

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Amanda Wohlfahrt Reis

**SIMULAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MEDIÇÃO FASORIAL  
UTILIZANDO TYPHOON VIRTUAL HIL**

Cachoeira do Sul, RS  
2019

**Amanda Wohlfahrt Reis**

**SIMULAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MEDIÇÃO FASORIAL UTILIZANDO  
TYPHOON VIRTUAL HIL**

Trabalho de Conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Santa  
Maria (UFSM, RS), campus Cachoeira do  
Sul como requisito parcial para a obtenção  
do título de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Dr. Fernando Guilherme Kaehler Guarda  
Coorientadora: Dra. Cristiane Cauduro Gastaldini

Cachoeira do Sul, RS  
2019

**Amanda Wohlfahrt Reis**

**SIMULAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MEDIÇÃO FASORIAL UTILIZANDO  
TYPHOON VIRTUAL HIL**

Trabalho de Conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Santa  
Maria (UFSM, RS), campus Cachoeira do  
Sul como requisito parcial para a obtenção  
do título de **Engenheiro Eletricista**.

**Aprovado em de junho de 2019:**

---

**Fernando Guilherme Kaehler Guarda, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Cristiane Cauduro Gastaldini, Dr. (UFSM)**  
(Coorientadora)

---

**António Manuel Santos Spencer Andrade, Dr. (UFSM)**

Cachoeira do Sul, RS

2019

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho aos meus pais César e Nair, e minha irmã Aline que sempre acreditaram no meu potencial e contribuíram com essa conquista.*

## **AGRADECIMENTOS**

A concretização deste trabalho ocorreu, principalmente, pelo auxílio, compreensão e dedicação de várias pessoas. Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste estudo e, de maneira especial, agradeço:

Aos meus pais, César e Nair, minha irmã Aline e meu namorado Patrick pelo amor, apoio e incentivo incondicional durante toda esta etapa;

Aos meus amigos e colegas que compartilharam essa experiência comigo;

Aos professores do curso de Engenharia Elétrica que contribuíram para a minha formação tanto acadêmica quanto profissional, em especial ao professor Fernando G. K. Guarda, pela orientação e apoio na elaboração deste trabalho, para que fosse obtido o melhor resultado possível;

À Universidade Federal de Santa Maria, campus Cachoeira do Sul por proporcionar um ambiente educacional de qualidade.

## **RESUMO**

### **SIMULAÇÃO DE UMA UNIDADE DE MEDIÇÃO FASORIAL UTILIZANDO TYPHOON VIRTUAL HIL**

AUTOR: Amanda Wohlfahrt Reis

ORIENTADOR: Dr. Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Este trabalho objetiva apresentar o projeto para a implementação de uma *Phasor Measurement Unit* (PMU) do português Unidade de Medição Fasorial, a qual é o principal componente do sistema de medição fasorial sincronizada. Essa tecnologia de medição visa trazer ganhos significativos para a operação dos sistemas elétricos, pois a mesma permite medir, simultaneamente, magnitudes e ângulos de tensão e corrente em pontos geograficamente distantes do sistema elétrico. Além disso, o trabalho relata sobre a utilização de filtros na obtenção das medidas da PMU. Desta forma, tem- se o intuito de realizar a implementação da PMU no *software Typhoon Virtual HIL*, para simular uma situação de medição fasorial em tempo real.

**Palavras-chave:** Filtros. Phasor Measurement Unit. Typhoon Virtual HIL.

## **ABSTRACT**

### **SIMULATION OF A FASORIAL MEASUREMENT UNIT USING TYPHOON VIRTUAL HIL**

AUTHOR: Amanda Wohlfahrt Reis

ADVISER: Dr. Fernando Guilherme Kaehler Guarda

This paper aims to present a project to implement the phasor measurement unit (PMU), which is the main component in the synchronized phasor measurement system. This measurement technology aims to bring significant gains to the operation of the electrical systems, since it allows to simultaneously measure magnitudes and phase of voltage and current at geographically distant points from the electrical system. Besides, the paper reports the use of filters in obtaining PMU measurements. In this way, it is intended to implement the PMU in the Typhoon Virtual HIL software, to verify PMU operation in real time.

**Keywords:** Filters. Phasor Measurement Unit. Typhoon Virtual HIL.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 1 - Estrutura de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada.....	18
Figura 2 – Modelo de uma PMU genérica.....	19
Figura 3 – Diagrama de Blocos do Algoritmo Interno da PMU.....	26
Figura 4 - Simulação implementada no editor esquemático do software Typhoon Virtual HIL.....	32
Figura 5 - Simulação implementada no HIL Scada do software Typhoon Virtual HIL.....	33
Figura 6 - Representação do Filtro Passa-Baixa.....	34
Figura 7 - Fasores de entrada.....	37
Figura 8 - Fasores de saída. ....	37
Figura 9 – Gráfico da Fase A para determinação da frequência.....	38
Figura 10 - Detalhe da Figura 9.....	39
Figura 11 - Gráfico da Fase B para determinação da frequência.....	39
Figura 12 - Detalhe da Figura 11.....	40
Figura 13 - Gráfico da Fase C para determinação da frequência.....	40
Figura 14 - Detalhe da Figura 13.....	41

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Resultados dos valores dos fasores, encontrados em simulação.....	36
Tabela 2 - Resultados de TVE, encontrados em simulação.....	37
Tabela 3 - Resultados de simulação obtidos.....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	OBJETIVOS .....	13
1.3.1	<b>Objetivos gerais.....</b>	<b>13</b>
1.3.2	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>13</b>
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	15
2.2	UNIDADE DE MEDAÇÃO FASORIAL SÍNCRONIZADA .....	15
2.2.1	<b>Sistema de medição fasorial sincronizada.....</b>	<b>17</b>
2.2.1.1	<i>Unidade de medição fasorial .....</i>	18
2.2.1.2	<i>Concentrador de dados fasoriais.....</i>	20
2.2.1.3	<i>Global positioning system.....</i>	21
2.2.1.4	<i>Canais de comunicação .....</i>	21
2.2.2	<b>Processo de medição fasorial sincronizada .....</b>	<b>22</b>
2.2.2.1	<i>Filtragem do sinal de amostragem.....</i>	23
2.2.2.2	<i>Aquisição de dados .....</i>	23
2.2.2.3	<i>Tratamento das medidas .....</i>	23
2.2.2.4	<i>Formatação das medidas .....</i>	23
2.2.2.5	<i>Erro vetorial total.....</i>	24
2.2.3	<b>Requisitos da Norma.....</b>	<b>24</b>
2.2.4	<b>Filtros.....</b>	<b>25</b>
2.2.4.1	<i>Transformada discreta de Fourier.....</i>	26
2.2.4.2	<i>Filtro de Kalman.....</i>	27
2.2.4.3	<i>Filtro Phase Locked Loop .....</i>	28

2.2.4.4 <i>Filtro Sliding Mode</i> .....	28
<b>2.2.5 Hardware in the loop</b> .....	<b>29</b>
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	31
3.2 TYPHOON VIRTUAL HIL .....	31
3.3 METODOLOGIA .....	31
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>36</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	36
4.2 RESULTADOS .....	36
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>43</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	43

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é constituído por usinas geradoras, linhas de transmissão de energia e sistema de distribuição de energia elétrica. Estes sistemas têm se tornando cada vez mais extensos e interligados, abrangendo grandes áreas e atendendo a demandas cada vez maiores. A intensificação deste processo, somado a fatores como a desregulamentação do setor, envelhecimento da infraestrutura, e a necessidade de melhores ferramentas para monitoração e controle, que aumentam a confiabilidade e segurança da operação além da contínua incorporação de novas tecnologias de equipamentos. São fatores que tem aumentado imensamente a complexidade operacional dos sistemas de energia elétrica. Surge então a necessidade de um constante aprimoramento dos métodos e instrumentos dedicados à monitoração e controle da operação destes, em tempo real (EHRENSPERGER, 2003).

Dentre as novas tecnologias que vêm sendo propostas, o Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (*Synchronized Phasor Measurement Systems - SMFS*), que utilizam os avanços nas comunicações, e na tecnologia de GPS (*Global Positioning System*), apresentam-se como uma tecnologia promissora para as novas necessidades de monitoração e gerenciamento da segurança de grandes sistemas. Este sistema de medição destaca-se pelo uso das Unidades de Medição Fasorial, mais conhecidas como PMUs (*Phasor Measurement Units*).

A PMU é um dispositivo de medição dos valores de tensão e corrente, com uma referência temporal comum, que provem dos sinais obtidos via satélite. 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, com taxas de amostragem superiores ao sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) tradicional e com precisão angular adequada aos requisitos da maioria das aplicações de monitoração e controle. As medidas são processadas e convertidas em fasores, com informações de magnitude e fase, pela PMU e assim enviadas ao concentrador de dados.

A primeira Unidade de Medição Fasorial foi construída em 1987 na Virginia Tech. Foi construída usando um chassi VME padrão com um CPU Motorola 68000, uma placa digitalizadora Analógico/Digital (A/D), uma placa de comunicação serial e uma interface de sinal analógico construída pela equipe de pesquisa. Usava um

receptor GPS comercial para fornecer um sinal sincronizado de um pulso por segundo (PPS) para sincronizar as medições e um 720 PPS para sincronizar a amostragem de sinais analógicos. A comunicação foi através de uma porta serial RS232 operando a 4800 bytes por segundo (BPS). Essa velocidade permitia enviar 12 medições por segundo em um formato binário com uma marca temporal Código Binário Decimal (BCD).

A primeira PMU comercial, a Macrodyne 1690, foi introduzida em 1990 e utilizou a mesma técnica de medição usada na unidade da Virginia Tech, mas incorporou internamente um receptor de GPS (PHADKE, 2017).

Segundo Guerra (2009), atualmente, o sistema de medição utilizado é implementado com base de dados provenientes de um conjunto de telemedidas redundantes, digitais e analógicas, que compõe o sistema SCADA. Estes dados, obtidos em intervalos regulares de tempo, são recebidos e processados através de ferramentas computacionais chamadas Configurador de Rede e Estimador de Estado, para que se conheça a configuração do sistema e o perfil das tensões complexas nas barras.

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O SMFS baseia-se no princípio de medição de sincrofatores que consiste em estimar o módulo e fase das tensões e correntes trifásicas de diferentes partes do sistema elétrico bem como a frequência e a variação da frequência do sistema. A estimação correta de frequência é essencial para a operação de diversos equipamentos de proteção, regulação e controle, os quais são necessários para a operação adequada do Sistema de Potência.

Idealmente seria interessante instalar PMUs em todas as subestações do sistema elétrico, porém, devido às restrições de custo, complexidade de processamento de dados, transmissão dos sinais, entre outras, deve-se otimizar o número de PMUs a serem instaladas, de acordo com diferentes critérios de alocação.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, a medição fasorial sincronizada tem se tornado a técnica de medição preferida para sistemas de potência. Esta técnica permite a medição de

tensão de sequência positiva, corrente, frequência local e taxa de variação de frequência. Além disso, pode ser personalizada para medir harmônicos e grandezas de sequências zero e negativa. Todas estas medidas são sincronizadas para um mesmo microsegundo, isto é possível devido à disponibilidade do GPS e do avanço no desenvolvimento de técnicas de processamento de dados (PHADKE, 2008).

Na monitoração, o SMFS pode trazer um ganho significativo quanto ao conhecimento prévio do comportamento do sistema elétrico, já que está medição através dos sincrofatores será mais exata, rápida e confiável. Esta inovação impacta positivamente a supervisão e controle do sistema, abrindo um campo para novas investigações e aplicações quanto ao planejamento e operação em tempo real.

Para auxiliar a compreensão do funcionamento de uma PMU, a simulação HIL (*Hardware in the loop*) é uma ferramenta poderosa, pois permite verificar o funcionamento da unidade em variadas situações.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho é simular uma unidade de medição fasorial no software Typhoon Virtual HIL, para observar a operação da PMU em tempo real.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Revisão Bibliográfica;
- Introdução ao software Typhoon V-HIL;
- Montagem do circuito referente à PMU no software Typhoon V-HIL;
- Simulação do circuito modelado no HIL SCADA;
- Análise dos resultados obtidos;
- Conclusões;
- Trabalhos futuros.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para a descrição do estudo sobre a unidade de medição fasorial, este documento encontra-se estruturado em cinco capítulos além deste Capítulo 1 de caráter introdutório.

O Capítulo 2 discorre sobre a revisão bibliográfica sobre o sistema de medição fasorial sincronizada, os componentes de uma unidade de medição fasorial, além da aplicabilidade de filtros para obtenção dos fasores e estimativa de frequência. Além disso, conta também com os trabalhos já realizados sobre o tema.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e a metodologia utilizada para desenvolver a PMU no software Typhoon Virtual HIL.

O Capítulo 4 tem como objetivo principal apresentar os resultados encontrados a partir da simulação.

Por fim, o Capítulo 5 é onde se encontram as conclusões deste trabalho e conta com dicas para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os sistemas de medição fasorial sincronizado, com foco nas unidades de medição fasorial, as quais correspondem aos dispositivos mais significativos deste sistema, será abordado também o assunto sobre os filtros aplicados na estimativa dos fasores de tensão e corrente, além do conceito da simulação *Hardware-in-the-loop*.

### 2.2 UNIDADE DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

O uso de dados da PMU na operação do sistema de potência é de importância prática e, segundo Dotta et al. (2013), esses dados são usados atualmente para monitoramento de operação em tempo real e análise offline. A compreensão dos mecanismos envolvidos no processo de estimativa fasorial é necessária para a correta interpretação e análise dos dados fasoriais, bem como para o projeto de esquemas avançados de controle e proteção. Segundo Neto et al. (2014) a utilização de dados provenientes da PMU na operação de sistemas elétricos de potência promove um aprimoramento, proteção e controle dos mesmos.

Convencionalmente, as faltas são diagnosticadas através do status de relés de proteção e disjuntores que são ativados após uma falta. No entanto, as faltas ocultas do sistema de proteção têm sido muitas vezes os principais suspeitos de parcial ou blecautes generalizados (DOBAKHSHARI; RANJBAR, 2014).

Para uma compreensão do processo de estimativa fasorial empregada em PMUs, Dotta et al. (2013) modelaram a mesma no software Matlab para compreensão do processo de estimativa fasorial. O objetivo deste simulador é auxiliar na compreensão do comportamento dos algoritmos internos da PMU e compreender os principais fatores que afetam seu desempenho na operação de frequência fora do comum. O simulador de PMU é útil para acadêmicos e profissionais que gostariam de entender os conceitos envolvidos no processo de estimativa fasorial realizado pelas PMUs. A ideia principal é baseada em medir formas de onda trifásicas de tensão e corrente, fasores estimados sincronizados com o GPS usando formas de onda e,

enviar os dados resultantes para uma localização central (subestação ou centro de controle) onde o Concentrador de Dados Fasoriais (CDF) está localizado.

Neto, Tochetto e Rocha (2014) realizaram a modelagem de uma PMU no software de simulação ATP (*Alternative Transients Program*) através da linguagem de programação MODELS, com o objetivo de permitir que esse ambiente de simulação seja utilizado para o estudo e o desenvolvimento de aplicações de medição fasorial sincronizada, especialmente na proteção e no controle dos SEPs. Para tal, abordaram a questão dos algoritmos utilizados para a estimativa fasorial, tendo como foco o método da transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform - DFT*) e, a título de comparação, o método da malha de captura de fase (*Phase-Locked Loop - PLL*). Segundo Phadke (2008), as principais contribuições deste sistema são a exatidão, elevada taxa de amostragem e sincronização de medidas fasoriais. Porém, segundo Tochetto (2014), as principais desvantagens estão relacionadas ao custo do simulador e às restrições com relação ao tamanho da rede a ser modelada. Sendo assim, a partir de dados gerados em simulações em ATP, avaliou-se o desempenho dos algoritmos segundo a norma IEEE C37.118-2011. Foi constatado que o desempenho da DFT é superior ao do PLL, sendo que a DFT, devido à sua resposta mais rápida, pode ser utilizada em qualquer aplicação que envolva PMUs, tanto de monitoramento quanto de proteção e controle dos SEP. Já o PLL é indicado apenas para aplicações de monitoramento, onde sua resposta mais lenta torna-se aceitável, em oposição a aplicações de proteção e controle, que necessitam de uma maior velocidade de resposta.

Dobakhshari e Ranjbar (2014) introduziram uma abordagem alternativa de diagnóstico de faltas independente da função do sistema de proteção. Um método analítico é introduzido para o diagnóstico de faltas do sistema de potência usando medições sincronizadas dispersas e a matriz de impedância (Zbus). O início da falta é detectado pela primeira vez por unidades locais de medição de fasores (PMUs). O diagnóstico de falta é então realizado de forma hierárquica, de modo que primeiro a zona defeituosa do sistema é diagnosticada, depois a linha defeituosa na zona de falta é diagnosticada e finalmente o ponto de falta ao longo da linha diagnosticada é localizado por gradiente descendente. O método proposto é aplicado ao sistema WSCC -9 barras, onde incidentes de falta em todas as linhas de transmissão são examinados. O diagnóstico e a localização da falta são bem-sucedidos mesmo se a linha de falta não estiver equipada com nenhuma PMU em nenhum dos lados. Os

resultados de simulação para um sistema de potência em larga escala contendo diversas PMUs revelou sucesso no diagnóstico de faltas para 100% dos casos de diferentes tipos de faltas em diferentes pontos da linha.

Rajeev et al (2015) propuseram um novo método para localizar faltas no sistema de distribuição. Este método usa medidas de sincronização de múltiplos locais para identificar a linha com falta. O método proposto foi testado para oito faltas diferentes e pode ser usado para identificar a falta nos alimentadores de distribuição do tipo anel e radial. Porém, não há necessidade de colocar as PMUS em todas as barras do sistema, devido ao alto custo, seu posicionamento ideal é feito usando um algoritmo de busca binária. Sendo assim, foi observado que o problema de alocação das PMUs não possui uma solução única. Dependendo do ponto de partida, o esquema de otimização desenvolvido pode produzir diferentes conjuntos de soluções, cada um fornecendo o mesmo número mínimo de PMUs, mas em locais diferentes.

Guardado (2016) também modelou a PMU no software ATP/EMTP utilizando MODELS para simulação de distúrbios em SEPs. O modelo proposto fornece medidas dos fasores de tensão de sequência positiva, desvio de frequência e ROCOF (taxa de variação da frequência), além de outras variáveis. O desempenho do modelo de PMU foi avaliado durante condições normais e anormais de operação, usando um sistema de teste com fontes ideais e o sistema de teste de 10 barras de 10 máquinas da New England.

### **2.2.1 Sistema de medição fasorial sincronizada**

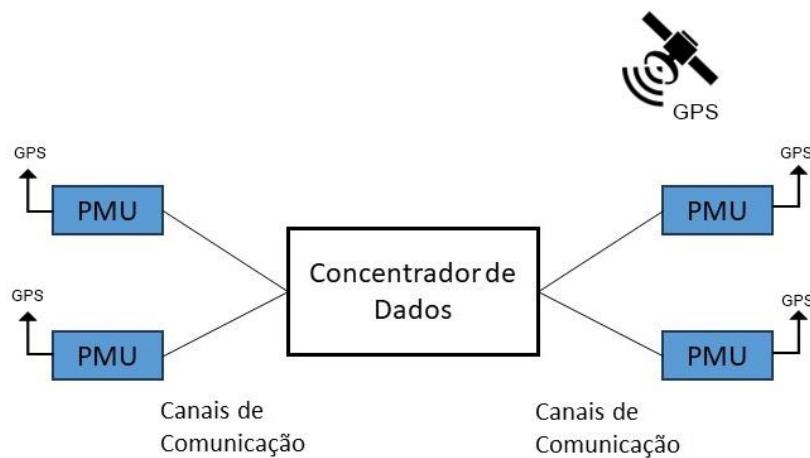
Um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada é uma tecnologia, de certa forma recente, que surge como uma alternativa para a obtenção de medidas de magnitude e ângulo das tensões e correntes em pontos geograficamente distantes do sistema elétrico de potência, assim como frequências, harmônicos, potência ativa e reativa, com rapidez, precisão e sincronismo (MARTINS, 2012).

Um sistema de medição fasorial é, basicamente, formado por:

- a) Unidade de Medição Fasorial (PMU);
- b) Concentrador de Dados Fasoriais (PDC);
- c) Global Positioning System (GPS);
- d) Canais de Comunicação.

Os aspectos particulares que compreendem cada um destes equipamentos serão abordados no decorrer deste documento. Entretanto, a estrutura geral de um sistema de medição de fasorial pode ser representada pela ilustração da Figura 1.

Figura 1 - Estrutura de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada.



Fonte: Autor.

#### *2.2.1.1 Unidade de medição fasorial*

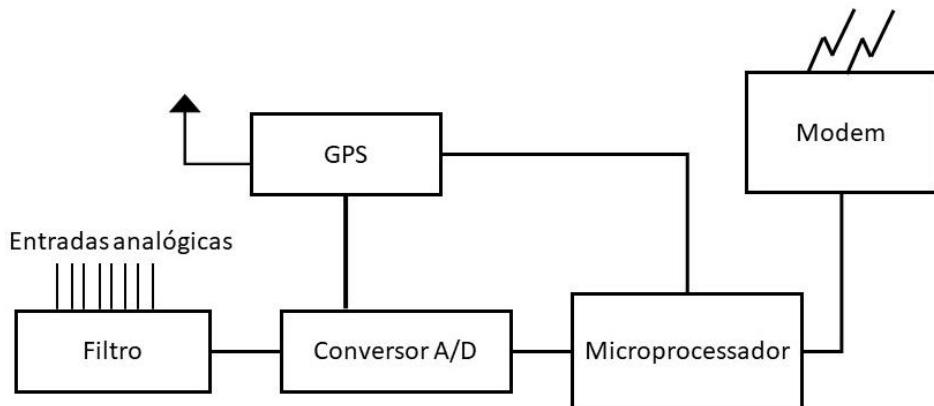
A unidade de medição fasorial é o elemento mais importante de um sistema de medição fasorial, ela é responsável por obter as medições dos dados do sistema, processá-las, e enviá-las ao concentrador de dados (PHADKE, 2008).

Como existem no mercado diferentes fabricantes de PMUs, é possível apenas fazer a sua representação genérica, a qual conta com seus principais componentes, a mesma está apresentada na Figura 2. A PMU é composta por um sistema de aquisição de sinais, ou seja, os sinais analógicos de entrada de tensão e corrente passam pela etapa de filtragem, a qual visa evitar o efeito de *aliasing*, em seguida tem-se o circuito oscilador e o módulo conversor A/D que realiza a discretização os sinais de entrada de tensão e corrente, e por fim um microprocessador que efetua o tratamento matemático das amostras.

As entradas analógicas de uma PMU são correntes e tensões obtidas a partir dos enrolamentos secundários dos transformadores de corrente e tensão. Todas as correntes e tensões trifásicas são usadas para que a medição de sequência positiva possa ser realizada. Em contraste com um relé, uma PMU pode ter correntes em

vários alimentadores originados na subestação e tensões pertencentes a vários barramentos na subestação (PHADKE, 2017).

Figura 2 – Modelo de uma PMU genérica.



Fonte: Autor.

A referência temporal de amostragem é dada através do receptor de sinais GPS, que recebe os sinais do tipo PPS. De forma contínua, o GPS envia um sinal de PPS. Tendo o sinal a uma precisão maior que  $1 \mu\text{s}$  e sendo ele recebido por estações distantes entre si com idêntica precisão, torna-se possível que o processo de aquisição seja executado de modo sincronizado em diferentes localizações ao longo do sistema, independentemente da distância entre as subestações onde se encontram instaladas as PMUs.

De acordo com Martins (2012), a habilidade das PMUs de medir correntes de linha faz com que todas as barras adjacentes a uma PMU sejam observáveis, desde que os parâmetros da linha sejam conhecidos com precisão. Se um número suficiente de PMU for instalado, é possível realizar um Sistema de Medição de Estado ou um Calculador de Estado, através do qual o estado do sistema possa ser medido ou calculado, em vez de estimado.

Para Phadke (2017) uma das características mais importantes da tecnologia da PMU é que as medições são marcadas com alta precisão na fonte, de modo que a velocidade de transmissão de dados não é mais um parâmetro crítico na utilização desses dados. Todas as medições de PMU com o mesmo registro de tempo são usadas para implicar o estado do sistema de potência no instante definido pelo registro de data e hora.

Todas as medições são armazenadas em dispositivos locais de armazenamento de dados, que podem ser acessados de locais remotos para fins de análise ou diagnóstico. A capacidade de armazenamento local é necessariamente limitada, e os dados armazenados pertencentes a um evento do sistema de energia interessante devem ser marcados para armazenamento permanente, para que não sejam sobre gravados quando a capacidade de armazenamento local estiver esgotada.

A norma IEEE Std C37.118.1 especifica o desempenho da medição sob condições estáticas e dinâmicas. O desempenho é avaliado com vários testes que caracterizam a capacidade de medição e representam sinais que são encontrados em sistemas de energia. A norma também define critérios para avaliar a medição desses sinais. Originalmente, o padrão do sincrofase abordava apenas a estimativa do sincrofase, embora a frequência e a taxa de variação de frequência (ROCOF) fossem relatadas junto com os sincrofases. Como essas medidas de frequência e ROCOF são amplamente utilizadas e sua derivação está intimamente relacionada à estimativa do sincrofase, o Grupo de Trabalho de Padrões decidiu que elas deveriam ser avaliadas com critérios semelhantes aos dos sincrofases (PHADKE, 2017).

#### *2.2.1.2 Concentrador de dados fasoriais*

As principais funções de um concentrador de dados fasoriais referido como PDC (*Phasor Data Concentrator*), é receber os sincrofases (de forma assíncrona) que são coletados por várias PMUs, rejeitar os dados incorretos, formatá-los com etiquetas de tempo a fim de organizar conjuntos de medidas referentes ao mesmo instante de tempo, e criar um registro coerente de dados gravados simultaneamente de uma parte mais ampla do sistema de energia. Porém, de acordo com Phadke (2017), as principais funções do PDC são agrupar dados de diferentes PMUs com identificadores de tempo idênticos, criar arquivos de dados arquivados para recuperação e uso futuros e disponibilizar fluxo de dados para tarefas de aplicativos com velocidade e latência adequadas.

Para Martins (2012), todos esses processos são realizados continuamente, gerando um fluxo de dados capaz de representar o estado do sistema elétrico de uma forma bastante próxima a do tempo real, além de tratar eventuais erros de transmissão de dados.

São previstas as seguintes funcionalidades para o PDC:

- a) Alinhamento temporal dos sincrofadores;
- b) Processamento dos dados;
- c) Armazenamento dos dados;
- d) Retransmissão dos dados.

#### *2.2.1.3 Global positioning system*

Este sistema, utilizado inicialmente para fins militares e composto por 24 satélites dispostos em seis órbitas a uma altura de aproximadamente 16.000 quilômetros, foi inicialmente projetado com o objetivo de fornecer a instrumentos de navegação dados relativos a coordenadas de posição. Além disto, os satélites transmitem um sinal de pulso por segundo, com precisão normalmente maior a 1µs, que pode ser recebido por estações receptoras na Terra. Surge, com isto, a possibilidade de se utilizar este sinal de pulso como fonte de sincronização para as medidas fasoriais. Considerando a frequência de 60 Hz, um erro no pulso de sincronização da ordem de 1µs, implica na existência de um erro da ordem de 0.021, o que satisfaz amplamente aos requisitos de precisão exigidos por qualquer aplicação atualmente vislumbrada para um sistema de medição fasorial (PHADKE, 1993).

O uso mais comum do GPS é na determinação das coordenadas do receptor, embora para as PMUs o sinal que é mais importante é o único pulso por segundo que através deste sinal sabem exatamente o instante em que deve ser feita a aquisição dos dados de forma sincronizada. Este pulso recebido por qualquer receptor na Terra é coincidente com todos os outros pulsos recebidos dentro de 1µs. Na prática, precisões muito melhores de sincronização - da ordem de algumas centenas de nanosegundos - foram realizadas (PHADKE, 2017).

#### *2.2.1.4 Canais de comunicação*

Tem como função básica transferir os dados recebidos entre as PMUs e o PDC, além de viabilizar a troca de informações entre concentradores de dados de diferentes áreas de controle, suas interligações podem ser desde linhas telefônicas até via wireless ou cabos de fibra óptica.

Atualmente, os canais de comunicação considerados para uso em sistemas de medição fasorial incluem opções de estruturas que operam tanto através de meios físicos específicos quanto através de tecnologia sem fio, amplamente denominadas “wireless”. A opção pelo emprego desta tecnologia implica no uso canais de micro-ondas ou de sistemas de satélites, sendo que hoje o mais cogitado seria o sistema LEO (*Low- Earth Orbiting*). Já no que se refere ao emprego de tecnologias utilizando cabos, diversas são as escolhas possíveis, entre estas o uso de linhas telefônicas, cabos de fibra ótica ou mesmo a rede de baixa e média tensão, o que pressupõe o emprego de tecnologia PLC (*Power Line Communication*) (NADUVATHUPARAMBIL, 2002).

### **2.2.2 Processo de medição fasorial sincronizada**

A função mais importante de um padrão de medição é estabelecer métodos para avaliar o desempenho de um dispositivo de medição. Neste caso, é necessário avaliar quão bem uma PMU estima sincrofatores, frequência e ROCOF. O padrão especifica testes que caracterizam a saída da PMU sob uma variedade de condições.

Os testes especificam um sinal a ser medido e os resultados esperados (referência). A avaliação é a diferença entre o valor de referência e a estimativa de PMU. Os testes baseiam-se nas condições de operação do sistema de potência, incluindo a frequência nominal e fora da nominal, interferência, como ruído ou harmônicos introduzidos, e mudanças dinâmicas, como perda de geração ou carga, comutação e interações do sistema que podem produzir oscilações dos rotores de máquinas.

O critério de desempenho da classe P permite uma resposta mais rápida, mas reduz a proteção contra interferência e *aliasing*. Já a classe M requer uma melhor medição em um intervalo maior, mas permite um tempo de resposta maior. Mais classes podem ser estabelecidas conforme a necessidade surgir (PHADKE, 2017). O procedimento de medição fasorial pode ser dividido entre as seguintes etapas:

- a) Filtragem do Sinal de Amostragem;
- b) Aquisição de dados;
- c) Tratamento das medidas;
- d) Formatação das medidas.
- e) Erro vetorial total.

#### *2.2.2.1 Filtragem do sinal de amostragem*

A primeira etapa no procedimento de medição é a filtragem do sinal de amostragem, cujo objetivo é evitar o efeito de *aliasing*, assim o sinal passa através de um filtro passa baixa com frequência de corte igual ou menor do que a frequência de Nyquist, também chamado de filtro *anti-aliasing* (GUADALUPE, 2004).

#### *2.2.2.2 Aquisição de dados*

A aquisição de dados tem como o GPS o seu principal componente, onde o mesmo envia constantemente um sinal de um pulso por segundo, o qual será a base de tempo para todo o processo. Este trem de pulso emitido tem uma precisão maior do que  $1\mu\text{s}$ , possibilitando ser a referência de tempo para que o processo de aquisição dos dados seja sincronizado mesmo nas subestações geograficamente distantes (MARTINS, 2012).

#### *2.2.2.3 Tratamento das medidas*

Os sinais de tensão e corrente adquiridos pelas PMUs são analógicos, por isso, tem-se a necessidade de discretizar estes sinais através do conversor A/D, posteriormente realizar-se um tratamento matemático nestes dados através do microprocessador instalado na própria PMU, a transformada discreta de Fourier é a ferramenta mais utilizada para a extração de um fasor a partir de um sinal alternado (PHADKE, 1994).

Porém já se tem conhecimento de outros métodos para estimação destes sincrofatores. Alguns deles serão apresentados nas próximas seções.

#### *2.2.2.4 Formatação das medidas*

A última etapa do procedimento de medição fasorial sincronizada consiste na formatação dos dados, segundo a norma IEEE C.37.118, para então serem enviados para o concentrador de dados.

As medidas fasoriais são transmitidas como quadros de dados em uma taxa de exteriorização que corresponde ao número inteiro de medidas transmitidas por

segundo. As medidas transmitidas devem ser igualmente espaçadas dentro do intervalo de 1 segundo.

#### 2.2.2.5 Erro vetorial total

Um aspecto importante a se considerar é a precisão do sinal medido na PMU. Para garantir a precisão da grandeza a ser transmitida, a norma IEEE C.37.118, determina testes de precisão.

### 2.2.3 Requisitos da Norma

A norma IEEE C37.118-2011 possui dois conjuntos básicos de ensaios de conformidade de PMUs: ensaios de regime permanente e dinâmico. A norma define duas classes de PMUs, de acordo com o resultado dos ensaios de calibração: a classe P e a classe M.

PMUs da classe M são indicadas para aplicações que exigem uma boa exatidão, como aplicações de monitoramento e supervisão e para registro de ocorrências, porém este requisito pode acarretar em tempos de resposta mais lentos. Já PMUs de classe P possuem respostas mais rápidas com um menor compromisso com a exatidão, e podem ser utilizados em aplicações de tempo real, na proteção e controle dos SEP.

O valor esperado para a medição de um sincrofase pode diferir do valor estimado para o mesmo pela PMU, tanto em modulo quanto em ângulo. A exatidão da estimação fasorial realizada é avaliada pela norma IEEE C37.118-2011 através do Erro Vetorial Total (*Total Vector Error - TVE*), que considera os erros de módulo e de ângulo simultaneamente, e é expresso pela Equação (5).

$$TVE = \sqrt{\frac{(Xr'(n) - Xr(n))^2 + (Xi'(n) - Xi(n))^2}{(Xr(n))^2 + (Xi(n))^2}} \quad (5)$$

Onde  $Xr'$  e  $Xi'$  são as partes real e imaginária do fasor estimado, respectivamente, e  $Xr$  e  $Xi$  são as partes real e imaginária do valor verdadeiro do fasor

que representa o sinal de entrada. O valor máximo que o TVE pode assumir em regime permanente é de 1%.

A exatidão da frequência é avaliada segundo o Erro de Frequência (*Frequency Error - FE*), dado pela Equação (6):

$$FE = | f_{verdadeira} - f_{medida} | \quad (6)$$

O valor máximo que o FE pode assumir em regime permanente é de 0,005Hz.

#### 2.2.4 Filtros

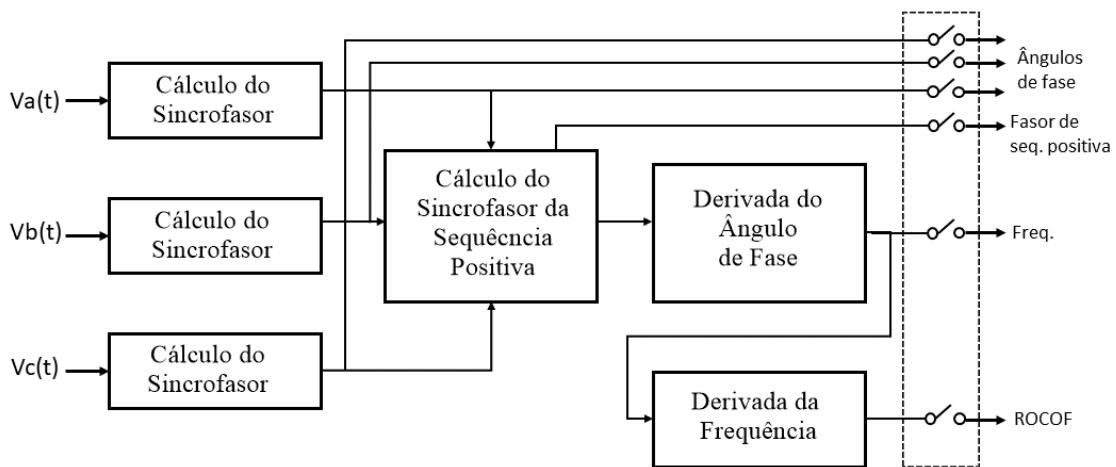
Para vislumbrar as possíveis configurações de hardware de uma PMU é imprescindível conhecer seus algoritmos. Existem diferentes formas de estimar os fasores e frequência a partir de medidas de tensão e corrente. O método mais comum para estimação de fasores é através de Transformada Discreta de Fourier (TDF). Outra maneira de estimação de fasores é a partir de filtros de Kalman, que utiliza um método matemático para produzir uma estimativa próxima do valor real da grandeza medida. O valor estimado é comparado ao valor medido por meio de uma média ponderada em que o valor de menor incerteza possui o maior peso. Além destes dois métodos será avaliado também o filtro *Phase Locked Loop* (PLL), o *Filtro Sliding Mode*, e o cruzamento por zero, onde seu funcionamento baseia-se na medição do tempo entre dois cruzamentos por zero de um sinal senoidal.

De acordo com Phadke e Thorp (2008), várias técnicas de estimação de frequência podem ser aplicadas, sendo desejável grande sensibilidade e exatidão para as aplicações exigidas no monitoramento do sistema elétrico.

Com desenvolvimentos das áreas computacionais e de eletrônica de potência, diversos métodos baseados em modelos matemáticos passaram então a ser utilizados para a medição de frequência. Um dos primeiros algoritmos aplicados neste âmbito foi o algoritmo de passagem por zero, o qual se baseia no cálculo do intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas de um sinal por zero, onde a frequência é obtida através do inverso do período calculado. Apesar da sua fácil implementação, o método não apresenta resultados satisfatórios para condições de oscilação de frequência e harmônicos (COZZOLINO, 2016).

Com a implantação da medição fasorial sincronizada, foram desenvolvidos métodos de estimação de frequência a partir do cálculo dos fasores. É apresentado na Figura 3 o diagrama de blocos genérico dos algoritmos internos de PMUs, segundo a proposição da Norma IEEE C37.118-2011.

Figura 3 – Diagrama de Blocos do Algoritmo Interno da PMU.



Fonte: Norma IEEE C37.118-2011.

Para Cozzolino (2016), primeiramente, a sequência positiva normal é calculada usando a transformação de componentes simétricas. Segundo o modelo proposto pela Norma IEEE C37.118-2011, a frequência é calculada a partir da taxa de variação dos ângulos de fase obtidos através do fator estimado, enquanto que o cálculo da derivada da frequência é efetuado a partir taxa de variação da frequência estimada.

#### 2.2.4.1 Transformada discreta de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) é um dos métodos mais populares para estimação espectral em sinais elétricos. Isso acontece devido à sua simplicidade e aos bons resultados apresentados. A TDF é usada, em particular, para a estimativa dos fasores do sinal, ou seja, a determinação da componente fundamental (LINS MIRANDA et al., 2005).

Bakhshai, Boon-Teck, & Karimi-Ghartemani (2010), concluíram que a técnica pode lidar com situações na frequência nominal em um sistema trifásico. As situações

fora da frequência nominal causam erros em sistemas monofásicos. A TDF é geralmente sensível e sofre de grandes erros na presença de inter-harmônicos e sinais de interferência.

A TDF, segundo Silva (2012), mostra um desempenho intermediário em termos de tempo de recuperação dos parâmetros do sinal, porém apresenta limitações para ocorrência de variação da frequência fundamental.

#### *2.2.4.2 Filtro de Kalman*

Uma das principais características do Filtro de Kalman (FK), é a sua separação em duas etapas: predição e correção. Na etapa de predição os estados são previstos com base nas medidas e incertezas das medições anteriores. E na etapa de correção os estados previstos são atualizados com base na medida e na incerteza da nova medição. Por ser um algoritmo recursivo, a necessidade de guardar as medições passadas é eliminada. Todas as informações prévias estão contidas na estimativa atual (GELB, 1974).

O filtro de Kalman é utilizado para estimar estados de sistemas na presença de ruídos, desde que estejam disponíveis o modelo dinâmico do sistema, as covariâncias dos ruídos presentes no modelo e nas medições. Com isso é possível fazer a predição de estados desses sistemas, os quais são corrigidos a cada nova amostra obtida do sinal de saída ruidoso. Em sistemas dinâmicos, nem sempre é possível ou desejável medir todas as variáveis que se deseja controlar, e o FK é uma maneira de estimar estas variáveis por meio de medidas indiretas e ruidosas. Apesar de a nomenclatura “filtro” normalmente remeter a dispositivos eletrônicos como indutores e capacitores que filtram sinais, o FK é, na verdade, um algoritmo de processamento de dados recursivo, que trabalha com sinais amostrados em tempo discreto, ao invés de sinais em tempo contínuo (MAYBECK, 1979).

O filtro de Kalman pode ser aplicado a um modelo de espaços de estado não linear, através da linearização de matrizes de estado e observação que neste caso passa a ser chamado de filtro de Kalman Estendido (FKE). Esse filtro estima precisamente a amplitude, a fase e frequência de sinais, permitindo também estimar o coeficiente de amortecimento exponencial (MORETO, 2011).

#### 2.2.4.3 Filtro Phase Locked Loop

Para Golestan (2013), a base do funcionamento do algoritmo de um PLL consiste na comparação do sinal de entrada com um sinal portador com frequência igual ou múltipla do sinal analisado. O PLL clássico, possui sua estrutura dividida em três componentes básicos: o comparador de fase, um filtro passa-baixa e um oscilador controlado por tensão.

Apesar de ser prático, o esquema de PLL apresentado possui algumas limitações. Uma delas se dá pela restrição da capacidade de rastreio do sinal gerado para com o sinal de entrada chamada de *lock*. Este fenômeno ocorre quando a frequência do sistema passa por variações muito mais rápidas do que aquelas que o PLL pode responder. Por este motivo o PLL é indicado para sistemas com pequenas variações ou de dinâmica lenta (GOLESTAN, 2013).

#### 2.2.4.4 Filtro Sliding Mode

A metodologia de controle não linear por modos deslizantes (SMS), conhecida como *sliding mode control*, foi desenvolvida por Utkin (1974) e posteriormente modificada e adaptada por Slotine e Li (1991).

Essa técnica consiste basicamente em se reduzir o problema de controle de um sistema genérico, descrito por equações não lineares de ordem  $n$ , para um sistema de primeira ordem, com incertezas nos parâmetros e/ou em sua própria estrutura matemática. Assim, dado um sistema descrito por equações de estado sendo a entrada um termo descontínuo através de uma superfície definida no espaço de estado, a metodologia de SMC consiste em projetar uma lei de controle capaz de fazer com que todas as trajetórias desse sistema convirjam para a superfície de deslizamento. A dinâmica desta superfície deve ser escolhida pelo projetista de modo que as trajetórias dentro da superfície convirjam para os valores desejados (*set-points*). Após a trajetória atingir o interior das superfícies deslizantes, é dito que o sistema está operando em modo deslizante.

O projeto do controlador baseado na teoria de SMC consiste em duas etapas. A primeira etapa consiste em definir uma superfície deslizante, que torna o sistema dinâmico estável quando a trajetória sobre a superfície deslizante e a segunda etapa

consiste em definir uma lei de controle que garante que todas as trajetórias converjam para a superfície deslizante (SPURGEON, 2014).

Para Spurgeon (2014), se trata de um tipo específico de Sistema de Estrutura Variável (VSS) que é caracterizado por várias leis de controle de *feedback* e uma regra de decisão. A regra de decisão, denominada função de chaveamento, tem como entrada alguma medida do comportamento atual do sistema e produz como saída o controlador de realimentação específico que deve ser usado naquele instante no tempo. No controle de modo deslizante, os Sistemas de Controle de Estrutura Variável (VSCS) são projetados para acionar e, em seguida, restringir o estado do sistema para ficar dentro de uma vizinhança da função de comutação. Uma vantagem é que o comportamento dinâmico do sistema pode ser ajustado diretamente pela escolha da função de comutação - essencialmente, a função de comutação é uma medida do desempenho desejado. Uma desvantagem do método tem sido a necessidade de implementar um sinal de controle descontínuo que, em termos teóricos, deve alternar com frequência infinita para fornecer rejeição total da incerteza.

## 2.2.5 Hardware in the loop

A simulação *Hardware in the loop* (HIL) é uma técnica que pode ser considerada recente. Começou a aparecer nos textos científicos de engenharia ao final da década dos anos 80 e foi sendo ainda mais conhecida e utilizada na década dos anos 90, graças ao desenvolvimento de sistemas computacionais que possuem capacidade de processar grande quantidade de informação em um intervalo de tempo muito pequeno. A simulação HIL pode ser aplicada a diversos sistemas e vem sendo utilizada em diversos segmentos de atuação como a indústria aeroespacial, química, de produção, da robótica e também sendo amplamente aplicada na indústria automobilística pelo fato de ser um segmento de mercado bastante competitivo (LOPES, 2017).

A principal razão da ascensão dessa técnica se justifica pela crescente complexidade dos sistemas e os prazos cada vez mais curtos de projeto. Com essa técnica, procura-se eliminar as dificuldades impostas pela necessidade de uma planta física de controle. A metodologia HIL substitui o sistema físico por um modelo matemático capaz de simular o comportamento real da planta, eliminando a necessidade de se ter o sistema em si (HALVORSEN, 2012).

Para LINS (2007), *hardware in the loop* é quando o hardware dedicado de controle e parte da planta que se deseja testar é utilizado no experimento e a outra parte da planta é substituída por um modelo de simulação em tempo real. É análogo a dizer que uma parte do sistema, conhecida, é simulada numericamente (software) e outra parte, aquela que constitui o objeto real de estudo, é incorporada fisicamente (hardware). Esta abordagem é clássica em teste e análises de comportamento e desempenho de sistemas dedicados de controle.

PASSOS (2008) descreve as vantagens de se utilizar a técnica *hardware-in-the-loop*, entre elas a possibilidade de desenvolver produtos com melhor produtividade, custos de desenvolvimentos reduzidos e melhor qualidade. Também apresentam a vantagem de melhorar a interação entre modelos simulados e protótipos físicos, que possibilitam um estudo do comportamento global do sistema, e por fim a vantagem de detectar e antecipar possíveis falhas no projeto antes que o produto seja industrializado. Os recursos computacionais necessários para utilização dessa técnica podem ser apontados como desvantagem, tendo em vista que exige recursos sofisticados.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados alguns trabalhos encontrados na literatura em relação a unidade de medição fasorial, uma revisão bibliográfica sobre o sistema de medição fasorial e sobre o processo de medição fasorial sincronizada, além de abordar alguns filtros para esse processo de medição, e por fim uma breve apresentação sobre a simulação *hardware in the loop*.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo visa apresentar os materiais, e a metodologia de projeto que foram utilizados para desenvolvimento da simulação proposta.

#### 3.2 TYPHOON VIRTUAL HIL

O software utilizado para simulação proposta foi o Typhoon Virtual HIL, o mesmo fornece todas as ferramentas necessárias para testar qualquer tipo de simulação em uma ampla gama de aplicações, desta forma é uma ferramenta ideal para desenvolvimento, teste e otimização de sistemas em tempo real.

O software conta com quatro ferramentas principais, o editor esquemático, HIL Scada, editor de *Script* e o *Test Suite*. Os elementos que foram utilizados para a simulação proposta foram o editor esquemático e o HIL Scada.

O editor esquemático permite criar modelos de simulações em tempo real. Esta seção também fornece todos os recursos e funcionalidades necessárias para um melhor e mais autêntico projeto de simulação.

O HIL Scada é um ambiente gráfico simples e fácil de ser utilizado, que permite criar e interagir com uma interface específica com o modelo desenvolvido no editor esquemático em tempo real, além disso, facilita o controle e a reconfiguração da simulação.

O editor de *Script* fornece recursos completos de automação de testes, pois permite que seja aberto, escrito e executado vários scripts de testes automatizados, escritos em Python, utilizando as apropriadas bibliotecas de API do Typhoon.

E por fim o *Test Suite* que é uma ferramenta de execução e pré-certificação altamente flexível. Seu principal objetivo é a qualificação padrão, usando testes automatizados cobertos com relatórios de teste detalhados.

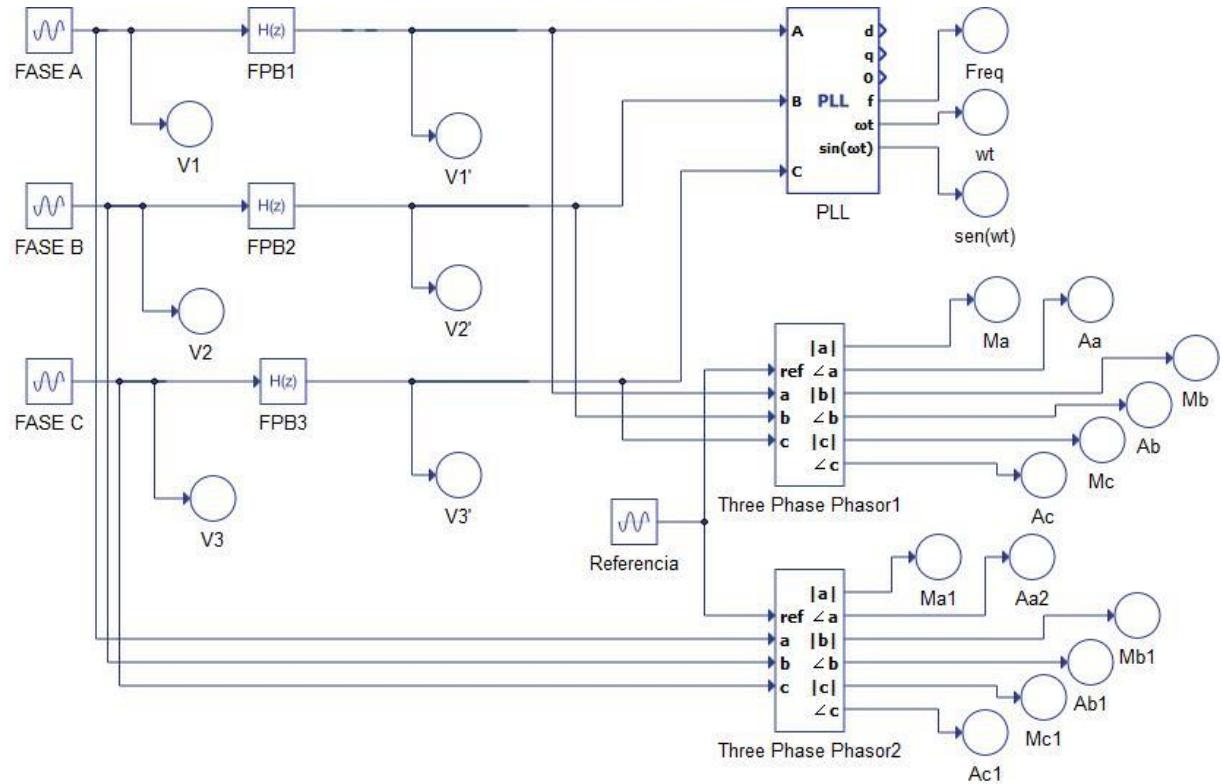
#### 3.3 METODOLOGIA

Como já mencionado nos capítulos anteriores, uma PMU genérica se baseia nas entradas analógicas de tensões e correntes, na utilização de um filtro para evitar o

efeito de *aliasing*, e por fim, um microprocessador que efetua o tratamento matemático das amostras.

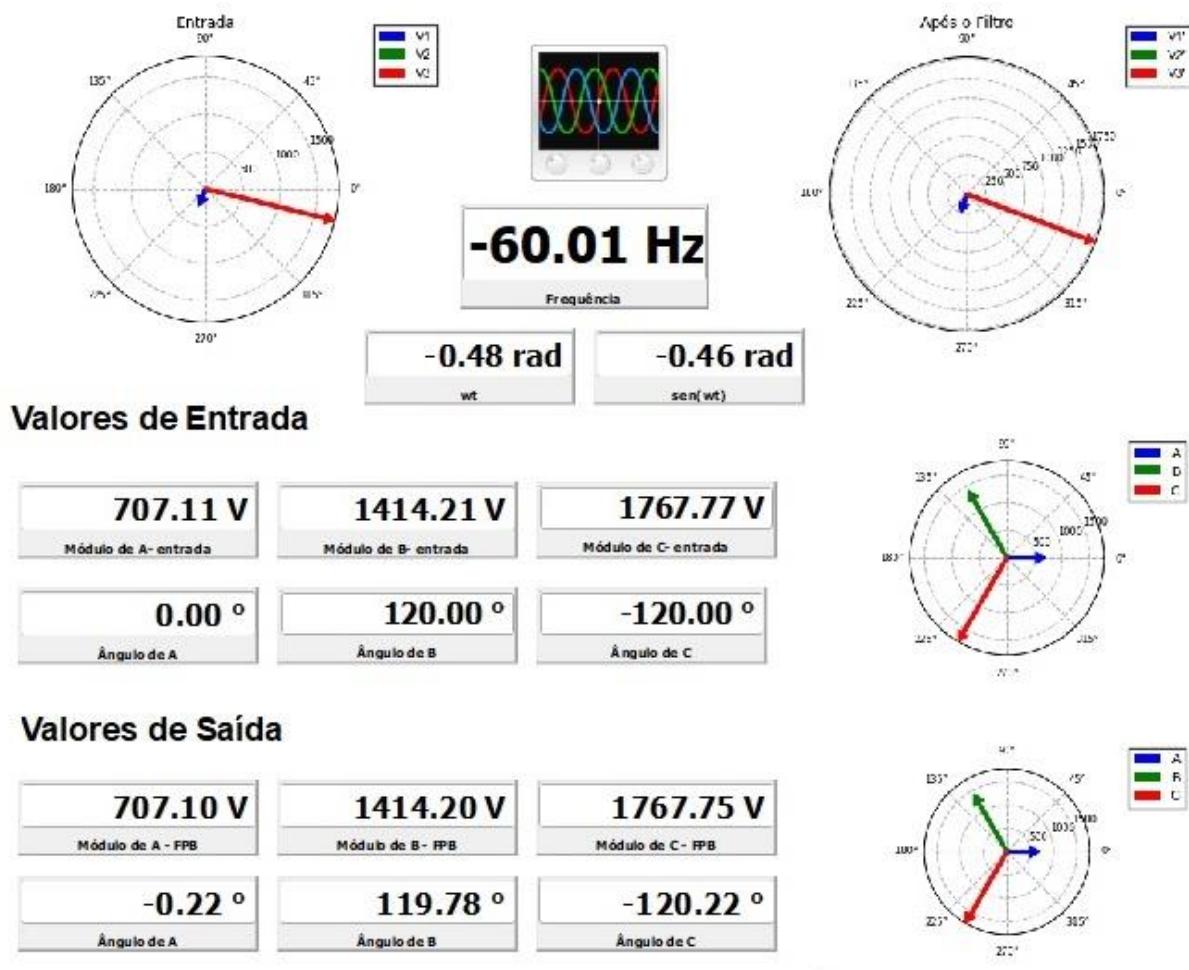
Para a implementação da PMU proposta foi utilizado o software descrito anteriormente, primeiramente a simulação foi implementada no editor esquemático e está apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Simulação implementada no editor esquemático do software Typhoon Virtual HIL.



Em seguida, para apresentação dos resultados de simulação, foi desenvolvida uma interface gráfica que é realizada na ferramenta HIL Scada do software, a mesma está apresentada na Figura 5.

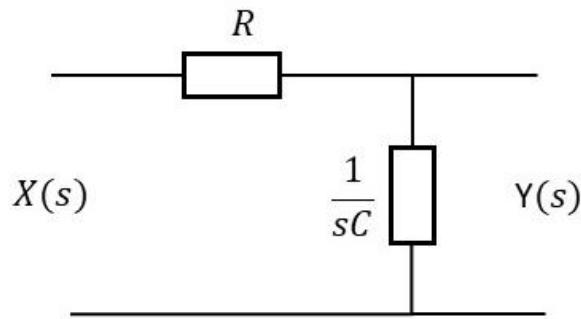
Figura 5 - Simulação implementada no HIL Scada do software Typhoon Virtual HIL.



Na simulação proposta foram utilizados sinais de entrada como sinais de tensão trifásicos, seguido por um filtro Passa-Baixa e a taxa de amostragem dos sinais avaliados é de 10k SPS (*sample per second* – amostras por segundo).

Para determinação do filtro foi utilizado como referência a planta do sistema de controle apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Representação do Filtro Passa-Baixa.



Desta forma, é possível encontrar a função de transferência da planta, a qual é caracterizada pela relação entre a entrada e a saída do sistema. Uma vez obtida, a função de transferência fornece uma descrição completa das características dinâmicas do sistema. Sendo assim, a função de transferência é expressada por:

$$Y(s) = X(s) * \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} \quad (1)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{1}{sC}}{\frac{sRC + 1}{sC}} \quad (2)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{sRC + 1} \quad (3)$$

Dividindo a Equação (3) por  $RC$ , temos:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} \quad (4)$$

A Equação (4) representa a equação final da função de transferência. Em seguida foram definidos os valores de R e C, baseando-se nas especificidades de projeto, tal como frequência de interesse determinada em 60Hz.

Uma vez com os sinais de entrada e o filtro passa baixa, é necessário efetuar as medições desejadas, pois como o sistema em si está sendo avaliado no modo discreto, não há a necessidade de realizar a discretização dos sinais.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para cumprir o objetivo deste trabalho, este capítulo apresentou a metodologia que foi seguida no desenvolvimento do projeto de simulação, além disso apresentou os materiais utilizados para a mesma, para que dessa forma seja feita a obtenção dos resultados finais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da simulação proposta.

### 4.2 RESULTADOS

Os valores de entrada da PMU são gerados no mesmo ambiente de simulação. Os sinais de entrada são representados por um sistema trifásico desequilibrado, com tensões de 1000V, 2000V e 2500V, defasados em 120°, representando as fases A, B e C, respectivamente. A frequência utilizada em todo o esquemático é de 60 Hz, equivalente a tensão da rede elétrica, logo, para referências futuras a frequência verdadeira do sistema é de 60Hz.

Sendo assim, a Tabela 1 apresenta os valores de módulo e ângulo, de entrada e também os valores de saída do sistema. Estes valores também podem ser visualizados na Figura 5, apresentada no capítulo anterior.

Tabela 1 – Resultados dos valores dos fasores, encontrados em simulação.

<b>Fase</b>	<b>Valores de Entrada</b>		<b>Valores de Saída</b>	
	<b>Módulo (V)</b>	<b>Ângulo (°)</b>	<b>Módulo (V)</b>	<b>Ângulo (°)</b>
A	707,11	0°	707,10	-0,22°
B	1414,21	120°	1414,20	119,78°
C	1767,77	-120°	1767,75	-120,22°

Na Figura 7 e na Figura 8 estão apresentados os gráficos dos fasores apresentados na Tabela 1. Os fasores apresentados na saída da PMU são os de sequência positiva.

Figura 7 - Fasores de entrada.

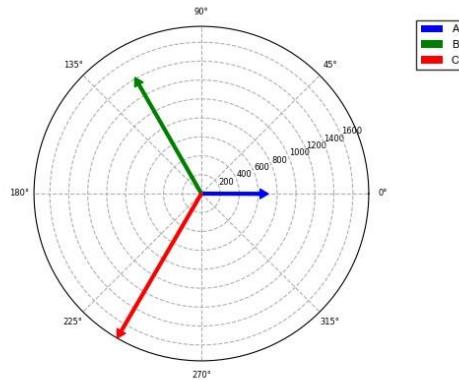
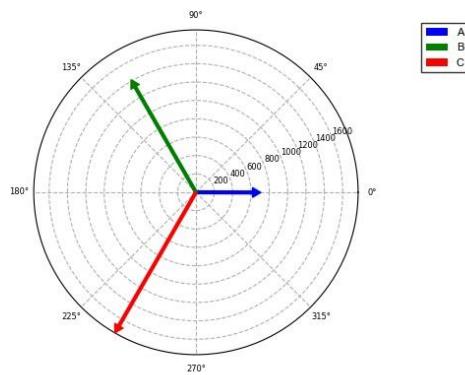


Figura 8 - Fasores de saída.



Além disso, foram realizados testes de conformidade de acordo com o proposto pela da norma IEEE C37.118-2011.

O primeiro teste pode ser realizado utilizando a Equação (5), pela qual pode-se calcular o erro vetorial total. A Tabela 2 apresenta os valores encontrados para TVE.

Tabela 2 - Resultados de TVE, encontrados em simulação.

Fase	A	B	C
TVE (%)	0,38	0,37	0,38

Segundo a norma, o valor máximo que TVE pode assumir é de 1%, sendo assim, todos os valores encontrados na simulação estão dentro do limite proposto pela norma.

O segundo teste realizado foi o teste de verificação da frequência. Para validação do mesmo, primeiramente fez-se uso da Equação (7), pois para a determinação da frequência de qualquer forma de onda senoidal é necessário conhecer o período que a forma de onda leva para completar um ciclo completo.

$$f = \frac{1}{T} \quad (7)$$

Esse tipo de análise foi definido para se conhecer a frequência do sistema em estado estático, pois como a simulação é em tempo real, a frequência será atualizada constantemente.

Sendo assim, utilizando a Equação (7) e os resultados apresentados na Figura 10, Figura 12 e Figura 14, é possível obter a frequência medida da tensão de entrada e da tensão de saída do sistema.

A Figura 9 apresentam as formas de onda da tensão de entrada da fase A (V1 - representada na cor vermelha) e da tensão de saída da fase A (V1' - representada na cor verde), a Figura 10 é um detalhamento para melhor visualização da Figura 9.

Figura 9 – Gráfico da Fase A para determinação da frequência.

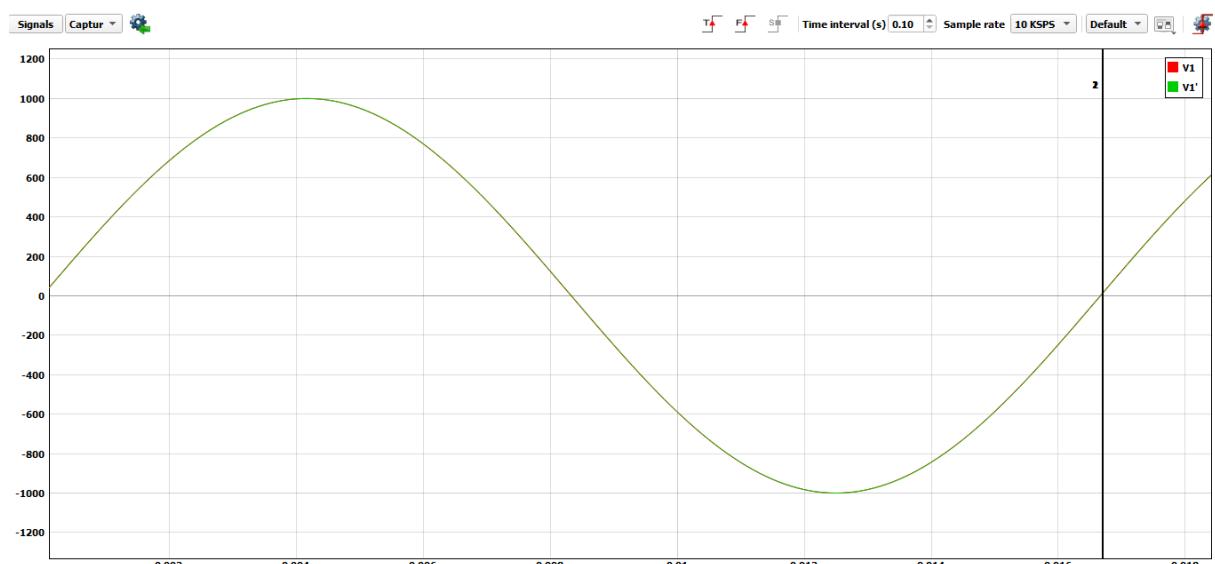


Figura 10 - Detalhe da Figura 9.

Signals data					
Signal Name	Cursor 1	Cursor 2	Delta	Min.	Max.
<b>Viewport 1</b>					
Ti...	0.01667999999999997s	0.01667999999999997s	0.0		
V1	-25.130095	-25.130095	0	0	0
V1'	-28.898851	-28.898851	0	0	0
Viewport 2					
Viewport 3					
Viewport 4					

Da mesma forma, é possível encontrar os valores de frequência medida para as fases B e C. A Figura 11 apresenta a forma de onda da fase B, e a Figura 12 apresenta o detalhamento dos valores encontrados para determinação da frequência.

Figura 11 - Gráfico da Fase B para determinação da frequência.

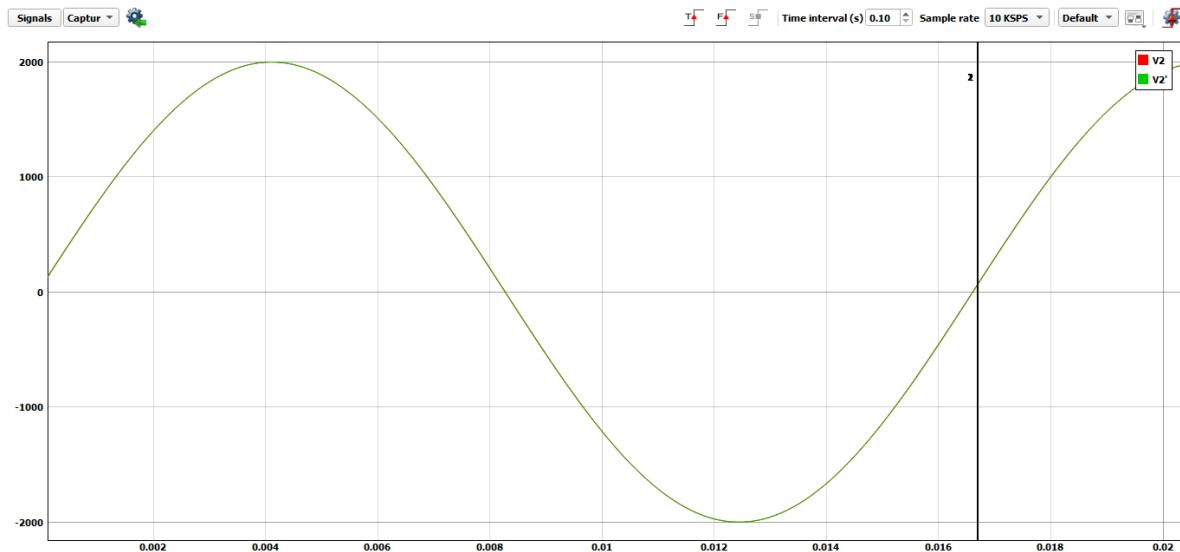


Figura 12 - Detalhe da Figura 11.

Signal Name	Cursor 1	Cursor 2	Delta	Min.	Max
<b>Viewport 1</b>					
Time	0.0166799999999997s	0.0166799999999997s	0.0	0	0
V2	-8.377556	-8.377556	0	0	0
V2'	-15.917979	-15.917979	0	0	0
<b>Viewport 2</b>					
<b>Viewport 3</b>					
<b>Viewport 4</b>					

A Figura 13 apresenta da mesma forma os dados para determinação da frequência da fase C, com detalhamento na Figura 14.

Figura 13 - Gráfico da Fase C para determinação da frequência.

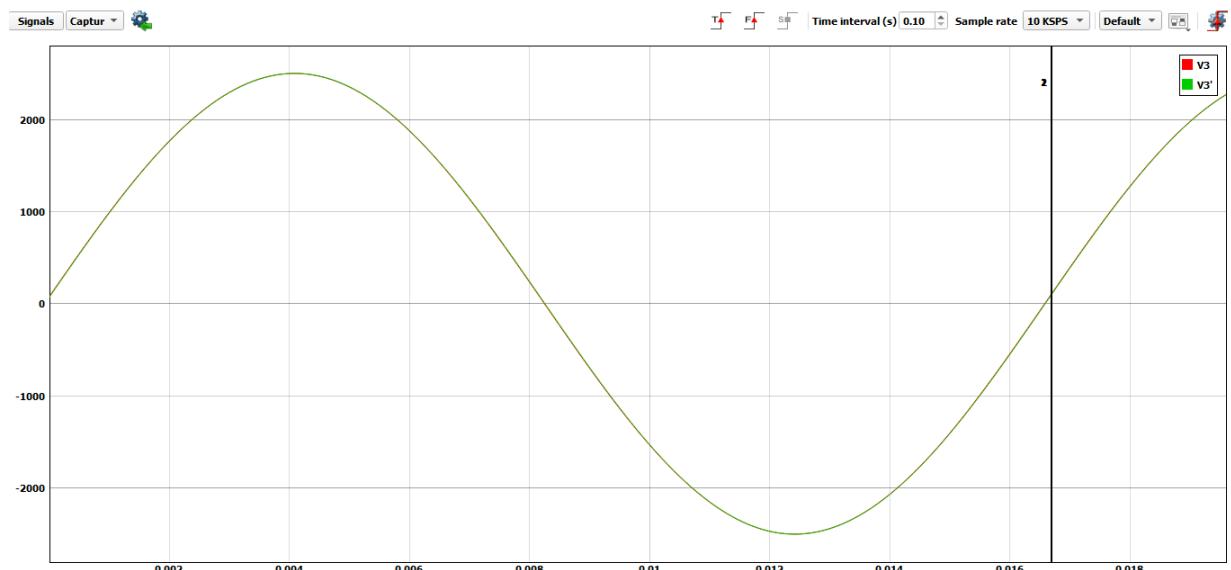
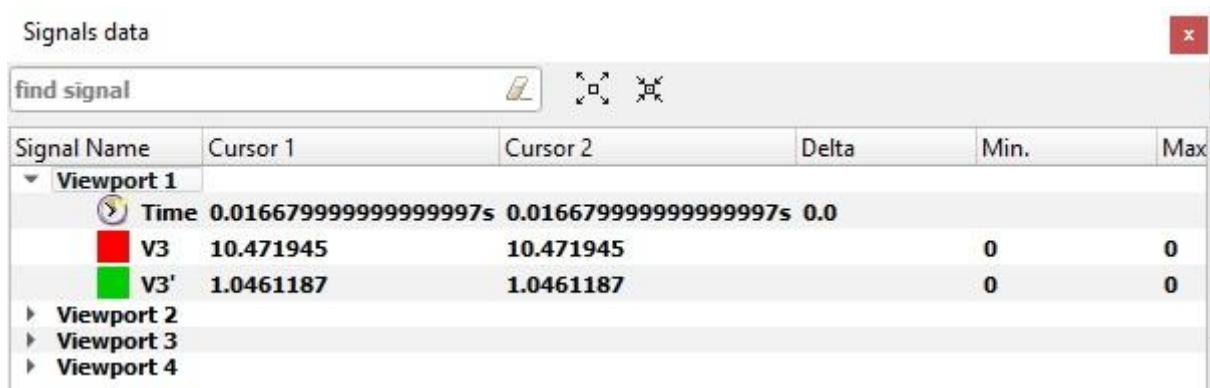


Figura 14 - Detalhe da Figura 13.



Com os resultados apresentados anteriormente e com utilizando da Equação (6), pode-se encontrar os valores de FE. Na Tabela 3 estão apresentados os valores de frequência medida, frequência verdadeira, período das formas de onda, além do valor final de FE, para as três fases.

Tabela 3 - Resultados de simulação obtidos.

		Período (s)	Frequência Medida (Hz)	Frequência Verdadeira (Hz)	FE (Hz)
Fase A	Entrada	0,01667999	59,952	60	0,047
	Saída	0,01667999	59,952	60	0,047
Fase B	Entrada	0,01667999	59,952	60	0,047
	Saída	0,01667999	59,952	60	0,047
Fase C	Entrada	0,01667999	59,952	60	0,047
	Saída	0,01667999	59,952	60	0,047

Segundo a norma, o valor máximo que o FE pode assumir em regime permanente é de 0,005Hz, porém o método utilizado para determinação da frequência

não é exato e está sujeito a erros, contudo os resultados continuam sendo válidos, pois para PMUs do tipo M a norma especifica valores mais altos para FE.

#### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados obtidos na simulação de uma unidade de medição fasorial no *software* Typhoon Virtual HIL.

Os resultados encontrados foram os fasores de tensão de entrada e saída do sistema, valores do erro vetorial total, frequência medida e erro de frequência.

## 5 CONCLUSÃO

O SMFS baseia-se no princípio de medição de sincrofatores que consiste em estimar o módulo e fase das tensões e correntes trifásicas de diferentes partes do sistema elétrico bem como a frequência do sistema. A estimação correta de frequência é essencial para a operação de diversos equipamentos de proteção, regulação e controle, os quais são necessários para a operação adequada do Sistema Elétrico de Potência.

Portanto, o trabalho foi baseado na simulação de uma PMU, utilizando o software Typhoon Virtual HIL. Os resultados adquiridos foram os fasores de sequência positiva, os valores de TVE, além de FE. Os resultados se tornam válidos devido a comparação com a norma IEEE.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Utilização do modelo de PMU proposto para a análise da operação de redes inteligentes;
- Monitoramento de microrredes conectadas a rede de distribuição;
- Implementação do modelo de PMU em microrredes com Geração distribuída para estimativa de fluxos de potência.

## REFERÊNCIAS

- BAKHSI, A.; BOON-TECK, KARIMI-GHARTEMANI, M. **Investigation of DFT-based Phasor Measurement Algorithm.** IEEE, 2010.
- COZZOLINO, J.R., SOUZA, R. **Um estudo sobre o desempenho de algoritmos de estimação de frequência visando unidades de medição fasorial.** 2016. Dissertação-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.
- DOBAKHSHARI, A. RANJBAR, A. **Application of synchronized phasor measurements to wide-area fault diagnosis and location.** IET Generation, Transmission & Distribution, v. 8, n. 4, p. 716-729, Out. 2013.
- DOTTA, D. et al. **A MATLAB-based PMU simulator.** Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2013.
- EHRENSPERGER, J.G. **Sistemas de Medição Fasorial: Estudo e Análise do Estado da Arte.** 2003. Dissertação- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- GELB, A. **Applied Optimal Estimation.** MIT Press, 1974.
- GUADALUPE, U.B., ASSAN A.E. **A Transformada de Fourier e o Fenômeno de Aliasing.** XXXI Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Mendoza-Argentina, 2004.
- GUARDADO, R. A., GUARDADO, J. L. **A PMU Model for Wide-Area Protection in ATP/EMTP.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 31, n. 4, p. 1953-1960, 2016.
- GUERRA, L. N. A. **Indicadores de Proximidade de Instabilidade de Tensão Utilizando Medição Fasorial em Tempo Real.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- GOLESTAN, S., et al. **Advantages and Challenges of a Type-3 PLL.** IEEE Transactions on Power Electronics, 28(11), 4985-4997. 10.1109/TPEL, 2013.
- HALVORSEN, H.P. **Hardware-in-the-Loop Simulation.** Telemark University College Faculty of Technology. Porsgrunn, Noruega, 2012.
- IEEE. **C.37.118; IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.** 2000.
- IEEE. **C37.118; IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.** 2011.
- LINS, A.R. **Aplicações de Hardware-in-the-Loop no desenvolvimento de uma mão robótica.** 2007. Tese (Doutorado)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LOPES, A. M. R. **Aplicação da simulação Hardware in the Loop para testes e desenvolvimento de suspensões veiculares.** 2017. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

MARTINS, R. S. **Apresentação do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada e Abordagem de sua Implantação no Estimador de Estado.** 2012. Dissertação-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MAYBECK, P.S. **Stochastic Models, Estimation and Control.** Academic Press. v.1, 1979.

MORAES, R.M. **Sincrofatores em Sistemas de Potência: Aplicações na Estimação de Estado.** 2009. Dissertação (Pós-Graduação) - Instituto de Computação, UFF, Niterói, 2009.

MORETO, M. **Análise Automática de Registros Digitais de Perturbações em Unidades Geradoras.** 2011. Dissertação-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

NADUVATHUPARAMBIL, B., VALENTI, M.C., FELIACHI, A. **Communication Delays in Wide Measurement Systems.** Southeastern Symposium on System Theory. Proceedings, 2002.

NETO, M. S. I., TOCHETTO, A. P., ROCHA, C. R. M. **Implementação de Unidade de Medição Fasorial em ATP.** 2014.

PASSOS, W. D. **Utilização de ferramentas de prototipagem rápida direcionada à concepção de sistemas embarcados baseados em computação configurável.** 2008. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PHADKE, A.G., PICKETT, B., ADAMIAK, M. **Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control,** IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 9, n. 1, 1994.

PHADKE, A.G., THORP, J.S. **Synchronized Phasor Measurements and Their Applications.** 1.ed. Nova York, Springer, 2008.

PHADKE, A.G., THORP, J.S. **Synchronized Phasor Measurements and Their Applications.** 2. ed. Springer, 2017.

TOCHETTO, A.P. et al. **Uso do RTDS para a realização de testes de aplicações de Medição Fasorial Sincronizada em tempo real.** XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - XIII SEPOPE, 2014.

RAJEEV et al. **Fault Location in Distribution Feeders with Optimally Placed PMU's.** IEEE International Conference on Technological Advancements in Power & Energy, 2015.

SILVA, R. P. M. D. **Algoritmos Genéticos Aplicados à Estimação Fasorial em Sistemas Elétricos de Potência.** 2012. Dissertação-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SLOTINE, J.J.E.; LI, W. **Applied Nonlinear Control**, Prentice Hall, Nova Jersey, 1991.

SPURGEON, S. **Sliding Mode Control: A Tutorial. European Control Conference.** França, 2014.

UTKIN, V.I. **Sliding Mode and their application to variable structure systems.** MIR Publishers, Moscou, 1978.