações realizadas de modo a se adaptar ao ambiente de simulação analisado.

4 SIMULAÇÃO DE PMU NO MATLAB

4.1 INTRODUÇÃO

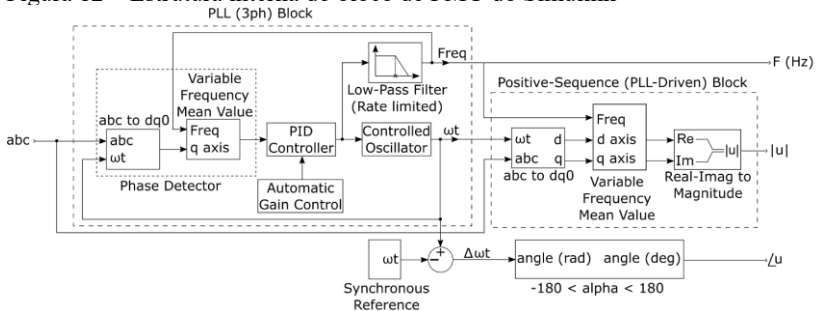
Para este trabalho, foi selecionado o software de cálculo Matlab, tendo em vista que este introduziu em 2017 na sua versão 2017b um modelo de PMU no programa Simulink. O intuito é analisar o funcionamento deste bloco e avaliar sua conformidade com a norma IEEE. Neste capítulo será abordada uma breve explicação da composição do bloco e apresentada a estrutura e algoritmo utilizados para a realização dos testes.

4.2 BLOCO PMU

Introduzido na versão Matlab 2017b, o bloco PMU (*PLL-Based, Positive-Sequence*), segundo [12], foi construído conforme a norma [8]. Ele implementa uma Unidade de Medição Fasorial utilizando uma “malha de travamento de fase (PLL)” que é aplicada para calcular o componente da sequência positiva do sinal de entrada trifásico (*abc*) em uma janela de um ciclo da frequência fundamental. O sinal de entrada pode ser balanceado ou desbalanceado e até possuir harmônicas. Uma referência síncrona é utilizada para fazer o sincronismo de fase do sinal.

A arquitetura do bloco está representada na Figura 12. Os sinais de saída são referentes à magnitude, fase (em graus) e a frequência da componente de sequência positiva do sinal *abc* na frequência fundamental.

Figura 12 – Estrutura interna do bloco de PMU do Simulink

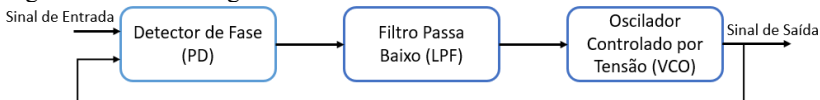


Fonte: [12]

4.2.1 Bloco PLL

Para compreensão da arquitetura apresentada é de interesse introduzir brevemente o conceito de *Phase-locked Loop* (PLL) visto que este é a base para o bloco utilizado. De acordo com [13], O PLL é um sistema que sincroniza um sinal de entrada (referência) e o sinal de saída do PLL, que é realimentado, e desse modo ambos os sinais operam na mesma frequência. Seu principal objetivo é obter um estado de “trava” em um “*lock time*” aceitável para a sincronia. O esquema mais básico possui um Detector de Fase (PD – *Phase Detector*), um Filtro Passa-Baixa (LPF – *Low Pass Filter*) e um Oscilador Controlado por Tensão (VCO – *Voltage Controlled Oscillator*), e está apresentado na Figura 13.

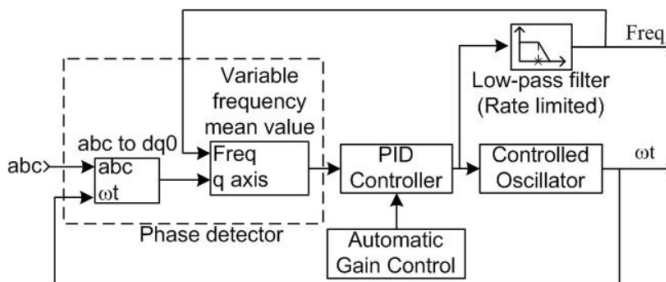
Figura 13 – Estrutura genérica de PLL



Fonte: Autoria própria

O PD é responsável por medir a diferença de fase e frequência entre o sinal de entrada e saída. Ele produz um sinal proporcional à diferença medida que será a entrada do LPF. Levando em consideração que o sinal possui elementos de alta frequência, o filtro passa baixa suprimirá estas componentes. O VCO, então, a partir da tensão advinda do LPF produzirá a frequência de saída.

Figura 14 – Estrutura do PLL utilizado no bloco de PMU do Simulink

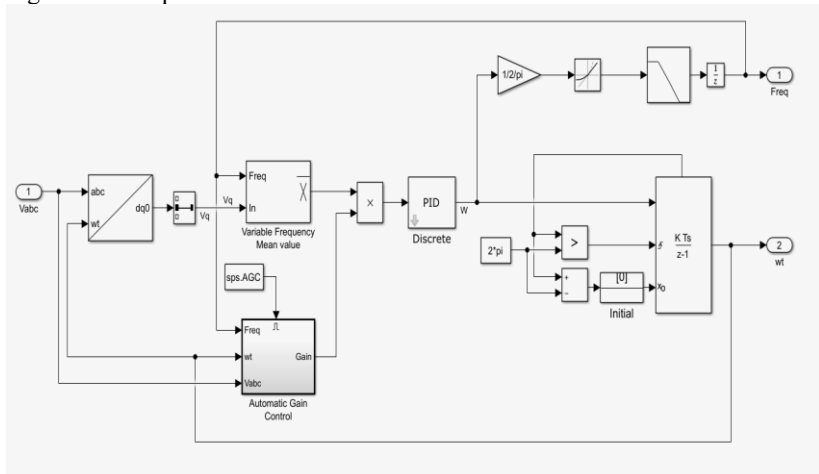


Fonte: [12]

Como apresentado na Figura 12, a primeira seção do Bloco de PMU consiste no PLL, que tem como diagrama, a Figura 14. Segundo a documentação em [14] o funcionamento elementar é o mesmo ao supracitado, entretanto o método é do Tipo-3 de PLL. Este utiliza-se da transformação de coordenadas em quadratura como sistema de comparação, mais especificamente, neste caso, a Transformada de Clarke-Park. De maneira breve, segundo [10], o sinal de entrada é referido ao eixo estacionário α - β , gerando as fases V_α e V_β , na frequência fundamental. Para a transformação $dq0$ toma-se a fase estimada como ângulo de referência para gerar os componentes girantes, V_d e V_q . Se o vetor estimado estiver em fase com o vetor real, então V_d terá valor nulo, ou seja, esta componente é um parâmetro para estimar o erro entre a fase real e a estimada.

No bloco, PLL-3ph do Simulink, segundo [14], o sinal de entrada é submetido à Transformada de Park utilizando-se da velocidade angular de um oscilador interno. O eixo de quadratura do sinal, proporcional à diferença de fase entre o sinal abc e o do oscilador é filtrado por um bloco de frequência variável média. Um controlador PID (*Proportional-Integral-Derivative*), com ganho de controle automático, tem como objetivo manter a diferença de fase em zero ao atuar no oscilador controlado. A saída do bloco PID, correspondente à velocidade angular, é então filtrada e convertida à frequência, em Hertz, que é utilizada pelo valor médio. O esquema completo é representado na Figura 15.

Figura 15 – Esquema interno do bloco de PLL no Simulink



Fonte: Adaptado do Simulink

4.2.2 Bloco PLL-Driven

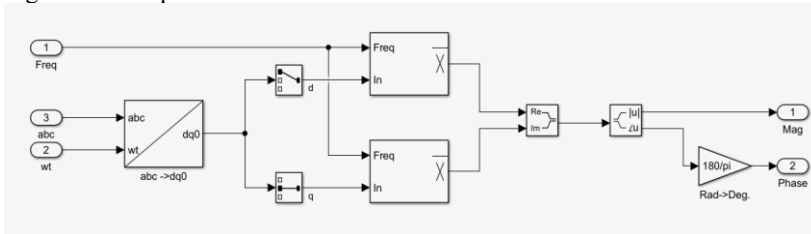
A outra parte da PMU é composta por um bloco chamado *Positive-Sequence (PLL-Driven)*, cujo diagrama interno está representado na Figura 16. De acordo com [12] e [15] sua função é calcular o componente de sequência-positiva (tensão e fase) da entrada em uma janela de um ciclo da frequência fundamental vinda do bloco de PLL. O *frame* de referência é dado pelo ângulo sincronizado nas passagens por zero da fase fundamental. Uma análise de Fourier na janela de um ciclo da frequência fundamental é aplicada ao sinal de entrada. O bloco avalia o valor dos fasores na fundamental e então a transformação é aplicada com a finalidade de obter a sequência positiva.

A componente de sequência positiva do sinal de entrada é dada segundo a Equação 19:

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a * V_b + a^2 * V_c) \quad (19)$$

Onde V_a , V_b e V_c são os fasores de tensão na frequência fundamental e $a = e^{j2\pi/3}$.

Figura 16 – Esquema interno do bloco PLL-Driven do Simulink



Fonte: Autoria própria, adaptado do Simulink

4.3 CONSIDERAÇÕES

Os parâmetros do bloco apresentado são:

- Frequência Nominal (f_n);
- *Sampling rate*, Nsr , que é a Taxa de Amostragem em pontos/ciclo;
- *Reporting Rate Factor*, k , que representa um fator a ser multiplicado por Nsr .

O tempo de amostra (T_s – *sample time*) é uma função de f_n e N_{sr} conforme a Equação 20. E a taxa de reporte, que determina o tamanho do intervalo onde será mostrado as medições, é dado pela Equação 21.

$$T_s = \frac{1}{f_n * N_{sr}} \quad (20)$$

$$R_t = k * T_s \quad (21)$$

Para o presente estudo, $f_n=60$ Hz, tendo em vista que esta é a frequência nominal do setor elétrico brasileiro, $N_{sr} = 64$ e $k=1$ o que leva a $T_s = 2,604e-4$ e $R_t = 2,604e-4$ segundos. Com estes valores, o Matlab reporta 3840 *fps*.

Algumas observações são necessárias, vale mencionar que o bloco do Simulink necessita de pelo menos um ciclo de simulação completo para medição correta da magnitude e ângulo por conta da janela de aplicação do Fourier. Além disso, o método de PLL traz algumas desvantagens e por conta disso são mais indicados para sistemas que possuam variações baixas ou lentas, segundo [10], quando a frequência do sistema sofre variações com velocidade maior que as detectáveis pelo PLL há uma limitação no rastreamento do sinal gerado em relação ao sinal de entrada. Também, segundo [12] a estimação fasorial pode apresentar valores equivocados quando em aplicações com condições subsíncronas. As demais considerações serão apresentadas em conjunto com os resultados no capítulo a seguir.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, o sistema simulado será apresentado juntamente com as especificações de parâmetros e considerações que foram feitas de modo a seguir os requerimentos feitos em [8] e [11], além dos resultados dos testes em três casos diferentes: o primeiro é totalmente controlado, sem ruídos, e os dois últimos possuem ruídos de variância distintos afim de testar o comportamento do bloco nestas situações. Todos os casos possuem as avaliações tanto para o Tipo P como o Tipo M. Quando cabíveis, discussões serão feitas acerca dos resultados com o intuito de analisar o que foi obtido e medido.

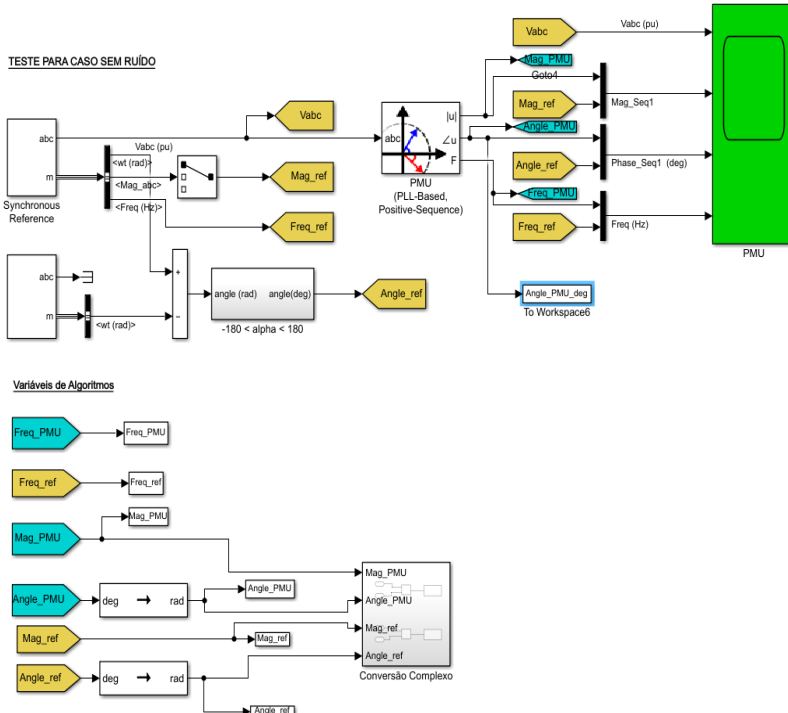
5.2 ESTRUTURA DO SISTEMA SIMULADO

Nas Figuras 17 e 18, o sistema desenvolvido no Simulink é apresentado. A inspiração do sistema é do modelo de PMU *Benchmark* disponibilizado no site do Matlab com algumas adaptações para a análise desejada. No que diz respeito ao funcionamento, o bloco “*Three-Phase Programmable Generator*” (Figura 19) é o responsável por gerar o sinal trifásico desejado e além disso possibilita que se inclua harmônicas, e um recurso muito utilizado neste trabalho que é o de variação no tempo, onde é possível escolher o parâmetro a variar (amplitude, fase e frequência) e o tipo de variação (degrau, rampa, modulação e por tabela de pares de tempo-amplitude) no tempo desejado de simulação. Este bloco tem como saída o sinal *abc* que vai direto à entrada da PMU e o sinal *m* que contém os sinais *Mag_abc* que é a magnitude de *abc*, *Phase_abc* são as fase dos componentes fundamentais de *abc* em graus, *Freq* representa a frequência do bloco em *Hertz* e *wt* que indica o ângulo instantâneo do vetor girante do componente de sequência positiva em *radianos*. Para este último foi necessário fazer uma conversão de modo a deixá-lo no mesmo formato de representação da PMU, de -180° a 180° (por isso o uso de outro bloco de gerador como referência para conversão). Com isso é possível obter os sinais que representam os valores reais dos fasores gerados, para posterior cálculo do TVE.

Todos os sinais de relevância foram conectados ao *scope* de modo a serem apresentados conforme a leitura da PMU e comparando-se ao sinal de referência. Ademais, estes sinais são ligados a blocos de *To Workspace* que permite que estes sejam variáveis utilizáveis no *workspace* do Matlab, podendo assim ser manipulados e utilizados nos

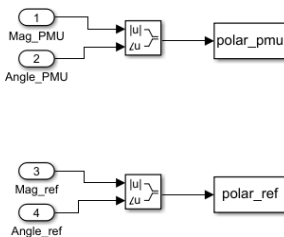
algoritmos de avaliação criados. Algo de relevância também, é a possibilidade de amostrar os dados obtidos, recurso este que será explicado a seguir.

Figura 17 – Estrutura do sistema desenvolvido para análise da PMU no Simulink



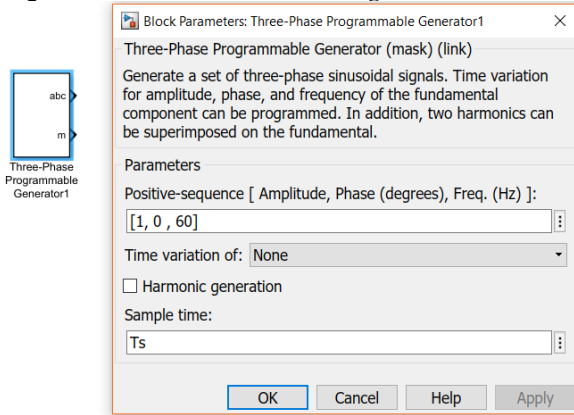
Fonte: Autoria própria

Figura 18 – Interior do bloco de “Conversão complexo”



Fonte: Autoria própria

Figura 19 – Bloco *Three-Phase Programmable Generator* e sua configuração



Fonte: Autoria própria

Alguns algoritmos foram elaborados para automatizar a simulação de múltiplas variáveis e também encontrar as medições necessárias, além de ajustar o sistema ao, por exemplo, remover transitórios que poderiam interferir nas medidas corretas. Estes algoritmos podem ser encontrados no Apêndice A.

No que diz respeito às configurações de simulação, foi selecionado o método de *step* fixo já que este permite selecionar o tamanho do *step* que é o tempo de reportagem fundamental (T_s) que precisa ser um múltiplo do *Sample Time* da Equação 20. O método de solver foi deixado no modo de escolha automática.

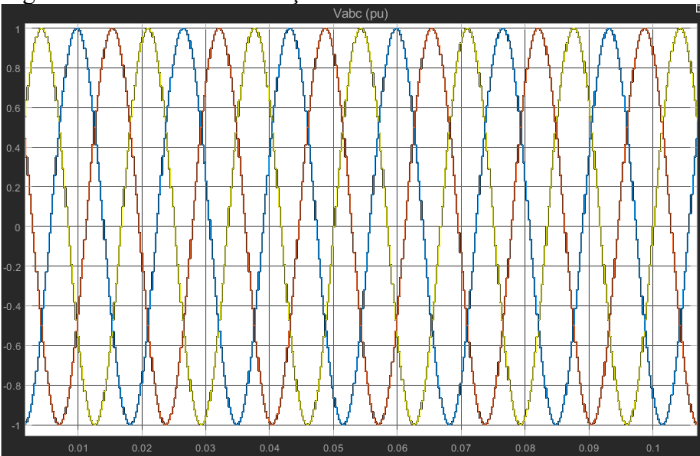
Deve-se ressaltar que para todos os casos o F_s escolhido é de 60 fps, e para isso foi necessário que os blocos de *To workspace* tivessem um Tempo de amostragem conforme a Equação 22 de modo que fossem analisadas as medições dentro do máximo de *frames* por segundo indicado em norma. Ou seja, em 1 segundo, 60 amostras serão coletadas. A ideia inicial era de alterar a taxa diretamente no bloco de PMU no Simulink, entretanto para o k da Equação 21 muito grande a medição obtida não era correta.

$$T_{sw} = \frac{64}{3840} = 0,01667 \text{ s} \quad (22)$$

5.3 CASO 1: CONDIÇÃO SEM RUÍDO

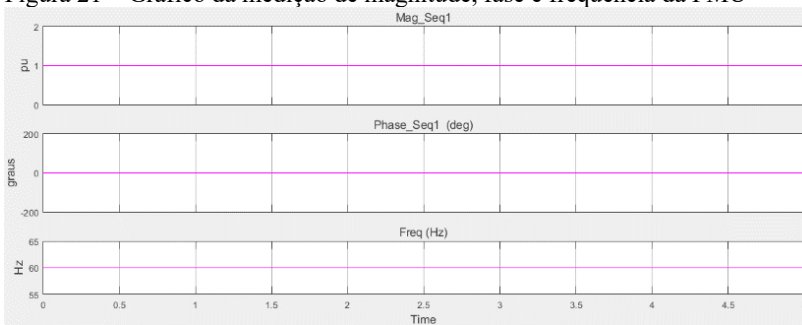
A Figura 20 representa a medição obtida diretamente da fonte e as medições, sem modificações, de Magnitude, ângulo e frequência feitas pela PMU estão demonstradas na Figura 21 abaixo.

Figura 20 – Gráfico da medição de abc da fonte



Fonte: Autoria própria

Figura 21 – Gráfico da medição de magnitude, fase e frequência da PMU



Fonte: Autoria própria

5.3.1 Teste de faixa de frequência – caso sem ruído

Para o teste de faixa de frequência foi realizada uma variação de 58 a 62 Hz com passo de 0,5 para o tipo P, como observado na Tabela 8, e de 55 a 65 Hz com passo de 0,5 para o tipo M (Tabela 9). Nota-se em ambos os casos que quando a frequência é a nominal o erro tende a zero, e quanto maior a distância em módulo de f_0 , maior é o erro, ainda que este seja de ordem baixa.

Tabela 8 – Medições de faixa de frequência do tipo P no caso sem ruído

Faixa de Frequência			
Frequência	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
58	1,783E-06	3,878E-07	3,451E-05
58,5	1,334E-06	2,900E-07	2,585E-05
59	8,900E-07	1,935E-07	1,724E-05
59,5	4,439E-07	9,639E-08	8,605E-06
60	2,416E-13	9,539E-13	2,260E-11
60,5	4,427E-07	9,605E-08	8,585E-06
61	8,829E-07	1,914E-07	1,713E-05
61,5	1,325E-06	2,872E-07	2,570E-05
62	1,762E-06	3,815E-07	3,421E-05
Limite	0,005	0,01	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Medições de faixa de frequência do tipo M no caso sem ruído

Faixa de Frequência			
Frequência (Hz)	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
55	4,461E-06	9,723E-07	8,620E-05
55,5	4,017E-06	8,760E-07	7,757E-05
56	3,570E-06	7,773E-07	6,909E-05
56,5	3,124E-06	6,795E-07	6,049E-05
57	2,676E-06	5,824E-07	5,182E-05
57,5	2,226E-06	4,841E-07	4,311E-05
58	1,783E-06	3,878E-07	3,451E-05
58,5	1,334E-06	2,900E-07	2,585E-05
59	8,900E-07	1,935E-07	1,724E-05
59,5	4,439E-07	9,639E-08	8,605E-06
60	2,416E-13	9,539E-13	2,260E-11
60,5	4,427E-07	9,605E-08	8,585E-06
61	8,829E-07	1,914E-07	1,713E-05
61,5	1,325E-06	2,872E-07	2,570E-05
62	1,762E-06	3,815E-07	3,421E-05
62,5	2,203E-06	4,774E-07	4,277E-05
63	2,639E-06	5,711E-07	5,127E-05
63,5	3,080E-06	6,667E-07	5,982E-05
64	3,514E-06	7,598E-07	6,830E-05
64,5	3,953E-06	8,551E-07	7,683E-05
65	4,393E-06	9,505E-07	8,535E-05
Limite	0,005	0,01	0,1

Fonte: Autoria própria

5.3.2 Teste de magnitude de tensão – caso sem ruído

Alterou-se a tensão de 0,8 a 1,2 pu no Tipo P e de 0,1 a 1,2 pu para o tipo M. Em ambos os casos, segundo a norma, observa-se somente o valor de TVE. O valor do erro encontrado é ínfimo se comparado ao limite e é considerado desprezível.

Tabela 10 – Medições de magnitude de tensão do tipo P no caso sem ruído

Teste de Magnitude de Tensão	
Tensão (pu)	TVE
0,8	9,5401E-13
0,9	9,5395E-13
1	9,5391E-13
1,1	9,5396E-13
1,2	9,54E-13
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 – Medições de magnitude de tensão do tipo M no caso sem ruído

Teste de Magnitude de Tensão	
Tensão (pu)	TVE
0,1	9,540E-13
0,2	9,540E-13
0,3	9,540E-13
0,4	9,540E-13
0,5	9,540E-13
0,6	9,540E-13
0,7	9,540E-13
0,8	9,540E-13
0,9	9,540E-13
1	9,539E-13
1,1	9,540E-13
1,2	9,538E-13
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

5.3.3 Teste de ângulo de fase – caso sem ruído

Tanto para P e M os testes são iguais, fazendo-se a variação em 180°.

Tabela 12 – Medições de ângulo de fase no caso sem ruído

Teste de ângulo de Fase	
Ângulo	TVE
0	9,54E-13
180	0,0013
-180	0,0013
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

5.3.4 Teste de distorção harmônica – caso sem ruído

No teste para o tipo P é aplicado 1% da magnitude em cada harmônica até a 50ª, e em M, faz-se 10%. Como os valores encontrados em ambos os tipos foram aproximadamente iguais, a Tabela 13 apresenta somente o de Tipo P, com os limites diferenciados nas últimas linhas.

Tabela 13 – Medições de distorção harmônica no caso sem ruído

Distorção Harmônica				27	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
Harmônica	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)	28	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
1	2,416E-13	9,539E-13	2,260E-11	29	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
2	2,416E-13	9,539E-13	2,260E-11	30	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
3	2,416E-13	9,539E-13	2,260E-11	31	2,416E-09	9,537E-13	2,260E-11
4	2,416E-13	9,539E-13	2,260E-11	32	2,416E-09	9,537E-13	2,260E-11
5	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	33	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
6	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	34	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
7	2,416E-13	9,539E-13	2,260E-11	35	2,274E-13	9,539E-13	2,260E-11
8	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	36	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
9	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	37	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
10	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	38	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
11	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	39	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
12	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	40	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
13	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	41	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
14	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	42	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
15	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	43	2,274E-13	9,539E-13	2,260E-11
16	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	44	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
17	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	45	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
18	2,274E-13	9,539E-13	2,260E-11	46	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
19	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	47	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
20	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	48	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
21	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	49	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11
22	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	50	2,416E-09	9,537E-13	2,260E-11
23	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11				
24	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11				
25	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	Limite P	0,005	0,01	0,4
26	2,416E-09	9,539E-13	2,260E-11	Limite M	0,005	0,01	0,1

Fonte: Autoria própria

5.3.5 Teste de interferência fora de banda – caso sem ruído

Conforme explicado na subseção 3.4.1 aplicou-se o sinal de 10 e 120 Hz (segunda harmônica), por serem os limites indicados, utilizando-se as frequências segundo a equação explicitada na Equação 15, de 57, 60 e 63 Hz. Vale ressaltar que somente o Tipo M é avaliado neste teste. Este ensaio apresentou valores acima do esperado tanto para FE como para o TVE, conforme mostrado na tabela abaixo.

Tabela 14 – Medições do teste fora de banda a no caso sem ruído

Testes Fora de Faixa		
Frequências	FE	TVE
57 Hz 10Hz	0,1178	0,0373
57 Hz 120Hz	0,0254	0,0127
60 Hz 10Hz	0,0632	0,034
60 Hz 120Hz	2,63E-13	4,14E-13
63 Hz 10Hz	0,0808	0,0317
63 Hz 120Hz	0,0543	0,0162
Limite	0,01	0,013

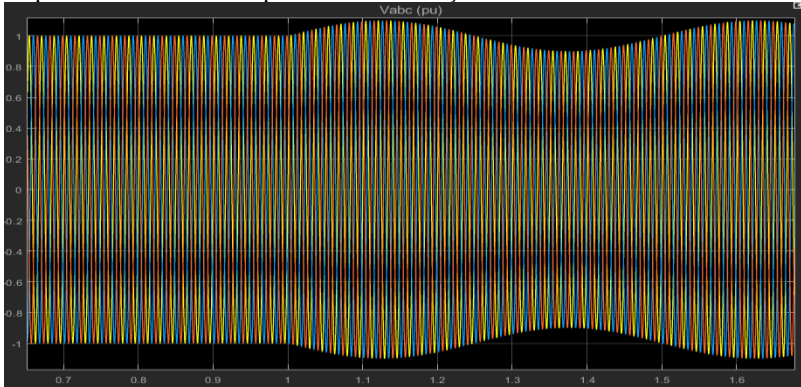
Fonte: Autoria própria

5.3.6 Teste de modulação– caso sem ruído

5.3.6.1 Teste de modulação de amplitude– caso sem ruído

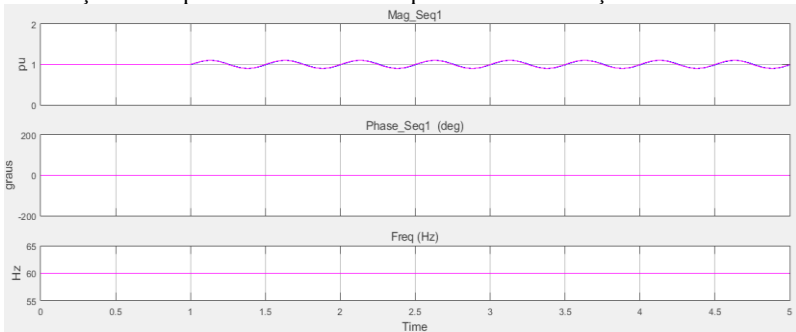
O primeiro teste dinâmico é o de modulação de amplitude, onde uma modulação no tempo de 1s, com o valor de 0,1 foi aplicada na amplitude do gerador síncrono variando a frequência de modulação de 0,1 a 2 Hz no Tipo P, e de 0,1 a 5 Hz no Tipo M. As Tabelas 15 e 16 apresentam as medições para o teste em 1s. Observa-se que para FE e RFE os erros são desprezíveis, porém para TVE, os valores, ainda que estejam dentro do limite, são mais suscetíveis às mudanças aplicadas.

Figura 22 – Medição gráfica do sinal abc da fonte quando da modulação de amplitude em 1s com frequência de modulação de 2 Hz



Fonte: Autoria própria

Figura 23 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando da modulação de amplitude em 1s com frequência de modulação de 2 Hz



Fonte: Autoria própria

Tabela 15 – Medições do teste de modulação de amplitude do Tipo P no caso sem ruído

Mod da Freq	Modulação de Amplitude		
	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
0,1	2,274E-13	5,40E-04	2,260E-11
0,3	2,274E-13	0,0016	2,260E-11
0,5	2,416E-13	0,0027	2,260E-11
0,7	2,416E-13	0,0038	2,345E-11
0,9	2,487E-13	0,0049	2,345E-11
1,1	2,274E-13	0,006	2,260E-11
1,3	2,487E-13	0,0071	2,260E-11
1,5	2,274E-13	0,0082	2,260E-11
1,7	2,274E-13	0,0093	2,260E-11
1,9	2,274E-13	0,0104	2,260E-11
2	2,274E-13	0,0109	2,260E-11
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 16 – Medições do teste de modulação de amplitude do tipo M no caso sem ruído

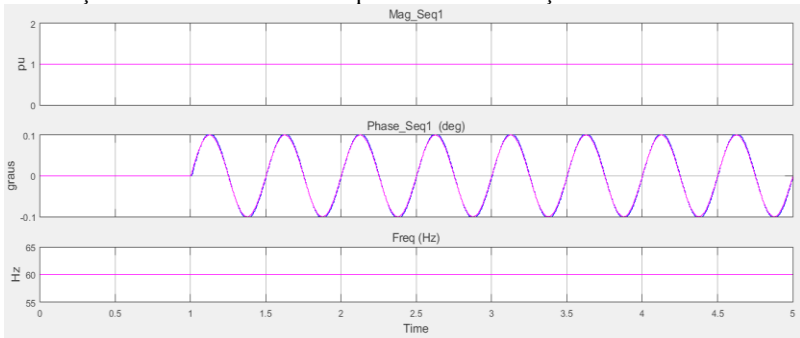
Modulação de Amplitude			
Mod da Freq	FE	TVE	RFE
0,1	2,274E-13	5,400E-04	2,260E-11
0,3	2,274E-13	0,0016	2,260E-11
0,5	2,416E-13	0,0027	2,260E-11
0,7	2,416E-13	0,0038	2,345E-11
0,9	2,487E-13	0,0049	2,345E-11
1,1	2,274E-13	0,006	2,260E-11
1,3	2,487E-13	0,0071	2,260E-11
1,5	2,274E-13	0,0082	2,260E-11
1,7	2,274E-13	0,0093	2,260E-11
1,9	2,274E-13	0,0104	2,260E-11
2,1	2,274E-13	0,0109	2,260E-11
2,3	2,274E-13	0,0126	2,345E-11
2,5	2,487E-13	0,0136	2,345E-11
2,7	2,274E-13	0,0148	2,174E-11
2,9	2,416E-13	0,0159	2,260E-11
3,1	2,487E-13	0,017	2,260E-11
3,3	2,274E-13	0,0181	2,174E-11
3,5	2,487E-13	0,0192	2,260E-11
3,7	2,274E-13	0,0203	2,260E-11
3,9	2,487E-13	0,0214	2,260E-11
4,1	2,274E-13	0,0224	2,260E-11
4,3	2,274E-13	0,0236	2,260E-11
4,5	2,274E-13	0,0246	2,260E-11
4,7	2,274E-13	0,0258	2,345E-11
4,9	2,274E-13	0,0268	2,174E-11
5	2,416E-13	0,0265	2,260E-11
Limite	0,03	0,3	14

Fonte: Autoria própria

5.3.6.2 Teste de modulação de fase – caso sem ruído

As mesmas modulações da subseção 5.3.6.1 são feitas neste teste, entretanto a modulação de 0,1 é aplicada na fase e não na amplitude. Como visto na Tabela 17 e 18 todos os limites foram respeitados, porém é possível notar como FE e RFE se comportam frente à variação de fase se comparado ao teste anterior quando seus erros foram desprezíveis.

Figura 24 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando da modulação de fase em 1s com Frequência de Modulação de 2 Hz.



Fonte: Autoria própria

Tabela 17 – Medições do teste de modulação de fase do tipo P no caso sem ruído

Modulação de Fase			
Mod da Freq	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
0,1	2,05E-04	6,35E-06	0,0064
0,3	6,14E-04	1,91E-05	0,0193
0,5	1,00E-03	3,17E-05	0,0321
0,7	1,40E-03	4,44E-05	0,0448
0,9	1,80E-03	5,70E-05	0,0574
1,1	2,20E-03	6,96E-05	0,0699
1,3	2,60E-03	8,21E-05	0,0821
1,5	3,00E-03	9,45E-05	0,0942
1,7	3,40E-03	1,07E-04	0,106
1,9	3,80E-03	1,19E-04	0,1175
2	4,00E-03	1,25E-04	0,1231
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 – Medições do teste de modulação de fase do tipo M no caso sem ruído

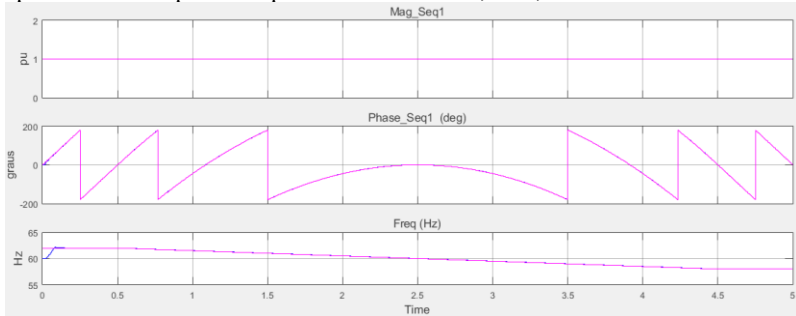
Modulação de Fase			
Mod da Freq	FE	TVE	RFE
0,1	2,049E-04	6,353E-06	0,0064
0,3	6,144E-04	1,905E-05	0,0193
0,5	0,001	3,174E-05	0,0321
0,7	0,0014	4,439E-05	0,0448
0,9	0,0018	5,701E-05	0,0574
1,1	0,0022	6,957E-05	0,0699
1,3	0,0026	8,207E-05	0,0821
1,5	0,003	9,449E-05	0,0942
1,7	0,0034	0,000107	0,106
1,9	0,0038	1,191E-04	0,1175
2,1	0,0038	8,239E-05	0,0503
2,3	0,0042	9,646E-05	0,0607
2,5	0,0046	1,103E-04	0,0719
2,7	0,005	1,262E-04	0,0845
2,9	0,0054	1,418E-04	0,0979
3,1	0,0058	1,576E-04	0,1123
3,3	0,0062	1,737E-04	0,1278
3,5	0,0066	1,900E-04	0,1442
3,7	0,007	2,064E-04	0,1617
3,9	0,0074	2,230E-04	0,1802
4,1	0,0078	2,397E-04	0,1996
4,3	0,0082	2,563E-04	0,2201
4,5	0,0086	2,723E-04	0,2415
4,7	0,009	2,897E-04	0,2638
4,9	0,0094	3,063E-04	0,2872
5	0,0095	3,144E-04	0,2938
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

5.3.7 Teste de rampa – caso sem ruído

O teste dinâmico de rampa consiste em aplicar uma rampa de frequência na taxa de 1 Hz/s variando como positivo e negativo com o intervalo especificado na norma. Para o tipo P foi aplicada uma rampa de 0,5 a 4,5 s tendo em vista que a mesma deve ir de 58 a 62 Hz com um intervalo de exclusão (explicado na subsecção 3.4.2) de 58,033 Hz a 61,967 Hz. A rampa no tipo M tem intervalo de 55 a 65 Hz e para tal foi inserida no tempo de 0,5 a 10,5 s, com intervalo relativo de 55,117 Hz a 64,883 Hz.

Figura 25 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado um rampa de frequência de -1Hz de 0,5 a 4,5s



Fonte: Autoria própria

Tabela 19 – Medições do teste de rampa do tipo P de 0,5 a 4,5s no caso sem ruído

Teste de Rampa			
Fator da Rampa	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
+1Hz	0,0138	0,002	0,0787
-1Hz	0,0138	0,002	0,0777
Limite	0,01	0,01	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 20 – Medições do teste de rampa do tipo M de 0,5 a 10,5s no caso sem ruído

Teste de Rampa			
Fator da Rampa	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
+1Hz	0,0099	0,002	0,0144
-1Hz	0,0099	0,002	0,0132
Limite	0,01	0,01	0,2

Fonte: Autoria própria

Nota-se que para o primeiro caso o FE passou por muito pouco dos limites estabelecidos em norma, e no tipo M, ainda que não tenha passado, ficou exatamente no valor máximo. É possível analisar que mesmo com o intervalo de exclusão, este não foi suficiente para chegar-se à estabilização do sistema o que causou medições com valor acima do recomendado.

5.3.8 Teste de degrau – caso sem ruído

Segundo [8] os tempos de resposta e atraso são pequenos se comparados ao intervalo de reporte da PMU e seria improvável que os pontos amostrados fossem medidos corretamente, para corrigir esse problema é indicado que se faça uma série de testes com o degrau aplicado em tempos diferentes. O método proposto consiste em mover os degraus em uma fração do tempo simulado seguindo a equação: $f_1(t_t + (n - 1)T/n)$, onde t_t é o tempo inicial de aplicação do degrau, n é o número de testes, que a norma recomenda $n=10$, e T é o *reporting interval*, $T_s=1/60$. Ou seja, as amostras são obtidas do degrau aplicado 10 vezes em instantes variados de tempo muito próximos e equidistantes do anterior. Os pontos devem ser intercalados, combinados e alinhados no mesmo instante inicial de aplicação. O algoritmo no Apêndice A foi desenvolvido para aplicação deste método.

No que diz respeito aos testes realizados, foi inserido $\pm 10\%$ de amplitude e de ângulo em seus testes correspondentes. Os gráficos obtidos e analisados, a fim de encontrar as medições desejadas, são demonstrados adiante juntamente com as tabelas de valores respectivos a cada critério. Cabe salientar, no entanto, que alguns valores, apresentados com N/A possuíam gráficos com valores muito próximos a 0 e, portanto, não possuíam as curvas características para análise gráfica.

As Figuras 26, 27, 28 demonstram o comportamento das grandezas analisadas quando da aplicação do degrau de magnitude, e as Figuras 29, 30 e 31 correspondem à aplicação do degrau de fase. Através destes gráficos os valores das Tabelas 21 e 22 foram obtidos conforme explicado na subseção 3.4.2. Da Figura 29, é possível observar como a *overshoot* da Tabela 22 ultrapassa o valor limite tanto para o tipo P como o tipo M.

Tabela 21 – Medições do teste de degrau de amplitude no caso sem ruído

Teste de Degrau					
Amplitude	Delay Time	Overshoot Max	Tempo de Resposta TVE (s)	Tempo de Resposta FE (s)	Tempo de Resposta ROCOF (s)
0.1	0,0007	-0,0008		0,018 N/A	N/A
-0.1	0,0007	0,00078		0,018 N/A	N/A
Limite	0,00416667	P: 0,005 M: 0,01	Tipo P -0,033 Tipo M -0,1167	P: 0,075 M: 0,233	P: 0,1 M: 0,233

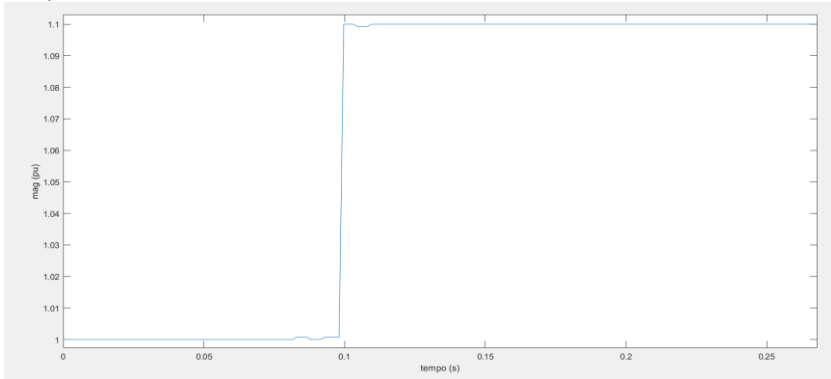
Fonte: Autoria própria

Tabela 22 – Medições do teste de degrau de fase no caso sem ruído

Teste de Degrau					
Fase	Delay Time	Overshoot Max	Tempo de Resposta TVE (s)	Tempo de Resposta FE (s)	Tempo de Resposta ROCOF (s)
10°	0,00068	3,5	0,01	0,12	P: 0,07 M: 0,15
-10°	0,00068	3,5	0,01	0,12	P: 0,07 M: 0,15
Limite	0,00416667	P: 0,005 M: 0,01	Tipo P -0,033 Tipo M -0,1167	P: 0,075 M: 0,233	P: 0,1 M: 0,233

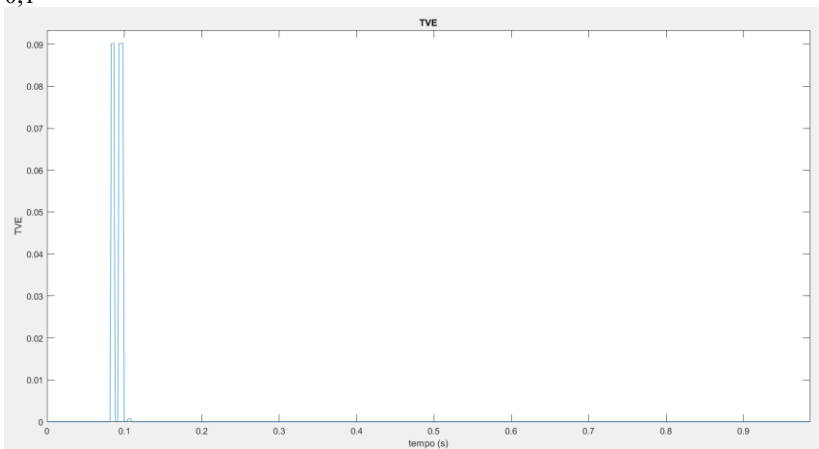
Fonte: Autoria própria

Figura 26 – Medição gráfica da tensão quando aplicado um degrau de magnitude de 0,1



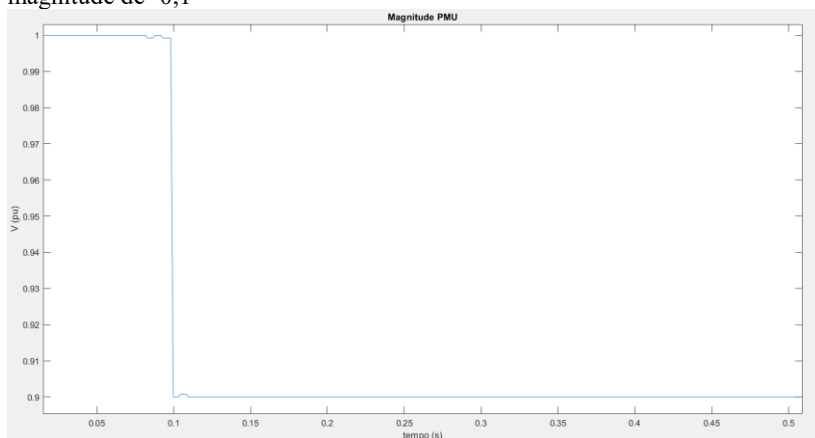
Fonte: Autorial própria

Figura 27 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de magnitude 0,1



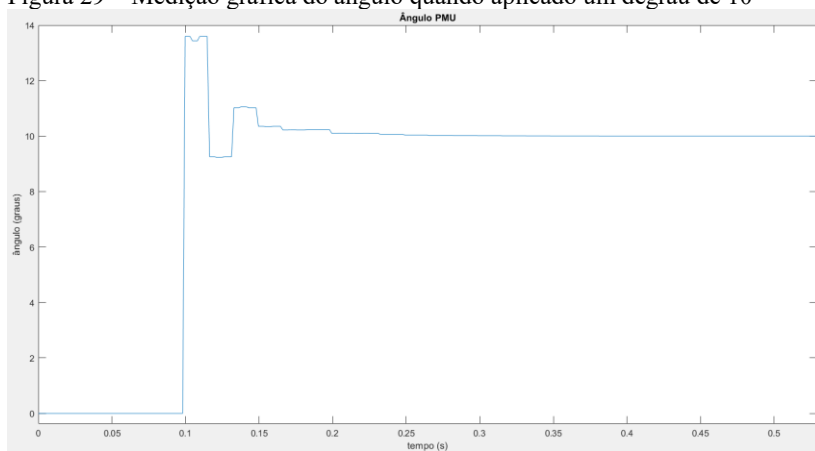
Fonte: Autorial própria

Figura 28 – Medição gráfica de magnitude quando aplicado um degrau de magnitude de -0,1



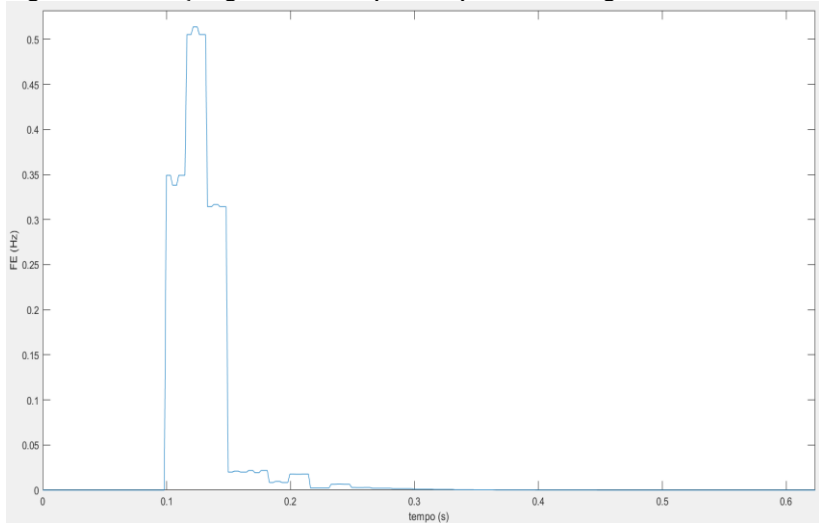
Fonte: Autoria própria

Figura 29 – Medição gráfica do ângulo quando aplicado um degrau de 10°



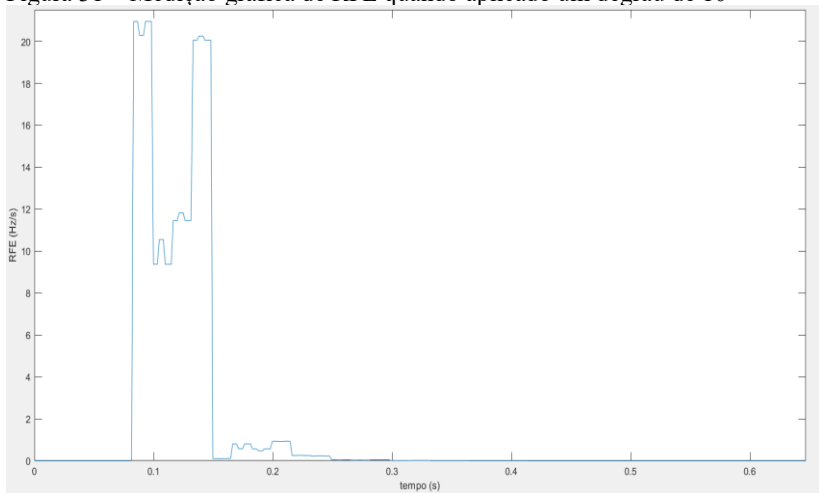
Fonte: Autoria própria

Figura 30 – Medição gráfica de FE quando aplicado um degrau de 10°



Fonte: Autoria própria

Figura 31 – Medição gráfica de RFE quando aplicado um degrau de 10°



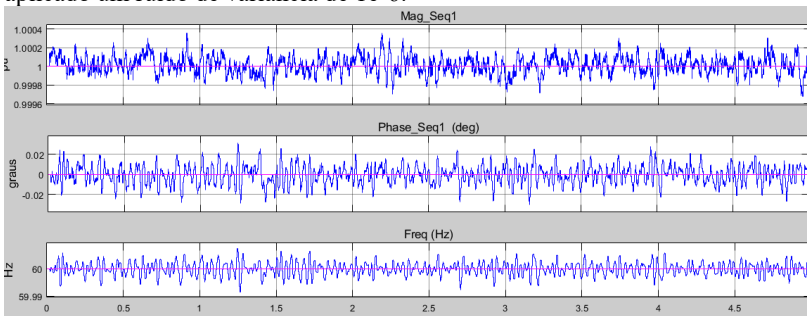
Fonte: Autoria própria

5.4 CASO 2: CONDIÇÃO COM RUÍDO DE BAIXA VARIÂNCIA

Para ambos os casos de ruído, foi inserido o bloco de AWGN que gera um ruído branco gaussiano ao sinal de entrada. A vantagem é a possibilidade de reutilizar o mesmo ruído gerado toda vez que a simulação for rodada. O modo escolhido para as simulações foi o de *Variance from mask* quer permite ao usuário inserir a variância desejada.

Para o Caso 1, a variância é de $1e-6$. Os mesmos testes foram realizados e os resultados são demonstrados na sequência.

Figura 32 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado um ruído de variância de $1e-6$.



Fonte: Autoria própria

5.4.1 Teste de faixa de frequência – caso com ruído de baixa variância

Como observado nas Tabelas 23 e 24, os valores de RFE foram muito acima do limite estipulado em norma, isso está atrelado ao fato de que a variação do ruído nesta variância certamente impactou no cálculo das derivadas que compõem o RFE.

Tabela 23 – Medições do teste de faixa de frequência do tipo P no caso com ruído de baixa variância

Faixa de Frequência			
Frequência	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
58	0,009	5,490E-04	0,9767
58,5	0,0064	5,203E-04	0,706
59	0,0059	4,749E-04	0,7013
59,5	0,0062	4,222E-04	0,6872
60	0,0079	4,086E-04	0,8614
60,5	0,0063	4,365E-04	0,7207
61	0,0058	4,313E-04	0,615
61,5	0,0066	5,183E-04	0,7403
62	0,0067	5,774E-04	0,7315
Limite	0,005	0,01	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 24 – Medições do teste de faixa de frequência do tipo M no caso com ruído de baixa variância

Faixa de Frequência			
Frequência (Hz)	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
55	0,0068	4,299E-04	0,7885
55,5	0,0077	4,985E-04	0,8794
56	0,0094	5,273E-04	1,0087
56,5	0,0063	5,159E-04	0,7363
57	0,0063	5,220E-04	0,6887
57,5	0,0063	5,410E-04	0,6754
58	0,009	5,490E-04	0,9767
58,5	0,0064	5,203E-04	0,706
59	0,0059	4,749E-04	0,7013
59,5	0,0062	4,222E-04	0,6872
60	0,0079	4,086E-04	0,8614
60,5	0,0063	4,365E-04	0,7207
61	0,0058	4,313E-04	0,615
61,5	0,0066	5,183E-04	0,7403
62	0,0067	5,774E-04	0,7315
62,5	0,0066	6,171E-04	0,7816
63	0,0067	5,892E-04	0,7552
63,5	0,0063	5,478E-04	0,7056
64	0,0058	4,954E-04	0,6281
64,5	0,0067	4,739E-04	0,7023
65	0,0065	5,463E-04	0,6643
Limite	0,005	0,01	0,1

Fonte: Autoria própria

5.4.2 Teste de magnitude de tensão – caso com ruído de baixa variância

Nos testes desta seção, os resultados estiveram dentro do esperado conforme as tabelas abaixo.

Tabela 25 – Medições do teste de magnitude de tensão do Tipo P no caso com ruído de baixa variância

Teste de Magnitude de Tensão	
Tensão (pu)	TVE
0,8	5,11E-04
0,9	4,54E-04
1	4,09E-04
1,1	3,71E-04
1,2	3,40E-04
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

Tabela 26 – Medições do teste de magnitude de tensão do Tipo M no caso com ruído de baixa variância

Teste de Magnitude de Tensão	
Tensão (pu)	TVE
0,1	0,0041
0,2	0,002
0,3	0,0014
0,4	0,001
0,5	8,17E-04
0,6	6,81E-04
0,7	5,84E-04
0,8	5,11E-04
0,9	4,54E-04
1	4,09E-04
1,1	3,71E-04
1,2	3,40E-04
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

5.4.3 Teste de ângulo de fase – caso com ruído de baixa variância

Da Tabela 27, observa-se que o TVE obtido para o ângulo de referência é desprezível, conforme esperado, e para os valores de 180° e -180° , o erro está dentro do limite com certa margem de folga.

Tabela 27 – Medições do teste de ângulo de fase no caso com ruído de baixa variância

Teste de ângulo de Fase	
Ângulo	TVE
0	9,54E-13
180	4,23E-04
-180	4,23E-04
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

5.4.4 Teste de distorção harmônica – caso com ruído de baixa variância

Tendo em vista que em todas as harmônicas analisadas o valor foi o mesmo, a Tabela 28 apresenta a medição de uma delas. Há de se ressaltar que tanto o valor de FE, como de RFE ultrapassaram os limites impostos em P, apesar de em M não haver limite para RFE, segundo [11]. Isso certamente é afetado pela leitura interferida pelo ruído.

Tabela 28 – Medições de distorção harmônica no caso com ruído de baixa variância

Distorção Harmônica			
Harmônica	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
2	7,900E-03	4,086E-04	8,614E-01
Limite	0,005	0,01	0,4
Limite	0,005	0,01	Sem limite

Fonte: Autoria própria

5.4.5 Teste de interferência fora de banda – caso com ruído de baixa variância

Observa-se que os valores continuam acima do limite (Tabela 29), como esperado, entretanto, a diferença para o Caso 1 não é tão grande, ou seja, a influência do ruído não fez muita diferença quando verificado o filtro *anti-aliasing* conforme o objetivo do ensaio.

Tabela 29 – Medições do teste fora de banda no caso com ruído de baixa variância

Testes Fora de Faixa		
Frequências	FE	TVE
57 Hz 10Hz	0,1223	0,0375
57 Hz 120Hz	0,0359	0,0129
60 Hz 10Hz	0,0736	0,0344
60 Hz 120Hz	8,70E-03	4,42E-04
63 Hz 10Hz	0,079	0,0319
63 Hz 120Hz	0,0603	0,0164
Limite	0,01	0,013

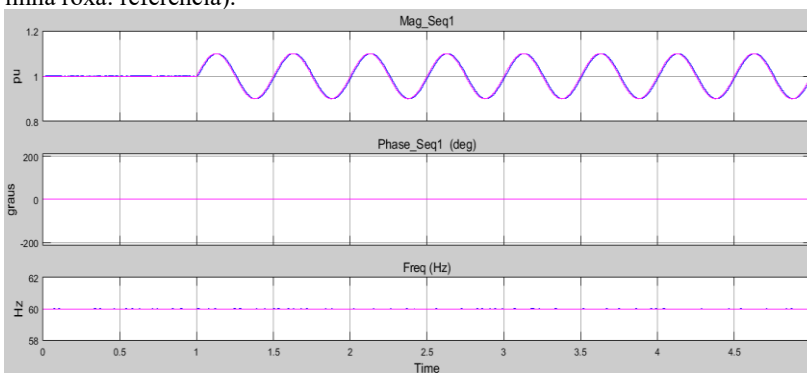
Fonte: Autoria própria

5.4.6 Teste de modulação– caso com ruído de baixa variância

5.4.6.1 Teste de modulação de amplitude– caso com ruído de baixa variância

No que diz respeito ao presente ensaio, a Figura 33 representa os dados medidos diretamente da PMU. Observa-se uma pequena diferença na leitura da PMU com relação à referência, contudo isto não afeta no limite máximo de erro especificado. As Tabelas 30 e 31 especificam os valores medidos dos erros analisados.

Figura 33 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de amplitude de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no caso com ruído de baixa variância (linha amarela: medição da PMU, linha roxa: referência).



Fonte: Autoria própria

Tabela 30 – Medições do teste de modulação de amplitude para o tipo P no caso com ruído de baixa variância

Modulação de Amplitude			
Freq da Mod	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
0,1	7,500E-03	7,222E-04	8,241E-01
0,3	7,200E-03	0,0018	7,840E-01
0,5	7,400E-03	0,0029	8,039E-01
0,7	8,000E-03	0,0039	8,738E-01
0,9	8,700E-03	0,0051	9,446E-01
1,1	8,600E-03	0,0061	9,466E-01
1,3	8,000E-03	0,0074	8,775E-01
1,5	7,400E-03	0,0083	8,063E-01
1,7	7,200E-03	0,0094	7,838E-01
1,9	7,600E-03	0,0105	8,213E-01
2	7,780E-03	0,011	8,233E-01
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 31 – Medições do teste de modulação de amplitude para o tipo M no caso com ruído de baixa variância

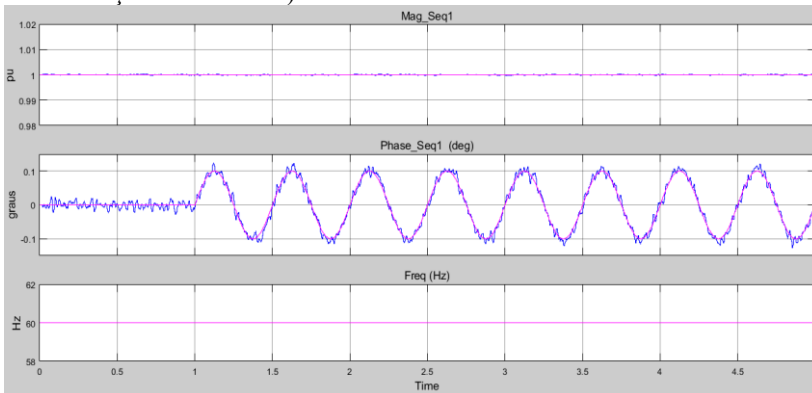
Modulação de Amplitude			
Mod da Freq	FE	TVE	RFE
0,1	7,500E-03	7,222E-04	8,241E-01
0,3	7,200E-03	0,0018	7,840E-01
0,5	7,400E-03	0,0029	8,039E-01
0,7	8,000E-03	0,0039	8,738E-01
0,9	8,700E-03	0,0051	9,446E-01
1,1	8,600E-03	0,0061	9,466E-01
1,3	8,000E-03	0,0074	8,775E-01
1,5	7,400E-03	0,0083	8,063E-01
1,7	7,200E-03	0,0094	7,838E-01
1,9	7,600E-03	0,0105	8,213E-01
2,1	8,300E-03	0,0115	8,983E-01
2,3	8,800E-03	0,0128	9,541E-01
2,5	8,500E-03	0,0138	9,301E-01
2,7	7,700E-03	0,0148	8,532E-01
2,9	7,200E-03	0,0159	7,938E-01
3,1	7,300E-03	0,0171	7,897E-01
3,3	7,800E-03	0,0182	8,426E-01
3,5	8,500E-03	0,0193	9,198E-01
3,7	8,700E-03	0,0206	9,543E-01
3,9	8,200E-03	0,0215	9,089E-01
4,1	7,500E-03	0,0226	8,316E-01
4,3	7,200E-03	0,0237	7,873E-01
4,5	7,400E-03	0,0247	8,013E-01
4,7	8,100E-03	0,0259	8,657E-01
4,9	8,700E-03	0,0269	9,361E-01
5	9,100E-03	0,0266	9,751E-01
Limite	0,03	0,3	14

Fonte: Autoria própria

5.4.6.2 Teste de modulação de fase – caso com ruído de baixa variância

Assim como na seção anterior, da Figura 34 observa-se a diferença de leitura, neste caso, da fase, devido ao ruído implementado. As Tabelas 32 e 33 representam os erros obtidos.

Figura 34 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de fase de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no caso com ruído de baixa variância (linha amarela: medição PMU e linha roxa: medição da referência).



Fonte: Autoria própria

Tabela 32 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo P no caso com ruído de baixa variância

Modulação de Fase			
Freq da Mod	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
0,1	7,700E-03	4,086E-04	0,8613
0,3	7,800E-03	4,102E-04	0,8621
0,5	0,0085	4,137E-04	0,8653
0,7	0,0091	4,101E-04	0,863
0,9	0,0086	4,203E-04	0,8561
1,1	0,0072	4,297E-04	0,8478
1,3	0,0086	4,219E-04	0,8495
1,5	0,0084	4,377E-04	0,87
1,7	0,009	4,61E-04	0,8927
1,9	0,0111	4,668E-04	0,885
2	0,0116	4,51E-04	0,8686
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 33 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo M no caso com ruído de baixa variância

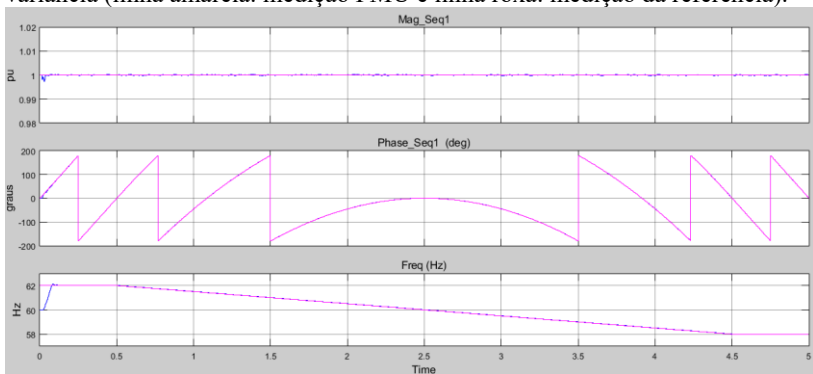
Modulação de Fase			
Freq da Mod	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
0,1	7,700E-03	4,086E-04	0,8613
0,3	7,800E-03	4,102E-04	0,8621
0,5	0,0085	4,137E-04	0,8653
0,7	0,0091	4,101E-04	0,863
0,9	0,0086	4,203E-04	0,8561
1,1	0,0072	4,297E-04	0,8478
1,3	0,0086	4,219E-04	0,8495
1,5	0,0084	4,377E-04	0,87
1,7	0,009	4,61E-04	0,8927
1,9	0,0111	4,668E-04	0,885
2	0,0116	4,51E-04	0,8686
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

5.4.7 Teste de rampa – caso com ruído de baixa variância

Como relatado, tanto para o Tipo P, como para o Tipo M, os valores de FE e RFE são maiores que o previsto (Tabela 34 e 35), assim como nos testes de rampa do Caso 1.

Figura 35 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma rampa de frequência -1Hz de 0,5 a 4,5s no caso com ruído de baixa variância (linha amarela: medição PMU e linha roxa: medição da referência).



Fonte: Autoria própria

Tabela 34 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo P no caso com ruído de baixa variância

Teste de Rampa			
Fator da Rampa	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
+1Hz	0,016	0,0025	0,7019
-1Hz	0,016	0,0025	0,7019
Limite	0,01	0,01	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 35 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo M no caso com ruído de baixa variância

Teste de Rampa			
Fator da Rampa	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
+1Hz	0,0182	0,0025	0,9541
-1Hz	0,0182	0,0025	0,9541
Limite	0,01	0,01	0,2

Fonte: Autoria própria

5.4.8 Teste de degrau – caso com ruído de baixa variância

Os ensaios realizados obtiveram resultados parecidos com os do Caso 1, porém é necessário mencionar que a presença do ruído nos gráficos dificultou a leitura e em alguns casos não foi possível medir, por exemplo, o *overshoot* do teste de degrau de amplitude. As Figuras 36 e 37 apresentam o gráfico de magnitude e TVE, respectivamente, quando aplicado o degrau de amplitude. Nas Figuras 38, 39 e 40 está demonstrado o comportamento no degrau de fase e pode-se notar a influência do ruído nos gráficos e como o tempo de resposta de FE passou do limite esperando no Tipo P, conforme Tabela 37.

Tabela 36 – Medições do teste de degrau de amplitude no caso com ruído de baixa variância

Teste de Degrau					
Amplitude	Delay Time	Overshoot Max	Tempo de Resposta TVE (s)	Tempo de Resposta FE (s)	Tempo de Resposta ROCOF (s)
0.1	0,0007	N/A	0,018	N/A	N/A
-0.1	0,0007	N/A	0,018	N/A	N/A
Limite	0,00416667	P: 0,005 M: 0,01	Tipo P -0,033 Tipo M-0,1167	P: 0,075 M: 0,233	P: 0,1 M: 0,233

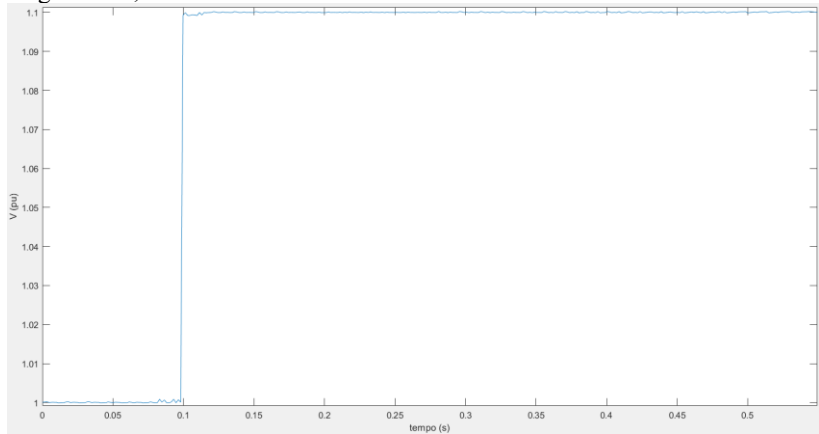
Fonte: Autoria própria

Tabela 37 – Medições do teste de degrau de fase no caso com ruído de baixa variância

Teste de Degrau					
Fase	Delay Time	Overshoot Max	Tempo de Resposta TVE (s)	Tempo de Resposta FE (s)	Tempo de Resposta ROCOF (s)
10°	0,00069	3,64	0,01	0,115	P: 0,078 M: 0,16
-10°	0,00069	3,64	0,01	0,115	P: 0,078 M: 0,16
Limite	0,00416667	P: 0,005 M: 0,01	Tipo P -0,033 Tipo M-0,1167	P: 0,075 M: 0,233	P: 0,1 M: 0,233

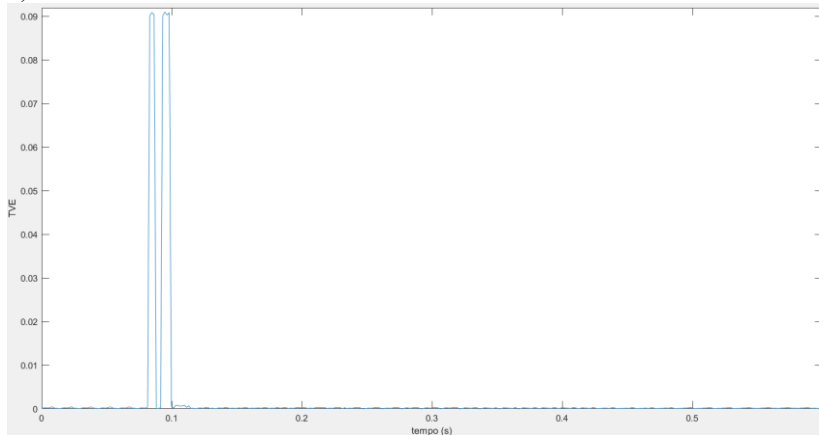
Fonte: Autoria própria

Figura 36 – Medição gráfica de magnitude quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com ruído de baixa variância



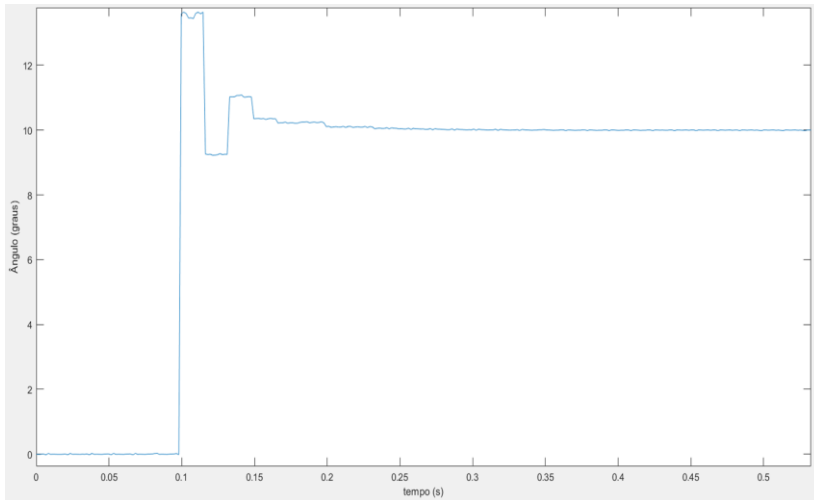
Fonte: Autoria própria

Figura 37 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com ruído de baixa variância



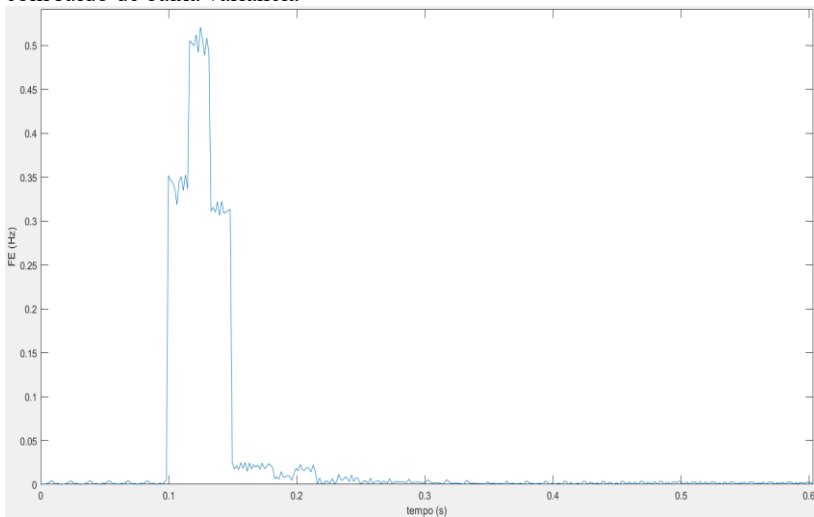
Fonte: Autoria própria

Figura 38 – Medição gráfica do ângulo quando aplicado um degrau de 10° no caso com ruído de baixa variância



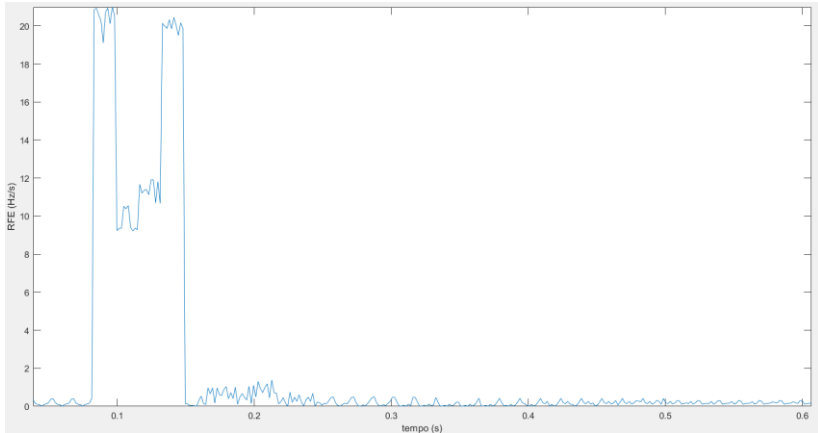
Fonte: Autoria própria

Figura 39 – Medição gráfica de FE quando aplicado um degrau de 10° no caso com ruído de baixa variância



Fonte: Autoria própria

Figura 40 – Medição gráfica de RFE quando aplicado um degrau de 10° no caso com ruído de baixa variância

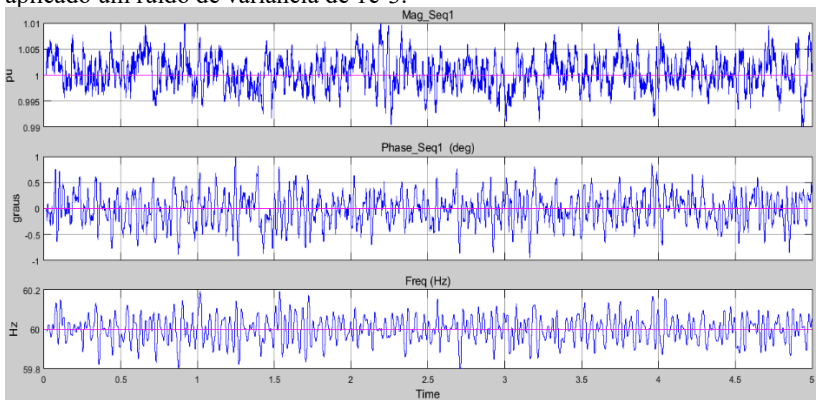


Fonte: Autoria própria

5.5 CASO 3: CONDIÇÃO COM RUÍDO DE ALTA VARIÂNCIA

Com o intuito de analisar os efeitos de um ruído com variância maior e sua influência na PMU, foi aplicado o mesmo AWGN do caso anterior, porém utilizou-se variância da ordem de $1e-3$. A Figura 41 demonstra como o ruído afeta a leitura da Unidade de Medição Fasorial.

Figura 41 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado um ruído de variância de $1e-3$.



Fonte: Autoria própria

5.5.1 Teste de faixa de frequência – caso com ruído de alta variância

Como será observado nos testes a seguir, os limites serão ultrapassados com recorrência. Certamente, as variações bruscas advindas do ruído gerado não são detectáveis pelo PLL e causam dificuldades nas medições.

As Tabelas 38 e 39 apresentam os valores, de FE, TVE e RFE para o teste desta seção. Ainda que TVE seja ultrapassado por pouco, tanto FE como RFE, principalmente, possuem valores altíssimos, demonstrando a influência da alta variância do ruído.

Tabela 38 – Medições do teste de faixa de frequência do Tipo P no caso com alta variância

Frequência	Faixa de Frequência		
	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
58	0,1707	0,0174	18,9877
58,5	0,1703	0,0164	18,0799
59	0,1747	0,0149	18,0067
59,5	0,1853	0,0133	17,1506
60	0,1954	0,013	18,8744
60,5	0,1913	0,0138	18,2728
61	0,2022	0,0136	18,8219
61,5	0,1876	0,0164	16,5018
62	0,2106	0,0182	17,3764
Limite	0,005	0,01	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 39 – Medições do teste de faixa de frequência do tipo M no caso com alta variância

Faixa de Frequência			
Frequência (Hz)	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
55	0,191	0,0136	20,8921
55,5	0,162	0,0157	16,9655
56	0,1787	0,0167	16,5016
56,5	0,1845	0,0165	21,6458
57	0,1838	0,0165	19,0988
57,5	0,1796	0,0171	20,2777
58	0,1707	0,0174	18,9877
58,5	0,1703	0,0164	18,0799
59	0,1747	0,0149	18,0067
59,5	0,1853	0,0133	17,1506
60	0,1954	0,013	18,8744
60,5	0,1913	0,0138	18,2728
61	0,2022	0,0136	18,8219
61,5	0,1876	0,0164	16,5018
62	0,2106	0,0182	17,3764
62,5	0,1786	0,0196	16,4671
63	0,1852	0,0188	17,2041
63,5	0,1637	0,0174	16,2423
64	0,18	0,0159	18,1515
64,5	0,1744	0,0151	17,2198
65	0,1895	0,0173	16,313
Limite	0,005	0,01	0,1

Fonte: Autoria própria

5.5.2 Teste de magnitude de tensão – caso com ruído de alta variância

Os testes apresentaram erro em todos os casos, o único que chegou mais próximo do limite foi de 1,2 pu, o que não era esperado, já que a PMU deveria ler sua tensão nominal com o mínimo de erro possível, porém a influência forte do ruído mais uma vez interferiu na medição apropriada e esperada.

Tabela 40 – Medições do teste de magnitude de tensão do tipo P no caso com alta variância

Teste de Magnitude de Tensão	
Tensão (pu)	TVE
0,8	0,0162
0,9	0,0144
1	0,013
1,1	0,0118
1,2	0,0108
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

Tabela 41 – Medições do teste de magnitude de tensão do tipo M no caso com alta variância

Teste de Magnitude de Tensão	
Tensão (pu)	TVE
0,1	0,1357
0,2	0,0665
0,3	0,0439
0,4	0,033
0,5	0,0264
0,6	0,022
0,7	0,0186
0,8	0,0162
0,9	0,0144
1	0,013
1,1	0,0118
1,2	0,0108
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

5.5.3 Teste de ângulo de fase - caso com ruído de alta variância

É interessante observar da Tabela 42, que diante do ruído inserido os valor medidos de TVE não sofreu alteração quando a fase é variada em 0 e 180°.

Tabela 42 – Medições do teste de ângulo de fase no caso com alta variância

Teste de ângulo de Fase	
Ângulo	TVE
0	0,013
180	0,0133
-180	0,0133
Limite	0,01

Fonte: Autoria própria

5.5.4 Teste de distorção harmônica – caso com ruído de alta variância

De modo semelhante ao Caso 2, foi observado a repetição dos valores nas demais harmônicas e, portanto, somente a de ordem 2 está representada adiante. No entanto, aqui, o TVE também foi ultrapassado, ainda que por uma margem baixa (Tabela 43).

Tabela 43 – Medições de distorção harmônica no caso com alta variância

Distorção Harmônica			
Harmônica	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
2	0,1954	0,013	18,8744
Limite	0,005	0,01	0,4
Limite	0,005	0,01	Sem limite

Fonte: Autoria própria

5.5.5 Teste de interferência fora de banda – caso com ruído de alta variância

No ensaio de interferência fora de banda, diferente do Caso 2, onde com 60 Hz o resultado ainda fora suficiente, aqui todos os cenários passaram por muito o limite máximo estipulado (Tabela 44).

Tabela 44 – Medições do teste fora de banda no caso com alta variância

Testes Fora de Faixa		
Frequências	FE	TVE
57 Hz 10Hz	0,2089	2,0217
57 Hz 120Hz	0,1903	2,0169
60 Hz 10Hz	0,2207	2,0204
60 Hz 120Hz	0,1876	2,0091
63 Hz 10Hz	0,1626	2,0232
63 Hz 120Hz	0,184	2,0145
Limite	0,01	0,013

Fonte: Autoria própria

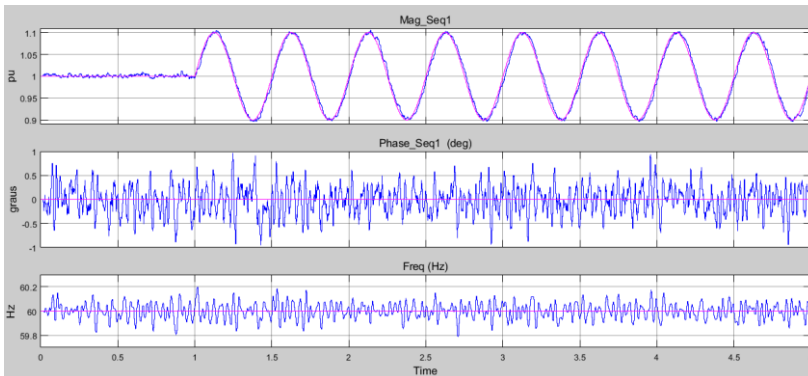
5.5.6 Teste de modulação– caso com ruído de alta variância

Comparando ao Caso 2, onde as medições estiveram dentro dos requisitos, no ambiente desta seção, tanto para a modulação de amplitude como de fase, as medidas de FE e RFE foram maiores que o máximo esperado e é possível perceber que o ruído impactou significativamente os erros advindos da PMU ao observar, por exemplo, como a variação do TVE na modulação de fase, mesmo dentro do limite, é ínfima.

5.5.6.1 Teste de modulação de amplitude - caso com ruído de alta variância

A Figura 42 apresenta a medição obtida da PMU com a modulação da amplitude, o ruído inserido e seu comportamento. Das Tabelas 45 e 46 observa-se, a ultrapassagem dos limites de FE e RFE com margens altíssimas de diferença.

Figura 42 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de amplitude de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no caso com alta variância



Fonte: Autoria própria

Tabela 45 – Medições do teste de modulação de amplitude para o Tipo P no caso com alta variância

Modulação de Amplitude				
Mod da Freq	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)	
0,1	0,1954	0,0129	18,68	
0,3	0,1953	0,0127	18,1504	
0,5	0,1953	0,0141	17,6916	
0,7	0,1952	0,0138	18,133	
0,9	0,1952	0,0141	18,6845	
1,1	0,1951	0,0138	18,5634	
1,3	0,195	0,016	18,762	
1,5	0,195	0,0157	18,855	
1,7	0,195	0,0158	18,8152	
1,9	0,1949	0,0189	19,052	
2	0,1948	0,0201	18,7145	
Limite	0,03	0,06	2,3	

Fonte: Autoria própria

Tabela 46 – Medições do teste de modulação de amplitude para o tipo M no caso com alta variância

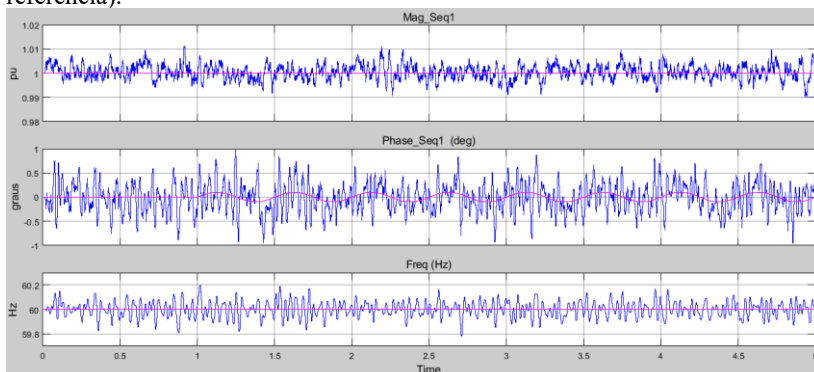
Modulação de Amplitude			
Mod da Freq	FE	TVE	RFE
0,1	0,1954	0,0129	18,68
0,3	0,1953	0,0127	18,1504
0,5	0,1953	0,0141	17,6916
0,7	0,1952	0,0138	18,133
0,9	0,1952	0,0141	18,6845
1,1	0,1951	0,0138	18,5634
1,3	0,195	0,016	18,762
1,5	0,195	0,0157	18,855
1,7	0,195	0,0158	18,8152
1,9	0,1949	0,0189	19,052
2,1	0,1948	0,0204	18,4753
2,3	0,1947	0,0197	17,9127
2,5	0,1947	0,0206	17,9398
2,7	0,1946	0,0211	17,8248
2,9	0,1946	0,0234	18,38
3,1	0,1945	0,0233	18,5695
3,3	0,1944	0,0255	18,7163
3,5	0,1946	0,0257	18,8213
3,7	0,1943	0,0264	18,9617
3,9	0,1943	0,0287	18,7907
4,1	0,1942	0,0306	18,4593
4,3	0,1942	0,0293	17,8782
4,5	0,1941	0,0306	17,8482
4,7	0,194	0,0337	17,7664
4,9	0,194	0,0337	17,9809
5	0,1939	0,0328	18,4633
Limite	0,03	0,3	14

Fonte: Autoria própria

5.5.6.2 Teste de modulação de fase - caso com ruído de alta variância

Esta seção apresenta o gráfico da PMU na modulação de fase (Figura 43), juntamente dos valores de TVE, FE e RFE (Tabelas 47 e 48), que foram muito semelhantes aos apresentados na seção anterior.

Figura 43 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma modulação de fase de 0,1 com frequência de modulação de 2 Hz em 1s no Caso 3 (linha amarela: medição PMU e linha roxa: medição da referência).



Fonte: Autoria própria

Tabela 47 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo P no caso com alta variância

Modulação de Fase			
Mod da Freq	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
0,1	0,1955	0,013	18,8697
0,3	0,1956	0,013	18,8625
0,5	0,1958	0,013	18,858
0,7	0,1959	0,013	18,877
0,9	0,196	0,013	18,8783
1,1	0,1961	0,013	18,8846
1,3	0,1963	0,013	18,8894
1,5	0,1964	0,013	18,8704
1,7	0,1965	0,013	18,8975
1,9	0,1966	0,013	18,87
2	0,1967	0,013	18,8752
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 48 – Medições do teste de modulação de fase para o tipo M no caso com alta variância

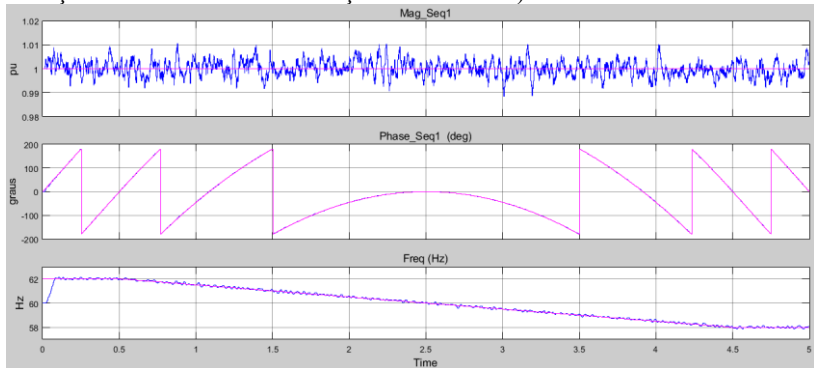
Modulação de Fase			
Mod da Freq	FE	TVE	RFE
0,1	0,1955	0,013	18,8697
0,3	0,1956	0,013	18,8625
0,5	0,1958	0,013	18,858
0,7	0,1959	0,013	18,877
0,9	0,196	0,013	18,8783
1,1	0,1961	0,013	18,8846
1,3	0,1963	0,013	18,8894
1,5	0,1964	0,013	18,8704
1,7	0,1965	0,013	18,8975
1,9	0,1966	0,013	18,87
2,1	0,1968	0,013	18,8846
2,3	0,1969	0,013	18,9276
2,5	0,197	0,013	18,8997
2,7	0,1971	0,0129	18,8715
2,9	0,1973	0,013	18,8735
3,1	0,1974	0,013	17,9946
3,3	0,1975	0,013	18,0013
3,5	0,1976	0,0131	18,7746
3,7	0,1977	0,0131	18,8274
3,9	0,1979	0,013	18,9205
4,1	0,198	0,013	19,0175
4,3	0,1981	0,0129	19,0479
4,5	0,1982	0,0129	18,9917
4,7	0,1984	0,013	18,0897
4,9	0,1985	0,0131	17,943
5	0,1985	0,0131	18,1398
Limite	0,03	0,06	2,3

Fonte: Autoria própria

5.5.7 Teste de rampa - caso com ruído de alta variância

Como esperado, mais uma vez, o teste de rampa não esteve dentro do limite explicitado (Tabela 49 e 50). O gráfico associado a este teste está representado na Figura 44.

Figura 44 – Medição gráfica da PMU de magnitude, fase e frequência quando aplicado uma rampa de frequência -1Hz de 0,5 a 4,5s no Caso 2 (linha azul: medição PMU e linha roxa: medição da referência).



Fonte: Autoria própria

Tabela 49 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo P no caso com alta variância

Teste de Rampa			
Fator da Rampa	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
+1Hz	0,1837	0,0194	17,3194
-1Hz	0,1837	0,0194	17,3194
Limite	0,01	0,01	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 50 – Medições do teste de rampa de frequência para o tipo M no caso com alta variância

Teste de Rampa			
Fator da Rampa	FE (Hz)	TVE	RFE (Hz/s)
+1Hz	0,2007	0,0193	20,2896
-1Hz	0,2007	0,0193	20,2896
Limite	0,01	0,01	0,2

Fonte: Autoria própria

5.5.8 Teste de degrau – caso com ruído de alta variância

Tanto para FE como para RFE não foi possível obter os valores gráficos devido à influência do ruído sobre o sinal medido, por isso as Tabelas 51 e 52 apresentam somente o Delay Time e os demais valores possuem N/A. Além disso, o Overshoot também não é claro no caso da análise da magnitude. Para ratificar a dificuldade de leitura devido à influência do ruído as Figuras 45 e 46 demonstram o gráfico com o degrau de amplitude, e as Figuras 47, 48, 49 e 50 indicam a medição quando da aplicação do degrau de fase.

Tabela 51 – Medições do teste de degrau de amplitude no caso com alta variância

Teste de Degrau					
Amplitude	Delay Time	Overshoot Max	Tempo de Resposta TVE (s)	Tempo de Resposta FE (s)	Tempo de Resposta ROCOF (s)
0.1	0,0007	N/A	N/A	N/A	N/A
-0.1	0,0007	N/A	N/A	N/A	N/A
Limite	0,00416667	P: 0,005 M: 0,01	Tipo P -0,033 Tipo M-0,1167	P: 0,075 M: 0,233	P: 0,1 M: 0,233

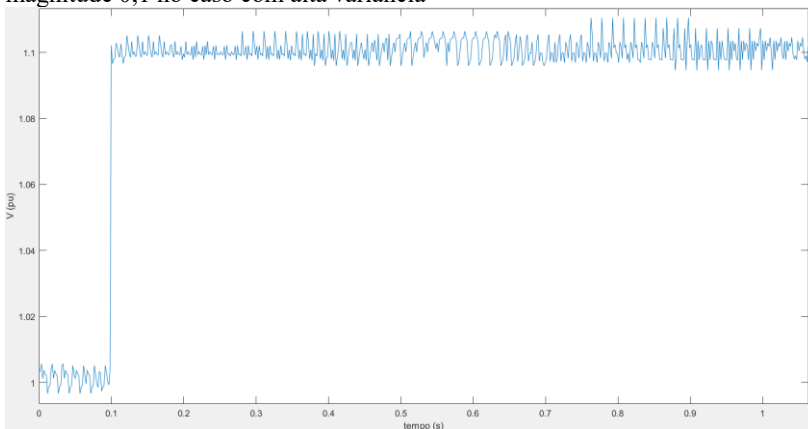
Fonte: Autoria própria

Tabela 52 – Medições do teste de degrau de fase no caso com alta variância

Teste de Degrau					
Fase	Delay Time	Overshoot Max	Tempo de Resposta TVE (s)	Tempo de Resposta FE (s)	Tempo de Resposta ROCOF (s)
10°	0,00066	N/A	N/A	N/A	N/A
-10°	0,00066	N/A	N/A	N/A	N/A
Limite	0,00416667	P: 0,005 M: 0,01	Tipo P -0,033 Tipo M-0,1167	P: 0,075 M: 0,233	P: 0,1 M: 0,233

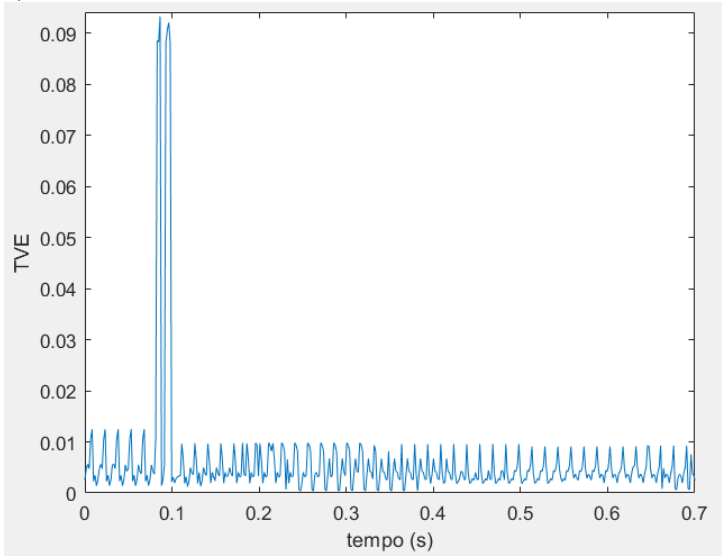
Fonte: Autoria própria

Figura 45 – Medição gráfica de magnitude quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com alta variância



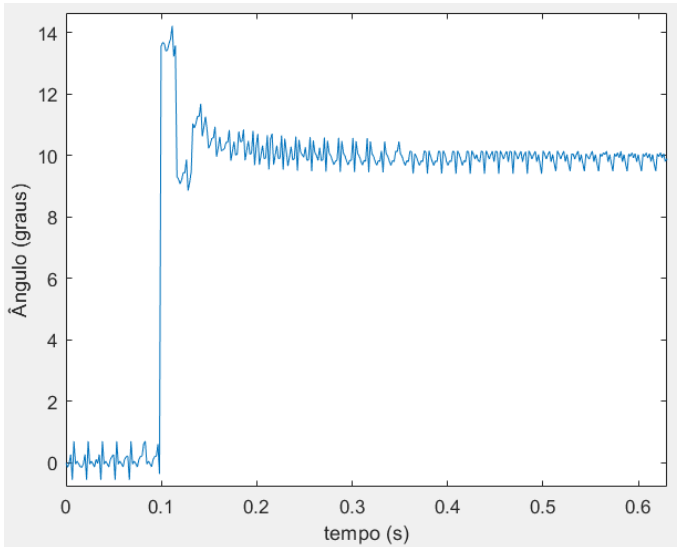
Fonte: Autoria própria

Figura 46 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de magnitude 0,1 no caso com alta variância



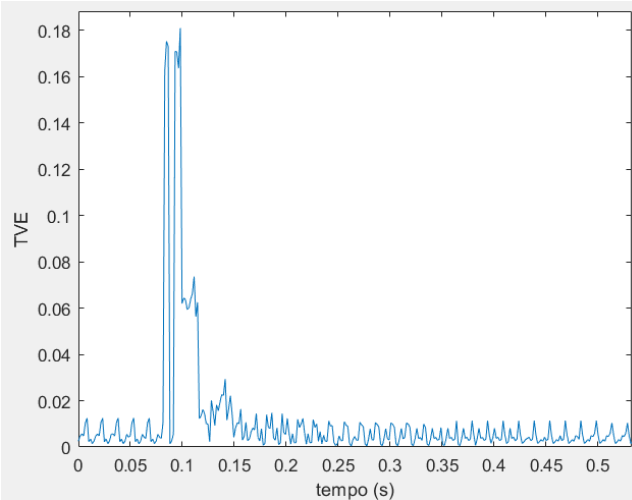
Fonte: Autoria própria

Figura 47 – Medição gráfica do ângulo quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância



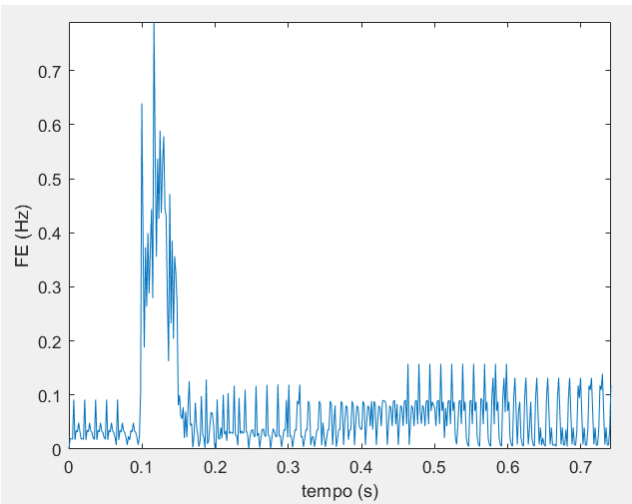
Fonte: Autoria própria

Figura 48 – Medição gráfica de TVE quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância



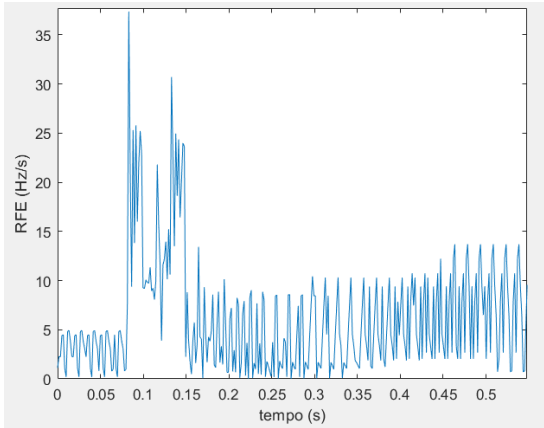
Fonte: Autoria própria

Figura 49 – Medição gráfica de FE quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância



Fonte: Autoria própria

Figura 50 – Medição gráfica de RFE quando aplicado um degrau de 10° no caso com alta variância



Fonte: Autoria própria

6 CONCLUSÃO

A implementação das Unidades de Medição Fasorial certamente crescerá cada vez mais no setor elétrico. O avanço das tecnologias e pesquisas tende a diminuir o custo de construção e instalação como já evidenciado, afinal pode-se observar através deste estudo e de tantos outros a variedade de aplicações possíveis no uso das PMUs. No entanto, como trazem medidas de elevada importância para controle e monitoramento da rede elétrica, é imprescindível que as leituras sejam o mais próximo da realidade possível, com o mínimo de erro, considerando que o risco de uma decisão tomada equivocadamente por um operador devido a uma medida errônea, por exemplo, pode afetar todo o sistema de maneira grave.

Mediante este cenário, o presente estudo analisou o comportamento de um modelo de PMU desenvolvido pelo *software* Matlab no ambiente do Simulink, que se utiliza do método PLL com o propósito de computar as medições advindas de uma fonte. Constata-se que no caso em que não há ruído superposto aos sinais de entrada, a PMU age de modo satisfatório na maioria dos cenários, com erros tendendo a zero mesmo diante de certas variações, contudo, no ensaio de fora de banda houve erros relativamente altos, o que demonstra uma provável ineficiência do filtro *anti-aliasing* utilizado, bem como no teste de rampa de frequência onde o FE esteve exatamente no limite por conta do sistema não ter estabilizado em tempo suficiente mesmo com o intervalo de exclusão indicado. É interessante notar que na documentação fornecida pelo Matlab [12] cita-se que o bloco foi desenvolvido a partir da norma [8] sem menção do Amendment [11] que traz novas recomendações, o que pode ter acarretado em certos resultados insatisfatórios.

Dos Casos 2 e 3, nos quais é adicionado um ruído, verifica-se que a PMU não responde bem na maioria dos testes performados chegando a valores altíssimos, principalmente, de RFE (caso 3). Isto é decorrente da dificuldade de resposta quando variações rápidas e bruscas são lidas na PMU por conta do modelo de construção de PLL adotado, que não consegue detectar tais transições satisfatoriamente, como mencionado na subseção 4.3.

Finalmente, se o bloco de PMU for aplicado a cenários mais parecidos com a realidade do setor elétrico é necessário atentar-se à possível ineficiência de algumas medidas. Todavia, a utilização da Unidade de Medição Fasorial apresentada é indicada a ambientes de simulação e para analisar o funcionamento básico deste instrumento em aplicações acadêmicas ou como ponto de partida para refinamento em

modelos mais rebuscados, haja vista que em situações mais simples o erro é mínimo e traz resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- [1]PHADKE, A. G. **Synchonyzed Phasor Measurements – A Historical Overview**. Virginia Tech pp. 1-3.
- [2]FALCÃO M., Djalma. **Smart Grid e Microrredes: O Futuro já é presente**. COPPE/UFRJ; 2009 Jan. Brasil.
- [3]Lavery, D., Morrow, D., McKinley, A. e Cregan, M. (2011). **Openpmu: Open source platform for synchrophasor applications and research**, Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, pp. 1-6.
- [4] TON, Dan T. SMITH, Merril A. The U.S. **Department of Energy's Microgrid Initiative**. The Electricity Journal; 2013 Set.
- [5]F. L. Grando, G. W. Denardin, M. Moreto and J. d. P. Lopes, "**A PMU prototype for Synchronized Phasor and frequency measurements for smart grid applications**," 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza, 2015, pp. 1-6.
- [6] Dotta, Daniel & H. Chow, Joe & Vanfretti, Luigi & Almas, Muhammad & Agostini, M. **A MATLAB-based PMU simulator**. IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2013. pp. 1-5.
- [7]**Phasor Measurement Unit (PMU) Implementation and Applications**. EPRI, Palo Alto, CA: 2007. 1015511.
- [8] IEEE, S. A. **IEEE Standard for synchrophasor measurements for power systems, IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)**, IEEE, 2011, pp. 1 –61
- [9]OLIVEIRA, Suzana Cândida Gomes de. **Análise do Algoritmo Interno de Unidades de Medição Fasorial**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- [10] SOUZA, Jose Renato Cozzolino Rodrigues de. **UM ESTUDO SOBRE O DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA VISANDO UNIDADES DE MEDIÇÃO**

FASORIAL. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e Telecomunicações, Uff, Niterói, 2016.

[11]IEEE, S. A..**IEEE Standard for synchrophasor measurements for power systems Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements, IEEE Std C37.118.1.a-2014.** IEEE, 2014, pp. 1 –25

[12]MATLAB (Org.). **PMU (PLL-Based, Positive-Sequence).** Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pmupllbasedpositivesequence.html?searchHighlight=pmu&s_tid=doc_srchtile>. Acesso em: ago. 2018.

[13]BANERJEE, Dean. **PLL Perfomance, Simulation and Design.** 5. ed. [s.i.]: Ti, 2017, pp. 1-13.

[14]Matlab (Org.). **PLL (3ph).** Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pll3ph.html#btrxtk_-3>. Acesso em: ago. 2018.

[15]Matlab (Org.). **PLL (Positive-sequence PLL Driven).** Disponível em:<<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/positivesequenceplldriven.html>>. Acesso em: ago. 2018.

[16]GHIGA, R., Martin, K. E., Wu, Q., & Nielsen, A. H. **Phasor Measurement Unit under Interference Conditions.** IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, pp. 630 – 639

[17]EHRENSPERGER, Juliana Gubert. **Sistemas de Medição Fasorial: Estudo e Análise do Estado da Arte.** Florianópolis: Ufsc, 2003. 50 p.

APÊNDICE A – ALGORITMOS UTILIZADOS

Código 1:

```

%Algoritmo para casos mais simples...
%...para calcular FE, TVE e RFE, e encontrar seus máximos.
%As variáveis Freq_ref, Freq_PMU, polar_pmu, polar_ref...
%...rocof_ref e rocof_pmu são de origem do Simulink do bloco To
Workspace
%A variável tout é o tempo da simulação puxada automaticamente
do Simulink

STABLE = 19; %tempo de 0,3 s para estabilização do sistema
tp= downsample(tout,64);
t=tp(STABLE:end); %tempo utilizado sem transitório
%% Frequency Error
%Cálculo de FE
fe_p = abs(Freq_ref-Freq_PMU);
fe = fe_p(STABLE:end);
fe_max = max(fe);

fe_max

%% TVE
%Cálculo de TVE
tve_p = (abs(polar_pmu-
polar_ref))./(abs(polar_ref)+eps*sign(abs(polar_ref)));
tve = tve_p(STABLE:end);
tve_max = max(tve);

tve_max
%% RFE
%Cálculo de RFE
rocof_pmu = diff(Freq_PMU)./diff(tp);
rocof_ref = diff(Freq_ref)./(diff(tp)+eps);

rfe_p = abs(rocof_ref-rocof_pmu);

rfe = rfe_p(STABLE:end);
rfe_max = max(rfe);

rfe_max

```

Código 2:

```

%Programa utilizado para simular o teste de Modulação de
Frequência
%E encontrar os máximos correspondentes a cada freq analisada

clear all
Ts=1/3840; %inicializa o Sample Time de 1/3840
STABLE = 19; %tempo de 0,3s para estabilização

```

```

FmValores=linspace(0.1,4.9,25); %Range de frequências de 0.1 a
4.9 Hz

for i = 1:25
Fm=FmValores(i);

sim('PMU_2') %Ativa a simulação em cada iteração com Freq de
Mod diferente
Fm
tp= downsample(tout,64);
t=tp(STABLE:end);
%% Frequency Error
fe_p = abs(Freq_ref-Freq_PMU);
fe = fe_p(STABLE:end);
fe_max(i) = max(fe);

fe_max = fe_max(i);
fe_max
%% TVE
tve_p = (abs(polar_pmu-
polar_ref))./(abs(polar_ref)+eps*sign(abs(polar_ref)));
tve = tve_p(STABLE:end);
tve_max(i) = max(tve);

tve_max = tve_max(i);
tve_max
%% RFE
rocof_pmu = diff(Freq_PMU)./diff(tp);
rocof_ref = diff(Freq_ref)./(diff(tp)+eps);
rfe_p = abs(rocof_ref-rocof_pmu);

rfe = rfe_p(STABLE:end);
rfe_max(i) = max(rfe);

rfe_max = rfe_max(i);
rfe_max
end

```

Código 3:

%Algoritmo para variação do tempo de aplicação do degrau
 %e sincronização dos vetores gerados afim de estarem no mesmo
 ponto

```

clear all
Ts=1/3840;
STABLE = 1;
t_step=(0.1:1/60:0.25);
for i = 1:10

t_deg=t_step(i); %variável utilizada no Simulink
sim('PMU_2') %inicializa simulação

tp= downsample(tout,64);

```

```

t=tp(STABLE:end);

%Gravar os resultados na linha da matriz para cada tempo
correspondente
v(i,:)=Mag_PMU;
fase(i,:)=Angle_PMU_deg;
fe_p = abs(Freq_ref-Freq_PMU);
fe(i,:) = fe_p(STABLE:end);

tve_p = (abs(polar_pmu-polar_ref))./(abs(polar_ref));
tve(i,:) = tve_p(STABLE:end);

rocof_pmu = diff(Freq_PMU)./diff(tp);
rocof_ref = diff(Freq_ref)./(diff(tp)+eps);

rfe_p = abs(rocof_ref-rocof_pmu);
rfe(i,:) = rfe_p(STABLE:end);
end

%correção de offset para os valores estarem alinhados
for i= 1:10
    corrigidoV(i,:)=circshift(v(i,:),-i);
    corrigidoFase(i,:)=circshift(fase(i,:),-i);
    corrigidoFE(i,:)=circshift(fe(i,:),-i);
    corrigidoTVE(i,:)=circshift(tve(i,:),-i);
    corrigidoROCOF(i,:)=circshift(rfe(i,:),-i);
end

intercalarV=corrigidoV(:)';
intercalarFase=corrigidoFase(:)';
intercalarFE=corrigidoFE(:)';
intercalarTVE=corrigidoTVE(:)';
intercalarROCOF=corrigidoROCOF(:)';

```

Código 4:

```

%Algoritmo utilizado para Simulação de Rampa do Tipo P
%Ele retira os intervalos de exclusão solicitados em norma e
calcula
%os máximo pedidos

%Intervalos de exclusão
STABLE_1 = 33; %tempo de 58,0375 Hz
STABLE_2 = 269; %tempo de 61,9741 Hz

tp= downsample(tout,64);
t=tp(STABLE_1:STABLE_2);
%% Frequency Error
fe_p = abs(Freq_ref-Freq_PMU);
fe = fe_p(STABLE_1:STABLE_2);
fe_max = max(fe);

fe_max

```

```
%% TVE
tve_p = (abs(polar_pmu-
polar_ref))./(abs(polar_ref)+eps*sign(abs(polar_ref)));
tve = tve_p(STABLE_1:STABLE_2);
tve_max = max(tve);

tve_max
%% RFE
rocof_pmu = diff(Freq_PMU)./diff(tp);
rocof_ref = diff(Freq_ref)./(diff(tp)+eps);
rfe_p = abs(rocof_ref-rocof_pmu);

rfe = rfe_p(STABLE_1:STABLE_2);
rfe_max = max(rfe);

rfe_max
```