

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Adrion Andrei Rosanelli

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA REAMOSTRAGEM DE SINAIS:  
UMA ABORDAGEM BASEADA NA IEC 61850-9-2**

Santa Maria, RS  
2024

Adrion Andrei Rosanelli

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA REAMOSTRAGEM DE SINAIS:  
UMA ABORDAGEM BASEADA NA IEC 61850-9-2**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**. Defesa realizada por videoconferência.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello

Santa Maria, RS  
2024

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Rosanelli, Adrion Andrei  
Análise e simulação da reamostragem de sinais: uma  
abordagem baseada na IEC 61850-9-2 / Adrion Andrei  
Rosanelli.- 2024.  
72 p.; 30 cm

Orientador: Carlos Henrique Barriquello  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2024

1. Reamostragem 2. Sampled Values 3. Simulação 4.  
Processamento digital de sinais 5. IEC 61850-9-2 I.  
Barriquello, Carlos Henrique II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ADRION ANDREI ROSANELLI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Adrion Andrei Rosanelli**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA REAMOSTRAGEM DE SINAIS:  
UMA ABORDAGEM BASEADA NA IEC 61850-9-2**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 16 de fevereiro de 2024:**

---

**Carlos Henrique Barriquello, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)**

---

**Mateus Beck Rutzig, Dr. (UFSM)**

---

**Ulisses Chemin Netto, Dr. (UTFPR)**

---

**Vinicius Jacques Garcia, Dr. (UFSM)  
(Suplente)**

Santa Maria, RS  
2024

## AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho de dissertação de mestrado contou com o auxílio e dedicação de diversas pessoas que colaboraram de alguma forma durante todo o mestrado. Desse modo, agradeço a todos que de alguma forma auxiliaram, colaboraram e apoiaram a realização deste mestrado.

O primeiro agradecimento importante a realizar é para a minha família, em especial meus pais Adilson e Rosangela e minha irmã Sandiara, que sempre me apoiaram, acompanharam, aconselharam e incentivaram durante toda minha trajetória.

Agradeço também a Deus pelas bênçãos e forças para conseguir trilhar essa caminhada.

À CPFL Energia e ao INESC P&D Brasil no projeto “PA3083 - Metodologia para Proteção Diferencial Centralizada de Barra com Uso Eficiente do Barramento de Processo (Process Bus) de acordo com a Norma IEC 61850”, desenvolvidos pelo Programa P&D ANEEL PD-00063-3083/2021, e todos aqueles que participaram do projeto pelo apoio financeiro e técnico.

Agradeço ao meu orientador Dr. Carlos Henrique Barriquello por seus ensinamentos, dedicação, disponibilidade, compreensão, apoio e amizade, que me acompanhou durante toda minha formação acadêmica-profissional e pessoal.

Aos membros da banca, pela disponibilidade e colaboração a essa pesquisa.

Outro agradecimento é aos professores e à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, que auxiliaram, incentivaram e se dedicaram para que pudesse chegar até aqui.

Agradeço a todos os colegas e amigos pelos divertimentos, companheirismo, estudos, apoio e parceria em todos os momentos desse período.

Aos integrantes do Gedre, pela amizade, parceria, conhecimentos e experiências vivenciadas durante minha caminhada.

A todos vocês, muito obrigado.

## RESUMO

### ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA REAMOSTRAGEM DE SINAIS: UMA ABORDAGEM BASEADA NA IEC 61850-9-2

AUTOR: Adrion Andrei Rosanelli

Orientador: Carlos Henrique Barriquello

A reamostragem de sinais é uma técnica de processamento digital de sinais com diversas aplicações, entre elas, aprimorar a qualidade de sinais Sampled Values (SV), definidos pela norma IEC 61850-9-2, o que permite a análise dos sinais SV de forma mais precisa e robusta para aplicações como a proteção de subestações de energia. Neste sentido, esta pesquisa tem como objetivo analisar e comparar diferentes esquemas de reamostragem para validar e explorar a viabilidade de sua utilização. Para isso são utilizados esquemas propostos pela literatura e com métodos convencionais de interpolação implementados em simulação. A comparação desses esquemas, juntamente com a validação da técnica de reamostragem, são realizadas em simulações com diferentes sinais SV e diferentes implementações, considerando implementações do sinal diretamente na rede ou o sinal como um todo, e avaliando efeitos, como o jitter e a perda de pacotes aleatória. Para isso são realizadas análises no domínio do tempo e da frequência (pela FFT) e de grandezas como o valor RMS e o tempo computacional. Nessas análises, observou-se que a reamostragem permite reduzir o vazamento espectral dos sinais SV por manter a relação entre a frequência do sinal e da amostragem constante. Isso também possibilita uma significativa redução no erro RMS, da ordem de  $10^{-2}A$  sem reamostragem para ordem de  $10^{-7}A$  em alguns esquemas, sendo o mais estável nessa análise o método da "Cubic Spline". Na análise dos efeitos do sinal observou-se que o jitter e a perda de pacotes aleatória não representam efeitos significativos na reamostragem. Considerando a implementação do SV diretamente na rede, novamente a "Cubic Spline" obteve o melhor desempenho no erro RMS, e todos os esquemas proporcionaram uma maior estabilidade no pico da FFT e no RMS, embora resulte em um atraso de fase na componente fundamental do sinal. Outra análise desenvolvida é da eficiência computacional, comparando o tempo de cada esquema, no qual o melhor desempenho foi com os métodos convencionais e o pior pela "Modified Sinc". A última simulação realizada foi de um estudo de caso avaliando os esquemas de reamostragem em sinais SV capturados por Merging Units (MUs) de quatro fabricantes, no qual é verificado que os benefícios da reamostragem são mais impactantes nos fabricantes 1 e 4, sendo reduzidos em outros casos, e mantendo um atraso de fase em todas as situações. Com essas análises verifica-se que a reamostragem resulta em uma maior precisão e robustez dos sinais SV mas adiciona um atraso de processamento e de fase. Dentre os esquemas analisados, o que obteve melhor desempenho foi o "Cubic Spline", fazendo a reamostragem uma técnica atraente em algumas aplicações dos SV.

**Palavras-chave:** Reamostragem. *Sampled Values*. Simulação. Processamento digital de sinais. IEC 61850-9-2.

## ABSTRACT

### ANALYSIS AND SIMULATION OF SIGNAL RESAMPLING: AN APPROACH BASED ON IEC 61850-9-2

AUTHOR: Adrion Andrei Rosanelli

ADVISOR: Carlos Henrique Barriquello

Signal resampling is a signal processing technique with several applications, among them, to improve Sampled Values (SV) signals defined by IEC-61850-9-2, which allows the analysis of SV signals in a more accurate and robust way for applications such as the power substations protection. In this sense, this work aims to analyze and compare different resampling schemes, to validate and explore the feasibility of their use. For this, schemes proposed by the literature and using conventional methods implemented in simulation are used. The comparison of these schemes, together with validation of the resampling technique, are performed in simulations with different SV signals and different implementations, considering implementations of the signal directly on the network or the signal as a whole, and evaluating effects such as jitter and random packets loss. To this end, analyzes are carried out in the time and frequency domains (by FFT) and measurements such as RMS and computational time. In these analyzes, it was observed that resampling allows to reduce the spectral leakage of SV signals by keeping the relationship between the signal frequency and sampling frequency constant. This also allows a significant reduction in the RMS error, from the order of  $10^{-2}A$  without resampling to the order of  $10^{-7}A$  in some schemes, the most stable in this analysis being the method of "Cubic Spline". When analyzing the signal effects, it was observed that jitter and random packet loss do not represent significant effects in resampling. Considering the implementation of the SV directly on the network, again the "Cubic Spline" obtained the best performance in the RMS error, and all schemes provided greater stability in the FFT peak and in the RMS, although it results in a phase delay in the fundamental component of the signal. Another analysis developed is computational efficiency, comparing the time of each scheme, in which the best performance was with conventional methods and the worst with "Modified Sinc". The last simulation carried out was a case study evaluating resampling schemes in SV signals captured by MUs from four manufacturers, in which it was verified that the benefits of resampling are more impactful in manufacturers 1 and 4, being reduced in other cases, and maintaining a phase delay in all situations. With these analyzes it is verified that resampling results in greater precision and robustness of SV signals but adds a processing and phase delay. Among the schemes analyzed, the one that performed best was the "Cubic Spline", making resampling an attractive technique in some SV applications.

**Keywords:** Resampling. Sampled Values. Simulation. Digital Signal Processing. IEC 61850-9-2.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão do SAS em níveis e barramentos de comunicação. ....	18
Figura 2 – Estrutura em camadas dos protocolos de comunicação da norma IEC 61850. 19	
Figura 3 – Exemplo de estruturação da comunicação na SE com protocolos da IEC 61850. ....	21
Figura 4 – Exemplo da amostragem de sinais. ....	23
Figura 5 – Exemplo da amostragem de sinais com trem de impulsos e representação na frequência. ....	24
Figura 6 – Exemplo do efeito de <i>aliasing</i> , situação onde $\Omega_S < 2\Omega_C$ . ....	25
Figura 7 – Processo de reamostragem usado pelo “ <i>Modified Sinc</i> ”. ....	28
Figura 8 – Processo de reamostragem usado pelo “ <i>Smart Resampling</i> ”. ....	30
Figura 9 – Ilustração da interpolação com função Sinc. ....	33
Figura 10 – Fluxograma do processo implementado nas simulações. ....	34
Figura 11 – Sinal base, gerado pelo OPAL-RT. ....	35
Figura 12 – Sinal base, senoide simulada. ....	36
Figura 13 – Análise no domínio da frequência (FFT) depois do curto circuito. ....	42
Figura 14 – Análise da fase no domínio da frequência (FFT) depois do curto circuito. ....	42
Figura 15 – Análise no domínio da frequência (FFT) durante o curto circuito. ....	43
Figura 16 – Análise no domínio do tempo durante o curto circuito. ....	44
Figura 17 – Análise da fase no domínio da frequência (FFT) durante o curto circuito. ....	45
Figura 18 – Erro RMS com variação da frequência base. ....	46
Figura 19 – Erro RMS com implementação do Jitter. ....	47
Figura 20 – Diferença de RMS na perda de pacotes aleatória. ....	48
Figura 21 – Erro RMS para o sinal direto na rede. ....	49
Figura 22 – Valor RMS para o sinal SV direto na rede. ....	50
Figura 23 – Pico da FFT para sinal SV direto na rede. ....	51
Figura 24 – Fase da FFT para o sinal SV direto na rede. ....	52
Figura 25 – Comparação da eficiência computacional para cada execução. ....	54
Figura 26 – Sinal base obtidos dos pacotes SV para diferentes MUs. ....	57
Figura 27 – Resultado no domínio do tempo para o estudo de caso. ....	58
Figura 28 – Resultado no domínio da frequência para o estudo de caso. ....	59
Figura 29 – Resultado da fase no domínio da frequência para o estudo de caso. ....	60
Figura 30 – Valor RMS na implementação direto na rede para o estudo de caso. ....	62
Figura 31 – Valor de pico da FFT na implementação direto na rede para o estudo de caso. ....	63
Figura 32 – Valor de fase da FFT na implementação direto na rede para o estudo de	

caso. ....	64
Figura 33 – Ampliação (zoom) do valor de fase da FFT na implementação direto na rede para o estudo de caso. ....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Análise da eficiência computacional.....	53
TABELA 2 – Comparação das características dos esquemas de reamostragem. ....	55

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASDU	<i>Application Service Data Unit</i>
BP	Barramento de Processos
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>
MU	<i>Merging Units</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
RMS	<i>Root mean square</i>
RTS	<i>Real-time Simulator</i>
SAS	Sistema de Automação de Subestação
SE	Subestação de Energia
SmpCnt	<i>Sample Count</i>
SV	<i>Sampled Values</i>
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_*$	Coeficientes do polinômio da “Cubic Spline”
$\delta(t)$	Função impulso
$\varphi_1$	Fase do sinal $u[k]$
$\omega$	Variável para amostras excluídas
$\Omega_C$	Largura de banda
$\Omega_S$	Frequência de amostragem (em rad)
$A$	Variável de dimensionamento (para “Modified Sinc”)
$f'_1$	Frequência determinada do sinal $u[k]$
$f_1$	Frequência do sinal $u[k]$
$f_i$	Frequência de amostragem (para “Smart Resampling”)
$F_S$	Frequência de amostragem (em Hz)
$H$	Filtro passa-baixa (para “Smart Resampling”)
$h_{Dig}$	Filtro passa-baixa (para “Smart Resampling”)
$Intp(x)$	Núcleo da interpolação (para “Modified Sinc”)
$L$	Ordem da sobreamostragem
$N$	Número de amostras de $u[k]$
$N'$	Número de amostras para reamostragem
$n$	Variável de tempo discreto
$N'_{per}$	Número de períodos
$N_F$	Limitação do tamanho da janela
$p(t)$	Trem de impulsos
$q$	Expoente da função cosseno
$T_{Del}$	Tempo de atraso
$T_0$	Período de reamostragem (para “Smart Resampling”)

$T_1$	Período determinado do sinal $u[k]$
$T_S$	Período (taxa) de amostragem
$T'_S$	Período de reamostragem
$T_W$	Tamanho da janela de $u[k]$
$T'_W$	Tamanho da janela de reamostragem
$U_1$	Amplitude do sinal $u[k]$
$u'(i)$	Sinal reamostrado (para "Modified Sinc")
$u \left[ k \right]$	Sinal SV (para "Modified Sinc")
$v(kT_n)$	Sinal intermediário (para "Smart Resampling")
$x(mT_i)$	Sinal SV (para "Smart Resampling")
$x(n)$	Sinal discreto (ou amostrado)
$x$	Instantes das amostras interpoladas
$x_a(t)$	Sinal de tempo contínuo
$x_i(t)$	Representação da amostragem no tempo contínuo
$y(t_0)$	Sinal reamostrado (para "Smart Resampling")

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
<b>2</b>	<b>CONCEITOS GERAIS</b>	<b>17</b>
2.1	A NORMA IEC 61850	17
<b>2.1.1</b>	<b>Comunicação utilizando SV</b>	<b>20</b>
2.2	A AMOSTRAGEM E REAMOSTRAGEM DE SINAIS	22
<b>2.2.1</b>	<b>A reamostragem</b>	<b>25</b>
2.3	CONCLUSÕES PARCIAIS	26
<b>3</b>	<b>ESQUEMAS DE REAMOSTRAGEM</b>	<b>27</b>
3.1	<i>MODIFIED SINC</i>	28
3.2	<i>SMART RESAMPLING</i>	30
3.3	MÉTODOS CONVENCIONAIS DE INTERPOLAÇÃO	31
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	33
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA E COMPARAÇÕES</b>	<b>34</b>
4.1	SINAL BASE PARA AS SIMULAÇÕES (SINAL SV)	35
4.2	ANÁLISE EFEITOS DO SINAL	37
4.3	ANÁLISE IMPLEMENTAÇÃO DIRETO NA REDE	37
4.4	COMPARAÇÃO DOS ESQUEMAS DE REAMOSTRAGEM	38
4.5	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL	39
4.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	39
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>41</b>
5.1	COMPARAÇÃO DOS ESQUEMAS DE REAMOSTRAGEM	41
5.2	ANÁLISE EFEITOS DO SINAL	46
5.3	ANÁLISE IMPLEMENTAÇÃO DIRETO NA REDE	48
5.4	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL	52
5.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	54
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b>	<b>56</b>
6.1	SINAL BASE - SV GERADO PELAS MU	56
6.2	COMPARAÇÃO COMPLETA DOS SINAIS	58
6.3	COMPARAÇÃO NA IMPLEMENTAÇÃO DIRETO NA REDE	61
6.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	65
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>67</b>
7.1	TRABALHOS FUTUROS	69
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução das tecnologias de comunicação, do processamento de dados e da geração de energia, assim como a crescente demanda por desempenho, qualidade técnica, redução de custos e satisfação dos consumidores, motivam a automação e digitalização das subestações de energia elétrica. Para esse tipo de subestação, os diversos dispositivos digitais, para monitoramento, proteção e operação, necessitam de uma rede de comunicação capaz de trocar informações de maneira rápida, confiável e compatível (YASHWANT; SWARUP, 2011; ROOSTAEE; HOOSHMAND; ATAEI, 2011).

No ambiente da automação de subestações, existe uma grande variedade de equipamentos e tecnologias de comunicação que resultam em uma incompatibilidade de protocolos entre dispositivos, exigindo a conversão de protocolos para o funcionamento. Essas conversões resultam em operações complexas que podem gerar mais custo e até atrasos na rede, afetando seu desempenho. Para evitar esse tipo de problema, tem-se a necessidade de padronização, o que, após uma série de estudos, é proposto pelo padrão IEC-61850 (SKENDZIC; DOLEZILEK, 2017; RODRIGUES; SOLDANI; WONG, 2006).

A norma IEC 61850 consiste em um padrão para automação de subestações de energia, desenvolvida com o objetivo de possibilitar a interoperabilidade entre fabricantes, a conectividade entre os dispositivos e sistemas da subestação, a flexibilidade de operação, a simplificação da engenharia para os usuários e a redução de custo total, principalmente da instalação devido a padronização dos fabricantes (RODRIGUES; SOLDANI; WONG, 2006; DONOVAN et al., 2022). Um protocolo de comunicação definido por esse padrão (IEC-61850-9-2) é o *Sampled Values (SV)*, destinado para mensagens rápidas (em tempo real), sendo utilizado para comunicações em rajadas do tipo *multicast*, destinada para um grupo específico de dispositivos (BLAIR; ROSCOE; IRVINE, 2016).

O SV é utilizado na subestação para transferir medições de tensão e corrente através do barramento de processos (*Process Bus*), no qual os pacotes de dados, com essas medições, é gerado pelas *Merging Units (MUs)* e encaminhado aos *Intelligent Electronic Device (IEDs - dispositivos eletrônicos inteligentes)* que irão atuar nos sistemas de proteção, por exemplo. Entretanto, esses sinais estão sujeitos à variações de frequência (do sinal de corrente, por exemplo), a um descasamento de frequência entre dispositivos, ou até à interferências da rede de comunicação ou dos dispositivos da subestação, tornando a amostragem do sinal imprecisa (CAI et al., 2010; KEZUNOVIC et al., 2008).

Uma forma de mitigar esse problema e tornar o sinal mais robusto é a reamostragem do sinal, que é uma técnica de processamento de sinais capaz de reduzir ou até corrigir alguns problemas desse tipo. Essa técnica consiste na reconstrução de um sinal digital, como o SV, utilizando uma interpolação de sinais e após realizar uma nova amostragem, reamostrando o sinal a uma nova taxa. Em uma breve revisão da literatura, é possível

observar trabalhos que estudam esse método, mostrando que seu uso pode ser benéfico ao sistema.

Uma aplicação da reamostragem é realizada no trabalho de Chen et al. (2020), no qual essa técnica é utilizada na calibração de instrumentos baseados em SV. Como resultado, observa-se que há um aumento na precisão e sincronização dos dispositivos, como MUs e IEDs. Isso se torna importante devido ao fato do sinal da rede de energia ser assíncrono e a amostragem ser realizada em uma frequência fixa, de acordo com a IEC 61850, e assim, a calibração pode melhorar a precisão da determinação da qualidade de energia. Vale observar que neste trabalho os autores propõem um método de reamostragem e o comparam à interpolação cúbica e quadrática, contudo os autores se limitam a esses métodos e a utilização como sinal base uma senoide simulada (embora simulada com ruído e harmônicas), focando na calibração de instrumentos.

O trabalho de Cai et al. (2010) propõem um esquema de reamostragem para corrigir a incompatibilidade das taxas de amostragem da fonte dos dados (MUs) e dos IEDs de proteção, sendo um fator crucial para o algoritmo de proteção atuar corretamente. Os autores apresentam um esquema com foco maior na eficiência computacional proposto para os relés de proteção totalmente digitais. Assim, esse esquema permite melhorar a operação dos algoritmos de proteção corrigindo erros nos sinais amostrados, por exemplo os causados por limitações de relógios independentes ou pela diferença na frequência de amostragem das MUs. Neste trabalho, os autores se limitam a avaliar o erro instantâneo comparando o esquema proposto com o *zero-order-holder* e com a *cubic spline*.

Na análise realizada por Melo et al. (2021) são observados os efeitos do barramento de processos nos sistemas de proteção, dentre eles a reamostragem realizada pelos relés. Neste ponto é verificado que a implementação da reamostragem nos sinais do barramento de processos (como o sinal SV) adiciona um considerável tempo de atraso na função de proteção, resultando em um impacto a ser observado para esta aplicação. Vale observar que os autores avaliam o efeito do barramento de processos, observando o atraso da reamostragem, mas sem aprofundar seu estudo.

Alguns trabalhos são desenvolvidos para a reamostragem em tempo real, como o realizado por Santos et al. (2020) e o realizado por Lima et al. (2010). Onde, em ambos, a reamostragem é utilizada para melhorar a precisão da transformada discreta de Fourier buscando aprimorar o monitoramento da qualidade de energia e a análise de harmônicas. O trabalho de Santos et al. (2020) busca a implementação em *hardware* da reamostragem em tempo real, se limitando a reamostragem utilizando a interpolação de Lagrange. Enquanto o trabalho de Lima et al. (2010) analisa a reamostragem dinâmica focada em rastrear as componentes harmônicas dos sinais de energia, se limitando a utilização com a interpolações do tipo *spline*, principalmente a cúbica.

Nesses últimos dois trabalhos de aplicações em tempo real, ambos os autores observam um vazamento espectral que ocorre devido a distúrbios na frequência dos sinais.

Isso resulta no cálculo incorreto das componentes de frequência dos sinais realizadas pela transformada de Fourier. Contudo, a reamostragem mostra-se como uma técnica capaz de reduzir, ou até evitar, esse efeito do vazamento espectral. Vale observar ainda que nesses trabalhos, as análises realizadas se limitam a utilização dinâmica da transformada discreta de Fourier focada no monitoramento da qualidade de energia em tempo real.

Com base nessa revisão bibliográfica, verifica-se que há diversos trabalhos que abordam a reamostragem para melhorar a precisão dos sinais e a análise dos mesmos, principalmente em análises em frequência. Desse modo, essa técnica de processamento digital de sinais apresenta algumas vantagens, como a redução do vazamento espectral e análises em frequência mais precisas (através de Fourier), em sinais de energia, tensão e corrente, como os definidos pela IEC 61850-9-2.

Contudo, a grande maioria dos trabalhos analisados se limita a observar, geralmente, apenas uma métrica e explorar apenas um ou dois esquemas de reamostragem, além de abordar apenas um sinal base, observando somente cenários mais específicos e, em algumas situações, algumas variações de seus parâmetros. Por isso uma análise mais aprofundada das características e técnicas de implementação da reamostragem em sinais SV, bem como a abordagem de diferentes aspectos desse tipo de sinal, se mostra interessante, o que é realizado na presente dissertação.

## 1.1 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa tem como objetivo realizar análises de sinais, como de valor RMS e do espectro de frequência, e comparações de esquemas de reamostragem a fim de verificar a viabilidade de sua utilização em sinais *Sampled Values* definidos pela norma IEC-61850-9-2 para a automação e digitalização de subestações de energia. Para atingir esse objetivo, tem-se como objetivos específicos:

- Analisar e implementar, em simulação, esquemas de reamostragem propostos na literatura e métodos utilizando formas convencionais de interpolação;
- Observar as características e vantagens da utilização da reamostragem;
- Verificar quais são os métodos mais viáveis para aplicação em sinais SV;
- Simular efeitos, como jitter e perda de pacotes, que podem afetar o sinal e analisar seu impacto na reamostragem;
- Analisar o comportamento dos esquemas de reamostragem na simulação de uma implementação em tempo real e checar a possibilidade de seu uso.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento foi estruturado em capítulos, sendo este, o primeiro, onde é apresentada a introdução da pesquisa. O segundo capítulo apresenta alguns conceitos gerais, como a norma IEC 61850 e o processo de amostragem e reamostragem, necessários para compreensão do conteúdo desenvolvido. O capítulo 3 descreve os esquemas de reamostragem avaliados juntamente com algumas informações sobre a implementação dos mesmos.

O capítulo 4 mostra a implementação realizada, descrevendo a metodologia empregada nas simulações e as informações de implementação das comparações. No capítulo 5 são apresentados e descritos os resultados juntamente com uma breve análise deles. Na sequência, no capítulo 6, é realizado um estudo de caso aplicando os esquemas de reamostragem nos sinais SV gerados por MUs de diferentes fabricantes. Por fim, no último capítulo é apresentada a conclusão, com as considerações observadas durante o trabalho.

## 2 CONCEITOS GERAIS

A automação e digitalização das subestações de energia (SE) traz consigo uma série de conceitos, definições e características que permite sua implementação. Dentre elas podemos observar a padronização proposta pela norma IEC 61850 que aborda diversos protocolos e definições para a utilização de sinais digitais nas SEs. Além disso, existem diversas técnicas e metodologias do processamento digital de sinais que são atraentes de utilização nesse tipo de sinal por possibilitarem a melhora da qualidade e das características do sinal de forma totalmente digital, permitindo que as funções das SEs, como a de proteção, atuem de forma mais precisa.

Assim, nesse capítulo, serão apresentados alguns conceitos gerais, esclarecendo aspectos importantes para o entendimento deste trabalho. Primeiro descreve-se a norma IEC 61850 e os protocolos de comunicação definidos por ela, principalmente o *Sampled Value* (SV), e após, o processo de amostragem e reamostragem, que são abordados nesta pesquisa.

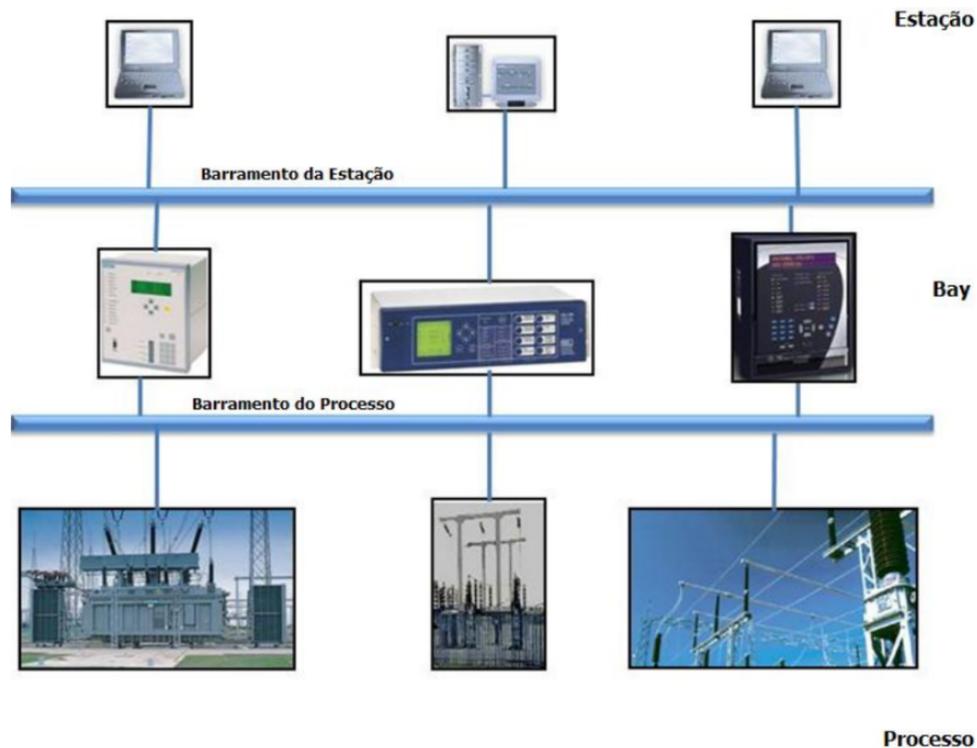
### 2.1 A NORMA IEC 61850

A norma IEC 61850 é um padrão muito importante na automação das SE, principalmente na definição e solução da infraestrutura de comunicação de dados, sendo assim um padrão essencial para automação e digitalização das SE. Essa norma possibilita padronizar a comunicação, a conectividade e a interoperabilidade dos dispositivos e sistemas de automação da subestação (SAS) de modo que atenda os requisitos de operações e funcionalidades dos mesmos (ANDERSSON; BRUNNER; ENGLER, 2003; DONOVAN et al., 2022).

A utilização dessa norma juntamente com alguns equipamentos, como IEDs e MUs, e redes de comunicação traz diversas vantagens para o Sistema de Automação de Subestação (SAS), que consegue realizar as funções de proteção, controle, medição e monitoramento de forma digital, tornando o SAS mais eficientes, confiáveis e com menor custo, embora possua alguns desafios para implementação (IGARASHI; SANTOS, 2014; INGRAM et al., 2013).

Para uma melhor organização e estruturação da SE e do SAS com a norma IEC 61850, a subestação é dividida em três diferentes níveis, o de processo, o de *bay* e o de estação, conectadas por dois barramentos de comunicação, o barramento de estação e o barramento de processo, necessários para tornar o SAS totalmente digital (JUNIOR et al., 2019). Essa divisão, juntamente com o exemplo de alguns equipamentos de cada nível, pode ser observada na Figura 1.

Figura 1 – Divisão do SAS em níveis e barramentos de comunicação.



Fonte: Adaptado de Junior et al. (2011).

Na estrutura da Figura 1, o nível de processo é responsável pela aquisição de dados, sendo constituído de equipamentos como sensores, transformadores de tensão e corrente, atuadores, disjuntores, entre outros. O nível de *bay* é responsável por realizar as funções de proteção, controle e medição através de equipamentos como os IEDs que irão atuar de acordo com os dados recebido do nível de processo. O último nível é o de estação, formado por interfaces homem-máquina (HMI, *Human Machine Interface*) e sistemas supervisórios (como o sistema SCADA), onde é realizada a supervisão e coordenação da subestação (ADEWOLE; TZONEVA, 2014).

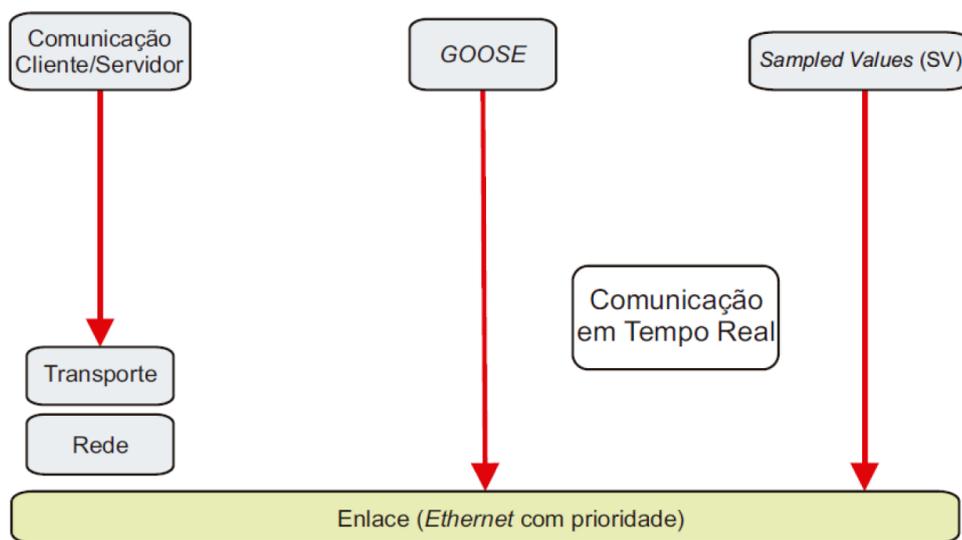
A conexão desses níveis se dá pelos barramentos de comunicação, onde o barramento de processo (BP) é responsável pela comunicação do nível de processo ao de *bay*, ou seja, é responsável por disponibilizar as informações do pátio da SE, como a posição dos disjuntores, e medições, como os sinais de tensão e corrente, para os IEDs. Já o barramento de estação possibilita a comunicação entre os próprios IEDs e entre os IEDs e o sistema supervisório, conectando o nível de *bay* com o de estação (JUNIOR et al., 2019; ADEWOLE; TZONEVA, 2014).

A comunicação nesses barramentos é realizada através de uma rede de comunicação de dados local (LAN, do inglês *Local Area Network*) construída com a tecnologia Ethernet (IEEE 802.3 ou ISO/IEC 8802-3) aproveitando das características e configurações inerentes dessa estrutura e tecnologia. Dessa forma, compartilha também a organização em camadas do modelo OSI (do inglês *Open Systems Interconnection*) e suas caracte-

rísticas, como, por exemplo, a possibilidade de estabelecer prioridades em determinadas comunicações de mensagens.

Para atender aos requisitos de comunicação a norma IEC 61850 estabelece três principais protocolos: o *Manufacturing Message Specification* (MMS), o *Generic Object Oriented Substation Event* (GOOSE) e o *Sampled Value* (SV). Esses protocolos são utilizados na rede de comunicação da subestação, do tipo LAN com a tecnologia Ethernet, e assim, são estruturados seguindo o modelo OSI, sendo implementados nas camadas de acordo com a aplicação. A organização em camadas desses protocolos pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Estrutura em camadas dos protocolos de comunicação da norma IEC 61850.



Fonte: Adaptado de Gurjão, Souza e Carmo (2007).

O protocolo MMS define uma comunicação do tipo Cliente/Servidor, sendo utilizado em mensagens mais lentas, sem requisitos rigorosos de atrasos. Por isso, esse protocolo atua em todas as camadas do modelo OSI, diferente do GOOSE e do SV, que não atuam em camadas como a de transporte e a de rede. Desse modo, as mensagens MMS são utilizadas em comunicações sem restrição de tempo, como na comunicação com o sistema supervisor, em funções de transferência de arquivos, em alarmes não críticos, entre outros (LOPES, 2013).

A mensagem GOOSE consiste de um protocolo para mensagens de alta prioridade, com requisitos de tempo e confiabilidade, sendo utilizado para comunicar os status de equipamentos e alarmes, como a mensagem de *trip*, sendo um dos principais tipos de mensagens para os equipamentos de proteção e automação, como os IEDs e disjuntores (JUSTINA, 2021). Devido a necessidade de comunicação em tempo real, mensagens rápidas com pouco atraso, esse protocolo atua apenas nas camadas de Aplicação, Apresentação, Enlace e Física. Para atender os requisitos de velocidade e confiabilidade, as mensagens GOOSE são do tipo *multicast*, sendo distribuída à todos os dispositivos da rede, de modo

que cada IED que receber a mensagem deve decidir se é de seu interesse ou não, e com esquema de retransmissão, onde a mensagem é reenviada em determinados períodos de tempo até o recebimento da confirmação do IED de destino (BHATTACHARJEE; JAMIL, 2019).

O outro protocolo, *Sampled Value* (SV), tem sua estrutura definida pela parte 9-2 da norma IEC 61850 e complementado pela IEC 61850 9-2LE, que especifica questões como método de publicação, aquisição e tratamento dos dados (GRASSET, 2018). O SV também é destinado a mensagens rápidas com rigorosos requisitos de tempo (tempo real), atuando nas mesmas camadas que a mensagem GOOSE, contudo é destinado para enviar medições de tensão e corrente das MUs para os IEDs. Assim, esse tipo de protocolo se torna fundamental para os sistemas de proteção e controle, permitindo que seus equipamentos verifiquem as condições da rede, se está normal ou está com condições anômalas (com sobretensão, subcorrente, entre outros) e atuem de acordo (JUSTINA, 2021).

Cada pacote SV possui uma *Application Service Data Unit* (ASDU), que estrutura os dados contendo uma amostra do sinal composta por quatro valores de tensão e quatro de corrente (das três fases e do neutro), e também um cabeçalho, contendo as informações de identificação do pacote. Sua transmissão segue o mecanismo de *publisher-subscriber* (emissor-receptor), onde um dispositivo envia a mensagem e outro assina/confirma seu recebimento, de maneira similar a mensagem GOOSE mas sem sistema de retransmissão (IGARASHI; SANTOS, 2014).

Conforme a norma, esses pacotes são gerados de acordo com uma frequência de amostragem fixa, de 4800 Hz resultando em 80 amostras por ciclo para uma aplicações de proteção à 60 Hz. Pode-se observar que a norma também define a opção de uma amostragem com 256 amostras por ciclo para aplicações de medição para qualidade da energia (WANNOUS; TOMAN, 2018). Além disso, cada pacote/amostra, recebe uma marcação, consistindo em um valor de contagem (chamado de *SmpCnt*, *Sample Count*) que pode ser verificado pelo receptor para fins de organização das amostras no *buffer*.

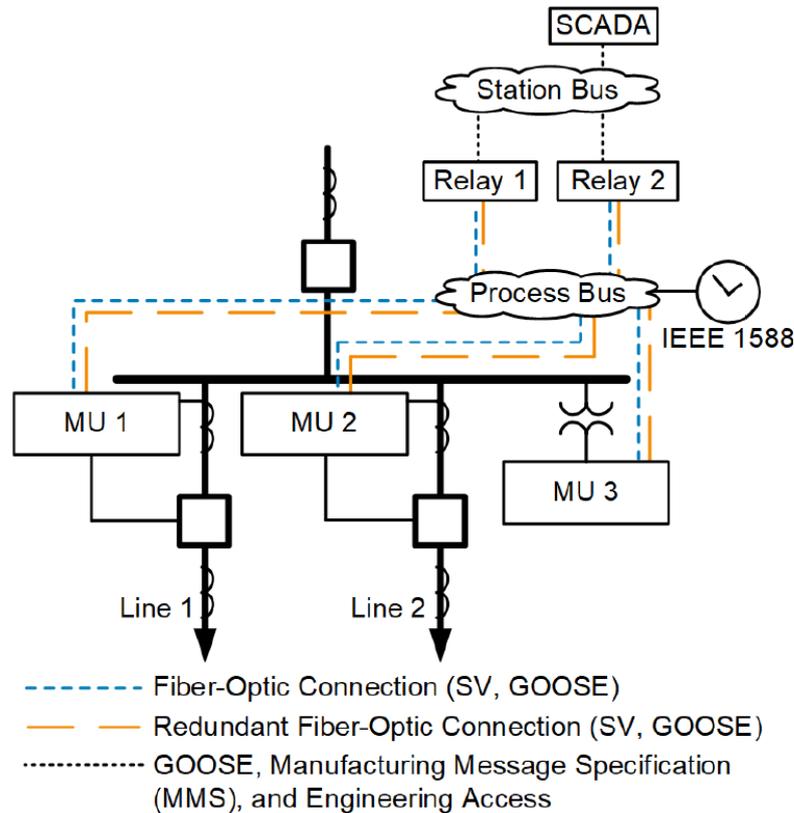
### 2.1.1 Comunicação utilizando SV

Conforme explicado anteriormente, praticamente toda a comunicação em uma subestação que segue a norma IEC 61850 ocorre nos dois barramentos (no de processos, o *Process Bus*, e no de estação, o *Station Bus*) seguindo os protocolos definidos pela norma (MMS, GOOSE e SV). Um exemplo de como essa comunicação é realizada em uma subestação pode ser observado na Figura 3.

Como se pode observar na Figura 3, a comunicação utilizando SV e GOOSE geralmente ocorre através de fibras ópticas das MUs, conectadas aos transformadores de corrente e potencial, até os IEDs passando pelo barramento de processos (BP). Já as

comunicações utilizando o MMS ocorre entre os IEDs e o sistema supervisório (SCADA) passando pelo barramento de estação. Desse modo se verifica que a comunicação utilizando SV ocorre basicamente entre dois equipamentos, a MU e o IED <sup>1</sup>.

Figura 3 – Exemplo de estruturação da comunicação na SE com protocolos da IEC 61850.



Fonte: Adaptado de Chase et al. (2019).

As mensagens SV são utilizadas principalmente para transferir sinais de corrente e tensão do secundário dos transformadores de corrente (TCs) e de potencial (TPs) de maneira digital. A digitalização do sinal pode ser realizada de duas maneiras, uma utilizando TCs e TPs ópticos, o que apresenta um custo elevado devido a necessidade de alterar os equipamentos existentes, ou com MUs. As MUs são equipamentos que podem ser instaladas próximos a equipamentos convencionais, como transformadores, para coletar os sinais gerado por eles, digitalizá-los e transferi-los por fibra óptica em pacotes SV (JUSTINA, 2021).

Já o destino das mensagens SV geralmente são os IEDs, que consistem basicamente em uma evolução dos relés eletromecânicos tradicionais, com funções de proteção, controle e monitoramento. Esse dispositivo utiliza as informações das grandezas elétricas recebidas de SV de MUs, por exemplo, para verificar as condições do sistema e enviar sinais, quando necessário, para outros dispositivos atuarem, como disjuntores, a fim de

<sup>1</sup>Como neste trabalho serão utilizado apenas os sinais SV, a explicação a seguir será focada apenas nesse tipo de comunicação, embora alguns conceitos possam ser aplicados aos outros protocolos.

isolar anomalias ou evitar problemas para a SE (JUSTINA, 2021).

Desse modo, a comunicação com SV consiste basicamente na amostragem de sinais de tensão e corrente dos TCs e TPs pelas MUs, que são enviados por pacotes (SV) digitalizados através do BP até os IEDs, para que esses atuem nas funções da subestação, como a proteção. Dessa forma, as mensagens SV possibilitam compartilhar valores e medições entre as MUs e os IEDs enviando, de maneira contínua, sequências de dados ou pacotes através da rede Ethernet do BP (WANNOUS; TOMAN, 2018).

Assim, uma sequência de pacotes SV (sequência de amostras de tensão e corrente) possibilita reconstruir esses sinais nos IEDs para que esses possam analisar e atuar de acordo com sua finalidade. Para isso, a norma IEC 61850 define suas características, como taxa de amostragem, requisitos de tempo, resolução, entre outros, de acordo com o propósito da medição, podendo ser destinado à proteção, controle ou medições (IGARASHI; SANTOS, 2014).

Vale observar que nesse tipo de comunicação, com mensagens SV, um processo de grande importância e utilizado em todas as aplicações mencionadas acima é a amostragem dos sinais de tensão e corrente, por isso, esse processo de amostragem será descrito a seguir.

## 2.2 A AMOSTRAGEM E REAMOSTRAGEM DE SINAIS

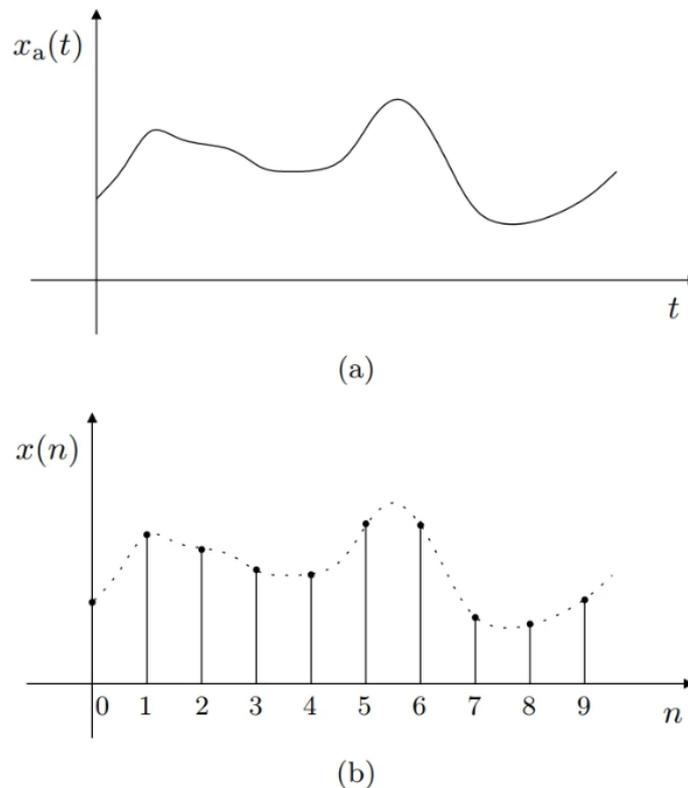
A amostragem é um processo necessário para conversão de sinais analógicos em sinais digitais, responsável por transformar um sinal de tempo contínuo em um sinal de tempo discreto. Desse modo, esse processo converte o sinal contínuo em uma sequência de pulsos que marcam a amplitude do sinal contínuo em determinados instantes de tempo definidos pela taxa de amostragem (NALON, 2013).

A taxa de amostragem, também chamada de intervalo ou período de amostragem  $T_S$ , é a grandeza que define o momento em que é obtida a informação da amplitude do sinal contínuo, ou seja, o instante de cada amostra. Muitas vezes essa grandeza é definida pela frequência de amostragem  $F_S$ , sendo o recíproco do período, dado por  $F_S = 1/T_S$ . Disso pode-se definir a amostragem matematicamente pela Equação (2.1).

$$x(n) = x_a(nT_S) \quad (2.1)$$

Onde  $x(n)$  é o sinal discreto (ou amostrado),  $n$  é a variável de tempo discreto e  $x_a$  é o sinal de tempo contínuo, onde as amostras são obtidas em  $nT_S$ , definidas a um período de amostragem  $T_S$ . A amostragem, descrita dessa forma, pode ser observada na Figura 4, onde o sinal no tempo contínuo  $x_a$  é mostrado em (a) e o sinal amostrado  $x(n)$  em (b).

Figura 4 – Exemplo da amostragem de sinais.



Fonte: Adaptado de Diniz, Silva e Netto (2014).

Para observar de forma mais detalhada como é realizado o processo de amostragem, uma forma equivalente é descrevê-lo no tempo contínuo com a utilização de um trem de impulsos  $p(t)$ , descrito pela Equação (2.2), formado por uma sequência de impulsos unitários  $\delta(t)$  deslocados no tempo de acordo com o período de amostragem  $T_S$ .

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_S) \quad (2.2)$$

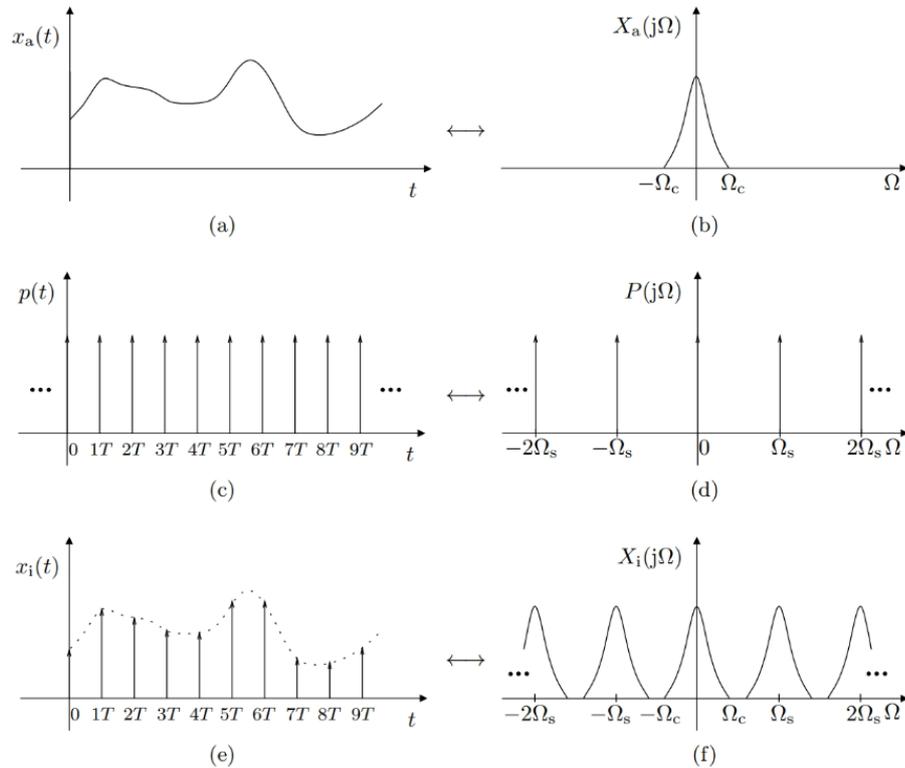
Utilizando o trem de impulsos  $p(t)$  como uma função de modulação da amostragem e aplicando a mesma no sinal contínuo  $x_a(t)$ , através da multiplicação dos dois sinais, podemos obter uma representação da amostragem  $x_i(t)$ . Assim, considerando as equações (2.1) e (2.2) e as devidas alterações temos a representação da amostragem dada por  $x_i(t)$  na Equação (2.3).

$$x_i(t) = x_a(t)p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)\delta(t - nT_S) \quad (2.3)$$

Esse sinal  $x_i(t)$  representa o sinal discreto  $x(n)$  no tempo contínuo, onde cada amostra é representada por um impulso. Os sinais dessa representação podem ser observados na Figura 5 nos gráficos à esquerda (a), (c) e (e), para o sinal contínuo  $x_a(t)$ , o trem

de impulsos  $p(t)$  e a multiplicação deles  $x_i(t)$ , respectivamente, junto com seus espectro em frequência, em (b), (d) e (f) obtidos pela transformada de Fourier (NALON, 2013; DINIZ; SILVA; NETTO, 2014).

Figura 5 – Exemplo da amostragem de sinais com trem de impulsos e representação na frequência.

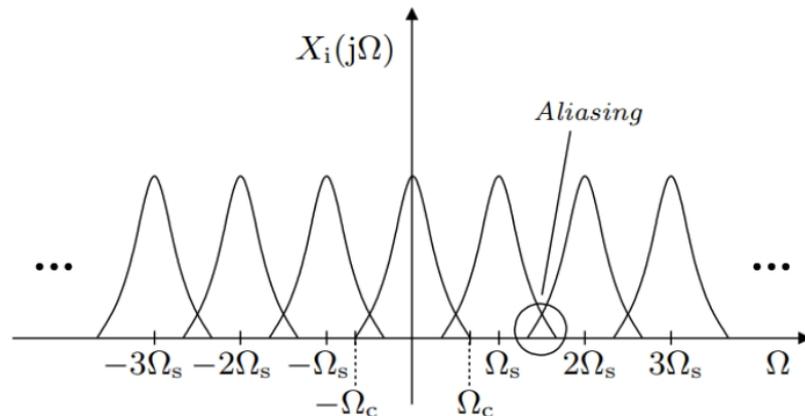


Fonte: Adaptado de Diniz, Silva e Netto (2014).

A Figura 5 possibilita observar o efeito da amostragem na frequência considerando  $\Omega_C$  a largura de banda do sinal contínuo. Como observa-se em (f), a reamostragem resulta em cópias do espectro do sinal contínuo deslocadas em múltiplos da frequência de amostragem  $\Omega_S = 2\pi/T_S$ . Isso demonstra uma importante questão da reamostragem, denominado de teorema da amostragem, onde a frequência de amostragem deve ser maior que o dobro da largura de banda do sinal  $\Omega_S > 2\Omega_C$ . Essa frequência de amostragem de  $2\Omega_C$  é chamada de frequência de Nyquist.

Caso esse teorema não seja respeitado, ou seja, a frequência de amostragem é menor que a frequência de Nyquist, o sinal sofrerá o efeito de *aliasing*, que pode ser observado na Figura 6. Isso faz as cópias do espectro se sobreporem, interferindo uma na outra e adicionando erros (como atenuação, distorção ou inversão do sinal) impedindo a reconstrução correta do sinal (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014).

Figura 6 – Exemplo do efeito de *aliasing*, situação onde  $\Omega_S < 2\Omega_C$ .



Fonte: Adaptado de Diniz, Silva e Netto (2014).

Isso mostra que um sinal amostrado só pode ser completamente reconstruído se seguir essa limitação<sup>2</sup>. Por exemplo, um sinal que segue a norma IEC 61850, como um sinal de corrente SV, e é amostrado em uma frequência de amostragem  $F_S = 4800\text{Hz}$ , só consegue representar componentes de frequência abaixo dos  $2400\text{Hz}$ . Por esse motivo as análises em frequência realizadas nesta pesquisa são limitadas nesse valor.

### 2.2.1 A reamostragem

A reamostragem consiste em uma técnica de processamento de sinais onde um sinal discreto (amostrado) é reconstruído através de técnicas de interpolação, a fim de tornar o sinal novamente contínuo, sendo então realizado um novo processo de amostragem. Esse processo possibilita modificar a taxa de amostragem para que esta se adéque as necessidades da aplicação, uma vez que permite transformar o sinal discreto em uma nova representação alterando os instantes de cada amostra (PARKER; KENYON; TROXEL, 1983).

Desse modo, um sinal discreto (amostrado) é interpolado, ou seja, são utilizadas funções (por exemplo a sinc e a cubic spline) para estimar os valores do sinal entre cada amostra do mesmo, convertendo-o em um sinal contínuo (SREEDEVI; NARAYANA-MURTHY; SEELAMANTULA, 2016). Vale salientar que para que esse processo ocorra de maneira adequada, a primeira amostragem deve ser realizada seguindo o teorema da amostragem, ou seja, a frequência de amostragem deve ser maior que a frequência de Nyquist, caso contrário o sinal sofrerá do efeito de *aliasing* pela sobreposição da repetição do espectro, conforme mostra a Figura 6.

<sup>2</sup>Uma forma de garantir isso e evitar o efeito do *aliasing* é limitando a largura de banda do sinal através de um filtro passa-baixa, chamado de filtro *anti-aliasing*.

Com isso, é possível repetir o processo de amostragem no sinal interpolado para a nova taxa de amostragem. Esse processo, de modo a simplificá-lo e melhorar sua eficiência, pode ser realizado estimando, pela interpolação, apenas os valores do sinal nos instantes das amostras da nova amostragem. Assim, não é necessário reconstruir todo o sinal, apenas as amostras de interesse.

Neste trabalho, essa técnica é utilizada nos sinais SV gerados de acordo com a norma IEC 61850, onde a primeira amostragem é realizada, seguindo a descrição acima, pela MU e o processo de interpolação e reamostragem é realizado pelo IED. Neste caso, a MU amostra o sinal a uma frequência de amostragem constante ( $4800\text{Hz}$ ), mas esses sinais de tensão e corrente podem sofrer variações, e assim, o IED realiza a reamostragem para corrigir isso, adaptando a frequência de amostragem a fim de manter o número de amostras por ciclo do sinal constante.

Isso irá aumentar a precisão de análises de sinais como de RMS e espectral (pela FFT), removendo erros e medições instáveis. Desse modo, a reamostragem possibilita remover oscilações no RMS existente nos sinais da rede de energia (BASTOS; SANTOSO, 2019). Além disso, essa técnica também melhora análises espectrais reduzindo o vazamento espectral e os erros de medições baseadas na transformada de Fourier (BORKOWSKI; BIEN, 2009). Devido ao aumento da precisão dessas análises em sinais de energia, de tensão e corrente, a utilização dessa técnica nos IEDs irá melhorar o desempenho dos mesmos.

## 2.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram abordados os conceitos da norma IEC 61850, que consiste em um padrão importante para a automação e digitalização de subestações de energia definindo, entre outras coisas, os protocolos de comunicação, como o SV que permite comunicar informações de tensão e corrente entre os equipamentos. Nisso, um processo de grande importância é a amostragem de sinais, que foi analisado neste capítulo descrevendo como esse processo é realizado.

Ainda foi observado uma técnica de processamento digital de sinais chamada de reamostragem, que consiste em refazer o processo de amostragem com auxílio da interpolação de sinais, permitindo corrigir a taxa de amostragem e aumentar a precisão de análises espectrais e de RMS por exemplo. Desse modo, no próximo capítulo serão abordados alguns esquemas de reamostragem descrevendo os processos e técnicas necessárias para sua implementação.

### 3 ESQUEMAS DE REAMOSTRAGEM

A reamostragem traz diversos benefícios aos sinais SV, como a redução do vazamento espectral por exemplo, que aumentam a precisão de análises e medições, entretanto é necessário uma análise mais aprofundada para avaliar seu desempenho. Além disso, existem diferentes metodologias que podem ser empregadas na implementação dessa técnica de processamento de sinais. Neste capítulo, serão descritos alguns esquemas de reamostragem propostos pela literatura e alguns métodos utilizando formas convencionais de interpolação.

Com base em uma revisão de literatura foram encontrados algumas pesquisas que abordam esquemas de reamostragem. Alguns desses trabalhos foram abordados no capítulo de Introdução desta dissertação, como o de Chen et al. (2020) onde é proposto um esquema chamado de “*Modified Sinc*”, o de Cai et al. (2010) onde é proposto o esquema chamado de “Smart Resampling” e os trabalhos de Santos et al. (2020) e Lima et al. (2010) que utilizam a reamostragem para análise da qualidade de energia em tempo real, mas não propõem nenhum esquema.

Além desses, foram observados trabalhos como o de Cimadevilla, Ferrero e Yarza (2014) que analisa a reamostragem com polinômios de terceira ordem aplicados à IEDs baseados em SV. O trabalho de (BORKOWSKI; BIEN, 2009) propõem um algoritmo de reamostragem coerente com um esquema para implementação completo, desde a estimação de frequência até a reamostragem em si, se limitando a avaliar o algoritmo proposto. Também foram observados outros trabalhos que abordam a reamostragem, como o de Sreedevi, Narayanamurthy e Seelamantula (2016) e Parker, Kenyon e Troxel (1983) por exemplo, mas por saírem um pouco da área de análises de sinais de energia, não utilizados nos esquemas abordados.

Também foram observados alguns métodos convencionais de interpolação que podem ser usados na reamostragem. Dentre esses, as interpolações de retenção de ordem zero (*Zero-order-hold*) que mantém o valor da última amostra até a próxima e de primeira ordem (*First-order-hold*) que traça uma linha reta entre as amostras adjacentes, que realizam a interpolação de forma mais abrupta, gerando certa descontinuidade nas amostras exigindo uma pós filtragem para melhor desempenho. A interpolação “Cubic Spline” que usa polinômios de terceira ordem nos segmentos entre as amostras e a interpolação com polinômios de Lagrange que define polinômios em cada grupo de amostras, consistem de métodos que possibilitam uma interpolação mais suavizadas. E a interpolação utilizando a função “Sinc” que também possibilita a interpolação suavizada e idealmente a reconstrução perfeita do sinal.

Dessa forma, foram escolhidos dois esquemas propostos pela literatura, o “*Modified Sinc*” e o “Smart Resampling” por Chen et al. (2020) e Cai et al. (2010). Esses, dentre os

trabalhos observados, propõem esquemas de reamostragem dentro da área de energia, diferente do restante que não propõem técnicas de reamostragem ou estão fora da área de interesse, a exceção é o trabalho de Cimadevilla, Ferrero e Yarza (2014) que propõem um esquema completo para reamostragem, o que por sua vez aumentaria consideravelmente a complexidade para a comparação realizada na presente pesquisa.

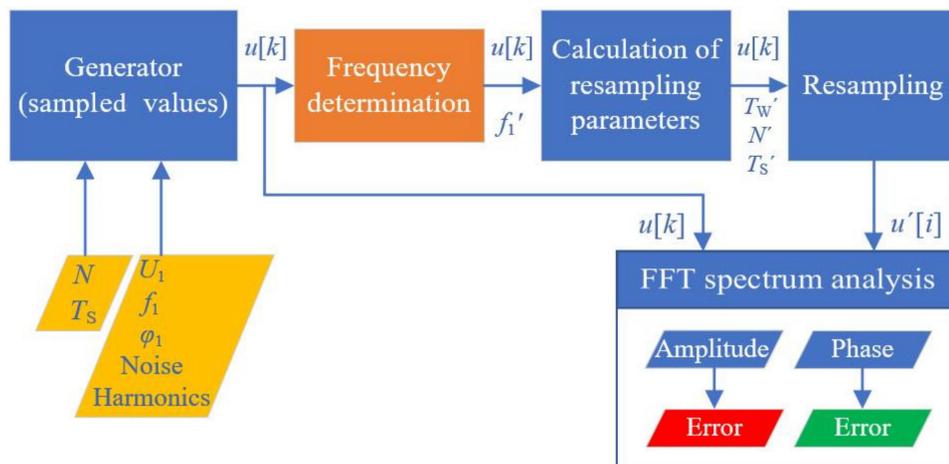
Foram escolhidos também dois esquemas utilizando métodos convencionais de interpolação, a “Cubic Spline” e a “Sinc”. A “Cubic Spline” por permitir a interpolação suavizada e por ser amplamente utilizada na maioria dos trabalhos observados por apresentar um bom desempenho. A “Sinc” também foi escolhida por apresentar um bom desempenho (idealmente a reconstrução perfeita do sinal, embora isso não seja possível na prática). Além disso, esses métodos convencionais foram escolhidos também devido ao conhecimento prévio do autor.

Assim, a seguir serão descritos os quatro métodos de reamostragem escolhidos, o “*Modified Sinc*” e o “Smart Resampling” da literatura seguindo a proposta de implementação dos autores, e a “Cubic Spline” e a “Sinc” de métodos convencionais sendo utilizados na reamostragem como interpolações sem modificações.

### 3.1 MODIFIED SINC

O primeiro esquema de reamostragem analisado é proposto por Chen et al. (2020) chamado “*Modified Sinc*” no qual é realizada uma modificação na função sinc. Para implementar esse esquema, os autores utilizam o processo ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Processo de reamostragem usado pelo “*Modified Sinc*”.



Fonte: Adaptado de Chen et al. (2020).

Como mostrado na Figura 7, inicialmente é gerado um sinal digital  $u[k]$ , simulando um sinal SV. Na sequência, é realizada a determinação da frequência do sinal  $f_1'$  e o

cálculo dos parâmetros para reamostragem, como a frequência de reamostragem ou o período de reamostragem  $T'_S$ , o numero de amostras  $N'$  e o tamanho da janela  $T'_W$ . Após, o sinal é reamostrado utilizando o método proposto pelos autores, e pode ser analisado pelo espectro da FFT. As equações para calcular os parâmetros de reamostragem são mostradas nas Equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4).

$$T'_W = T_W - (\omega \cdot T_S + T_{Del}) \quad (3.1)$$

$$N' = 2^{\text{Ceil}(\log(N,2))} \quad (3.2)$$

$$T'_S = (N'_{per} \cdot T_1) / N' \quad (3.3)$$

$$N'_{per} = \text{Floor}(T'_W / T_1) \quad (3.4)$$

Nessas equações,  $\omega$  and  $T_{Del}$  são variáveis para definir a quantidade de amostras utilizadas em cada método, considerando as amostras a serem excluídas ( $\omega$ ) e o tempo de atraso ( $T_{Del}$ ). A variável  $N'_{per}$  é o número de períodos do sinal e  $T_1$  é o período definido pela determinação de frequência.

Nesse esquema de reamostragem, proposto por Chen et al. (2020), é realizada uma modificação no núcleo da interpolação com a função sinc. Essa modificação consiste, aproximadamente, em um janelamento utilizando uma função cosseno e considerando algumas variáveis de ajuste. A implementação desse método de reamostragem é descrita pelas Equações (3.5), (3.6) e (3.7).

$$u'(i) = \sum_{k=0}^{N-1} u[k] \cdot \text{Intp}(x) \quad (3.5)$$

$$\text{Intp}(x) = \begin{cases} A \cdot \cos^q \left[ \frac{\pi}{N_F} \cdot x \right] \cdot \text{sinc}(\pi \cdot x), & -\frac{N_F}{2} < x < \frac{+N_F}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$x = i \cdot T'_S / T_S - k \quad (3.7)$$

Nessas equações,  $A$  é uma variável para dimensionamento,  $q$  é um expoente da função cosseno e  $N_F$  é uma limitação do tamanho da janela usada para limitar o janelamento. A variável  $x$  é utilizada para definir os instantes das amostras interpoladas, como ocorre na interpolação com função sinc. Por fim, o sinal digital  $u'(i)$ , obtido da Equação (3.5), é o sinal reamostrado, que pode ser analisado através da FFT, por exemplo.

Essas variáveis ( $A$ ,  $q$  e  $N_F$ ) possibilitam ajustar alguns aspectos do esquema “*Modified Sinc*”. Onde a variável de dimensionamento  $A$  geralmente é utilizada como 1 para

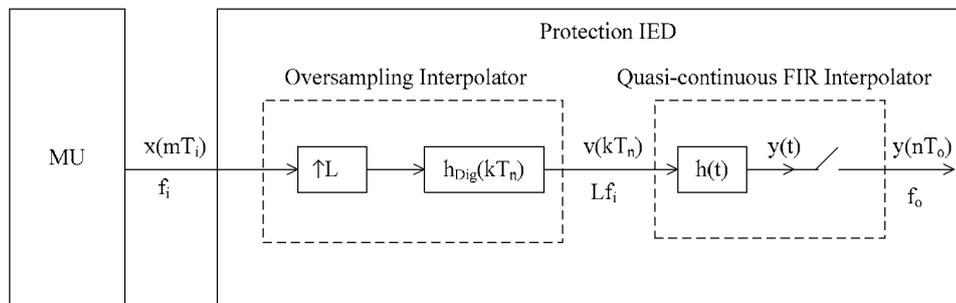
não adicionar nem ganhos nem perdas de amplitude do sinal. A variável de limitação da janela  $N_F$  possibilita otimizar o algoritmo limitando o número de amostras a serem computadas e reduzindo a quantidade de cálculos necessários. E a variável  $q$  é o expoente do cosseno que, basicamente, define a largura do lóbulo principal do janelamento, de modo que quanto maior for, mais estreito será o lóbulo.

Os valores dessas variáveis utilizados pelos autores são  $A = 1$ ,  $q = 6$  e  $N_F = 40$ . No presente trabalho, foram utilizados esses mesmos valores para as análises realizadas, entretanto, deve-se levar em consideração que esses valores poderiam ser otimizados de acordo com aplicações específicas.

### 3.2 SMART RESAMPLING

Outro esquema para reamostragem de sinal encontrado na literatura é proposto por Cai et al. (2010) chamado “Smart Resampling”. Esse esquema segue duas etapas, na primeira é implementado um interpolador de sobreamostragem e na segunda um interpolador FIR (resposta de impulso finita, do inglês *Finite Impulse Response*) quase-contínuo. As etapas são representadas na Figura 8.

Figura 8 – Processo de reamostragem usado pelo “Smart Resampling”.



Fonte: Adaptado de Cai et al. (2010).

Esse esquema utiliza um sinal SV  $x(mT_i)$  gerado por uma MU, de forma semelhante ao método anterior, com uma frequência de amostragem  $f_i$ . Disso, no IED, é implementada a reamostragem, onde a primeira etapa é o “Oversampling Interpolator”, implementando uma sobreamostragem de ordem  $L$ , na qual  $L - 1$  amostras nulas são inseridas entre cada amostra do sinal e após é realizada uma filtragem com um filtro passa-baixas. Esse processo é descrito pela Equação (3.8), no domínio do tempo, e a Equação (3.9), no domínio da transformada Z.

$$v(kT_n) = \sum_{\forall u} h_{Dig}(kT_n - uT_i)x(uT_i) \quad (3.8)$$

$$V(z) = H(z)X(z^L) \quad (3.9)$$

Nessas equações,  $h_{Dig}$  ou  $H$  representam os coeficientes do filtro passa-baixa e  $L$  a ordem da sobreamostragem. Essa etapa pode ser implementada utilizando uma estrutura polifásica para melhorar a eficiência computacional.

Em alguns testes realizados verificou-se que a utilização da estrutura polifásica para implementação nessa etapa reduz o tempo computacional do esquema aproximadamente pela metade, sem afetar significativamente o desempenho da reamostragem. Contudo, no restante desta pesquisa foi utilizado o esquema sem essa estrutura pois, apesar de melhorar a eficiência computacional, sua implementação é mais complexa.

A próxima etapa, o “Quasi-continuous FIR Interpolator”, é baseada na interpolação de Lagrange para reconstruir o sinal quase em um sinal contínuo, e então realizar a reamostragem. As Equações (3.10) e (3.11) descrevem a implementação dessa etapa. Isso conclui o processo proposto pelos autores, resultando no sinal  $y(t_0)$  reamostrado a uma nova taxa  $T_0$ .

$$y(t_0) = y(nT_0) = v(l_0T_n)(1 - \Delta_n) + v[(l_0 + 1)T_n]\Delta_n \quad (3.10)$$

$$l_0 = \text{Int}(t_0/T_n), \Delta_n = nT_0/(T_n - l_0) \quad (3.11)$$

Assim como no esquema de reamostragem anterior, tem-se algumas variáveis que podem ser otimizadas para aplicações específicas. Os autores utilizaram um  $L = 20$  e um filtro passa-baixa de Nyquist. Para as análises realizadas nesse trabalho, foi utilizada a mesma sobreamostragem de ordem  $L = 20$ , mas foi utilizado um filtro passa-baixa do tipo FIR com uma janela de Hamming de ordem 90 e frequência de corte  $200Hz$ , escolhido pela qualidade do filtro, por alguns testes realizados e por questões de implementação.

### 3.3 MÉTODOS CONVENCIONAIS DE INTERPOLAÇÃO

Além dos esquemas de reamostragem propostos na literatura, dois métodos utilizando interpolações convencionais sem nenhuma modificação foram analisados. Esses métodos utilizam a interpolação “Cubic Spline” e a interpolação com a função “Sinc”. Por se tratarem de métodos de interpolação, essas técnicas são utilizadas para reconstruir o sinal analógico (digitalmente um sinal com amostras muito próximas), contudo, neste trabalho eles são aplicados ao sinal para reconstruir apenas as novas amostras (para o sinal reamostrado).

A interpolação da “Cubic Spline” consiste na reconstrução do sinal utilizando um

polinômio de terceira ordem. Esse polinômio é descrito na Equação (3.12), onde  $\alpha$  são os coeficientes determinados pela análise de mínimos quadrados das amostras, neste caso do sinal SV (INGLE; PROAKIS, 2011).

$$x_a(t) = \alpha_0(n) + \alpha_1(n)(t - nT_S) + \alpha_2(n)(t - nT_S)^2 + \alpha_3(n)(t - nT_S)^3, nT_S \leq t < (n+1)T_S \quad (3.12)$$

Este tipo de interpolação utiliza da aproximação polinomial por partes, onde é estimado um polinômio cúbico (de terceira ordem) em cada par de amostras. Assim, essa técnica possibilita a reconstrução dos sinais de forma mais suaves, pois em cada polinômio (como os da Equação (3.12)) possui quatro coeficientes (valores de  $\alpha$ ) para cada segmento (*spline*), trazendo flexibilidade suficiente para garantir uma interpolação continuamente diferenciável (BURDEN; FAIRES, 2011).

A interpolação com a função “Sinc” consiste em aplicar a função sinc, definida na Equação (3.13), em cada amostra do sinal e após realizar a soma. A implementação desse processo é descrita na Equação (3.14) e ilustrada na Figura 9 onde à esquerda temos o sinal no tempo  $x_a(t)$  e amostrado  $x(n)$ , e à direita a interpolação, aplicando a sinc em cada amostra (INGLE; PROAKIS, 2011).

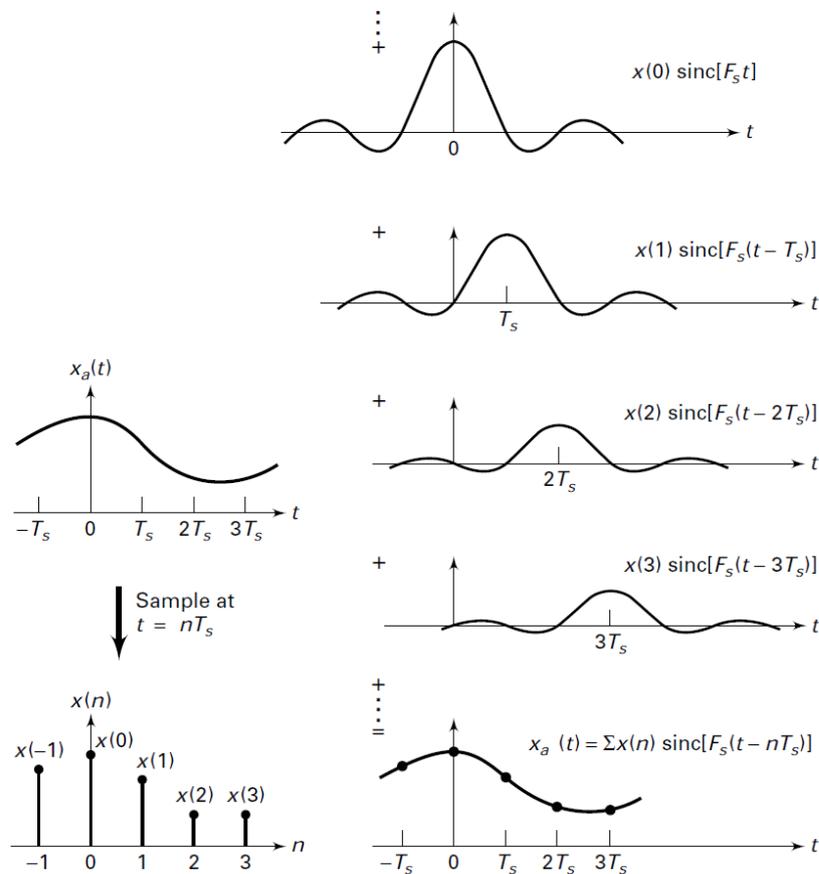
$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x} \quad (3.13)$$

$$x_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot \text{sinc}[F_S(t - nT_S)] \quad (3.14)$$

Esse tipo de interpolação é de importante observação pois a função sinc consiste na resposta ao impulso de um filtro passa-baixa ideal, e o processo descrito na Equação (3.14) nada mais é que a filtragem do sinal. Dessa forma, essa técnica representa a reconstrução ideal do sinal, mostrado na Figura 9, pois essa filtragem removeria as repetições do espectro causada pela amostragem, observado na Figura 5 (f). Entretanto esse processo ideal não pode ser realizado na prática, pois o sistema é não causal e para ter um resultado exato seria necessário um número infinito de amostras (INGLE; PROAKIS, 2011; NALON, 2013).

Embora a utilização ideal da sinc não seja possível, podemos realizar sua implementação seguindo o mesmo procedimento, mesmo com as limitações físicas, ou seja, limitando o tamanho da sinc (que idealmente seria infinito) com um truncamento (janelamento) da função sinc e tornando o somatório da Equação (3.14) finito, o que resulta apenas em uma aproximação do filtro ideal. Desse modo, a sinc limitada é aplicada às amostras e somada, estimando os valores nos instantes necessários para formar o sinal reamostrado, aos moldes das outras implementações.

Figura 9 – Ilustração da interpolação com função Sinc.



Fonte: Adaptado de Ingle e Proakis (2011).

### 3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, inicialmente é realizada uma análise de métodos para a reamostragem de sinais, abordando esquemas propostos pela literatura e métodos convencionais de interpolação de sinais que permitem a implementação da reamostragem. Com isso são descritos quatro métodos, o “*Modified Sinc*”, o “*Smart Resampling*”, a “*Cubic Spline*” e a “*Sinc*”, analisando os passos para sua implementação.

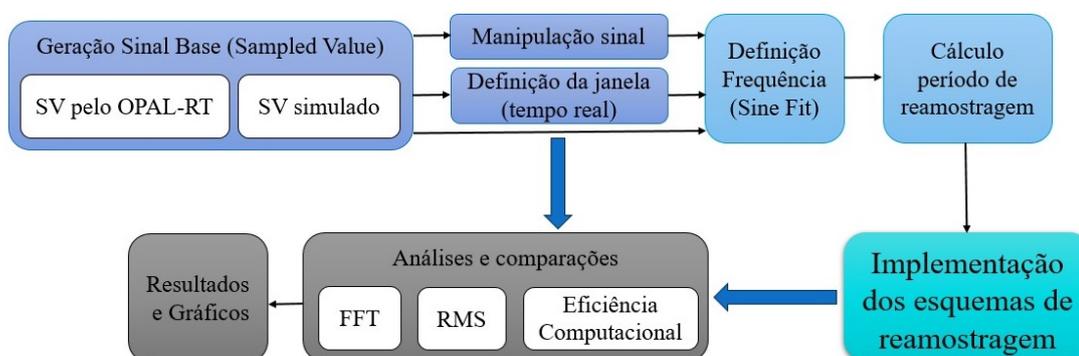
Para avaliar o desempenho e as características desses esquemas e da reamostragem em si, é necessário realizar análises e comparações dos mesmos, o que pode ser feito através de simulações. Desse modo, no próximo capítulo são descritas as metodologias e comparações, implementadas nesta pesquisa, para avaliar e observar os esquemas e a reamostragem.

## 4 METODOLOGIA E COMPARAÇÕES

Uma forma de melhor analisar e estudar os métodos de reamostragem descritos anteriormente e avaliar seu impacto nos sinais SV é através de simulação. Para isso, esses esquemas foram implementados no *software* matemático OCTAVE, que possibilita simular e comparar diversos aspectos dos esquemas de reamostragem e dos sinais SV.

Assim, as simulações foram realizadas seguindo o fluxograma mostrado na Figura 10, que ilustra as principais etapas implementadas. Desse modo, esse fluxograma descreve o processo utilizado nas simulações para conseguir avaliar os esquemas de reamostragem de maneira mais abrangente.

Figura 10 – Fluxograma do processo implementado nas simulações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Como mostra o fluxograma na Figura 10, as simulações iniciam com a geração de um sinal base que consiste em um sinal SV, os sinais gerados nessa etapa serão descritos na seção 4.1 a seguir. Na sequência, são realizadas algumas manipulações do sinal base para permitir a análise de alguns efeitos que podem estar presente no sinal, sua implementação é descrita na seção 4.2. Outra possibilidade de análise é para implementação da reamostragem em tempo real, descrito na seção 4.3, onde é simulada a situação onde os pacotes SV são gerados sequencialmente, como se a reamostragem fosse realizada em tempo real no IED.

Após ter o sinal base, suas modificações ou implementação em tempo real, é realizada a definição da frequência do sinal. Para isso, é utilizado um algoritmo que utiliza mínimos quadrados para determinar os parâmetros de um sinal senoidal, o *Four-Parameter Sine Wave Fit Algorithm* (IEEE-STD-1057) (Marko Neitola, 2023).

Disso, é realizado o cálculo do período de reamostragem, uma vez que esse algoritmo permite estimar a frequência fundamental do sinal ( $T_1$ ) e assim utilizá-la na Equação (3.3) para determinar a nova taxa de reamostragem. Os outros parâmetros de reamostragem são mantidos os mesmos, ou seja, o mesmo tamanho de janela ( $T'_W = T_W$ ) e o mesmo numero de amostras ( $N' = N$ ).

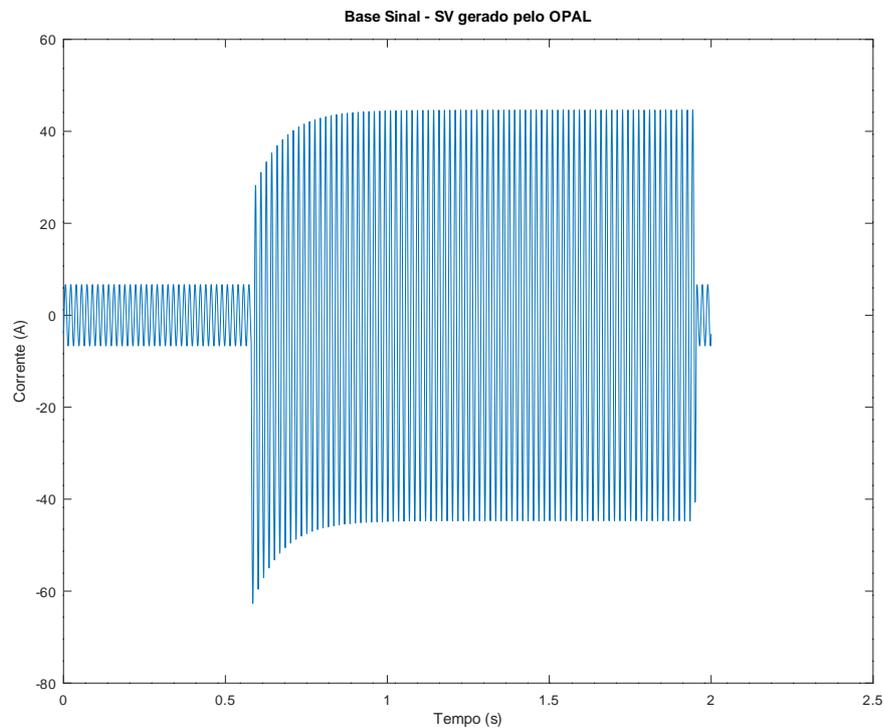
Com isso é possível implementar os esquemas de reamostragem analisados seguindo as descrições e equacionamentos mostrados no capítulo 3. Após, foram realizadas as análises e comparações, tanto no sinal reamostrado pelos diversos esquemas, quanto no sinal base após suas modificações, essa implementação será descrita na seção 4.4. Por fim, foram apresentados os resultados e gráficos associados as simulações.

#### 4.1 SINAL BASE PARA AS SIMULAÇÕES (SINAL SV)

O sinal base utilizado nas simulações representa um sinal SV gerado por uma MU, ou seja, um sinal digital de tensão e corrente onde cada amostra representa um pacote do sinal SV. Esse sinal é amostrado a uma frequência  $F_S = 4800Hz$  de acordo com a padronização proposta pela IEC 61850-9-2.

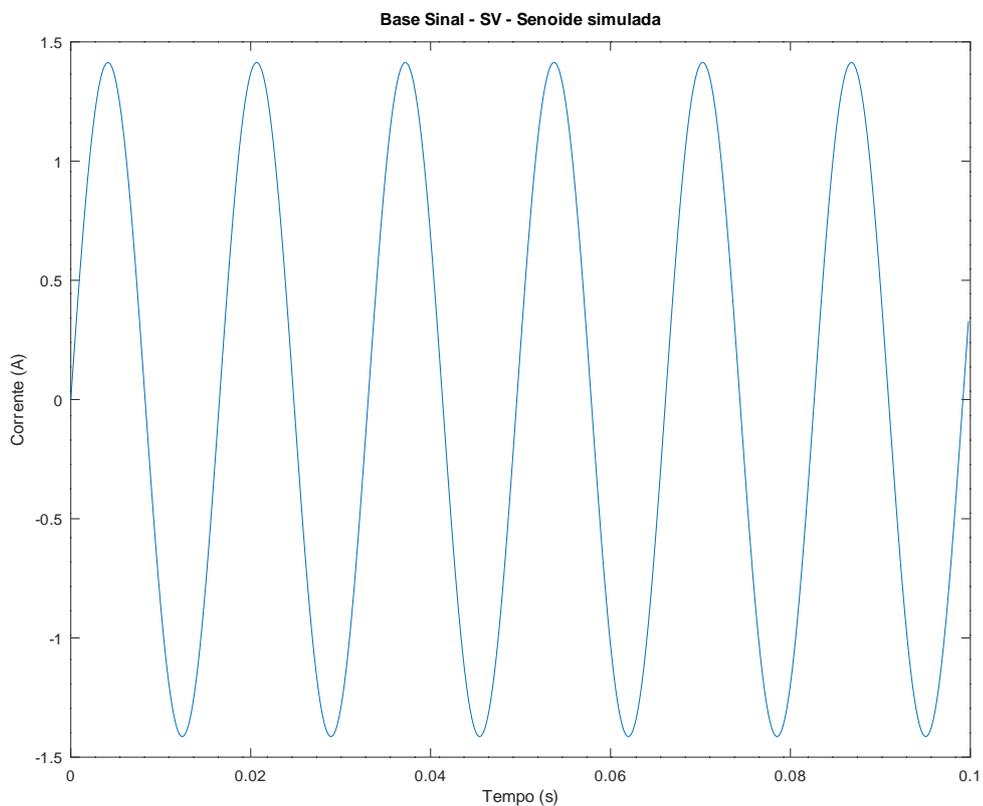
Para as análises realizadas neste trabalho, o sinal base (sinal SV) é definido de duas maneiras. A primeira considera um sinal mais realista, consistindo em um sinal *Sampled Value* gerado pelo simulador de tempo real OPAL-RT's Real-time Simulator (RTS) OP5700, que simula uma subestação real com um curto circuito trifásico. Esse sinal pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Sinal base, gerado pelo OPAL-RT.



O segundo sinal base desenvolvido para as análises consiste em uma senoide simulada, tal como um sinal de corrente SV. Ele é definido com uma corrente RMS igual a  $1A$ , fase nula ( $0^\circ$ ) e frequência base de  $60.5Hz$ , ou seja, com uma pequena alteração de um sinal da rede elétrica (que idealmente seria  $60Hz$ ) a fim de possibilitar a observação do vazamento espectral, conforme mostrado na Figura 12. Esse sinal simulado será utilizado para permitir a variação de algumas de suas características, possibilitando avaliar os esquemas de reamostragem de maneira mais abrangente.

Figura 12 – Sinal base, senoide simulada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Baseado nesses sinais, a seguir, serão descritas algumas comparações e análises que podem ser realizadas. Em cada uma delas será indicado o sinal base utilizado, o gerado pelo OPAL e mostrado na Figura 11 ou o sinal senoidal simulado.

## 4.2 ANÁLISE EFEITOS DO SINAL

Os sinais, tal como os SV, estão sujeitos a efeitos causados pelas redes de comunicações ou pelos próprios equipamentos presentes no sistema, como por exemplo, o efeito jitter e da perda de pacotes. O jitter consiste em uma variação no tempo de cada amostra do sinal, ou seja, há uma variação no período de amostragem fazendo com que as amostras não sejam perfeitamente espaçadas. A perda de pacotes é um efeito mais crítico, pois implica na perda de amostras do sinal, o que resulta em uma perda de informação do sinal.

De acordo com Mocanu e Thiriet (2021), o efeito jitter está presente nos sinais SV, entretanto, o uso de redes redundantes e marcações de tempo (*timestamps*) fazem com que seu impacto seja praticamente insignificante. Para verificar isso e analisar se o jitter afeta a reamostragem, nesta pesquisa este efeito é simulado adicionando um valor aleatório ( $\Delta T$ ) em cada amostra do sinal. Esse valor será limitado a uma parcela do período de amostragem ( $T_s$ ), ou seja, o jitter limitará o valor máximo adicionado a cada amostra ( $\Delta T/T_s$ ), onde  $\Delta T$  é um valor aleatório entre 0 e 1 definido por um gerador de números pseudo-aleatórios (função “rand” do *software* OCTAVE).

Dessa forma, o valor do jitter ( $\Delta T/T_s$ ) limitará o deslocamento máximo da amostra, por exemplo, um jitter de 0,1 irá deslocar a amostra do seu valor ideal em até 10% do período de amostragem. Isso possibilita adicionar o jitter aleatoriamente em cada amostra sem que essa se sobreponha a outra, e avaliar sua variação, pois aumentando seu valor pode-se observar o comportamento da reamostragem em deslocamentos (jitter) máximo maiores.

Outro efeito simulado é da perda de pacotes que é um problema existente na maioria das redes de comunicação, incluindo no barramento de processos (*Process Bus*) e no SV. Além disso, como comentado e analisado por Chen, Guo e Crossley (2015), esse é um efeito crítico e deve ser considerado, uma vez que a perda de informação causada por ele, no pior caso, pode comprometer toda a operação do sistema.

Para simular a perda de pacotes, nesta pesquisa será considerada uma perda de pacotes aleatória, onde uma porcentagem das amostras, selecionadas aleatoriamente através do gerador de números pseudo-aleatórios, será zerada, representando um pacote perdido. Essa porcentagem de pacotes perdidos é definida de acordo com um ciclo do sinal, sendo assim, quanto mais ciclos tiver o sinal, maior a quantidade de pacotes removidos, aleatoriamente em todo o sinal.

## 4.3 ANÁLISE IMPLEMENTAÇÃO DIRETO NA REDE

A implementação da reamostragem na mensagem SV direto na rede de comunicação é um ponto de interesse dessa tecnologia, pois assim poderia ser utilizada para

melhorar a qualidade dos sinais SV durante a operação, aumentando a precisão dos sistemas de proteção, por exemplo. A fim de verificar esse tipo de aplicação, foi realizada a simulação dos esquemas de reamostragem buscando uma implementação direto na rede como ocorreria na prática, ou seja, em uma implementação real no IED.

Para essa simulação considerando o sinal SV direto da rede, uma janela de análise fixa é definida antes da implementação da reamostragem, definida com o menor tamanho possível, pois isso diminui o tempo de processamento, que necessita ser o menor possível para ser aplicado em tempo real. Assim, o tamanho da janela é de um pouco mais de um ciclo do sinal na frequência da rede (60Hz), pois é necessário ao menos um ciclo completo do sinal para permitir a estimação da frequência, que pode sofrer variações.

Tendo essa janela definida, ela é deslocada em uma amostra a cada implementação da reamostragem, simulando a recepção de um novo pacote SV. Assim, para cada amostra recebida, ou seja, cada deslocamento da janela, pode ser realizada as análises de RMS e da FFT com e sem o uso dos esquemas de reamostragem.

Neste caso, o erro RMS pode ser obtido da diferença em relação ao seu valor exato, quando este é conhecido, ou o valor RMS pode ser comparado ao do sinal base, quando usado o sinal SV (da Figura 11). Outra análise que pode ser utilizada é observando o valor de pico da frequência fundamental, obtido pela FFT. Essas análises são realizadas para cada janela, cada nova amostra do sinal SV, verificando assim o desempenho da reamostragem diretamente na rede para aplicações de tempo real.

#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS ESQUEMAS DE REAMOSTRAGEM

Para analisar e comparar os esquemas de reamostragem são utilizados alguns parâmetros durante as simulações para avaliar as vantagens da reamostragem nas mensagens SV juntamente com o desempenho de cada esquema. Dentre esses foram calculados o valor RMS, a análise em frequência e a eficiência computacional.

O valor RMS foi calculado no sinal base e em cada sinal reamostrado de acordo com a janela analisada (para cada deslocamento da janela em tempo real, ou para o sinal como um todo). Isso possibilita analisar o impacto de cada método de reamostragem ao comparar o RMS do sinal reamostrado ao valor exato do RMS, quando possível, ou em relação ao sinal base, pela diferença nos RMS.

Na análise em frequência é utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), que permite analisar as componentes de frequência do sinal. Com isso pode-se verificar a influência dos esquemas no vazamento espectral, que ocorre quando há uma variação na frequência do sinal em relação a amostragem. Outro ponto que pode ser analisado pela FFT é a diferença na componente da frequência fundamental do sinal, para avaliar amplitude do sinal.

Essas características da FFT e do RMS permitem analisar o impacto da reamostragem relativo à variação de frequência do sinal base em relação à frequência de amostragem, uma vez que essa variação irá resultar em um resultado impreciso da FFT e do valor RMS. Contudo, isso pode ser mitigado pela reamostragem, pois ela é capaz de manter o número de amostras por ciclo o mais constante possível.

#### 4.5 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL

Outra análise realizada é da eficiência computacional utilizada para verificar os requisitos computacionais de cada esquema. Essa análise é bastante importante na implementação em tempo real, pois diversas aplicações dos sinais SV, como na proteção, são sensíveis ao tempo, e portanto, o atraso adicionado no processo deve ser mínimo.

Para investigar esse ponto, foi calculado o tempo necessário para executar cada esquema de reamostragem, do início do processo de reamostragem até obter o sinal reamostrado. Isso é realizado considerando a implementação direta na rede, descrita na sessão 4.3, onde o tempo computacional é calculado em cada execução, ou seja, em cada janela analisada (cada amostra do sinal adicionada).

A observação dessa grandeza é realizada na implementação direta na rede por ser de maior interesse nessa aplicação (de tempo real) e por permitir uma maior amostra de valores, estimando o processamento computacional de forma mais precisa. Vale salientar ainda que essa análise possibilita apenas comparar os esquemas entre si, contudo não pode ser utilizado para avaliar os requisitos de tempo exigidos pela norma, pois essa análise foi realizada em um computador pessoal, ao contrário do que seria em uma aplicação prática, onde seria um computador destinado à esse fim (computador industrial, por exemplo).

#### 4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, são descritas as metodologias e comparações utilizadas nesta pesquisa para avaliar e observar os esquemas e a reamostragem. Para isso é apresentado um fluxograma completo na Figura 10 mostrando as etapas realizadas nas simulações, que são descritas no decorrer do capítulo. Nelas são mostrados os sinais base que simulam sinais SV, utilizados nas análises, como é simulados os efeitos do sinal, como o jitter e a perda de pacotes. Também é definida a implementação da reamostragem em sinais SV diretos na rede, importante para aplicações em tempo real.

Além disso, são descritas as grandezas de RMS e de análise em frequência da FFT

e como são utilizadas para as comparações, bem como da análise da eficiência computacional. Seguindo essas metodologias, o próximo capítulo apresenta os principais resultados e análises obtidos das mesmas, possibilitando observar o comportamento da reamostragem nos sinais SV e dos esquemas de reamostragem abordados.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos procedimentos e metodologias descritos anteriormente. Também é realizada uma breve descrição dos principais parâmetros e implementações em simulação de cada resultado, juntamente com uma análise dos principais pontos observados nos resultados encontrados.

### 5.1 COMPARAÇÃO DOS ESQUEMAS DE REAMOSTRAGEM

A primeira análise foi desenvolvida para observar o comportamento do sinal SV e dos esquemas de reamostragem. Para isso, foi utilizado o sinal SV simulado pelo OPAL-RT, mostrado na Figura 11, para obter uma análise mais próxima da realidade. Onde foi analisado o sinal com e sem a reamostragem tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, obtido através da FFT.

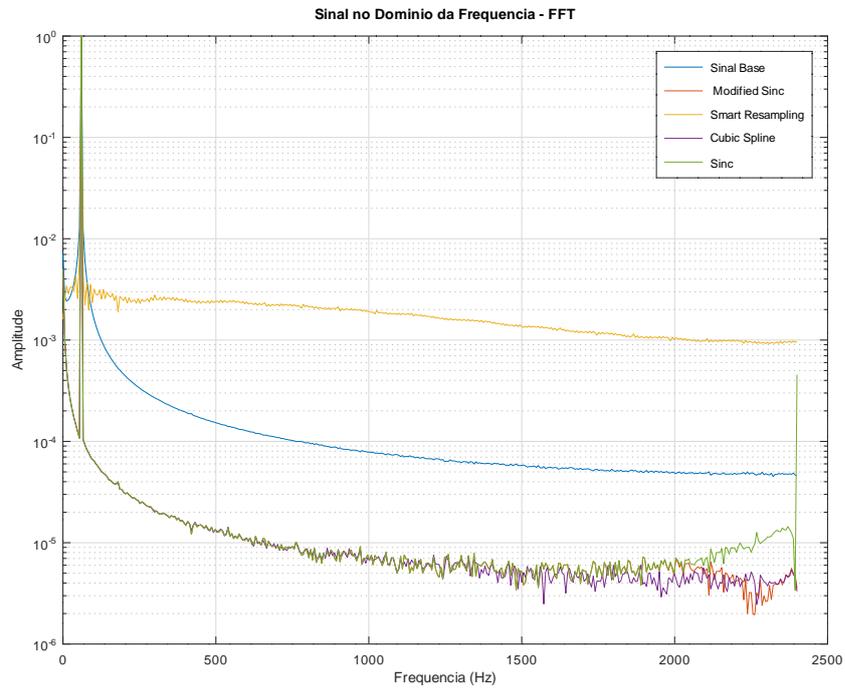
Isso foi observado em três etapas: antes, depois e durante o período transitório do sinal (momento em que ocorre o curto circuito) definindo janelas (com tamanhos em torno de 10 ciclos) em cada um desses momentos para observar o comportamento da reamostragem nas diferentes situações do sinal. Disso, observou-se que os resultados antes e depois do transitório foram bastante similares, portanto é apresentado apenas depois do período transitório. Esse resultado no domínio da frequência é mostrado na Figura 13.

Como mostra a Figura 13, há um vazamento espectral no “Sinal Base” (Azul) que é mitigado pela maioria dos métodos de reamostragem, mostrando que seu uso traz benefícios à qualidade do sinal SV. O esquema que é exceção, é o “Smart Resampling” (Amarelo), que, embora reduza o vazamento espectral próximo a frequência fundamental, acaba adicionando ainda mais no restante do espectro.

Essa análise no domínio da frequência, através da FFT, também possibilita analisar a fase do sinal de acordo com a variação de frequência. O resultado disso é apresentado na Figura 14.

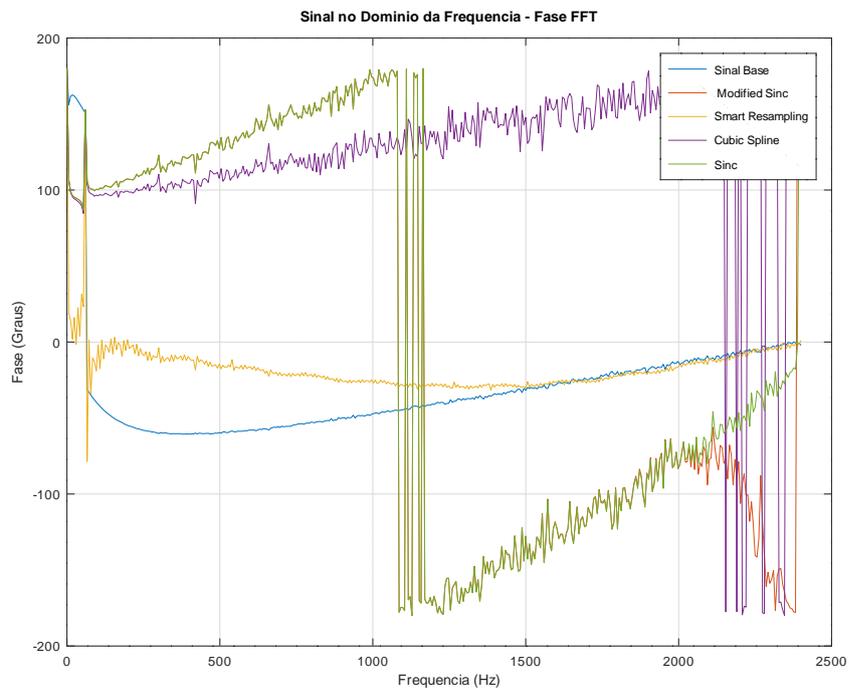
O resultado da análise de fase, da Figura 14, mostra que a utilização da reamostragem implica em um deslocamento considerável da fase em relação ao “Sinal Base”. O único método que acompanha o comportamento da fase do “Sinal Base” (Azul) é o “Smart Resampling” (Amarelo), embora todos os esquemas tenham uma fase parecida na frequência fundamental (próximo aos 60Hz). Isso também ocorre antes da transição, assim como na análise da amplitude, contudo nessa situação a oscilação da fase em relação a frequência é maior e nem mesmo o “Smart Resampling” (Amarelo) consegue acompanhar o “Sinal Base” (Azul).

Figura 13 – Análise no domínio da frequência (FFT) depois do curto circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

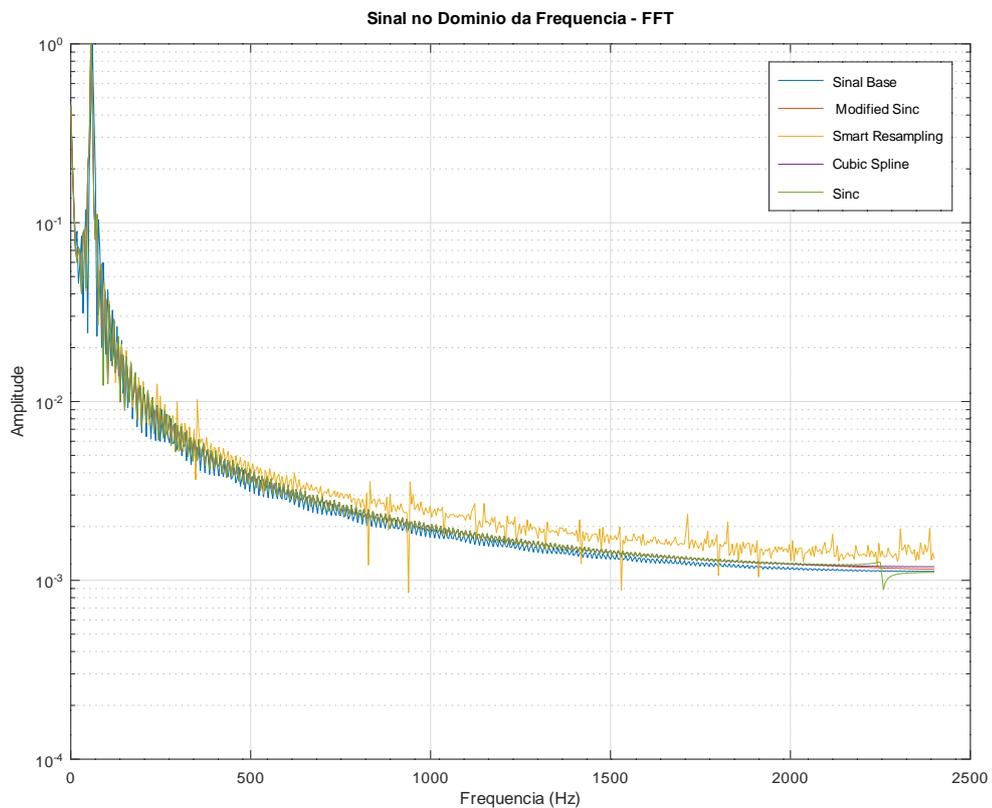
Figura 14 – Análise da fase no domínio da frequência (FFT) depois do curto circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Complementando essa análise, foi realizado o mesmo procedimento durante o momento do curto circuito (durante o período transitório) do mesmo sinal SV (Figura 11) a fim de verificar se a reamostragem é afetada pela variação do sinal. Embora a maioria dos algoritmos de proteção não abordam essa janela, sua análise é válida para ver o comportamento da reamostragem e sua influência nessa situação do sinal. Os resultados foram analisados novamente no domínio da frequência, mostrado na Figura 15, e também no domínio do tempo, mostrado na Figura 16.

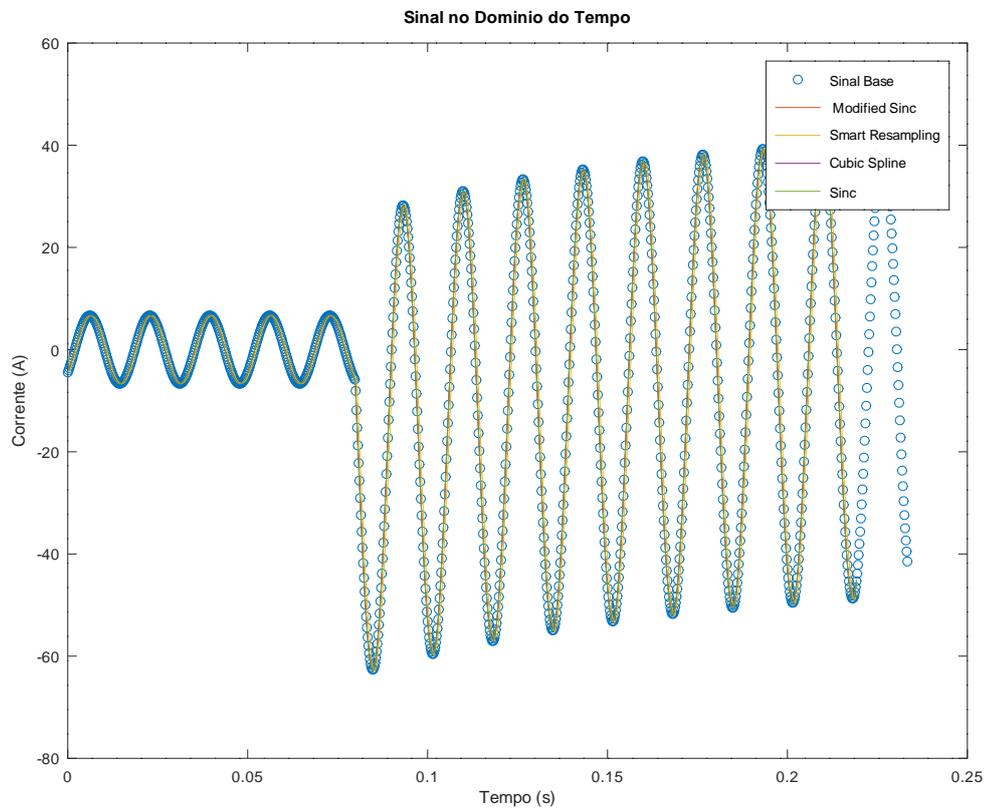
Figura 15 – Análise no domínio da frequência (FFT) durante o curto circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Neste resultado, pode-se verificar que, na Figura 15, durante a transição do sinal, o vazamento espectral aumenta em todos dos métodos, ficando todos bastante próximos ao sinal sem reamostragem ("Base Signal", Azul). Isso mostra que, mesmo com a variação do sinal (transição devido ao curto), a reamostragem não prejudica o sinal, o que ocorre é que as vantagens de sua utilização, como a redução do vazamento espectral, são reduzidas.

Figura 16 – Análise no domínio do tempo durante o curto circuito.

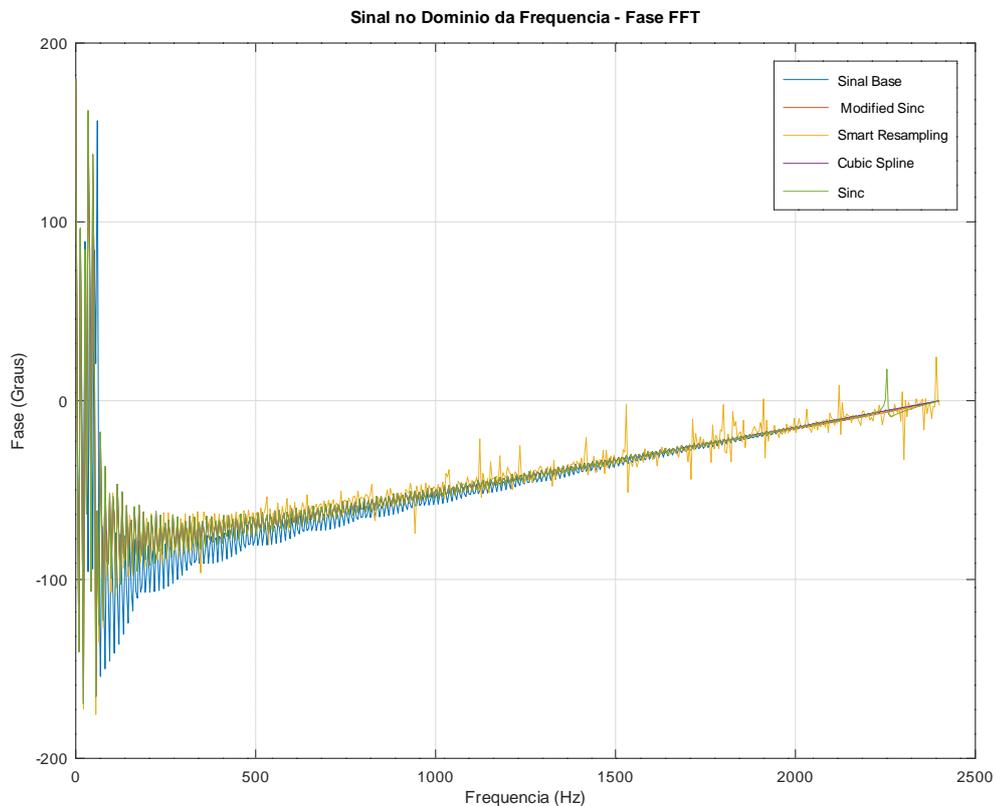


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O fato da reamostragem não prejudicar o sinal SV, mesmo neste caso, pode ser observado na Figura 16, onde ambos os sinais são bastante similares ao sinal base. Vale salientar ainda, que todos os esquemas de reamostragem mantêm as mesmas características do sinal base, mesmo durante variações, mostrando que essa técnica de processamento não irá acarretar em erros significativos em análises para sistemas como o de proteção das subestações, por exemplo.

O mesmo é observado na fase, mostrado na Figura 17, onde os sinais reamostrados possuem um comportamento semelhante a situação sem reamostragem (Azul). Neste caso, a existência da transição no sinal base mostra uma oscilação constante em sua fase, maior do que na situação anterior (depois da transição), e os esquemas de reamostragem acompanham esse comportamento de forma mais precisa que na situação anterior, embora ainda apresentem uma diferença.

Figura 17 – Análise da fase no domínio da frequência (FFT) durante o curto circuito.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

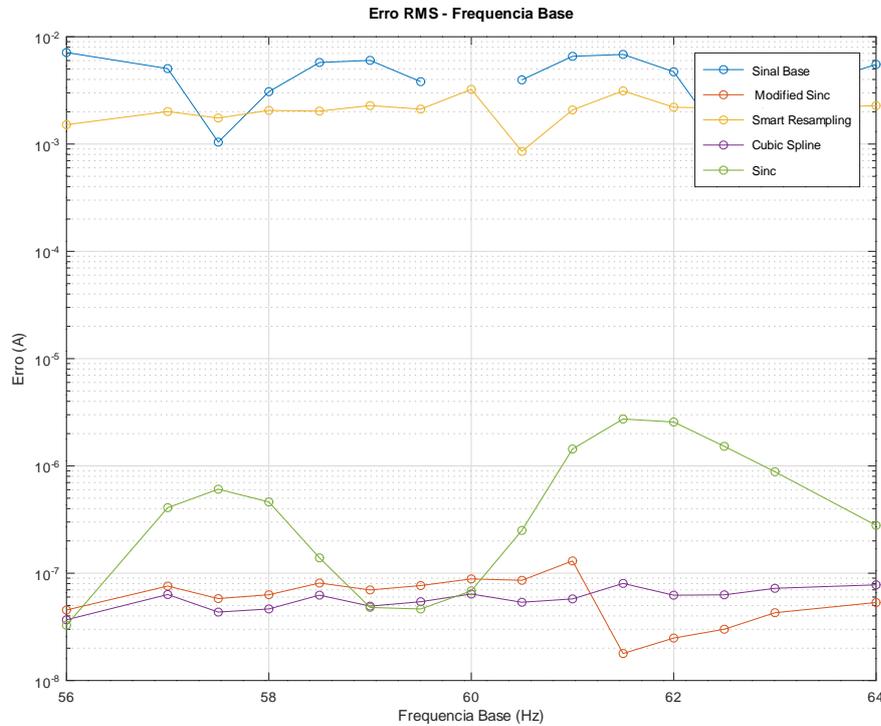
Para uma análise mais ampla dos impactos e benefícios da implementação da reamostragem nos sinais SV foi calculado o erro RMS de acordo com a variação da frequência base do sinal. Nesta análise, foi utilizado o segundo sinal base, ou seja, uma senoide com  $1A$  de corrente RMS e sua frequência variada em torno dos  $60Hz$  (frequência da rede elétrica). Com isso, o erro RMS pode ser observado, obtido da diferença no valor RMS dos sinais (reamostrado ou não) do valor definido na senoide ( $1A$ ). Esse resultado é mostrado na Figura 18.

Como pode-se observar da Figura 18, quando o sinal base (Azul) não está perfeitamente sincronizado com a frequência de amostragem, que ocorre apenas nos  $60Hz$ , ele apresenta um erro RMS na ordem de  $10^{-2}A$ . Contudo, praticamente em todos os casos, esse erro é consideravelmente menor com a utilização da reamostragem.

Os melhores esquemas de reamostragem, baseado nessa análise, são a “Cubic Spline” (Roxo) e a “Modified Sinc” (Vermelho), que reduzem o erro RMS aproximadamente para a ordem de  $10^{-7}A$ , sendo que a “Cubic Spline” (Roxo) é um pouco mais estável. A reamostragem com a função “Sinc” (Verde) apresenta uma boa redução do erro RMS,

contudo possui uma variação maior em relação a variação de frequência. E a “Smart Resampling” teve o pior desempenho comparado aos outros métodos, mas ainda assim, na maioria dos casos, reduziu o erro em relação ao sinal base.

Figura 18 – Erro RMS com variação da frequência base.



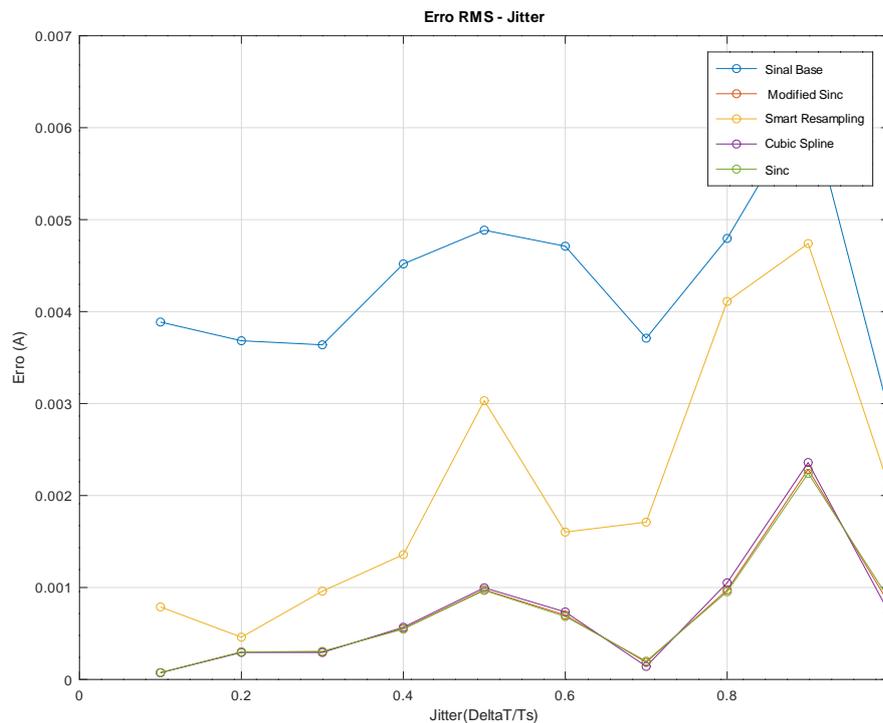
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 5.2 ANÁLISE EFEITOS DO SINAL

Para verificar o comportamento da reamostragem perante alguns efeitos existentes em redes de comunicação foram simulados efeitos como jitter e perda de pacotes aleatória. As análises e resultados foram desenvolvidos para analisar o impacto desses efeitos na reamostragem, não nos sinais SV.

Na análise do efeito Jitter, foi utilizado o sinal senoidal simulado com  $1A$  de corrente RMS e frequência base de  $60.5Hz$ . Nisso foi analisado o erro RMS, de forma similar ao realizado anteriormente (na Figura 18), mas agora mantendo a frequência base constante e variando o valor do Jitter introduzido nas amostras. Esse resultado é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Erro RMS com implementação do Jitter.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

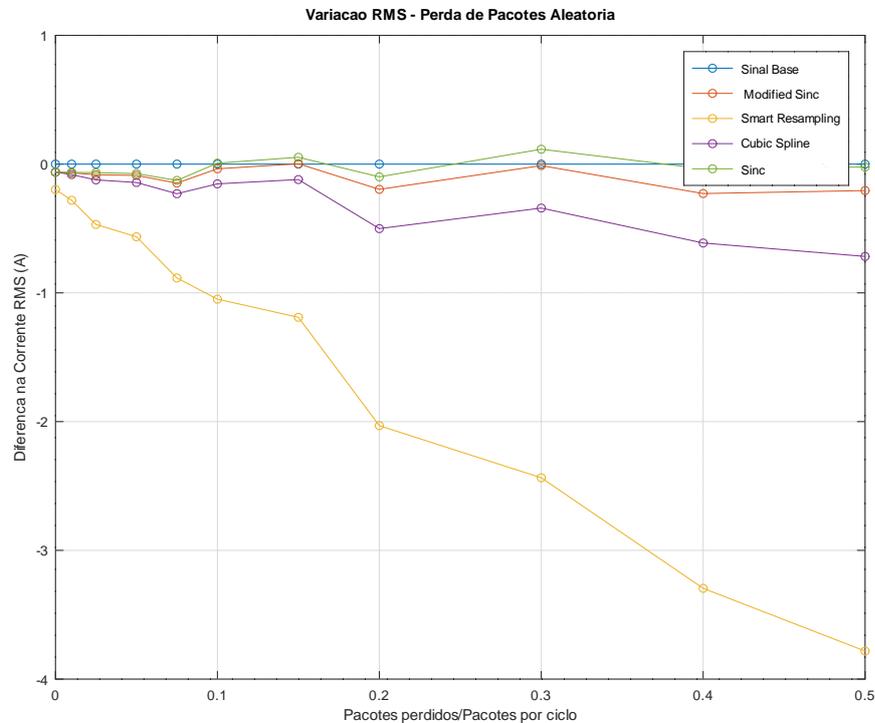
Assim, como observado na literatura, o Jitter não apresenta um impacto significativo na análise do erro RMS. Isso é verificado de modo que o erro permanece praticamente constante mesmo com o aumento do Jitter aplicado nas amostras do sinal. A variação na Figura 19 se deve a aleatoriedade do Jitter inserido, mudando em diversas execuções da simulação mas, em todas elas, mantendo a mesma ordem do erro. Dessa forma, a reamostragem, em nenhum dos métodos analisados é afetado por esse efeito, permanecendo na mesma ordem de grandeza e com um erro menor do que o “Base Signal” (Azul), mostrando que o Jitter não impacta o desempenho dessa técnica de processamento.

Outro efeito analisado em simulações foi o da perda aleatória de pacotes, através dos valores de RMS em relação ao aumento da quantidade de pacotes perdidos. Para esta análise, o sinal SV descrito na Figura 11, obtido do OPAL-RT, foi utilizado considerando a janela onde ocorre a transição, e avaliada a diferença nos valores RMS dos sinais reamostrados em relação ao sinal base, mostrado na Figura 20.

Conforme observa-se na Figura 20, a perda de pacotes aleatória não representa grande influência na reamostragem, pois a diferença no erro RMS dos esquemas em relação ao “Base Signal” (Azul) é pequena e possui apenas um pequeno aumento nas maiores quantidades de pacotes perdidos. Uma exceção a isso é o método do “Smart Resampling” (Amarelo), que não segue o comportamento do RMS dos outros métodos aumentando a

diferença para as maiores perdas.

Figura 20 – Diferença de RMS na perda de pacotes aleatória.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

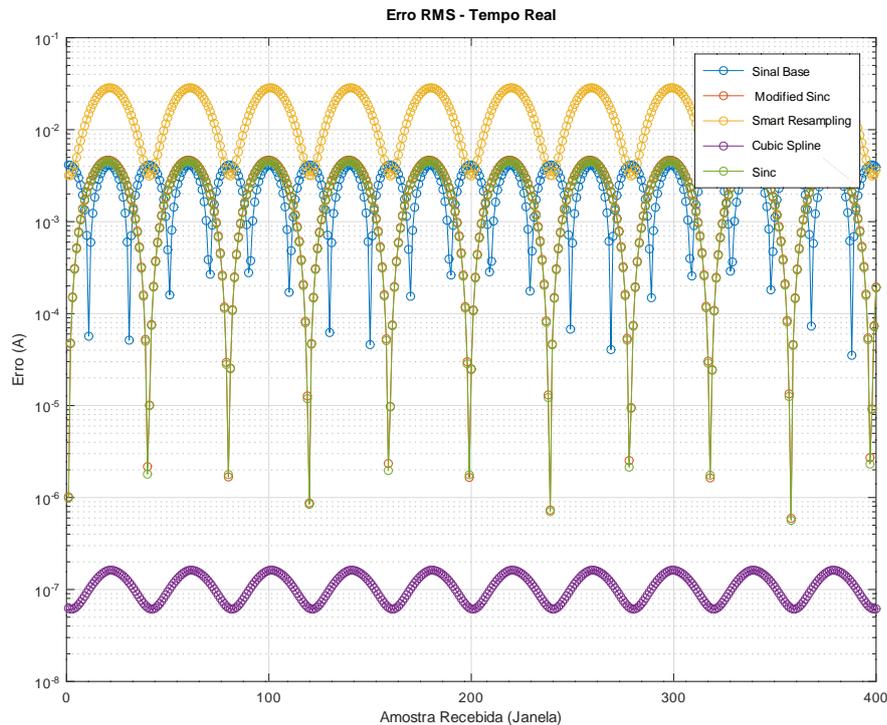
### 5.3 ANÁLISE IMPLEMENTAÇÃO DIRETO NA REDE

A próxima simulação realizada foi utilizada para uma análise mais próxima de uma implementação da reamostragem diretamente no IED. Para isso é utilizado o procedimento descrito na Seção 4.3, para um sinal SV direto na rede<sup>1</sup>. Assim, os esquemas de reamostragem e os cálculos das grandezas (como RMS, por exemplo) são realizados na janela de análise a cada deslocamento da mesma, ou seja, a cada nova amostra do sinal SV adicionada à análise.

Nesta situação, é utilizado o sinal senoidal simulado com  $1A$  de corrente RMS e frequência de  $60,5Hz$ , e analisado o erro RMS para cada deslocamento da janela (cada amostra recebida). O resultado nessa análise é mostrado na Figura 21.

<sup>1</sup>Essas simulações considerando a situação de sinais SV obtidos diretamente da rede de comunicação é focada em simular aplicações de tempo real, por isso, alguns títulos de gráficos apresentam o termo tempo real para especificar essa implementação.

Figura 21 – Erro RMS para o sinal direto na rede.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

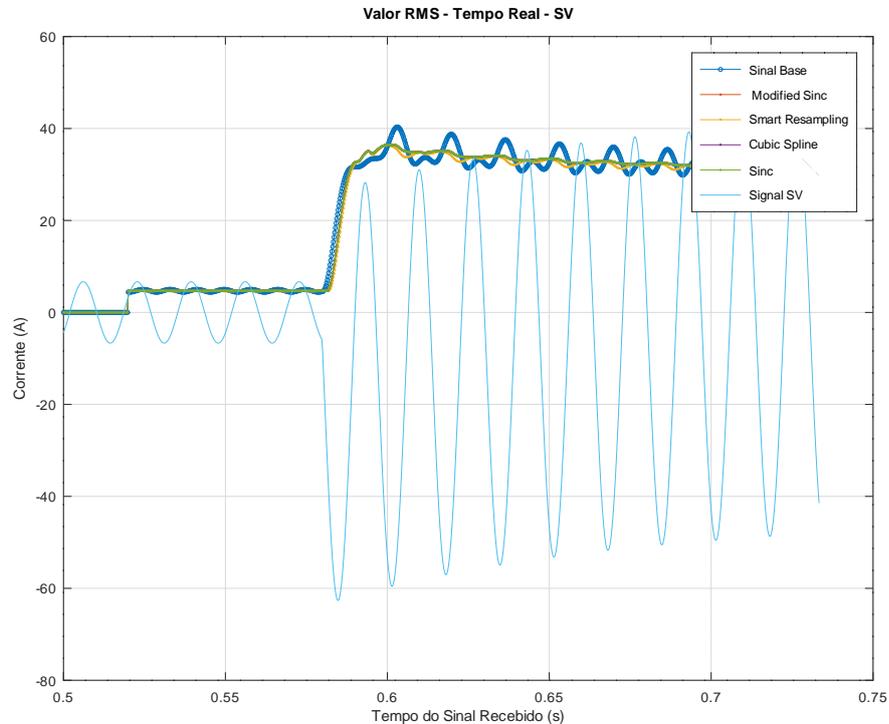
Pode-se observar, no erro RMS da Figura 21, que seu valor varia de acordo com o deslocamento da janela de análise (a cada amostra recebida), pois a janela utilizada é pequena e a variação de fase se mostra bastante impactante. O esquema “Smart Resampling” (Amarelo) possui o pior comportamento, com uma pequena redução do erro RMS e, na maioria dos casos, adiciona ainda mais erro, quando comparado ao “Sinal Base” (Azul), caso sem reamostragem.

Os esquemas da “Modified Sinc” (Vermelho) e da “Sinc” (Verde), apresentam um comportamento semelhante, com uma boa redução no erro RMS em alguns pontos, mas com uma grande variação, ficando, em alguns casos, igual ou pior que a situação sem reamostragem (Azul). O principal ponto a ser observado é o esquema com melhor desempenho, que nesta análise é o “Cubic Spline” (Roxo), que apresenta a maior redução no erro RMS em todas as janelas de análise, além de permanecer mais constante que os demais métodos.

Outra simulação de implementação direto na rede foi realizada utilizando o sinal SV gerado pelo OPAL-RT, descrito na Figura 11, no momento da transição, onde ocorre o curto. Nessa simulação, é observado o comportamento do valor RMS e o valor de pico e a fase da frequência fundamental da FFT dos sinais reamostrados e do sinal base, a fim de verificar seu comportamento na implementação direto na rede. O resultado do valor RMS

é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Valor RMS para o sinal SV direto na rede.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

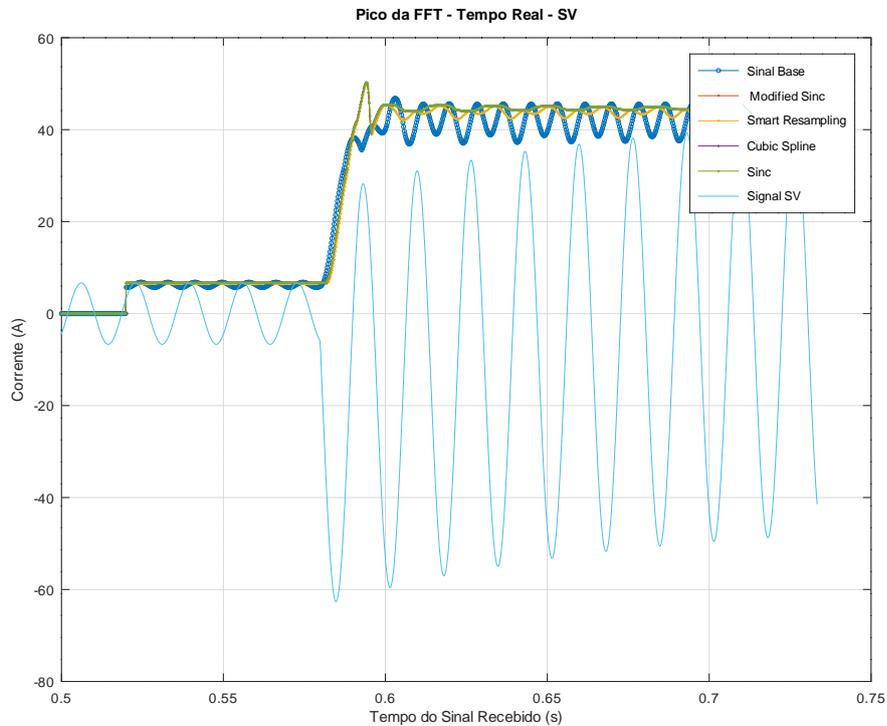
O valor RMS da Figura 22 mostra o valor eficaz da senoide tanto antes quanto depois do transitório, embora após tenha um pequeno deslocamento para a parte negativa do sinal devido ao ângulo de incidência da falta. A reamostragem, nessa análise, consegue acompanhar o valor do sinal base até mesmo removendo a oscilação no valor RMS apresentado pelo “Sinal Base” (Azul). Embora todos os esquemas de reamostragem melhoram a estabilidade do valor RMS, o esquema da “Smart Resampling” (Amarelo) apresenta uma oscilação nessa grandeza um pouco maior que os outros três esquemas analisados, contudo ainda se mantém mais estável que a situação sem amostragem.

De forma semelhante a essa análise, o valor de pico da FFT, mostrado na Figura 23 apresenta a amplitude da frequência fundamental de acordo com o deslocamento da janela, a cada nova amostra.

O pico da FFT, na Figura 23, representa a amplitude do sinal, uma vez que o sinal não apresenta harmônicas impactantes, fazendo com que seu valor acompanhe o pico da própria senoide, apesar do deslocamento logo após a transição, conforme observado anteriormente. Como pode-se observar nessa análise, assim como no RMS, o uso dos esquemas de reamostragem trazem uma maior estabilidade para essa medição do sinal (pico da FFT, ou amplitude), quando comparado ao “Sinal Base” (Azul). Isso ocorre de-

vido a redução do vazamento espectral resultante da reamostragem, como observado nas análises anteriores, tornando a FFT mais precisa.

Figura 23 – Pico da FFT para sinal SV direto na rede.

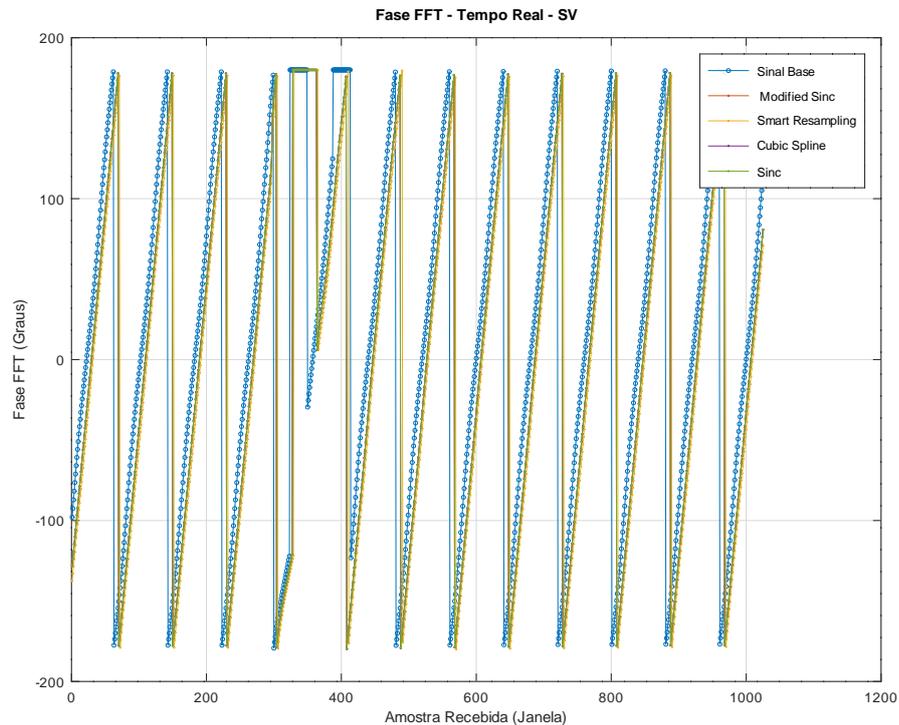


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Outro ponto que pode ser observado nestes últimos resultados, Figuras 22 e 23, é que as primeiras amostras do sinal são nulas para mostrar a primeira janela da implementação direto na rede, onde ainda não há um valor para as grandezas. Além disso, no momento da transição pode-se observar que há um pequeno atraso nos sinais reamostrados em relação ao sinal base, indicando o custo da utilização do processo de reamostragem. Esse atraso também pode ser verificado na análise da fase da FFT, mostrado na Figura 24.

Nessa análise, percebe-se um atraso de fase constante em todo o sinal reamostrado quando comparado ao “Sinal Base” (Azul), sendo mais intensificado durante a transição, onde tem-se a descontinuidade da fase (em torno das amostras 350 a 400 aproximadamente). Além disso, vale observar que apesar da fase ser bastante irregular, na análise da Figura 17, o valor da fase na frequência fundamental, observado na Figura 24, é bastante próximo nas situações com e sem reamostragem.

Figura 24 – Fase da FFT para o sinal SV direto na rede.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

#### 5.4 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA COMPUTACIONAL

A eficiência computacional é outra importante análise a ser desenvolvida, pois em diversas aplicações, principalmente de tempo real, o tempo de processamento computacional necessário pode acarretar em atrasos. Vale salientar que a análise realizada nesta pesquisa pode ser utilizada para comparar a eficiência entre os esquemas, e não o atraso computacional para implementações reais, uma vez que foi implementada em um simulador matemático em um computador pessoal.

Para essa análise, foi utilizada a implementação direto na rede, descrita na Seção 4.3, na qual é contabilizado o tempo de execução de cada esquema de amostragem em sequência para cada deslocamento da janela (cada amostra recebida). Com isso, obtém-se um conjunto de tempos computacionais das diversas janelas para cada esquema, onde são observados os tempos máximos, mínimos, e médios para execução dos métodos, conforme mostra a Tabela 1.

Nesta análise, os esquemas de reamostragem com melhores eficiências computacionais são os métodos utilizando interpolações convencionais, com uma média de aproximadamente  $1ms$  para a “Sinc” e  $1,9ms$  para a “Cubic Spline”. Isso se deve a esses métodos já serem mais robustos e mais otimizados que as versões implementadas seguindo a

literatura.

Tabela 1 – Análise da eficiência computacional.

	<b>Máximo (ms)</b>	<b>Mínimo (ms)</b>	<b>Médio (ms)</b>
<b>Modified Sinc</b> (CHEN et al., 2020)	641,959	396,167	418,781
<b>Smart Resampling</b> (CAI et al., 2010)	10,190	5,7099	6,9159
<b>Cubic Spline</b> (convencional)	3,8888	1,7109	1,9054
<b>Sinc</b> (convencional)	5,0871	0,82898	1,0363

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

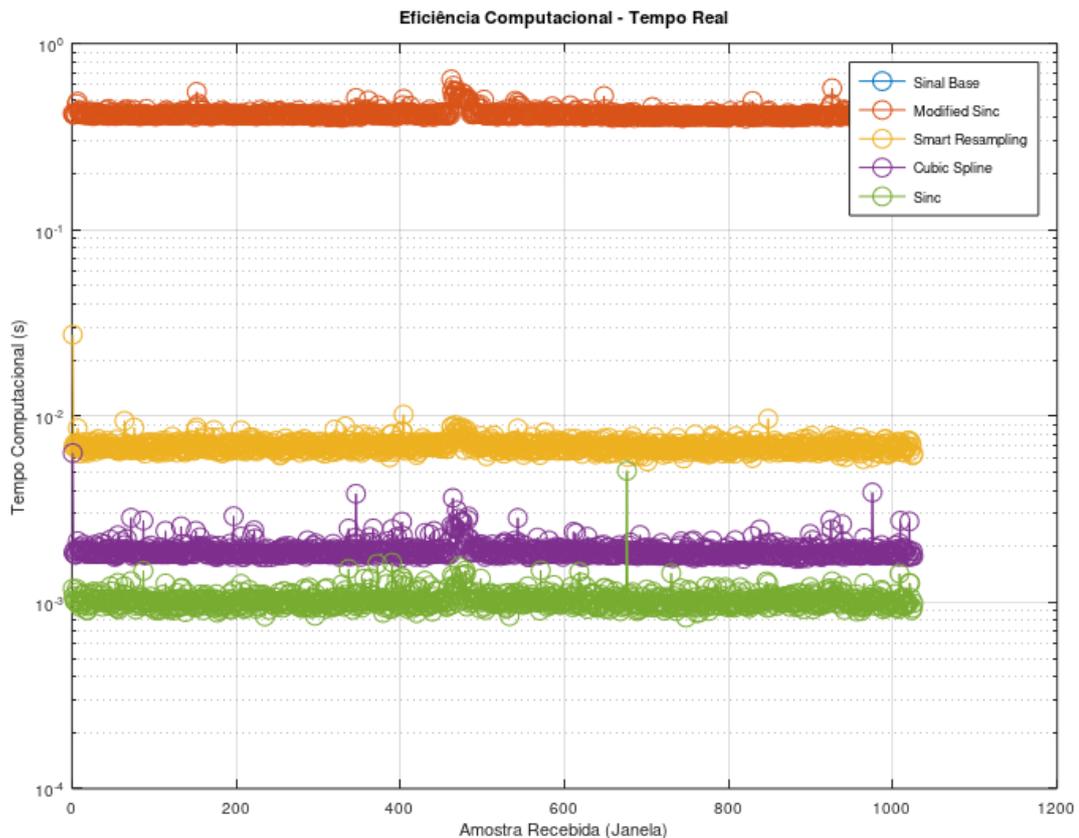
O esquema do “Smart Resampling” tem uma média um pouco maior que os esquemas convencionais, de aproximadamente  $6,9ms$ , e o pior método em termos de processamento computacional é o “Modified Sinc”, com tempo em torno de  $418ms$  de média. Outro ponto que pode ser observado são os tempos de mínimo e máximo, onde a “Cubic Spline” se mostra computacionalmente mais estável (com menor variação de tempos). Para uma melhor comparação, foi gerado o gráfico a seguir na Figura 25.

Da Figura 25, pode-se observar que a “Modified Sinc” (Vermelho) possui o pior desempenho, embora seja bastante constante nas diversas execuções (amostras). Na sequência, temos o “Smart Resampling” (Amarelo), com um desempenho consideravelmente melhor, mas um pouco pior que os dois métodos convencionais, entretanto esse esquema pode ser implementado utilizando técnicas para melhorar sua eficiência computacional, como a estrutura polifásica, conforme comentado na sessão 3.2.

Os métodos convencionais, “Cubic Spline” (Roxo) e a “Sinc”(Verde), apresentam o melhor desempenho computacional, sendo a “Sinc” levemente mais eficiente. Contudo, a “Cubic Spline” é um pouco mais estável com as diversas medições (em cada nova amostra), fato que foi observado em outros testes aumentando o tamanho da janela de análise, onde este método é o único que permanece com tempos na ordem de  $10^{-3}s$ .

Deve-se observar ainda que essa análise computacional realizada não demonstra como os métodos realmente vão se comportar em um sistema industrial, pois é realizada em um computador pessoal. Contudo, é interessante observar que nos valores obtidos, não há um desvio padrão muito elevado entre as máximas, mínimas e médias, mostrando que sua utilização não afetaria as restrições de tempo em aplicações de tempo real.

Figura 25 – Comparação da eficiência computacional para cada execução.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 5.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresenta os principais resultados e análises obtidos possibilitando observar o comportamento da reamostragem nos sinais SV e dos esquemas de reamostragem abordados. Dentre esses observou-se diversos aspectos e situações, onde cada esquema apresentou características e desempenhos diferentes, o que pode ser adaptado de acordo com as aplicações. Por esse motivo, a Tabela 2 apresenta uma comparação dos esquemas de acordo com os resultados deste capítulo, sintetizando os mesmos.

Nesta Tabela 2 foi realizada a análise dos esquemas de reamostragem apontando a comparação de desempenho entre eles de acordo com as análises e características observadas nos resultados. Assim, foram classificadas em melhor, intermediário e inferior, para cada análise, mantendo a mesma classificação para os esquemas que apresentaram desempenho semelhante.

Dentre as características observadas o vazamento espectral, o erro RMS, a análise direto da rede e a eficiência computacional foram elencadas de acordo com os gráficos de resultados apresentados acima. A característica de flexibilidade foi definida considerando a possibilidade de ajuste e otimização de parâmetros para realizar a reamostragem, onde apenas os esquemas propostos na literatura já tem isso definido, as variáveis da "Modified

*Sinc*” e a implementação da “Smart Resampling”, principalmente na grande flexibilidade de filtros que podem empregados no interpolador de sobreamostragem, por exemplo.

Tabela 2 – Comparação das características dos esquemas de reamostragem.

	<b>Modified Sinc</b>	<b>Smart Resampling</b>	<b>Cubic Spline</b>	<b>Sinc</b>
<b>Vazamento Espectral</b>	Melhor	Inferior	Melhor	Melhor
<b>Erro RMS</b>	Melhor	Inferior	Melhor	Intermediário
<b>Direto na Rede</b>	Intermediário	Inferior	Melhor	Intermediário
<b>Eficiência Computacional</b>	Inferior	Melhor	Melhor	Melhor
<b>Flexibilidade</b>	Intermediário	Melhor	Inferior	Inferior
<b>Estabilidade</b>	Intermediário/ Inferior	Intermediário	Melhor	Intermediário/ Inferior

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Desse forma, com os resultados e análise apresentados nesse capítulo e a síntese dos mesmos na Tabela 2, é possível avaliar melhor os melhores esquemas para cada tipo de aplicação. Com essas características dos esquemas de reamostragem e a fim de explorar melhor a utilização da reamostragem, no próximo capítulo é apresentado um estudo de caso, observando essas análises em um sinal real capturado diretamente de uma subestação.

## 6 ESTUDO DE CASO

Uma outra análise realizada para avaliar a reamostragem e sua utilização em subestações de energia que seguem a norma IEC 61850, consiste de um estudo de caso. Para isso é realizada a simulação dos esquemas de reamostragem utilizando sinais SV obtidos por *Merging Units* (MUs) de quatro diferentes fabricantes. Nesse capítulo são apresentados os sinais base das MUs e a comparação dos esquemas considerando toda a janela do sinal e com a implementação do mesmo direto na rede<sup>1</sup>. Esse estudo de caso é realizado aos moldes da metodologia apresentada no capítulo 4.

### 6.1 SINAL BASE - SV GERADO PELAS MU

Como sinal base para esse estudo de caso, foi realizada a captura dos pacotes em uma rede de comunicação de uma subestação de energia em processo de implementação da digitalização e automação com a norma IEC 61850. Nessa situação, são obtidos os pacotes SV gerados por MUs de quatro diferentes fabricantes, a partir dos quais são obtidos os valores de correntes, das três fases do sinal de energia medido ( $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ ), juntamente com o respectivo valor de índice dos pacotes (SmpCnt).

A obtenção desses pacotes SV é realizada monitorando a rede de comunicação diretamente no campo da subestação em implementação da norma IEC 61850 durante um período de testes. Nessa caso, foi conectado um computador, com software de monitoramento de redes de computadores, diretamente no *switch* onde as MUs estão conectadas e publicando as mensagens SV geradas com as informações obtidas por elas diretamente dos transformadores da subestação.

Disso, pode-se observar os sinais de corrente durante a janela de captura dos pacotes SV realizada. O tempo de cada amostra é definido pelos índices dos pacotes (valores de SmpCnt), considerando a frequência de amostragem de  $F_s = 4800Hz$  de acordo com a norma, e o tempo zero para a primeira amostra capturada. Os sinais de corrente obtidos para cada MU é mostrado na Figura 26.

Desta captura de sinal SV, pode-se verificar comportamentos atípicos para os sinais de corrente em alguns fabricantes, principalmente do fabricante 2, no qual tem-se variações consideráveis na passagem por zero e nos picos da senoide. Entretanto, apesar das situações iniciais da implementação das MUs e dessas características incomuns dos sinais de corrente, esses sinais SV possibilitam avaliar o desempenho da reamostragem

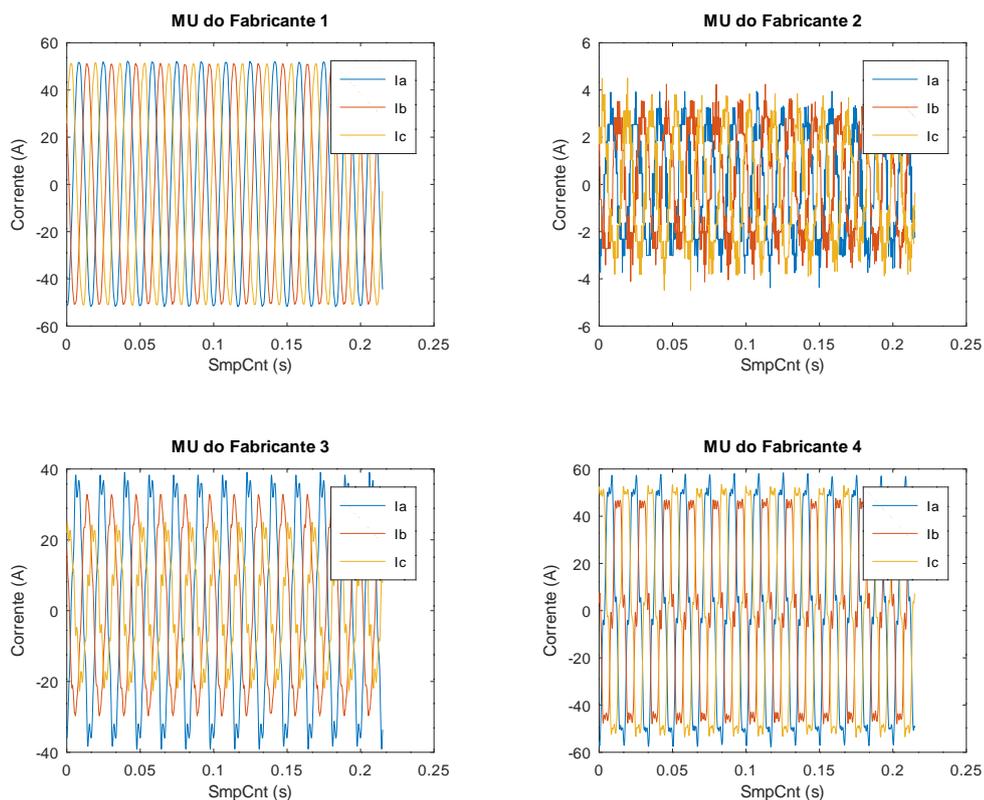
---

<sup>1</sup>Para melhor observar os resultados deste estudo de caso, em alguns gráficos não é apresentada a legenda, mas ela segue o padrão utilizado por toda essa pesquisa: Sinal Base - Azul; Modified Sinc - Vermelho; Smart Resampling - Amarelo; Cubic Spline - Roxo; Sinc - Verde.

em situações adversas, consistindo de um caso interessante para análise.

Vale observar que, por se tratar de uma situação inicial de implementação da norma IEC 61850 pela proprietária da subestação, ainda são necessárias algumas adaptações e configurações nas MUs para um bom desempenho das mesmas, por isso não são apresentados os nomes dos fabricantes. Contudo, como o objetivo deste trabalho é avaliar a utilização dos esquemas de reamostragem e os sinais das MUs que apresentam características diferentes, assim, este estudo de caso permite uma análise mais completa da reamostragem. Nesses sinais, da Figura 26, temos um sinal mais estável, com uma senóide mais padronizada, no caso do fabricante 1, um sinal com uma considerável atenuação e com bastantes oscilações, no caso do fabricante 2, e dois sinais próximos de uma senóide de corrente estável mas com algumas irregularidades, no caso dos fabricantes 3 e 4.

Figura 26 – Sinal base obtidos dos pacotes SV para diferentes MUs.



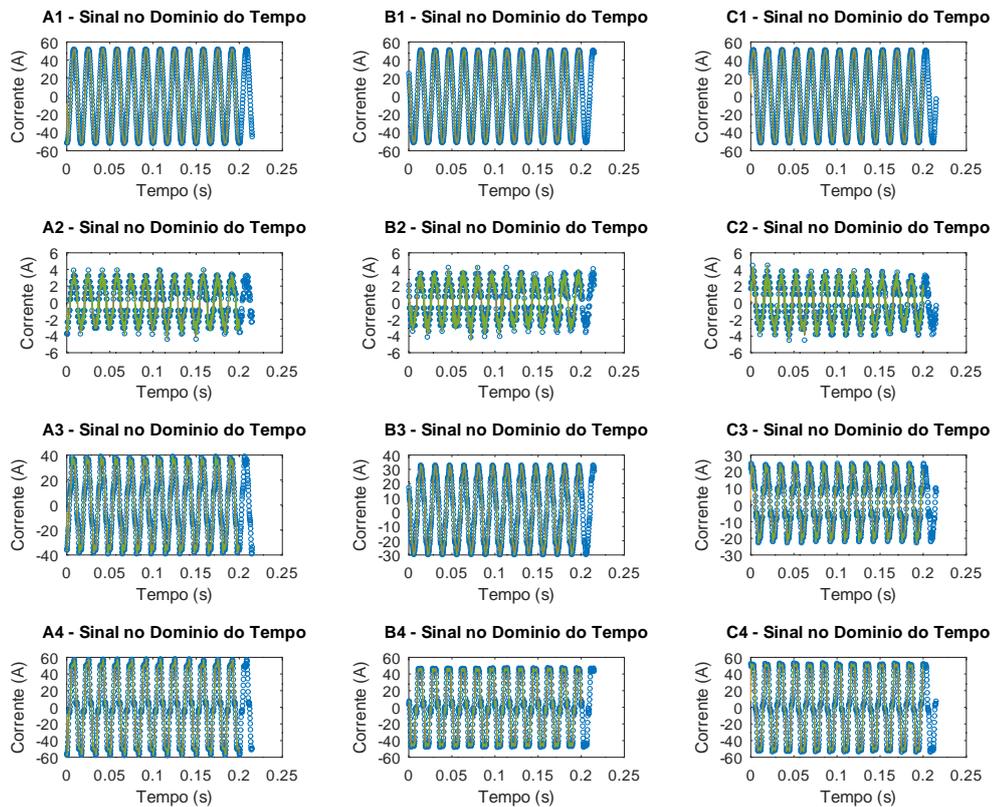
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 6.2 COMPARAÇÃO COMPLETA DOS SINAIS

A primeira análise realizada nesse estudo de caso consiste na implementação dos esquemas de reamostragem, descritos no capítulo 3, considerando todo o sinal, ou seja, todos os pacotes SV obtidos durante a janela de captura. Disso, foi realizada a análise do sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência (através da FFT), aos moldes das análises realizadas anteriormente.

Essa implementação foi realizada em cada fase da corrente (fase A, B e C) para cada MU dos diferentes fabricantes (fabricante 1, 2, 3 e 4). O resultado no domínio do tempo é apresentado na Figura 27, onde cada coluna representa uma fase (letra) e cada linha um fabricante (número).

Figura 27 – Resultado no domínio do tempo para o estudo de caso.



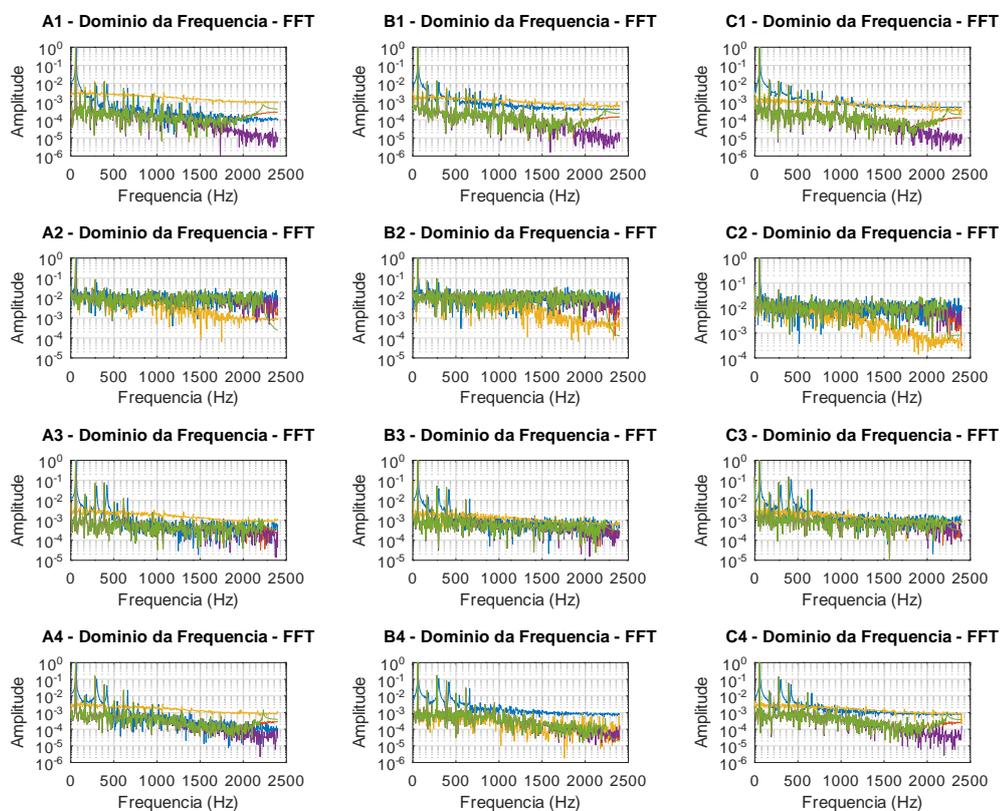
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No domínio do tempo pode-se verificar, na Figura 27, que a reamostragem consegue acompanhar o sinal de forma bastante próxima, ou seja, o sinal reamostrado é semelhante ao sinal base em todos os casos e com todos os esquemas. Essa semelhança se mantém até mesmo nas irregularidades e transições abruptas dos sinais (principalmente

nos fabricante 2, 3 e 4). Isso mostra, de maneira similar ao observado nas análises anteriores, que a utilização da reamostragem não adiciona interferência ou erros significativos ao sinal, ou seja não prejudica a informação contida nele.

Na sequência foi realizada a análise em frequência através da FFT, assim como realizado em análises anteriores, observando o comportamento do sinal e dos esquemas de reamostragem nesse aspecto. O resultado dessa análise é apresentado na Figura 28, considerando as três fases e os quatro fabricantes, assim como foi realizado no domínio do tempo.

Figura 28 – Resultado no domínio da frequência para o estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nessa análise, Figura 28, assim como ocorreu anteriormente, na maioria dos sinais observados há um vazamento espectral no sinal base que é reduzido pela utilização da reamostragem em quase todos os esquemas. Pela Figura 28 observa-se que as corrente A, B e C não representam um impacto significativo na reamostragem nessa análise, embora afete o sinal base (azul), no qual há um aumento do vazamento espectral nas fases B e C em relação a fase A, sendo mais perceptível nas MU dos fabricantes 1 e 4.

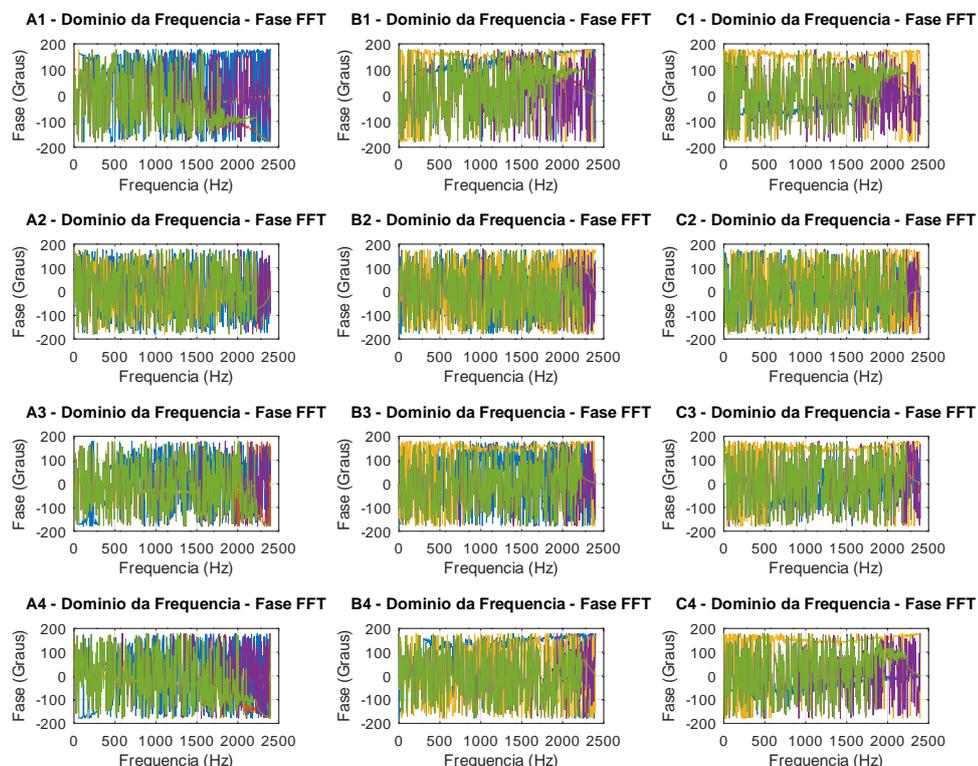
Outro ponto que pode-se observar é que na situação do fabricante 2 (gráficos A2,

B2 e C2) a reamostragem não representa nenhum efeito que beneficie a qualidade do sinal nem que o prejudique. Isso ocorre devido a grande irregularidade do sinal na MU do fabricante 2, mesmo assim a utilização da reamostragem não prejudica o sinal, mantendo sua análise espectral próxima ao sinal base, indicando que pode ser utilizada mesmo em situações anormais.

Além disso, o esquema “Smart Resampling” (amarelo), embora consiga reduzir o vazamento espectral próximo a frequência de pico, em algumas situações ele acaba adicionando ainda mais nas outras frequências, como ocorre nos gráficos A1, B1, A3 e A4. Os outros esquemas de reamostragem apresentaram um desempenho semelhante entre eles, com uma redução considerável do vazamento espectral na maioria dos casos e em outros uma redução menor quando comparado ao sinal base. Esse benefício reduzido é perceptível nos gráficos do fabricante 2 (conforme comentado anteriormente), e nos gráficos A1, A3, B3, C3 e A4, principalmente nas frequências mais elevadas (acima dos 500 Hz aproximadamente).

Ainda na análise em frequência pode-se observar o comportamento da fase do sinal, obtendo o valor do ângulo da FFT. Esse resultado é mostrado na Figura 29 para os sinais SV analisados das quatro MUs.

Figura 29 – Resultado da fase no domínio da frequência para o estudo de caso.



Disso percebe-se que a fase nesse estudo de caso apresenta um comportamento bastante caótico em relação à frequência do sinal, o que ocorre com e sem a utilização da reamostragem e em todos os casos. Ademais, em algumas situações (como em B1, C1 e C4), o “Sinal Base” (Azul) e o “Smart Resampling” (Amarelo) apresentam uma certa constância na fase, como na análise da Figura 14, contudo com uma oscilação maior.

### 6.3 COMPARAÇÃO NA IMPLEMENTAÇÃO DIRETO NA REDE

Continuando o estudo de caso, foi realizada a implementação direto na rede dos sinais SV<sup>2</sup> de forma semelhante a realizada anteriormente, ou seja, simulando a reamostragem em uma janela menor, pouco mais de um ciclo a 60 Hz, e deslocando a mesma para cada pacote SV recebido (cada amostra do sinal). Assim, é analisado os valores RMS e a amplitude e fase em frequência através da FFT, sendo essas grandezas calculadas em cada execução da reamostragem, ou seja, em cada nova amostra, para cada um dos sinais das MUs dos quatro fabricantes.

O primeiro resultado analisado nessa implementação direto na rede foi o do valor RMS, mostrado na Figura 30. Vale observar que os valores nas primeiras amostras foram representados nulos pois consiste na primeira janela de análise, ou seja, a implementação dos esquemas começa considerando essas amostras, obtendo os valores de RMS apenas após o término dessa janela. Novamente, cada coluna representa uma fase (A, B e C) e cada linha a MU de um fabricante (1, 2, 3 e 4).

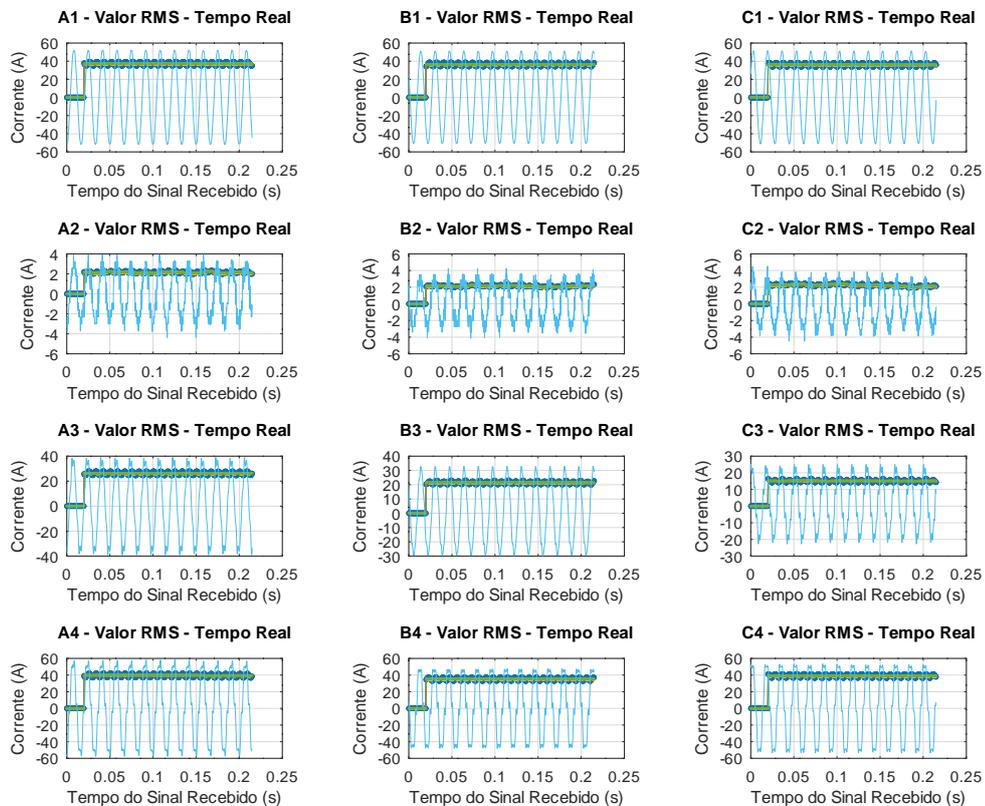
Da análise dos valores RMS obtidos, na Figura 30, pode-se observar que os esquemas de reamostragem mantém o valor RMS mais estável, quando comparado ao sinal base, que oscila o seu valor com o deslocamento da janela. Esse comportamento pode ser observado para todos os sinais, nas três fases para os quatro fabricantes, contudo para o fabricante 2 esse efeito é menor, o que ocorre devido a maior variação do sinal. Em uma análise um pouco mais detalhada, percebe-se ainda que o “Smart Resampling” (Amarelo) possui uma oscilação maior que os outros esquemas, embora ainda seja bem menor que a do “Sinal Base” (Azul).

Com essa mesma implementação foi realizada a análise do valor de pico da FFT, comparando o valor de amplitude da frequência fundamental do sinal com e sem os esquemas de reamostragem. Isso é apresentado na Figura 31, onde, assim como no caso do valor RMS, as primeiras amostras são nulas representando a primeira janela.

---

<sup>2</sup>Assim como no capítulo anterior, alguns títulos de gráficos apresentam o termo tempo real para especificar essa implementação direto na rede.

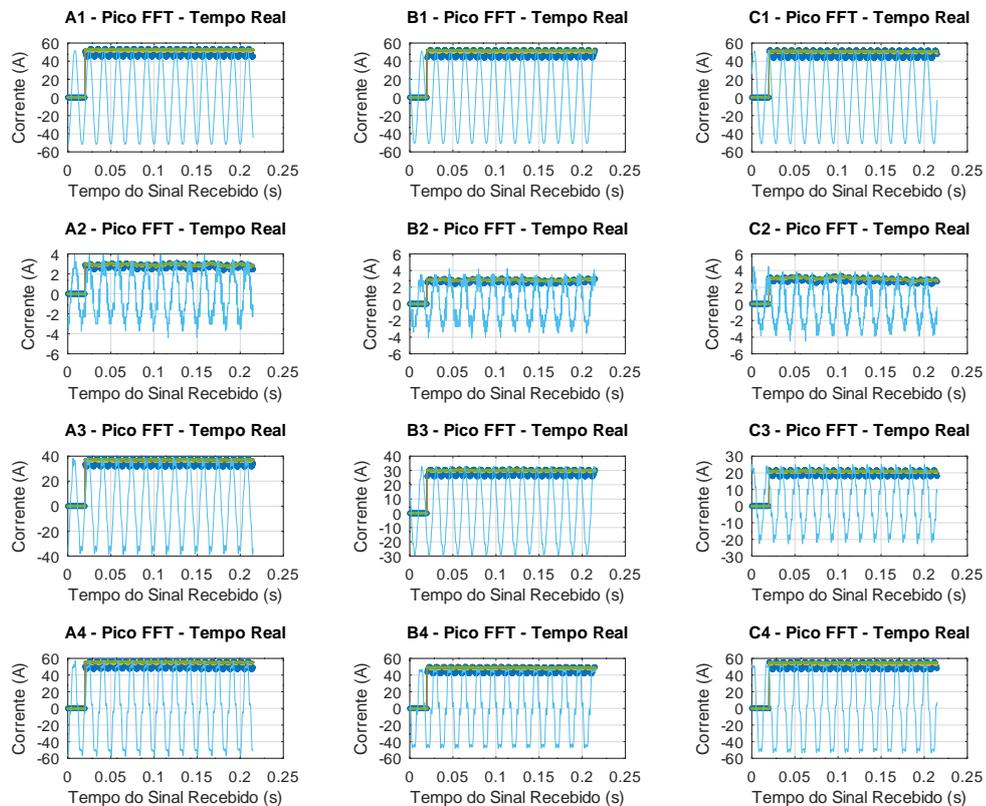
Figura 30 – Valor RMS na implementação direto na rede para o estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Assim como nas análises anteriores, o valor pico da FFT, na Figura 31 é bem próximo ao valor da amplitude do sinal e a reamostragem traz uma maior estabilidade à essa grandeza quando comparada ao sinal base. Isso ocorre em todos os sinais analisados, de forma semelhante ao que ocorre no RMS, contudo, nesse caso, o esquema do “Smart Resampling” (Amarelo) apresenta um desempenho um pouco inferior em relação aos outros esquemas, o que é mais perceptível nos sinais do fabricante 1. Outro ponto que pode ser observado é que a mudança na fase do sinal (A, B e C) não representou impactos significativos nessa análise.

Figura 31 – Valor de pico da FFT na implementação direto na rede para o estudo de caso.



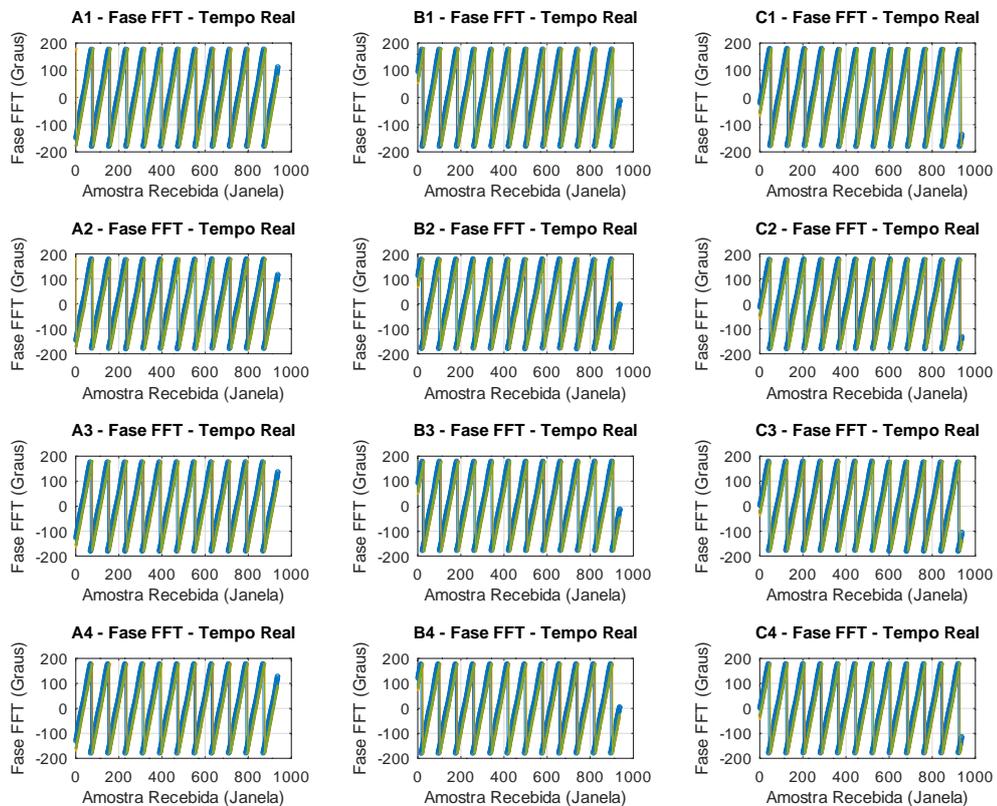
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Uma última grandeza observada nessa implementação direto na rede dos sinais do estudo de caso é o valor de fase na frequência fundamental da FFT, cujo resultado é mostrado na Figura 32.

Desta análise da fase, Figura 32, verifica-se que ambos os fabricantes mantêm as três fases corretamente espaçadas (com aproximadamente  $120^\circ$ ), o que pode ser facilmente observado nas primeiras amostras de cada fase (A, B e C). Além disso, apesar da análise em frequência da fase ser bastante caótica, conforme comentado na Figura 29, na frequência fundamental os esquemas de reamostragem conseguem acompanhar corretamente o sinal base em ambas as fases (A, B e C).

Outro ponto que pode ser observado é que, nesta análise (Figura 32), não há diferenças significativas entre os fabricantes, onde em todos os casos a fase na frequência fundamental se mantém linear com o deslocamento da janela, tanto com, quanto sem a utilização da reamostragem. Vale observar ainda, que a reamostragem adiciona um atraso de fase, praticamente constante, em todas as amostras.

Figura 32 – Valor de fase da FFT na implementação direto na rede para o estudo de caso.

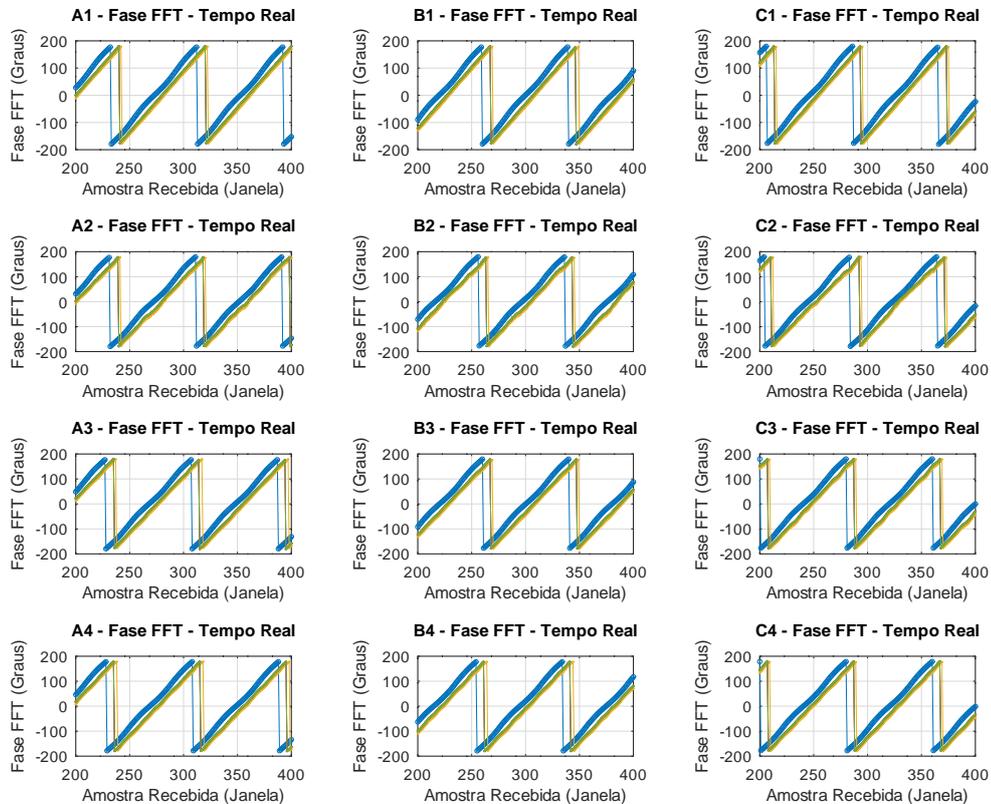


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para observar com mais detalhes o atraso de fase resultante da implementação dos esquemas de reamostragem, conforme a Figura 33, é mostrado o mesmo resultado anterior (Figura 32) mas com uma ampliação (zoom no gráfico), observando apenas alguns ciclos dos sinais.

Assim, pode-se verificar que a utilização da reamostragem resulta em um deslocamento de fase semelhante para todos os esquemas, sendo um pouco maior para o “Smart Resampling” (Amarelo). Contudo, esse deslocamento é praticamente constante durante todo o sinal, o que mostra um custo da implementação da reamostragem.

Figura 33 – Ampliação (zoom) do valor de fase da FFT na implementação direto na rede para o estudo de caso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 6.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste último capítulo realizou-se um estudo de caso, observando como a reamostragem se comporta perante a um sinal SV real capturado de uma subestação de energia. Nele pode-se verificar também, que a reamostragem, de modo geral, consegue reduzir o vazamento espectral existente nos sinais SV. Isso mostra que sua utilização consegue melhorar a precisão de algumas grandezas do sinal, como na FFT e no RMS, tanto na análise do sinal como um todo, quanto na implementação direto na rede.

Outro ponto observado nesse estudo de caso, é que essas vantagens são mais consideráveis para as MUs de alguns fabricantes (1 e 4), mas em nenhum deles a reamostragem prejudica o sinal. Em contrapartida, o custo da reamostragem é um atraso de fase, que é bastante semelhante em todos os casos.

Dessa forma o estudo de caso possibilitou verificar os resultados realizados no capítulo anterior, contudo explorando sinais reais, ao invés de apenas sinais simulados. Isso possibilita validar as análises realizadas e observar algumas características dos sinais SV existentes na prática e como a reamostragem se comporta em relação à elas.

## 7 CONCLUSÃO

A automação e digitalização de subestações utilizando o padrão IEC 61850 traz um protocolo de comunicação, chamado *Sampled Values* (SV) e definido pela IEC 61850-9-2, para transferir medições de tensão e corrente. Contudo, esses sinais são sujeitos à variações de frequência e interferências que podem resultar em sinais imprecisos. Uma técnica de processamento de sinais, chamada de reamostragem, pode reduzir ou até evitar esse problema. Assim, neste trabalho, foi explorada essa técnica aplicada ao SV a fim de verificar a possibilidade de sua utilização.

Para isso, foram implementados, em simulações, esquemas para a reamostragem de sinais, dois propostos pela literatura, um por Chen et al. (2020) chamado "*Modified Sinc*" e outro Cai et al. (2010) chamado "Smart Resampling", e dois utilizando técnicas convencionais de interpolação, um com a "Cubic Spline" e outro com a função "Sinc". Esses esquemas são analisados por grandezas como a FFT e o RMS e na análise da eficiência computacional, realizando uma série implementações e simulações de efeitos para validar suas características.

Com essas análises verificou-se que a reamostragem consegue reduzir o vazamento espectral no sinal em diversas situações, uma vez que a reamostragem possibilita manter a relação entre frequência do sinal e frequência de amostragem constante. Isso também possibilita uma significativa redução no erro RMS de acordo com a variação de frequência dos sinais, da ordem de  $10^{-2}A$  sem reamostragem para ordem de  $10^{-7}A$  em alguns esquemas. Nestas situações, embora todos os esquemas de reamostragem analisados trazem esses benefícios, o com o pior desempenho foi o "Smart Resampling" e o melhor desempenho foi obtido pela "Cubic Spline". Vale observar que, apesar dessas vantagens, a utilização da reamostragem também altera o comportamento da fase do sinal.

Outro ponto observado neste trabalho é relativo aos efeitos que os sinais SV podem estar sujeitos, como o jitter e a perda de pacotes. Nesses, o efeito do jitter praticamente não representa nenhum efeito significativo nem para o sinal em si e nem para a reamostragem. A perda de pacotes, embora seja um problema na perda de informação do sinal, isso não impacta na técnica de reamostragem na maioria dos esquemas, mostrando um efeito apenas no "Smart Resampling".

Na análise da implementação direto na rede do sinal SV, verificou-se que o único esquema que mantém a redução do erro RMS mais constante de acordo com a variação da janela de análise foi o "Cubic Spline". Embora todos os esquemas proporcionem uma estabilidade maior em grandezas como o pico da FFT e o RMS. É observado nesta implementação um custo da utilização da reamostragem que consiste em um atraso devido ao processamento, o que é observado na análise da fase, onde todos os esquemas apresentam um atraso de fase que deve ser considerado, principalmente em aplicações de tempo

real.

A fim de verificar esse custo da reamostragem de forma mais precisa foi observada a eficiência computacional dos esquemas, utilizada apenas para comparar os esquemas entre si. Nisso verifica-se que a “Modified Sinc” apresenta um desempenho computacional consideravelmente pior que os outros esquemas. Os outros esquemas se mostraram melhores computacionalmente com valores menores de tempo computacional, o “Sinc”, com os melhores tempos considerando a pequena janela da implementação direto na rede; a “Cubic Spline”, sendo mais estável com menores variações em seus tempos; e a “Smart Resampling”, com um tempo um pouco maior que os dois últimos, mas com possibilidade de técnicas para melhorar o mesmo.

No estudo de caso, foram realizadas as mesmas análises considerando os sinais SV capturados de MUs de quatro fabricantes diferente em situação de implementação da IEC 61850. Nisso, observou-se novamente que a reamostragem reduz o vazamento espectral, sendo mais impactante nos fabricantes 1 e 4, ou ao menos o mantém sem prejudicar o sinal, no caso do fabricante 2. Além disso, todos os esquemas melhoram a estabilidade do RMS e do pico da FFT na implementação direto na rede, o que ocorre para todos os fabricantes. Outro ponto que ocorrem em todos os casos é o atraso de fase, praticamente constante em todas as amostras, sendo o “Smart Resampling” com o atraso um pouco maior.

Considerando todas essas análises, observou-se que a reamostragem proporciona como benefício uma redução do vazamento espectral e uma melhora na precisão e na estabilidade em análises como a FFT e o RMS. Em contrapartida, em algumas situações, esses benefícios são reduzidos e a utilização dessa técnica resulta em um atraso de processamento e um atraso de fase, o que traz a necessidade de uma atenção maior em algumas aplicações, como as de tempo real.

Além disso, de modo geral, o esquema que apresentou o melhor desempenho foi utilizando a técnica convencional da “Cubic Spline” e o pior desempenho foi o “Smart Resampling”, embora possua parâmetros que podem ser otimizados. Ademais, a reamostragem proporciona benefícios para aplicações SV, podendo ser implementada na automação e digitalização de subestações, apesar de necessitar de análises detalhadas em aplicações específicas.

Vale observar ainda que esse trabalho de dissertação gerou duas publicações, o artigo “*Analysis of Real Time Implementation of Resampling Schemes: An Approach Based on IEC 61850-9-2*” apresentado no *15th Seminar on Power Electronics and Control - SE-POC 2023* (ROSANELLI et al., 2023), e o artigo “*Analysis and Comparison of Resampling Schemes: An Approach Based on IEC 61850-9-2*” apresentado no Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2023, embora este ainda não publicou os anais do evento na data de escrita desta dissertação.

## 7.1 TRABALHOS FUTUROS

Com o decorrer dessa pesquisa e dos desenvolvimentos apresentados nesta dissertação, surge uma série de possibilidades de trabalhos futuros. Um deles de realizar a implementação dos esquemas em simulações de tempo real para verificar requisitos de tempo exigidos pela norma IEC 61850 em aplicações de proteção, por exemplo. Explorar de maneira mais aprofundada algoritmos de definição de frequência e métodos para definição da taxa de reamostragem, que, se otimizada deve ter um impacto ainda maior na reamostragem.

Outra possibilidade de trabalho futuro é de implementar outros esquemas de reamostragem para aumentar a comparação dos mesmos. Explorar outras aplicações da reamostragem nos sinais SV. Realizar otimizações e modificações em parâmetros dos esquemas para melhorar seu desempenho em aplicações específicas. Entre outras diversas possibilidades de trabalhos futuros que possibilitem aprimorar a técnica da reamostragem e sua utilização.

## REFERÊNCIAS

ADEWOLE, A.; TZONEVA, R. Impact of iec 61850-9-2 standard-based process bus on the operating performance of protection ieds: Comparative study. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, p. 2245–2252, 2014. ISSN 1474-6670. 19th IFAC World Congress. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016419464>>.

ANDERSSON, L.; BRUNNER, C.; ENGLER, F. Substation automation based on iec 61850 with new process-close technologies. In: **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 6 pp. Vol.2–.

BASTOS, A. F.; SANTOSO, S. Root-mean-square profiles under varying power frequency: Computation and applications. In: **2019 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.

BHATTACHARJEE, T.; JAMIL, M. Goose publishing and receiving operations of iec 61850 enabled ieds. In: **2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

BLAIR, S. M.; ROSCOE, A. J.; IRVINE, J. Real-time compression of iec 61869-9 sampled value data. In: **2016 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

BORKOWSKI, D.; BIEN, A. Improvement of accuracy of power system spectral analysis by coherent resampling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 3, p. 1004–1013, 2009.

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Numerical Analysis**. 9. ed. Boston: Brooks/Cole Cengage Learning, 2011.

CAI, C. et al. A smart resampling scheme for digital substation relay protection. In: **IEEE. IEEE PES General Meeting**. [S.l.], 2010. p. 1–6.

CHASE, S. et al. Protection and testing considerations for iec 61850 sampled values-based distance and line current differential schemes. In: **72nd Annual Conference for Protective Relay Engineers**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–10.

CHEN, X.; GUO, H.; CROSSLEY, P. Interoperability performance assessment of multivendor iec61850 process bus. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 31, n. 4, p. 1934–1944, 2015.

CHEN, Y. et al. Precise amplitude and phase determination using resampling algorithms for calibrating sampled value instruments. **Sensors**, MDPI, v. 20, n. 24, p. 7345, 2020.

CIMADEVILLA, R.; FERRERO, I.; YARZA, J. M. Iec61850-9-2 process bus implementation on ieds. In: **IEEE. 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition**. [S.l.], 2014. p. 1–5.

DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B. da; NETTO, S. L. **Processamento Digital de Sinais: Projeto e análise de sistemas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

DONOVAN, M. O. et al. An evaluation of extending an existing substation automation system using iec 61850. In: **2022 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6.

GRASSET, H. Differences between iec 61850-9-2 9-2le and iec 61869-9. **CIGRE 2018**, 2018.

GURJÃO, E. C.; SOUZA, B. A.; CARMO, U. A. A comunicação entre equipamentos de proteção na norma iec 61850. **São Paulo: Eletricidade Moderna**, p. 148–157, 2007.

IGARASHI, G.; SANTOS, J. C. Challenges to the implementation of a real-time process bus according to iec 61850-9. In: **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.

INGLE, V. K.; PROAKIS, J. G. **Digital Signal Processing Using MATLAB**: Third edition. 3. ed. Boston: Cengage Learning, 2011.

INGRAM, D. M. E. et al. Performance analysis of iec 61850 sampled value process bus networks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 3, p. 1445–1454, 2013.

JUNIOR, P. S. P. et al. Analysis of ptp synchronization behavior with iec 61850 process bus. In: **2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.

\_\_\_\_\_. **IEC 61850-9-2 Avaliação e testes de um barramento de processos**. osetorelétrico, 2011. Acessado em 03 mai 2023. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/iec-61850-9-2-avaliacao-e-testes-de-um-barramento-de-processos/>>.

JUSTINA, G. de L. **Análise da Digitalização de Subestações ante a IEC 61850 com Ênfase em Transformadore de Instrumentação e Merging Units**. 2021. 82 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

KEZUNOVIC, M. et al. Digital protection system using optical instrument transformers and digital relays interconnected by an iec 61850–9–2 digital process bus. **Power Systems Engineering Research Center Final Project Report**, PSERC Publication, 2008.

LIMA, M. A. A. et al. A method of dynamic resampling for dft-based harmonic analysis under time-varying frequency conditions. In: **Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.

LOPES, Y. **SMARTFlow Sistema Autoconfigurável para Redes de Telecomunicações IEC 61850 com arcabouço OpenFlow**. 2013. 109 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

Marko Neitola. **Four-Parameter Sinefit**: Version 2.0.0.0. MathWorks, 2023. Acessado em 03 mai 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/23214-four-parameter-sinefit>>.

MELO, A. F. S. et al. Influence of process bus on performance of power system protection. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 200, p. 107491, 2021.

MOCANU, S.; THIRIET, J.-M. Real-time performance and security of iec 61850 process bus communications. **Journal of Cyber Security and Mobility**, v. 10, n. 2, p. 1–42, 2021.

NALON, J. A. **Introdução ao Processamento Digital de Sinais**. Reimpr. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2013.

PARKER, J. A.; KENYON, R. V.; TROXEL, D. E. Comparison of interpolating methods for image resampling. **IEEE Transactions on Medical Imaging**, v. 2, n. 1, p. 31–39, 1983.

RODRIGUES, J.; SOLDANI, L.; WONG, G. First substation with iec61850 commissioned in the americas. In: IEEE. **2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America**. [S.l.], 2006. p. 1–5.

ROOSTAEE, S.; HOOSHMAND, R.; ATAEI, M. Substation automation system using iec 61850. In: **2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 393–397.

ROSANELLI, A. A. et al. Analysis of real time implementation of resampling schemes: An approach based on iec 61850-9-2. In: **2023 15th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6.

SANTOS, L. O. et al. Implementação em hardware de um sistema de reamostragem dinâmica coerente. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1.

SKENDZIC, V.; DOLEZILEK, D. New and emerging solutions for sampled value process bus iec 61850-9-2 standard—an editors perspective. In: **Southern African Power System Protection & Automation Conference**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–10.

SREEDEVI, G.; NARAYANAMURTHY, P. K.; SEELAMANTULA, C. S. Efficient resampling of speech/audio signals in shift-invariant spaces. In: **2016 Twenty Second National Conference on Communication (NCC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.

WANNOUS, K.; TOMAN, P. Sharing sampled values between two protection relays according to standard iec 61850-9-2le. In: **2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

YASHWANT, K.; SWARUP, K. S. Modeling an iec61850 based substation automation system. In: **2011 Annual IEEE India Conference**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5.