

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade do Gama – FGA
Engenharia Eletrônica

COMPRESSÃO DE SINAIS PARA SMART GRID

JÉSSICA DE SOUZA ALVES

Orientador: Dr. JORGE ANDRÉS CORMANE ANGARITA

Coorientador: Dr. MARCUS VINÍCIUS CHAFFIM COSTA



UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FGA – FACULDADE DO GAMA

ENGENHARIA ELETRÔNICA

COMPRESSÃO DE SINAIS PARA SMART GRID

JÉSSICA DE SOUZA ALVES

ORIENTADOR: JORGE ANDRÉS CORMANE ANGARITA

CO-ORIENTADOR: MARCUS VINÍCIUS CHAFFIM COSTA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ENGENHARIA ELETRÔNICA

BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO DE 2019

UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FGA – FACULDADE DO GAMA
ENGENHARIA ELETRÔNICA

COMPRESSÃO DE SINAIS PARA SMART GRID

JÉSSICA DE SOUZA ALVES

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À FACULDADE DO GAMA - FGA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

APROVADA POR:

Prof. Jorge Andrés Cormane Angarita, Dr.

(Orientador)

Prof. Marcus Vinícius Chaffim Costa, Dr.

(Co-orientador)

Marcel Henrique Trabuco, Dr.

(Examinador externo)

Davi Benevides Gusmão, Mestre em Engenharia Biomédica

(Examinador externo)

FICHA CATALOGRÁFICA

ALVES, JÉSSICA DE SOUZA

Compressão de Sinais para Smart Grid,

[Distrito Federal], 2019.

43p., 210 × 297 mm (FGA/UnB Gama, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, 2019).

Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade do Gama, Engenharia Eletrônica

1. Compressão de Sinais

2. Redes Elétricas Inteligentes

3. Processamento de Sinais

4. Controle de qualidade

I. FGA UnB/UnB.

II. Título (série)

REFERÊNCIA

ALVES, JÉSSICA DE SOUZA (2019). Compressão de Sinais para Smart Grid. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Eletrônica, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 43p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jéssica de Souza Alves

TÍTULO: Compressão de Sinais para Smart Grid

GRAU: Bacharel em Engenharia Eletrônica

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de conclusão de curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

jessicaturunenn@gmail.com

Brasília, DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi realizado no âmbito do Edital 04/2017 - Seleção Pública de Propostas de Pesquisa Científica, Tecnológica e Inovação Demanda Espontânea da Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal - FAPDF, com o projeto intitulado "DESENVOLVIMENTO DE UM TÉCNICA DE COMPRESSÃO BASEADA EM UMA ABORDAGEM DISSOCIATIVA PARA FORMAS DE ONDA DE DISTÚRBIOS PRODUZIDOS EM REDES ELÉTRICAS". Termo de Outorga 1373/2017 e Número do Processo: 193.001.474/2017.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jorge Cormane, pela paciência, ajuda na realização do trabalho, e no conhecimento passado. Ao meu professor e coorientador Prof. Dr. Marcus Vinícius Chaffim pela paciência e as instruções que recebi dele desde o início da minha graduação.

Aos amigos: Angélica, Edilberto e Lorena pelo apoio na reta final da graduação.

Ao meu noivo Victor pela dedicação, paciência e carinho.

Agradeço a melhor parte de mim, minha família. Tudo isso eu devo as melhores pessoas da minha vida, a minha mãe por toda dedicação de uma vida, o meu padastro e ao pai que ele foi para mim. Obrigada pela família maravilhosa que vocês me deram.

A Deus, por ter colocado pessoas maravilhosas em minha vida.

RESUMO Para modernizar o sistema elétrico atual são necessárias novas tecnologias entre elas, as tecnologias da informação e comunicação. Considerando que os sinais elétricos de uma rede devem ser continuamente medidos e que a importância e quantidade dos dados gerados por estas medições é grande o suficiente para gerar uma demanda significativa de transmissão de dados, a compressão das informações armazenadas passa a ter grande relevância, pois a compressão destes sinais também permite o armazenamento de dados a respeito de um grande número de variáveis, por longos períodos, para análises posteriores mais aprofundadas, as quais podem resultar em grandes ganhos de eficiência e segurança nas operações do sistema elétrico. Vale ressaltar que o Brasil possui um sistema elétrico integrado, e é um país com muito potencial para investimentos na aplicação das redes elétricas inteligentes, dado seu tamanho e suas necessidades no setor elétrico. Este trabalho propõe um algoritmo de compressão para sinais com distúrbios. São apresentados os procedimentos que envolveram o tratamento matemático dos sinais em domínio transformado, como a quantização e alocação de bits, a codificação, a decodificação e todos os passos realizados até a reconstrução do sinal tratado, assim como os resultados dos métodos utilizados.

ABSTRACT To modernize the current electrical system, new technologies are needed, including information and communication technologies. Considering that the electrical signals of a network must be continuously measured and that the importance and quantity of the data generated by these measurements is large enough to generate a significant demand for data transmission, the compression of the stored information is of great relevance, since the compression of these signals also allows the storage of data about a large number of variables, for longer periods, for further in-depth analyzes, which can result in great gains in efficiency and safety in the operations of an electrical system. It is worth mentioning that Brazil has an integrated electrical system, and it is a country with a lot of potential for investments in the application of smart electricity grids, given the size of the country and the current needs in the electric sector. This paper proposes a compression algorithm for signals with disturbances. The procedures that involve the mathematical treatment of the signals in the transformed domain are presented, such as quantization and allocation of bits, encoding, decoding and all the steps performed until the reconstruction of the treated signal, as well as the results of the methods used.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Justificativas	3
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	Conceitos Iniciais	5
2.1	Qualidade de Energia e Análise de Distúrbios	5
2.1.1	Oscilografia	6
2.2	Smart Grid	6
2.3	Sinais em Domínio Contínuo e Discreto	9
2.4	Transformadas Lineares de Sinais em Tempo Discreto	11
2.4.1	Transformada de Fourier	11
2.4.2	Transformada de Wavelet	12
2.5	Compressão de Sinais e Dados	14
2.5.1	Compressão por Transformadas	15
2.5.2	Codificação Aritmética	17

3	 Materiais e Métodos	18
3.1	Banco de Sinais	18
3.2	Métricas	20
3.3	Algoritmo de Compressão dos Sinais de Potência	20
3.3.1	Segmentação das Janelas	22
3.3.2	Transformada de Wavelets	23
3.3.3	Ajuste de Faixa Dinâmica	24
3.3.4	Divisão de Sub-bandas e Alocação de Bits	24
3.3.5	Quantização	27
3.3.6	Codificador Aritmético	27
3.3.7	Reconstrução do Sinal	28
4	 Resultados e Discussão	29
4.1	Discussão acerca dos Resultados obtidos	35
5	 Conclusão	37
5.1	Propostas para trabalhos futuros	38
A	 Apêndice - Resultados Parciais	42

LISTA DE TABELAS

4.1	Medição de Desempenho da Técnica para $N=256, M=8$	34
4.2	Medição de Desempenho da Técnica para $N=256$, e M variável	34
4.3	Medição de Desempenho da Técnica para $N=512, M=8$	34
4.4	Medição de Desempenho da Técnica para $N=512$, e M variável	35
4.5	Medição de Desempenho da Técnica para $N=1024, M=8$	35
4.6	Medição de Desempenho da Técnica para $N=1024$, e M variável	35
A.1	Medição de Desempenho da Técnica para $N=1024, M=8, Q=8$	42
A.2	Medição de Desempenho da Técnica para $N=512, M=8, Q=8$	43
A.3	Medição de Desempenho da Técnica para $N=256, M=8, Q=8$	43

LISTA DE FIGURAS

2.1	Comparação entre modelos de distribuição de energia	7
2.2	Esquemático de fluxo de energia e fluxo informações na Smart Grid	8
2.3	Exemplo de sinal contínuo e sinal discreto	10
2.4	Sinal não estacionário amostrado	12
2.5	Transformada discreta de Wavelet em sequência	14
3.1	Sinal original de corrente	19
3.2	Sinal original da tensão	19
3.3	Diagrama de blocos do processo de compressão do sinal	21
3.4	Diagrama de blocos do processo de descompressão do sinal	22
3.5	Coefficientes transformados do sinal de corrente	23
3.6	Coefficientes transformados do sinal de tensão da fase V1	23
3.7	Exemplo dos coeficientes após a normalização	24
3.8	Relação taxa-distorção do sinal reconstruído do sinal original	25
3.9	Exemplo de divisão de sub-bandas fixas $M = 8$ e $N = 256$	26
3.10	Exemplo de divisão de sub-bandas variáveis com $M = 9$ e $N = 256$	26
4.1	Ilustração da construção do vetor de alocação de bits para $N=256$, com sub-bandas fixas e $M=8$	30
4.2	Ilustração da construção do vetor de alocação de bits para $N=256$, com sub-bandas variáveis e $M=9$	30

4.3	Sinal Reconstruído de Tensão com $N=256$ e Sub-bandas Variáveis	31
4.4	Sinal Reconstruído de Tensão com $N=256$ e Sub-bandas Fixas	31
4.5	Diferença entre os sinais original e reconstruído, para o caso das sub-bandas variáveis	31
4.6	Diferença entre os sinais original e reconstruído, para o caso das sub-bandas fixas	32
4.7	Sinal Reconstruído de Corrente com $N=256$ e Sub-bandas Variáveis	32
4.8	Sinal Reconstruído de Corrente com $N=256$ e Sub-bandas fixas	33
4.9	Erro entre o sinal de corrente original e o sinal reconstruído, com M variável e $N=256$	33
4.10	Erro entre o sinal de tensão original e o sinal reconstruído, com $M=8$ e $N=256$	33

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

- ANEEL* – Agência Nacional de Energia Elétrica
- DB4* – Daubechie Wavelet 4
- DOE* – *U.S. Department of Energy* - Departamento de Energia dos Estados Unidos
- EPRI* – *U.S. Electric Power Research Institute* - Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica dos Estados Unidos
- GC* – Ganho de Compressão
- IEC* – *International Electrotechnical Commission* - Comissão Eletrotécnica Internacional
- IEEE* – *Institute of Electrical and Electronic Engineers* - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
- MRA* – *Multiresolution Analysis* - Análise Multiresolução
- MSNE* – *Mean Squared Normalized Error* - Erro Quadrático Médio Normalizado
- NIST* – *U.S. National Institute of Standards and Technology* - Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia
- QEE* – Qualidade de Energia Elétrica
- RDP* – Registrador Digital de Perturbação
- SNR* – *Signal-to-Noise Ratio* - Relação Sinal Ruído
- STFT* – *Short-Time Fourier Transform* - Transformada de Fourier de Tempo Curto
- TB* – Taxa de Bits
- TDF* – Transformada Discreta de Fourier
- TDW* – Transformada Discreta de Wavelets
- TF* – Transformada de Fourier
- TW* – Transformada de Wavelet

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O sistema elétrico é um dos maiores projetos de engenharia de um país. Gerar, transmitir e distribuir energia requer gerenciamento dos processos do sistema, principalmente porque a maior parte da geração de energia ocorre em locais afastados dos centros de operação. Em decorrência desse fato, o gerenciamento de dados da rede é imprescindível porque viabiliza a operação remota do sistema, o monitoramento da rede pela análise de desempenho, registro de eventos e até o consumo do cliente final.

Para modernizar os processos de gerência do sistema, tem sido tendência mundial no setor elétrico a integração de tecnologias, muitas vezes oriundas de outros tipos de aplicação, para substituir o padrão de operação atual pelo de redes elétricas inteligentes. Essas mudanças implicam na redução de perdas na organização do processo de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica. Tais transformações são reflexo não só nas demandas atuais mas também das previstas no mercado de energia elétrica. [1]

Assim, ao se pensar em modernização do setor elétrico vem a tona o conceito de *Smart Grid* - redes elétricas inteligentes. Esse conceito é apresentado como uma tecnologia que possibilita o uso eficiente da energia elétrica e assim pode ser utilizado como uma ferramenta para contribuir, de forma significativa, na solução de alguns dos desafios relacionados a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Uma *Smart Grid* atende a vários critérios de medidas operacionais, incluindo por exemplo medidores inteligentes. [2].

Para que um sistema *Smart Grid*, ofereça os benefícios imaginados é necessário que haja a instalação de medidores elétricos inteligentes, capazes de ler e registrar diversos parâmetros da energia entregue, e de tecnologias para a comunicação entre cliente, medidor e centrais de controle. Todo esse trabalho converge para o uso de elementos digitais de comunicações nas redes que transportam energia. Com a instalação desses equipamentos de comunicação dos elementos que compõem o sistema elétrico, pode-se enviar uma gama de dados e informações para os centros de controle, onde serão tratados, auxiliando na

operação e controle do sistema como um todo [3]. Assim, uma característica do sistema elétrico inteligente é a comunicação. Integrar sistemas e comunicá-los entre-si.

Devido a velocidade com que ocorrem os eventos em um sistema elétrico, o monitoramento das variáveis gera informação, que além de volumosa deve ser transmitida para permitir uma atuação eficaz sobre o sistema. Eventos devem ser armazenados e transmitidos entre todo o sistema ou por uma central, por exemplo. No entanto, esse dados se tornam um problema caso não haja um tratamento prévio das informações, pela quantidade de informações nos canais e armazenamento.

Diante desse cenário, a compressão de dados é uma possível solução para lidar com os grandes volumes de dados gerados pelos eventos e medições da rede elétrica. Com ela há a capacidade de reduzir o espaço usado, diminuir a banda de transmissão de informação, além de possibilitar melhor desempenho no tempo de transmissão de informações se comparado ao sinal original. A compressão de dados é utilizada em vários setores da tecnologia, como por exemplo, uma videoconferência na internet, nas comunicações móveis e até na da TV digital. A compressão de dados permite que tais tecnologias e outras sejam possíveis.

A compressão é uma operação que pode ser realizada de diversos métodos, com a finalidade de reduzir a quantidade de bytes para representar um dado. Ela baseia-se em retirar a redundância dos dados originais, partindo que muitos dados contêm informações que se repetem e que podem ou devem ser eliminados do sinal original. Assim um sinal comprimido tem o tamanho menor comparado ao sinal original, mas ainda contém as informações importantes deste sinal. A técnica de compressão utilizada deve se adequar as características do sinal original.

Os dados utilizados para compressão nesse trabalho foram sinais de tensão e corrente com distúrbio de um sistema elétrico, sendo as técnicas utilizadas foram baseadas no comportamento desse tipo de sinal: compressão por transformadas. Utilizou-se a transformada de Wavelets e a quantização baseada em alocação de bits. Isso, por que a técnica apresenta maior vantagem para sinais de maior comprimento de palavra.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um algoritmo para compressão de sinais potência com distúrbios, no domínio da transformada de Wavelets e usando alocação dinâmica de bits.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Segmentar o sinal amostrado em três tamanhos de janelas;
- Utilizar a Transformada Discreta de Wavelets e obter os coeficientes transformados do sinal original;
- Fazer o ajuste da faixa de valores dos coeficientes para utilizar os valores ajustados na quantização;
- Dividir as janelas em sub-bandas fixas e variáveis;
- Construir um vetor de alocação de bits baseado nas sub-bandas obtidas, e a partir do vetor construído, quantizar os coeficientes;
- Codificar os coeficientes quantizados em um codificador aritmético;
- Decodificar os coeficientes e realizar a quantização inversa dos coeficientes;
- Aplicar a Transformada Inversa e obter o sinal reconstruído;
- Comparar o erro entre sinais originais com os sinais reconstruídos;
- Apresentar as análises de desempenho obtidas entre os métodos realizados.

1.3 JUSTIFICATIVAS

A compressão de dados é uma maneira de solucionar os problemas relacionados ao volume de dados gerados no monitoramento de redes elétricas inteligentes, os quais precisam ser transmitidos ou armazenados. Faz necessário assim estudos e pesquisas de métodos em que atendam esse tipo de demanda tecnológica.

Devido a velocidade com que ocorrem os eventos em um sistema elétrico, o monitoramento das variáveis gera informação, que além de volumosa devem ser transmitida para permitir uma atuação eficaz sobre o sistema. Eventos devem ser armazenados e transmitidos entre todo o sistema ou por uma central, por exemplo.

No entanto, esse dados se tornam um problema caso não haja um tratamento prévio das informações, pela quantidade de informações nos canais e armazenamento. Uma ideia da quantidade de dados gerados durante o monitoramento é a quantidade de medidores trifásicos que monitoram tensão e corrente da rede: são 100 medidores que digitalizam os sinais a uma taxa de amostragem de 15360 amostras/s e resolução de 16 bits. [4]

Nesse trabalho será apresentado uma aplicação de compressão de dados aos sinais de potência, visto que as demandas tecnológicas do sistema elétrico tendem para comunicação e transmissão de informações. Portanto, para se tornar viável e a comunicação e armazenamento do grande volume de dados gerados pelos eventos da rede, faz-se necessário o estudo de soluções para a diminuição dos dados do sistema sem que isso afete a informação contida nas medições.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura básica desse trabalho é composta pelas seguintes etapas: Definição dos conceitos de qualidade da energia elétrica, distúrbios, *smart grids*, sinais em domínio contínuo e discreto, transformadas lineares em sinais de tempo discreto e compressão de sinais e dados. Seguindo-se dos materiais e métodos utilizados para a construção do algoritmo de compressão de sinais de tensão e corrente com distúrbio, prosseguindo para a apresentação dos resultados do algoritmo de compressão construído, a discussão a respeito desses resultados e finalmente as conclusões obtidas, juntamente com propostas de trabalhos complementares futuros.

2 CONCEITOS INICIAIS

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA E ANÁLISE DE DISTÚRBIOS

Inicialmente para se falar de redes elétricas inteligentes e a aplicação da compressão de sinais e dados, intimamente ligada a esse avanço tecnológico, se faz necessário conceituar o termo QEE - Qualidade da Energia Elétrica. Segundo a referência [5], a qualidade da energia elétrica é uma área qual se trata os distúrbios causados por harmônicas, variações de tensão, interrupções transitórias, surtos atmosféricos, ruídos, etc.

As referência [6] traz algumas definições de QEE. Uma definição é a frequência e severidade dos desvios na amplitude e forma de onda da tensão e da corrente. Outra definição diz que é qualquer problema na tensão, na corrente ou desvio na frequência que resulte em falha ou prejudique a operação dos equipamentos. Uma terceira definição afirma que um sistema elétrico com excelente qualidade da energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de energia em tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência, como se emanasse de uma fonte de potência infinita.

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*IEEE -Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define QEE como “O conceito de fornecer e estabelecer a alimentação de um equipamento elétrico sensível de forma adequada ao seu funcionamento” [7]. A norma *IEC -International Electrotechnical Commision* - define o termo como “Características da eletricidade em um dado ponto do sistema elétrico, em relação a um conjunto de parâmetros técnicos de referência” [8].

No entanto, o termo QEE deve ser interpretado de maneira ampla como qualidade do serviço efetuado pelas concessionárias, englobando três aspectos: confiabilidade, qualidade da energia oferecida e provisão de informação. Mas uma definição ampla do termo QEE é encontrada em [9], o qual define: “Qualidade de Energia Elétrica é a combinação entre a qualidade da tensão e a qualidade da corrente. Uma tensão ideal é uma tensão senoidal com amplitude e frequência constantes, onde ambos apresentam valores nominais”. Esta será uma boa definição a ser relacionada ao trabalho realizado que será apresentado nos próximos capítulos, visto que a QEE aqui está relacionada a habilidade

do sistema elétrico de operar cargas sem danificá-las, além da relação da eficiência do sistema elétrico e sua operação sem perturbações. [10] Considerando que o sistema elétrico brasileiro possui o fornecimento ao consumidor final padronizado em tensões senoidais de 60hz, as deformações serão consideradas ruídos que indicam perturbações no sistema, sendo estes os dados a serem comprimidos através da transformação matemática.

2.1.1 Oscilografia

A Oscilografia surge em meados dos anos vinte, com os primeiros oscilógrafos eletromecânicos, para que as medições das perturbações do sistema elétrico fossem utilizadas para documentação e estudos acadêmicos, tanto para os analistas das operadoras, transmissoras e também das concessionárias. O significado de oscilografia é “o registro das oscilações de grandezas elétricas do sistema, como tensões e correntes” [11]. Em torno da década de cinquenta, essas medições eram realizadas por meio de equipamentos eletromecânicos que através de uma agulha móvel, semelhante a um compasso, registravam as oscilações em um rolo de papel em movimento. A partir dos anos setenta, o registro então passou a ser realizado com impressão térmica em papel fotográfico, ainda por aparelhos analógicos, porém já com maior precisão mas ainda com grandes dificuldades para armazenar e transmitir os dados registrados. Já em meados dos anos oitenta, surgem os primeiros oscilógrafos digitais, que foram então chamados de Registradores Digitais de Perturbação - RDP. [11][12]

Os RDPs são descritos como “equipamentos de aquisição digital de sinais desenvolvidos especificamente para serem utilizados em instalações de sistemas elétricos de potência”. A principal função é a gravação contínua em uma memória cíclicas das grandezas de interesse. Essas podem ser tensões e correntes de fase ou linha, tensões e correntes de neutro e no caso de geradores, tensão e corrente de campo. Nesse novo cenário de avanços tecnológicos, no âmbito das medições de distúrbio e qualidade de energia, as redes de oscilografia ainda têm dificuldades relacionadas aos dados armazenados e a disponibilidade desses dados, gerados pelas medições. Ainda assim a partir dos avanços nesse ramo, têm-se possibilidade da modernização das redes elétricas convencionais para as redes elétricas inteligentes.[11] [4]

2.2 SMART GRID

Um dos principais problemas do sistema elétrico está na geração de energia em usinas afastadas dos centros de consumo; e por consequência, a transmissão de eletricidade em

distâncias continentais. O sistema além de gerar a energia, deve transmitir e distribuir aos numerosos consumidores finais. Isso implica o gerenciamento dos processos do sistema, o qual é necessário para obter os dados de cobranças, para análises de desempenho e também além dos gerados pelo monitoramento e para operação do sistema.

O Instituto Americano de Tecnologia e Padrões, NIST (*National Institute of Standards and Technology*), define *Smart Grid* como: “uma rede moderna que permite o fluxo bidirecional de energia, usando comunicação nos dois sentidos e técnicas de controle, que possibilitará novas funcionalidades e novas aplicações”. Já no contexto do setor elétrico brasileiro, os fatores que mais motivam a implantação da *Smart Grid* são a possibilidade de geração distribuída integrada ao sistema e a prevenção de perdas. [1]

Com as redes elétricas inteligentes, tem-se possibilidade do fluxo bidirecional da energia elétrica gerada - a energia pode seguir os dois caminhos, tanto entrando como saindo de algum lugar. Dessa forma permitindo integração ao sistema elétrico de um enorme número de unidades geradoras de pequeno porte, conseqüentemente diminuindo a demanda do sistema e aumentando sua confiabilidade. Entretanto, a energia gerada de forma distribuída, para que possa ser transmitida e utilizada, depende de um controle de qualidade. Sem esse controle, torna-se muito difícil o monitoramento dos eventos e atividades da rede, sendo notável uso de ferramentas para esse contexto, devido a necessidade de uma infraestrutura central monitorar à distância um grande número de pontos [13].

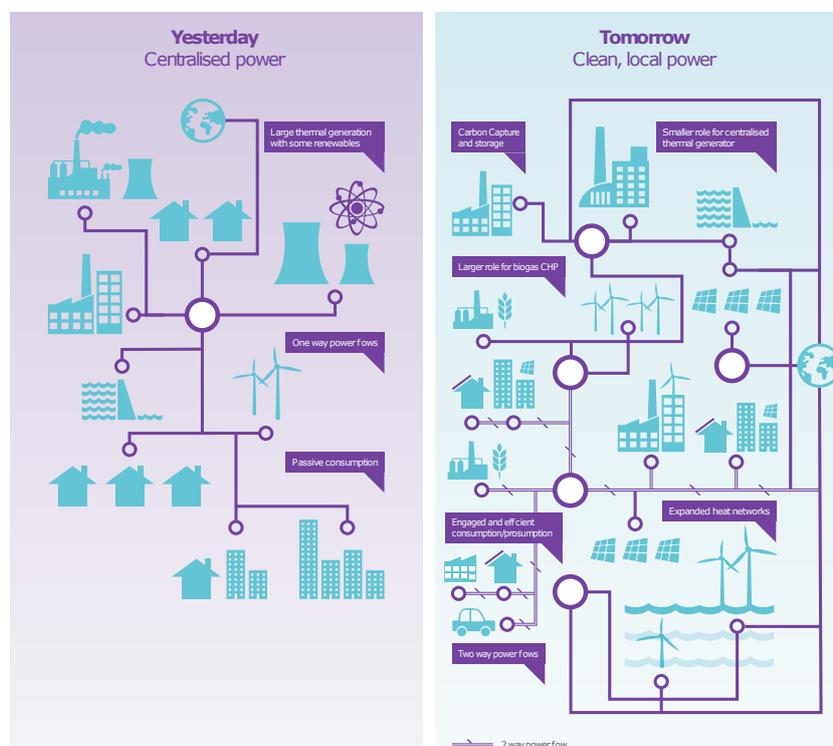
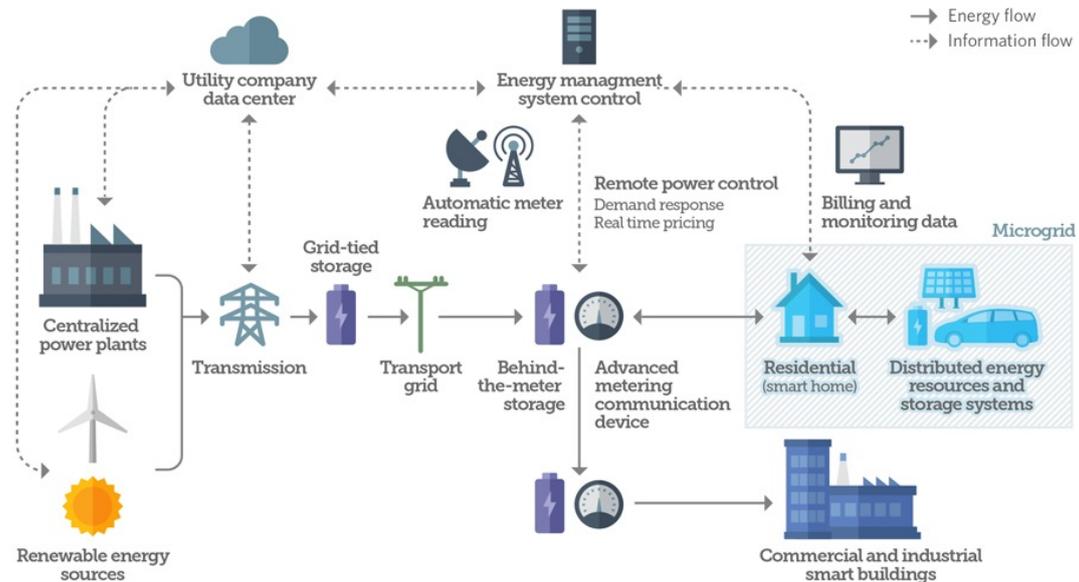


Figura 2.1. Comparação entre modelos de distribuição de energia. Modificado de [14]

As mudanças relacionadas ao controle e monitoramento tem ainda outros benefícios, todos acompanhados de redução de custos operacionais como: a facilidade na leitura do consumo, diminuição do erro de leitura, aplicação de modelos de faturamento diferenciado e a diminuição dos indicadores do tempo de atendimento em caso de falhas na rede, devido ao monitoramento dos sinais que podem indicar falhas ao sistema de controle de distribuição antes mesmo que sejam percebidas pelo consumidor.



Source: LG CNS

© 2016 The Pew Charitable Trusts

Figura 2.2. Esquemático de fluxo de energia e fluxo informações na Smart Grid. Modificado de [15]

O grande volume de dados gerados deve ser armazenado por certo período de tempo, tanto para fins previstos na legislação, quanto para estudos de desempenho com análises de sinais, para que então as empresas responsáveis possam prever tendências futuras de consumo e detecção de falhas. Em suma: o sistema elétrico traz desafios de projeto que devem satisfazer os requisitos de demanda de eletricidade, mas também de gerenciamento dos processos realizados desde a usina geradora até o fornecimento de energia ao consumidor; manter o sistema modernizado se reflete na confiabilidade da energia elétrica de um país e do desempenho global da economia. [16]

As *Smart Grid* trazem uma modernização das redes elétricas. Estas redes são uma abordagem para solucionar problemas na distribuição de energia no modelo até então adotado, problemas relacionados à perdas significativas, custos elevados de operações e falhas relacionadas a geração, principalmente quando é feita de forma mais distribuída - devido a necessidade do sincronismo de um número cada vez maior de unidades geradoras e cargas distintas - visto que o modelo até então adotado apresenta falhas acerca

desses quesitos que na prática impedem a adoção em larga escala do livre mercado de geração, pois o sistema elétrico tradicional baseia-se em uma estrutura verticalizada com a geração apoiada na operação de grandes unidades de potência responsáveis por um determinado número de cargas, em que há pouca ou nenhuma associação dessas unidades com outras no atendimento a demanda das cargas, resultando em baixa flexibilidade do sistema e vulnerabilidades em pontos centrais da infraestrutura, os quais não podem ser contornados em caso de falha.[17]

As figuras [14] e [15] apresentam esquemas de funcionamento de uma rede elétrica inteligente. A partir delas, é possível visualizar o funcionamento do fluxo de energia, e a comunicação entre o sistema elétrico.

A implantação das redes inteligentes está diretamente relacionada a interconexão do sistema elétrico, pois, entre outras funcionalidades, os dados oscilográficos obtidos pela *Smart Grid* podem ser utilizados para facilitar as operações de sincronismo fasorial necessárias para interligar as diversas partes do sistema. [17]

Ao adicionar um nível de comunicação ao sistema, busca-se um modo eficiente de transmissão dos dados de controle, usados para análises ou até mesmo para a cobrança de tarifas dos clientes e operação das cargas. No entanto, quando se tem dados de transmissão constante é indispensável notar a representação que a quantidade desses dados para o sistema: O volume de dados gerados é o produto da quantidade de eventos observados dentro de uma janela de tempo multiplicado pelo tempo de observação, portanto é imprescindível uma solução para diminuição e/ou otimização da quantidade de informação transmitida; o que também se aplica ao armazenamento dos dados.

Assim, as técnicas de compressão em sinais e dados de sistemas elétricos de potência são aplicadas na redução ou eliminação das interdependências e das redundâncias entre amostras, de forma a diminuir a quantidade de informação necessária para transmitir ou armazenar.[18] [19]

2.3 SINAIS EM DOMÍNIO CONTÍNUO E DISCRETO

Sinais são a tradução da evolução de uma grandeza ao longo do tempo. Quando um sinal é definido para todo instante de tempo é chamado de sinal de tempo contínuo. Sinais definidos apenas em determinados instantes de tempo são chamados de sinais de tempo discreto. [20]

O sinal senoidal representado na figura 2.3a é um sinal de tempo contínuo, e o sinal

da 2.3 é um sinal de tempo discreto. Enquanto o sinal em tempo contínuo tem valores para todo o intervalo de tempo, o sinal discreto está amostrado e assim possui valores para determinados instantes de tempo. Isso, por que na maioria dos casos um sinal no tempo discreto é a amostragem de um sinal de tempo contínuo.[21]

O processo de conversão de um sinal ou forma de onda analógico é baseado na amostragem do sinal original. Neste processo, o sinal passa a ser representado por um conjunto discreto de números, que são iguais aos valores do sinal em instantes bem determinados - os instantes de amostragem. Então, a onda que era definida em um tempo contínuo passa a ser representada por um tempo discreto. [22]

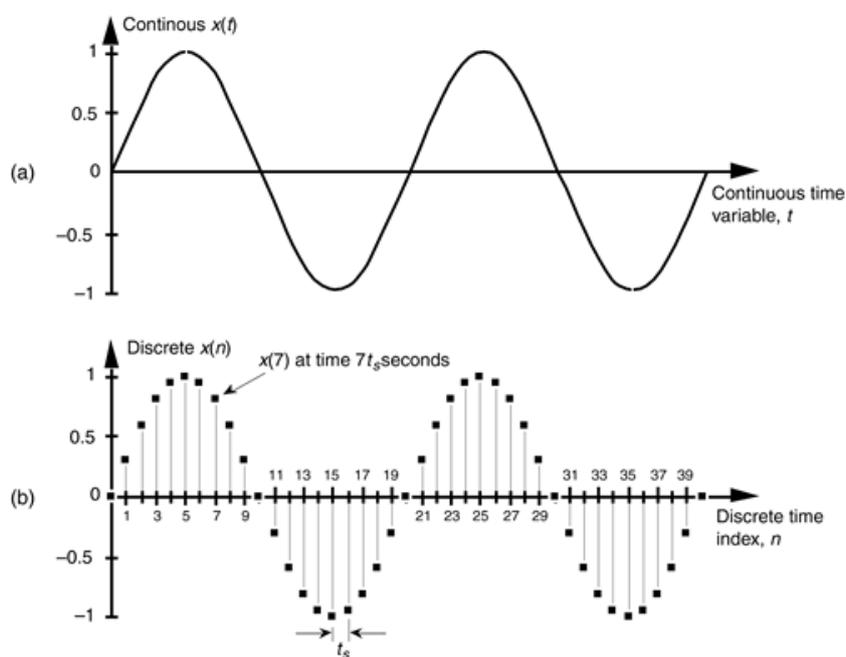


Figura 2.3. Exemplo de um sinal contínuo e um sinal discreto: Para a primeira figura (a) o sinal está em tempo contínuo, assim há um valor entre 1 e -1 no eixo das ordenadas para todas as abcissas (que está correspondendo domínio do tempo no eixo das ordenadas). Para a segunda figura (b) o sinal está em tempo discreto, e os valores de amostragem respeitando o período do sinal amostrado. Modificado de [21]

Esses instantes de amostragem devem ser espaçados convenientemente e são denominados T_s , a frequência de amostragem é o inverso de T_s , sendo $f_s = 1/T_s$ (amostras por segundo). O teorema da amostragem diz que para que seja possível reconstruir sinal original a f_s deve ser no mínimo igual ao dobro da frequência máxima contida no sinal analógico.

Após o processo de conversão analógico-digital é possível realizar assim o processamento computacional. [20] A discussão sobre a digitalização do sinal deste trabalho não será descrita, pois o mesmo foi adquirido no formato digital.

2.4 TRANSFORMADAS LINEARES DE SINAIS EM TEMPO DISCRETO

Uma transformação linear é um tipo especial de função que associa um vetor a outro vetor. Um sinal discreto $x[n]$, da forma $x : \{0, 1, 2, \dots, N - 1\} \rightarrow \mathbb{R}$; para certas aplicações tem maior eficiência quando se processa esse sinal na forma linear como apresentado na equação 2.1. Sendo k um índice inteiro finito, $\hat{X}[k]$ coeficientes transformados e b_k funções que formam um conjunto denominado conjunto de expansão. Este conjunto de expansão é chamado de base quando as funções b_k são independentes, ou seja, ortogonais, e permite a expansão a partir da decomposição linear apresentada na equação 2.1 para todo o sinal $x[n]$ descrito anteriormente. [20] [23] Representar um sinal $x[n]$ por meio de uma base significa que os elementos da base combinados linearmente formam o sinal.

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{X}[k] b_k[n] \quad (2.1)$$

2.4.1 Transformada de Fourier

Uma das transformadas mais conhecidas é Transformada de Fourier -TF, que é usada para representar um sinal como uma série de senos e cossenos, considerando todo o sinal para transformação. Essa representação é apropriada para sinais estacionários, que são sinais que apresentam as mesmas componentes de frequência durante toda a sua duração. Isso quer dizer que a transformada decompõe o sinal em frequências estacionárias - janelando os sinais em pontos estacionários. Para viabilizar o cálculo dessa representação, utiliza-se uma aproximação para representar os valores de uma função contínua no tempo, em instantes discreto. [20]

No entanto, para análises de sinal não estacionários, faz-se necessário a utilização de uma ferramenta que trabalhe com a mudança de frequência no tempo. Como alternativa a Transformada Discreta de Fourier - TDF tem-se a STFT, *Short-Time Fourier Transform* - que é derivada da Transformada de Fourier para sinais não estacionários. A STFT é a TF aplicada em janelas, no entanto ainda sim não apresenta uma boa representação tempo-frequência. [24] Isso é por que componentes temporal de baixa e alta frequência possuem a mesma precisão (janelas de tamanho igual). Como apresentado em [20], é intuitivo observar que para componentes de alta frequência é desejável uma alta precisão no tempo (janelas de curta duração), e para componentes de baixa frequência janelas de longa duração.

Os sinais estudados nesse trabalho apresentavam ruídos, além de uma janela de longa duração. Assim, o estudo realizado foi direcionado para ferramentas que se utiliza em

casos em que há mudança de frequência no tempo. Uma transformação importante para esse tipo de sinal é a Transformada de Wavelets - TW.

2.4.2 Transformada de Wavelet

Como citado anteriormente, para o caso da Transformada de Fourier, o cálculo dos componentes de frequência formam o sinal para todos os instantes de tempo, assim essa transformada não leva em consideração os instantes que as componentes de frequência se encontram. O que para sinais não estacionários não se faz aplicável. Os sinais estudados aqui são variáveis no tempo, e para uma descrição concreta das componentes de frequência, justifica-se utilizar uma representação em tempo-frequência. Uma forma de visualizar um sinal em que a Transformada de Wavelets se torna a ferramenta aplicável para a transformação está apresentado na figura 2.4. [25]

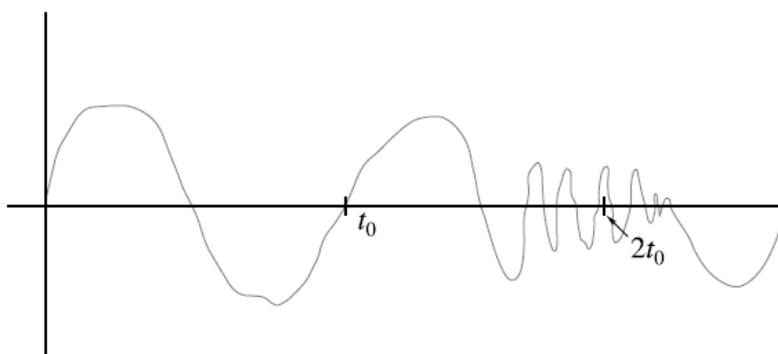


Figura 2.4. Exemplo de um sinal não estacionário. Modificado de [26]

Tendo em vista essa justificativa, a Transformada de Wavelet - TW - é uma alternativa para sinais onde se precisa analisar frequências não estacionárias, pois é uma transformada em janelas de tamanho variado. Em janelas maiores, têm-se as altas frequências, e para janelas menores as baixas frequências. A TW permite simultaneamente obter informações de maneira mais flexível que a STFT, já que utiliza janela de largura variável. Assim, ao decompor em tempo-frequência o sinal consegue-se informações de curta duração, alta frequência e também informações de longa duração, baixa frequência (ambas simultaneamente). [24]

Para a análise de um sinal pode-se utilizar da Análise Multi-Resolução - MRA, e assim analisar diferentes frequências utilizando diferentes resoluções. De forma sucinta a partir da MRA, pode se ter boa resolução no tempo e baixa resolução em frequência (para altas frequências), e ter baixa resolução no tempo e boa resolução em frequência (para baixas frequências). A TW utiliza do princípio da análise multi-resolução. [27] [28]

A *Wavelet* mãe ψ é a função que analisa o sinal, servindo de protótipo para o cálculo das funções de base (chamados de janelas aqui). Para a realização da transformada utiliza-se das janelas, que são versões dilatadas, ou comprimidas e deslocadas da *wavelet* mãe. Inicialmente, realiza-se o produto da função wavelet de maior frequência (mais comprimida) pelo sinal, e integra para todo o intervalo de tempo, então o resultado encontrado é multiplicado por uma fator de normalização (assim o sinal transformado tem a mesma energia para cada escala). Depois disso, desloca-se a mesma *wavelet* à direita e realiza-se esses passos novamente. [25] Ao final, a *wavelet* foi dilatada por um valor pequeno e o processo de dilatação e deslocação da *wavelet* recomeça o processo. Ao completar todas as dilatações da *wavelet*, a TW então foi calculada a partir da relação 2.2.

As equações as quais representam a transformação para a a TW estão a seguir. Na equação 2.2, tem-se a representação da Transformada de Wavelets para tempo contínuo. Comparando com a equação 2.1, $x[n]$ seria o equivalente ao $x(t)$, e b_k seria como o $\psi * \left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ - com a transformação linear dilatada. Onde ψ é a função de transformação (wavelet mãe), e $\frac{1}{\sqrt{s}}$ é o fator de normalização. O parâmetro de translação é τ .

$$\Psi_x^\psi = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int x(t) \psi * \left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2.2)$$

Assim a TW é calculada fazendo dilatações da janela de análise (quando varia s), e deslocando o tempo (quando se varia τ), multiplicando pelo sinal e integrando sobre o intervalo de tempo desejado. [20] [24].

Como visto na equação 2.2, a transformada é calculada com uma soma infinita no intervalo de tempo, no entanto isso se torna impraticável o cálculo. Assim o cálculo é feito pela Transformada Discreta de Wavelet - TDW - a qual já é amplamente utilizada em processamento de imagens, por exemplo. [20].

O trabalho em questão utilizou-se das wavelets em domínio discreto, por isso a equivalência entre $x[n]$. Ainda assim é adaptado os parâmetros s e τ da equação 2.2. Para que as escalas variem por fatores de dois, e assim a taxa de amostragem fique dizimada para um fator de dois. Pois assim há um número finito de dilatação e translação para a TDW. A TDW pode ser calculada de maneira eficiente utilizando técnicas da teoria de banco de filtros.

2.4.2.1 Banco de Filtros Multi-taxa

Há técnicas de utilização de filtros que se utiliza de banco de filtros com diferentes frequências de corte para visualização das mudanças de escala, que fazem com que o cálculo da TDW seja eficiente. [20] A reconstrução perfeita de banco de filtros pode ser utilizada para o cálculo da TDW e para a dedução das bases contínuas de *wavelet* [29].

A TDW divide o sinal analisado em componentes de baixa escala e alta escala. O conteúdo de baixa frequência do sinal está presente nas aproximações, e o conteúdo de alta frequência estão presente nos detalhes. Uma característica da DWT é que ela tem uma concentração de energia esteja em poucos coeficientes, o que a torna uma boa escolha para compressão de sinais. [20]

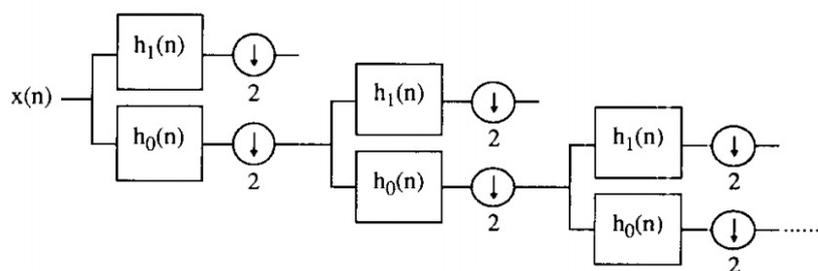


Figura 2.5. Transformada discreta de Wavelet em seqüência. O filtro passa-baixas e passa-altas são os respectivos $h_0(n)$ e $h_1(n)$. Tendo como $2 \downarrow$ a dizimação por dois. Modificado de [29]

Na figura 2.5 podemos observar um sistema discreto que computa a transformada discreta de wavelet. A utilização de filtros separa o sinal nas diferentes frequências que ele é composto, sendo que diferentes níveis de quantização podem ser aplicado as diferentes sub-bandas obtidas. A quantidade de coeficientes transformados na saída é igual a quantidade de amostras do início, ainda que o número de amostras seja dobrado quando o sinal passa pelos dois filtros. Ele é reduzido dizimadores ($2 \downarrow$), onde o número de amostras cai pela metade [30]. Para se reconstituir o sinal original, o processo inverso pode ser aplicado ao sinal transformado. [29].

2.5 COMPRESSÃO DE SINAIS E DADOS

É impossível falarmos das transformações atuais que o mundo está passando, sem falarmos da quantidade de dados armazenados, processados e transmitidos a todo instante em nossas vidas. Com os constante avanços tecnológicos, com a crescente produção de informação, o aumento de digitalização de dados se tornou uma realidade. O crescimento da internet, no desenvolvimento das comunicações, a relevância das comunicações por

vídeo, são os aspectos da revolução multimídia que se tornam possíveis com a compressão de dados. [26]

Para acompanhar esse aumento de dados digitais é imprescindível a atuação de sistemas de armazenamento e transmissão de dados eficientes. Isso se dá pelo fato que o espaço de armazenamento e a largura de banda para a transmissão de dados são limitados. A compressão de dados é utilizada para reduzir os bits para a representação de um sinal, seja ele uma imagem, vídeo, música, etc. A compressão de dados permite maior armazenamento de dados, além de otimizar e possibilitar transmissão de informação. Então, as técnicas de compressão de dados visam diminuir as redundâncias de um sinal. [31] [30]

Existem vários métodos de compressão de dados, os quais devem ser avaliados para uso dependendo da sua aplicação e necessidade. Para dados onde não se pode ter perdas, por exemplo, é necessária uma compressão por entropia (a qual é uma compressão sem perdas). Nesse caso por mais que o método retire as redundâncias, não se tem perda do sinal reconstruído, nesse tipo de compressão os dados recuperados são iguais aos dados originais.

No caso em que é preciso ou pode-se abrir mão de um sinal reconstruído sem perda, usa-se a compressão com perdas. Nesse caso, o sinal reconstruído não é idêntico ao sinal original. No entanto, ao comprimir esses dados é fundamental uma análise de perdas entre o sinal reconstituído com o sinal original, para que a compressão seja viável, além de que é preciso analisar uma faixa tolerável de perdas do sinal original. [31] [20]

O sinal reconstruído deve possuir um nível de fidelidade que não gere interpretações errôneas para o acompanhamento dos sinais de potência [30]. A compressão neste trabalho consistiu de forma sucinta eliminar informações que podem ser descartadas por não serem significativas para o entendimento dos dados do sinal analisado. Os sinais tratados neste trabalho são sinais de tensão e corrente com distúrbio, e para o caso em questão foi utilizada a técnica de compressão com perdas, os quais a comparação entre as perdas entre o sinal reconstruído e o sinal original serão melhores detalhados nos próximos capítulos.

2.5.1 Compressão por Transformadas

Dos diversos métodos de compressão existentes a compressão por transformadas é um deles. Esse método é utilizado pela característica que a maior parte das informações estão contidas em poucos símbolos (coeficientes transformados), o que faz com que o ganho de compressão seja vantajoso para esse tipo de dado - dados de maior comprimento (nesse caso, a amplitude do sinal) aparecem em menor quantidade de símbolos comparado aos

de comprimento menor. [20]

Para esse trabalho utilizou-se dessa técnica de compressão, onde se leva os dados para o domínio transformado, quantiza-os e aplica-se então um codificador. A reconstrução do sinal original se dá na forma inversa, utilizando o decodificador com o sistema inverso (que será melhor descrito na metodologia). Na maioria dos casos de compressão por transformada, os três passos utilizados são:

- Transformação:

A transformação é o passo que consiste em mapear a sequência de dados fonte em uma sequência transformada, na qual maior parte da energia será encontrada nos elementos de menor tamanho, tendo como consequência a possibilidade de remoção de elementos da transformada sem impacto significativo no sinal reconstruído. Coeficientes transformados com maior concentração de energia (que carregam mais informações) se apresentam mais concatenados e em menor quantidade, que coeficientes de menor concentração energética (que carregam menos informação). Após a transformação, pode-se dividir em blocos de tamanho fixo e variável, tendo os dados de forma dividida.

- Quantização:

Depois de transformado, o sinal é quantizado. De forma conceitual, o processo de representação de grandes valores (possivelmente valores infinitos), por um conjunto menor (limitado) é chamado de quantização. A quantização é o processo feito para que se delimitar os valores de um conjunto, quando se utiliza por exemplo de arredondamentos ou de aproximações. No entanto esse processo faz com que haja perdas do sinal comprimido comparados ao sinal original, e é por isso que a compressão é dita com perdas, pois o processo de quantização traz perdas nos arredondamentos e ao limitar o conjunto de valores de escrita do sinal. No entanto, pode-se a partir de uma quantização ajustar uma faixa de dados após uma transformada. [31]

- Codificação:

A codificação é o processo reescrever ou dar uma nova leitura ao que se codifica, tendo assim uma nova representação de um sinal ou algoritmo, por exemplo. Depois de levar o sinal para um novo domínio e quantizá-lo, a codificação tem melhores resultados. Então, após o tratamento prévio das informações, já se tem a informação que se quer codificar. Assim é necessário gerar um código para representar essa informação.

2.5.2 Codificação Aritmética

A codificação aritmética é especialmente útil ao lidar com fontes com alfabetos pequenos, como fontes binárias, e alfabetos com altas probabilidades distorcidas. É também uma abordagem muito útil quando, por várias razões, a modelagem e os aspectos de codificação da compactação sem perdas devem ser mantidos separados.[26]

A codificação aritmética se baseia na construção de tabelas por modelo estatístico, o qual são listadas as probabilidades do próximo símbolo [31]. O tamanho da palavra de código varia de acordo com o tamanho da sequência, de forma que sequências maiores possuem maiores palavras de código. A palavra de código é denominada de *tag*. Assim, para distinguir uma sequência de símbolos de outra sequência, é preciso marcá-la com um identificador único. Esse conjunto possível de *tags* para representar sequências de símbolos são os números no intervalo $[0, 1]$.

Como o número de números no intervalo de unidades é infinito, é possível então atribuir uma *tag* exclusiva a cada sequência distinta de símbolos. Para fazer isso, usa-se de uma função que mapeia sequências de símbolos no intervalo da unidade. Esse mapeamento é realizado em função da distribuição acumulada de variáveis aleatórias associadas a fonte. Para a decodificação é feito o processo inverso. [31] [26]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os passos realizados para a construção do algoritmo de compressão de sinais de tensão e corrente com distúrbio. Além da ferramenta utilizada, e os processos que resultaram no método de compressão escolhido.

3.1 BANCO DE SINAIS

Os sinais aqui trabalhados foram escolhidos de forma a representar de maneira efetiva eventos ocorridos em um sistema elétrico. As medições elétricas são realizadas continuamente, sendo elas de tensão ou corrente. Quando há qualquer distúrbio no sistema elétrico, esses eventos são armazenados. Esses devem ser armazenados para controle da companhia elétrica. Para as redes elétricas inteligentes, além de serem armazenados também há comunicação no sistema. Assim, os eventos de distúrbio que são armazenados também são transmitido para o sistema ou uma central, por exemplo. Com isso, trabalho foi baseado em um sinal real colhido de um sistema elétrico.

Os sinais originais estão representados nas figuras 3.1 e 3.2. Os números de amostras que estão apresentados em 3.1 e 3.2 estão apresentados de forma que seja possível visualizar de forma definitiva as amostras com efeito dos distúrbios (as amostras apresentadas estão limitadas pelo momento do ocorrência do distúrbio), no entanto as amostras do sinal de corrente é de 30720 amostras, e o de tensão é 15360 amostras. Os sinais de tensão e corrente foram obtidos do banco de dados do *DOE - Department of Energy/EPRI - National Database Repository of Power System Events* [32], são os dados dos eventos 21867 para a corrente e 21839 para a tensão.

Na base de dados do EPRI, estão organizados de acordo com as causas dos distúrbios e com os locais de medição. Cada um deles contém as formas de onda dos três sinais de tensão e de corrente além da corrente do neutro, sendo então sete sinais armazenados em cada arquivo de sinal, estes foram coletadas com uma taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo para uma frequência fundamental de 60 Hz (15360 amostras por segundo), e digitalizadas usando um comprimento da palavra de 16 bits por amostra.

Aqui utilizou-se de três sinais, de cada arquivo, sendo em um deles a tensão das três fases, e outro a corrente das três fases. Nos dois casos, os formatos de onda contêm vários ciclos do sinal que descrevem o regime permanente nos instantes anteriores e posteriores ao distúrbio.

A ferramenta utilizada para realização do algoritmo foi o software MATLAB versão 2017b.

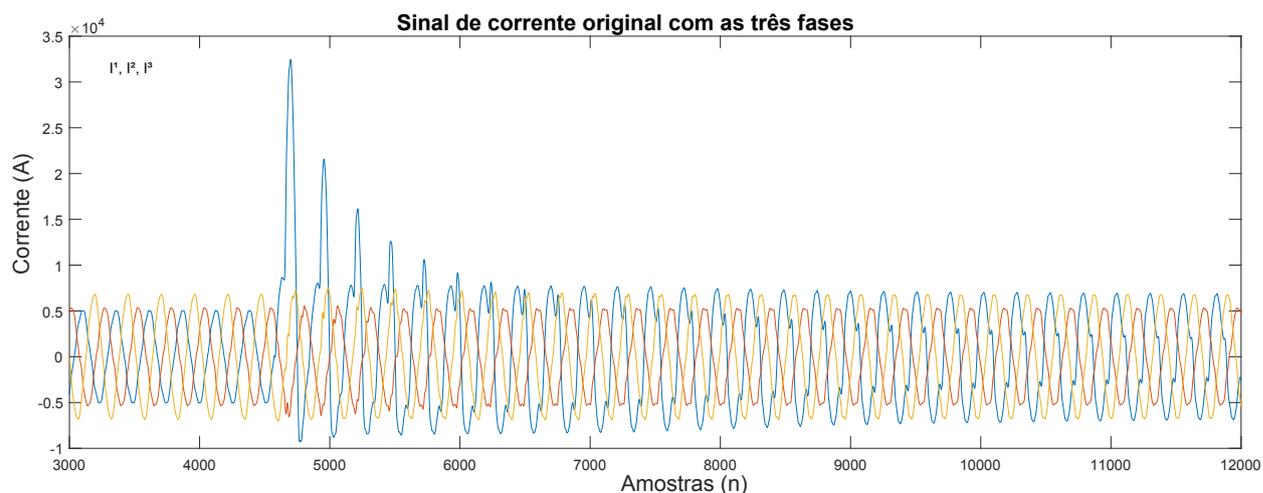


Figura 3.1. Sinal original de corrente, com as três fases I1,I2,I3. A amplitude está no eixo das ordenadas, e as amostras estão nos eixo das abscissas. As amostras estão apresentadas no intervalo onde o distúrbio é evidenciado.

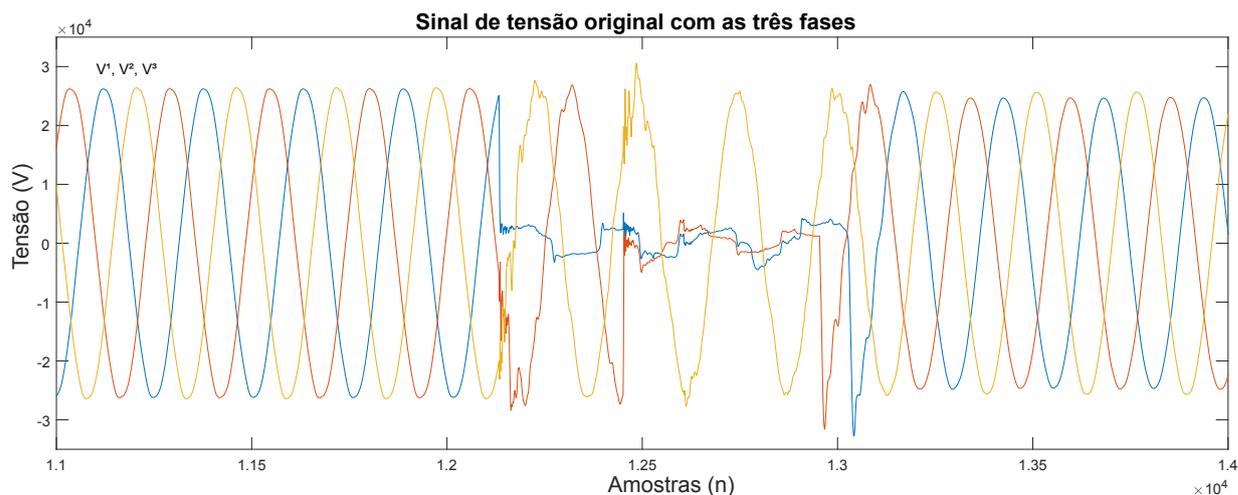


Figura 3.2. Sinal original da tensão, com as três fases V1,V2,V3. A amplitude está no eixo das ordenadas, e as amostras estão nos eixo das abscissas. As amostras estão apresentadas no intervalo onde o distúrbio é evidenciado. e o número de amostras em Y

3.2 MÉTRICAS

Foram utilizadas métricas para validação dos resultados, sendo essas selecionadas pelo o tipo de sinal trabalhado aqui: sinal de potência. O ganho de compressão (eq. 3.1) é um dos critérios utilizados. Ele se dá pela relação de bits utilizados na representação antes da compressão (O_s) e a quantidade que é utilizada após o sinal ser comprimido (C_s). Entretanto, o sinal que está sendo comprimido ainda precisa reter informações que podem ser essenciais, então as perdas de compressão também devem ser consideradas. As perdas são calculadas por meio do SNR (eq. 3.2), e da MSNE (eq. 3.3). Esses parâmetros permitem verificar se o método de compressão é vantajoso. [4]

$$GC = \frac{O_s}{C_s} \quad (3.1)$$

$$SNR = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2}{\sum_{k=0}^{N-1} (x[n] - \hat{x}[n])^2} \right] [dB] \quad (3.2)$$

$$MSNE = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{k=0}^{N-1} (x[n] - \hat{x}[n])^2}{\sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2} \right] [dB] \quad (3.3)$$

Outros parâmetros utilizados para caracterizar a compressão são o fator de compressão CF (eq. 3.4), que mostra a quantidade de bits necessários para representar o sinal original em relação a quantidade que o sinal original utiliza, e a taxa de bits TB (eq. 3.5), que representa para uma amostra única do sinal original a quantidade média de bits para representá-la. [4]

$$CF = \left[1 - \frac{C_s}{O_s} \right] \times 100\% \quad (3.4)$$

$$TB = \frac{C_s}{N} [bits/amostra] \quad (3.5)$$

3.3 ALGORITMO DE COMPRESSÃO DOS SINAIS DE POTÊNCIA

O sistema desenvolvido consiste na codificação e decodificação de um sinal de tensão e corrente com distúrbios. Os diagramas que descrevem os passos realizados no processo de codificação e decodificação estão ilustrados respectivamente nas figuras 3.3 e 3.4. Os diagramas apresentam o esquemático geral do procedimento realizado.

A compressão realizado foi baseada na compressão por transformadas. O sinal original foi segmentado em janelas fixas, aplicou-se a transformada TDW para cada janela. Em seguida coeficientes transformados obtidos pela transformada, os coeficientes foram quantizados baseados em sub-bandas. As sub-bandas foram baseadas em tamanhos fixos e variáveis, que será melhor descrito nas próximas seções.

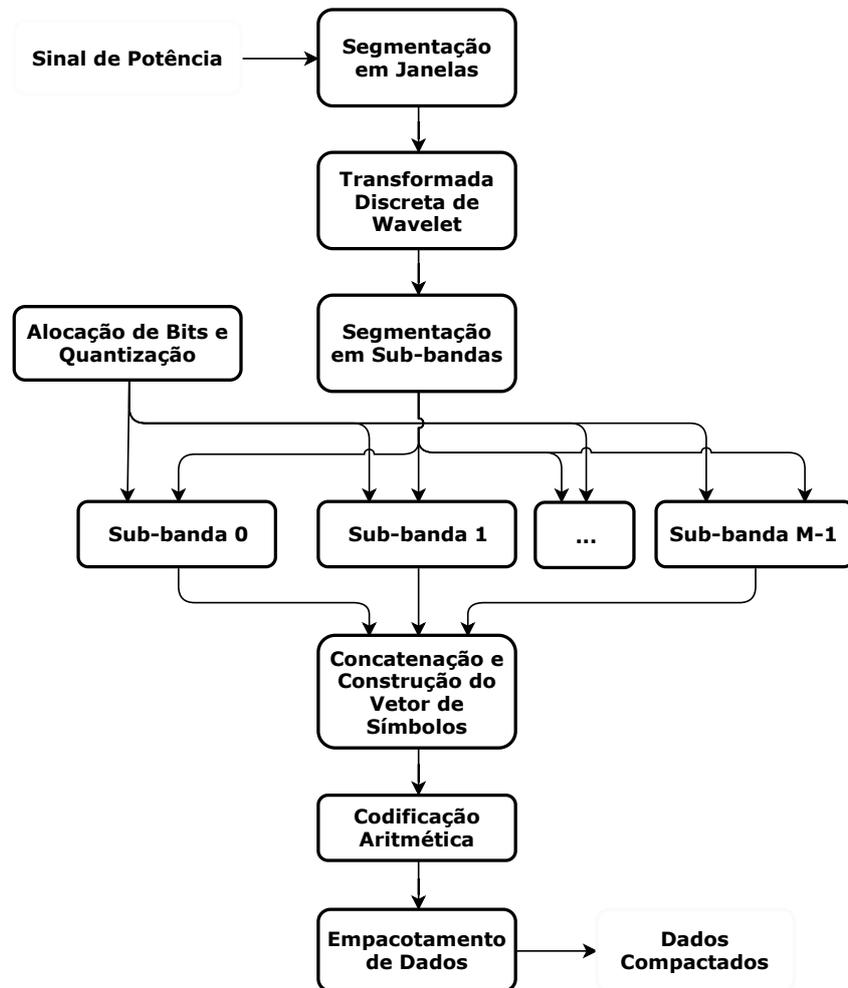


Figura 3.3. Diagrama de blocos do processo de compressão do sinal

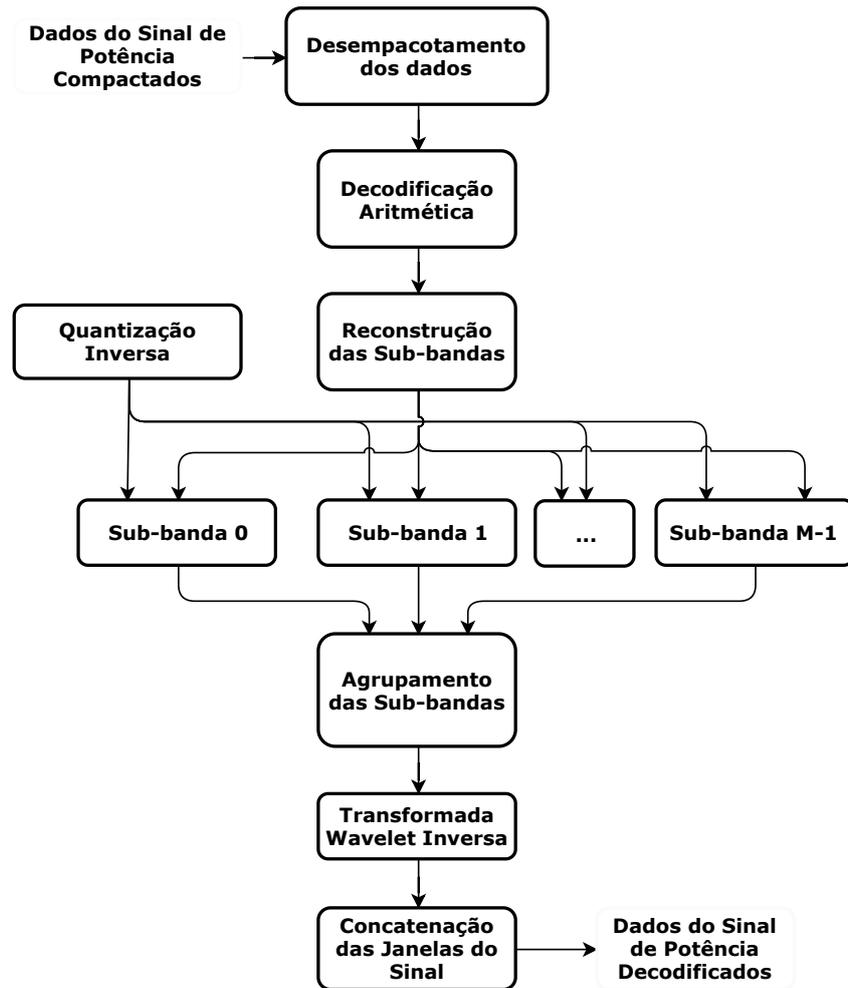


Figura 3.4. Diagrama de blocos do processo de descompressão do sinal

3.3.1 Segmentação das Janelas

Os sinais já foram obtidos digitalizados e amostrados. As janelas fixas foram escolhidas como apresentado em [4], além de mais dois tipos de segmentação menores. As escolhas foram feitas nos resultados desenvolvidos na referência.

Foram utilizadas janelas de 1024, 512 e 256 amostras, para então comparar a compressão janelas de tamanhos diferentes. Assim para cada fase de tensão e corrente dos sinais trabalhados foi segmentada em janelas com $N = 256$, $N = 512$, $N = 1024$ amostras.

3.3.2 Transformada de Wavelets

Após a segmentação, usou-se a Transformada Discreta de Wavelets - TDW, aplicada a cada janela para levar o sinal $x[n]$ ao domínio transformado. Para a decomposição do sinal em *wavelets*, usou-se o nível L máximo para cada número de amostras da janela seguitada. Por exemplo, para janelas de 256 amostras, o nível de decomposição da *wavelet* foi de 8 níveis ($L = \log_2 N$). A família de *wavelet* utilizada foi a *Daubechies 4* db4 do MATLAB, e a função utilizada para a transformações foi a *wavedec*. A escolha da família utilizada se deu pela melhor eficiência da db4 para o tipo de sinal aqui codificado, como apresentado nos resultados de teste de eficiência pela referência [4].

Os coeficientes da transformada estão apresentados nas figuras 3.5 e 3.6. Os coeficientes transformados são denominados como $X[k]$.

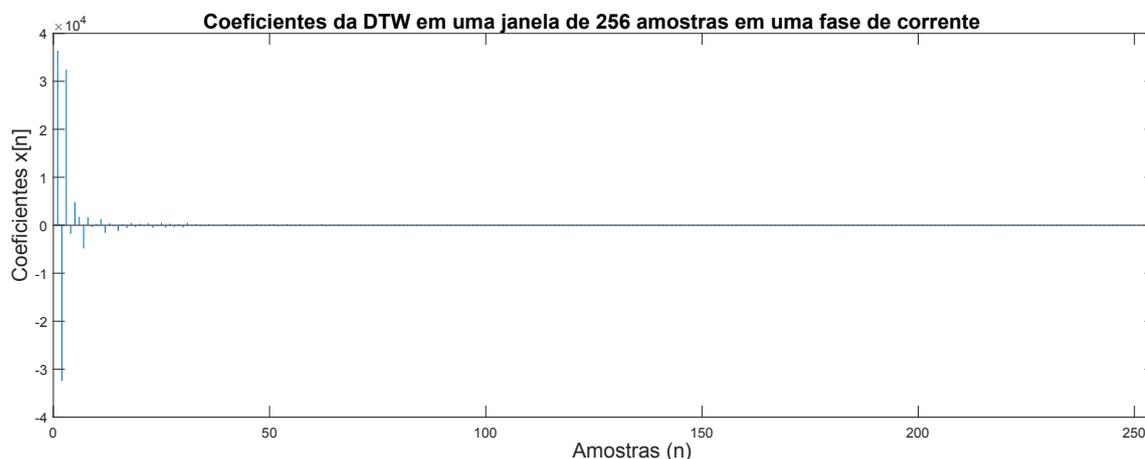


Figura 3.5. Coeficientes transformados do sinal de corrente da fase I1, para uma janela onde há distúrbio.

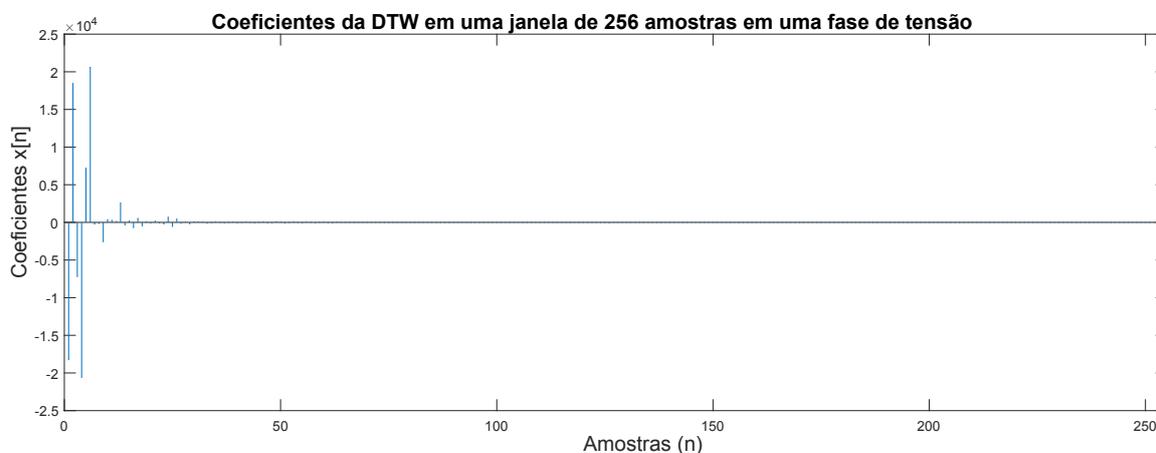


Figura 3.6. Coeficientes transformados do sinal de tensão da fase V1, para uma janela onde há distúrbio.

3.3.3 Ajuste de Faixa Dinâmica

Depois de efetuar os cálculos dos coeficientes transformados $X[k]$, foi realizado o ajuste de faixa dinâmica dos coeficientes. Com esse recurso é possível definir os limites nos quais serão representados nos coeficientes numericamente. Os novos coeficientes $X_s[k]$ são ajustados pelo fator λ , que é dado pela equação 3.6. Sendo K o índice das janelas do sinal, e λ o fator de ajuste para cada janela.

$$\lambda = \frac{1}{\max\{|X[k]|\}}, k = \{0, 1, \dots, N-1\} \quad (3.6)$$

O ajuste de faixa é então realizado como na equação 3.7, em que o coeficiente é multiplicado pelo fator λ . Dessa forma, o intervalo dos coeficientes normalizados estarão entre o intervalo $-1 \leq X_s[k] \leq 1$. A figura 3.7 apresenta um exemplo do ajuste da faixa dos coeficientes.

$$X_s[k] = \lfloor \lambda X[k] \rfloor, k = \{0, 1, \dots, N-1\} \quad (3.7)$$

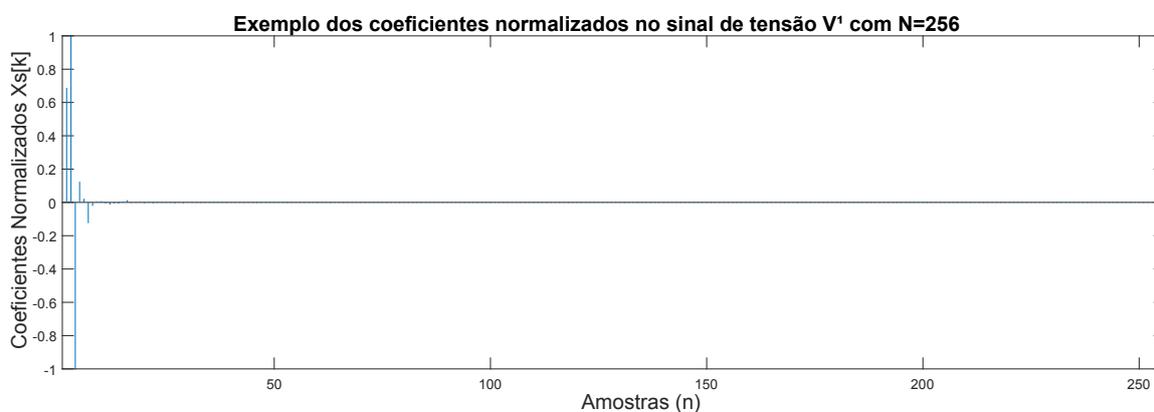


Figura 3.7. Representação do ajuste de faixa dos coeficientes, para uma janela de 256 amostras no sinal de tensão V^1

3.3.4 Divisão de Sub-bandas e Alocação de Bits

Depois do ajuste da faixa dinâmica, com o novo intervalo dos coeficientes normalizados, a divisão de sub-bandas e a alocação foram realizadas. Esses passos foram realizados para que a quantização dos coeficientes por alocação de bits fosse realizada posteriormente.

Foi realizado um O estudo inicialmente para verificar o desempenho de uma quan-

tização fixa, sem considerar o tamanho da palavra dos coeficientes. Com isso, a quantização era fixa para toda a janela (e conseqüentemente as sub-bandas). Os valores de variação nessa quantização estavam entre 1 a 16 bits, sendo estes os tamanhos destinados para a escrita dos coeficientes.

Com esse estudo parcial, os resultados obtidos demonstraram a significância entre a relação de distorção entre o sinal original pelo sinal comprimido quando o ganho de compressão era variado. Então a partir desse modulo de quantização fixa, baseou-se a quantização por alocação de bits.

Só então a partir desse comportamento percebido, a quantização efetiva realizada foi baseada o vetor de alocação de bits por sub-bandas, com valores de tamanho de palavra digital diferentes para cada sub-banda (que será descrito posteriormente). O gráfico 3.8 é resultado desses testes preliminares da escola da quantização escolhida.

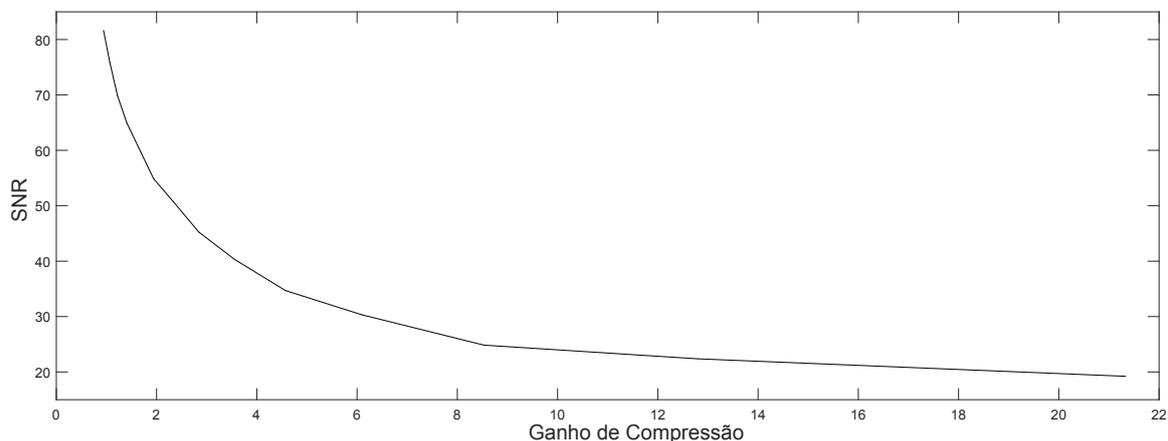


Figura 3.8. Relação taxa-distorção do sinal reconstruído do sinal original, variando o ganho de compressão para a janela de $N = 1024$. O gráfico diz respeito ao sinal de tensão e o cálculo de SNR (db) e Ganho de Compressão foi apresentado na seção de Métricas.

Nesse gráfico está a relação de distorção sinal ruído entre sinal original e o sinal comprimido. Constatou-se durante o trabalho que a quantização por um fator fixo apresentava menor desempenho do que a quantização por alocação de bits. Para o sinal trabalhado, foi visto que a relação entre o nível de qualidade desejada na representação dos dados e o gasto de bits requerido atingia um nível de qualidade quando a quantização era baseada no comprimento da palavra digital. A simulação realizada partiu que o vetor de alocação de bits - $B[r]$ - era fixo para toda a janela, e variava entre 1 a 16 bits.

A partir da quantização baseada no comprimento da palavra digital, as simulações conseguintes utilizou-se da quantização por alocação de bits. O vetor de alocação foi construído baseado em sub-bandas. As sub-bandas é a divisão das janelas em seguimentos

menores, e que a partir dessa segmentação o vetor $B[r]$ fosse construído.

A divisão em sub-bandas - M - foi realizada de duas formas: a primeira com valores fixos para $M = 8$; e a segunda foi realizada baseada nos níveis de decomposição da *wavelet*. Um exemplo do primeiro caso com a sub-banda fixa e $M = 8$ está na figura 3.9: tem-se janela $N = 256$ e há oito divisões fixas com cada sub-banda com 32 amostras.

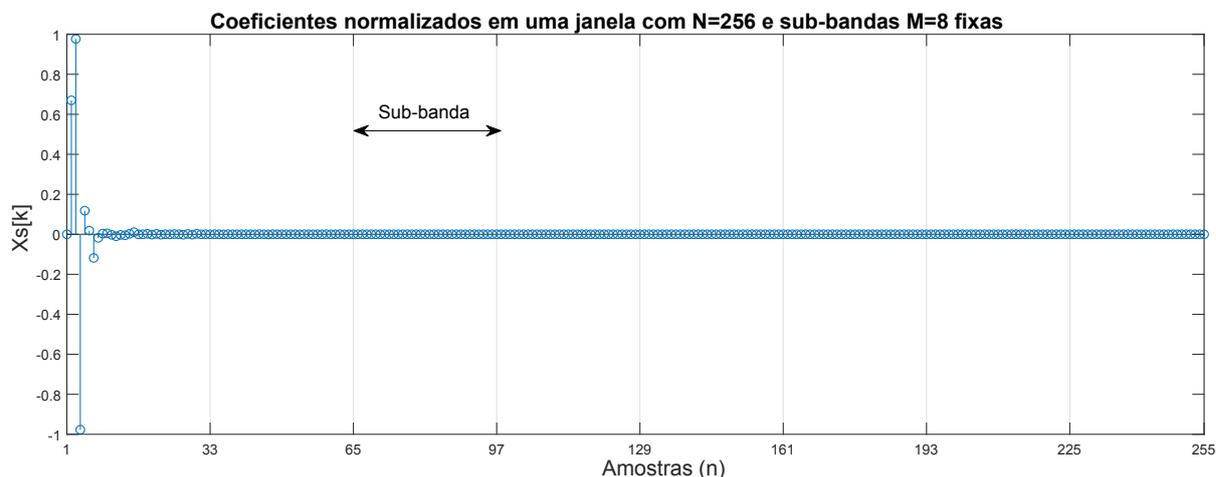


Figura 3.9. Exemplo de divisão de sub-bandas fixas $M = 8$ e $N = 256$

Já no caso das sub-bandas variáveis a segmentação é baseada na divisão da *wavelets*. De acordo com os níveis de decomposição, as sub-bandas tem tamanhos variados. A figura 3.10 mostra como ficaria uma sub-banda com $N = 256$, considerando que a decomposição realizada nesse trabalho é feita com a decomposição máxima dos níveis - como descrito em 3.3.2.

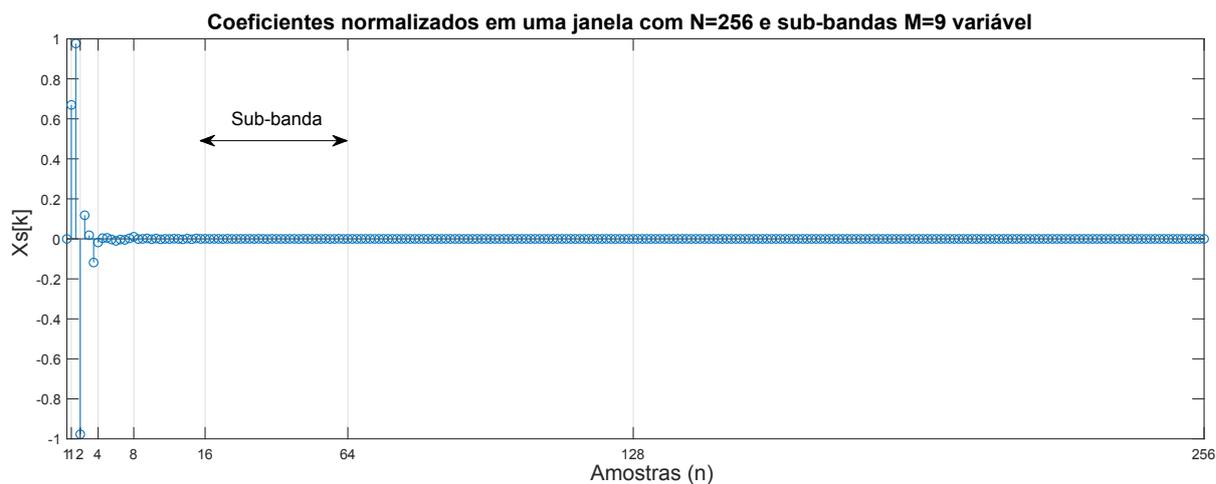


Figura 3.10. Exemplo de divisão de sub-bandas fixas $M = 9$ e $N = 256$, as sub-bandas tem amostras de tamanhos variados.

Há então $M = ((\log_2 N) + 1)$ sub-bandas. Para o caso em $N = 256$ há 9 sub-bandas, tendo a quantidade de amostras por sub-bandas descritas na figura 3.10. Para cada sub-

banda há uma quantidade diferente de amostras, a quantidade varia em potências de dois. O número de coeficientes transformados por sub-bandas é $S = 1$ para $p = 1$; e $2^{(p-2)}$ com $2 \leq p \leq N$ sendo p o índice da sub-banda que varia de 1 a N .

Após as divisões de sub-bandas, o vetor de alocação de bits $B[r]$ foi construído. Para as sub-bandas fixas ele foi construído de acordo com a equação 3.8 e para as sub-bandas variáveis foi construído pela equação 3.9. Na equação tem-se r que é o índice da sub-banda, e k determina os coeficientes transformados presentes em uma sub-banda r .

$$B_{fix}[r] = \lceil \log_2(\max \{|X[k]|\}_{k=\{\frac{N}{M}r, \frac{N}{M}r+1, \dots, \frac{N}{M}r+\frac{N}{M}-1\}}) \rceil \quad r = 0, 1, \dots, M-1 \quad (3.8)$$

$$B_{var}[r] = \lceil \log_2(\max \{|X[k]|\}_{k=\{2^0, 2^0, 2^1, r+2^2, \dots, r+2^{p-2}\}}) \rceil \quad (3.9)$$

e k é a divisão das sub-bandas e sendo r a quantidade de bits para cada sub-banda, e p o índice da sub-banda indo de 2 a N .

3.3.5 Quantização

Calculando o maior valor para a escrita dos coeficientes $X[k]$ tem-se o vetor $B[r]$, como já descrito em 3.3.4. A partir do vetor alocação de bits $B[r]$ o passo seguinte é a quantização dos coeficientes. Os coeficientes quantizados $X_q[k]$ são calculados de acordo com a operação 3.10. O cálculo se baseia na quantidade de bits que cada sub-banda necessita para a escrita da maior palavra contida na mesma.

Os coeficientes quantizados $X_q[k]$ são calculados a partir dos coeficientes normalizados $X_s[k]$. Leia-se que $B[r]$ é a substituição de $B_{fix}[r]$ e $B_{var}[r]$, dependendo da divisão de sub-banda requerida. A faixa de valores é $-2^{B[r]} \leq X_q[k] \leq 2^{B[r]}$.

$$X_q[k] = \lfloor |X_s[k] \times 2^{B[r]}| \rfloor \quad (3.10)$$

3.3.6 Codificador Aritmético

O codificador aritmético teve como propósito a redução as redundâncias no conjunto de coeficientes. Como descrito na referência [4], o codificador aritmético apresentou maior eficiência comparado ao codificador de Huffman, por causa dos tamanhos dos dicionários

gerados.

Assim após os coeficientes quantizados esses foram codificados por um codificador aritmético. Foram codificados os coeficientes baseado no algoritmo proposto em *The Data Compression Book* de Mark Nelson. O algoritmo foi uma adaptação da linguagem C para o *software* MATLAB.

3.3.7 Reconstrução do Sinal

Para a reconstrução do sinal, um processo inverso ao da compressão é feito, como no diagrama 3.4. O desempacotamento, a decodificação e a quantização inversa acontece paralelamente para que os coeficientes de cada bloco sejam acessados.

Ao receber os dados em código binário, utiliza-se o decodificador associado. Faz-se uso da sequência criada pelo codificador para se obter o vetor de coeficientes, para então utilizar-se o vetor criado para realizar transformada inversa. Com a transformada inversa dos coeficientes, as matrizes de dados concatenados formam a reconstrução do sinal comprimido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos pelo algoritmo de compressão construído. Os passos para a elaboração foram descritos no capítulo 3.

Nesse mesmo capítulo foi colocado no subitem 3.3.4 o gráfico da figura 3.8. Esse gráfico faz parte dos resultados parciais da quantização baseada na alocação de bits. O gráfico apresenta a variação do ganho de compressão, pela relação da distorção do sinal-ruído do sinal reconstruído pelo sinal original. Para diferentes tamanhos de janela o desempenho da técnica diminui conforme diminui a quantidade de amostras em cada janela. Esse estudo prévio partiu que a equação 3.10 fosse quantizado com valores predefinidos do vetor $B[r]$. Isso significa que todos os coeficientes obtidos foram escalonados por valores inteiros fixos, que variaram entre $2 \leq Q \leq 16$, sendo Q quantidade de bits destinado ao coeficiente.

As equações utilizadas para a formulação do gráfico 3.8 estão no apêndice A deste trabalho. Também estão apresentados no apêndice os testes dos estudos preliminares sobre a quantização utilizada, escolhas de janelas e a influência disso no ganho de compressão.

Consequente ao estudo de quantização com valores fixos de $B[r]$ para todos os coeficientes, fez-se um novo escalonamento para que a quantização fosse baseada no vetor de alocação de bits. O trabalho foi direcionado na compressão de dados por transformada e nesse tipo quantização. As figuras 4.1 e 4.2 ilustra como foi construído o vetor de alocação $B[r]$.

Como citado anteriormente, no caso das sub-bandas variáveis, a quantidade de sub-bandas varia com o número de níveis de decomposição da *wavelet*. O vetor de representação do número de amostras em cada divisão da *wavelet* é dado por L , e foi a partir dele que foi estabelecido as divisões vetor variável. Para cada Tamanho de N, um vetor de $B_{var}[r]$ com tamanho diferente. A função utilizada no trabalho foi a *wavedec* do MATLAB, que retorna coeficientes transformados e também o vetor L .

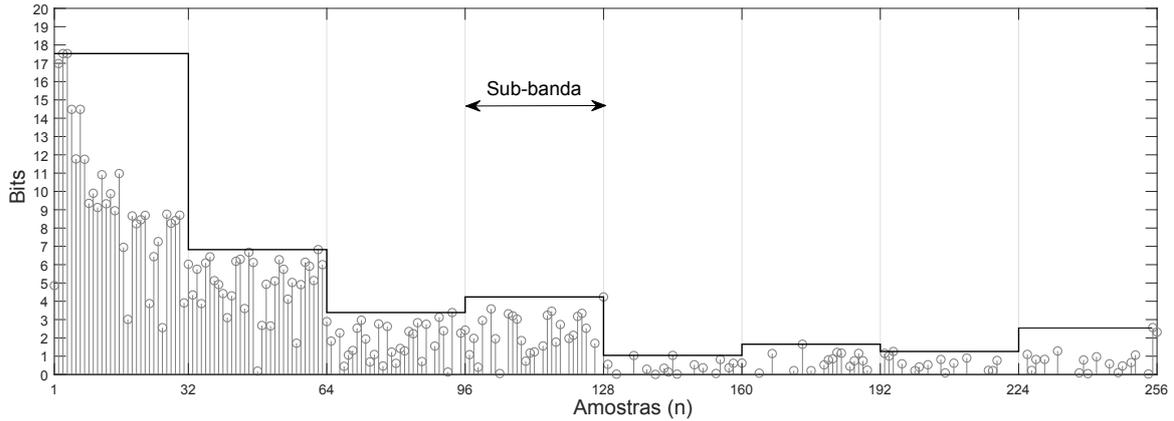


Figura 4.1. Nessa representação, as sub-bandas são de tamanho $\frac{N}{M} = 32$. O vetor formado por esse sequência é $B_{fix}[r] = [18 \ 7 \ 4 \ 5 \ 2 \ 2 \ 3]$.

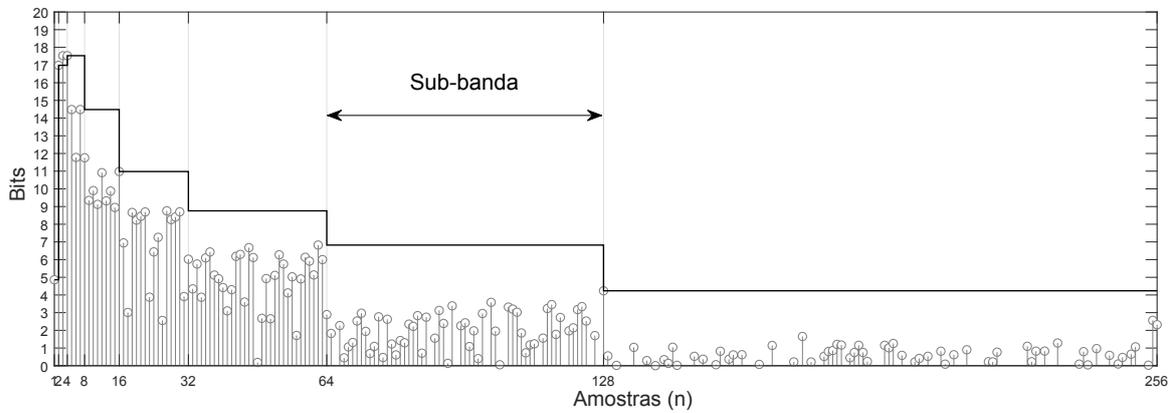


Figura 4.2. Nessa representação, as sub-bandas variam de acordo com a decomposição da *wavelet*. A quantidade de coeficientes por sub-banda com $N=256$ é dada pelo vetor $L=[1 \ 1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 16 \ 32 \ 64 \ 128]$. As sub-bandas não tem o mesmo número de coeficientes, mas a soma de todos os coeficientes da sub-banda deve ser igual a N . O vetor formado por esse sequência é $B_{var}[r] = [5 \ 17 \ 18 \ 15 \ 11 \ 9 \ 7 \ 5 \ 3]$.

As figuras 4.3 e 4.4 são os resultados após a compressão do sinal de tensão original. Para os casos em que as sub-bandas eram variáveis, o sinal original apresenta maiores diferenças comparado ao das sub-bandas fixas. Isso é perceptível já pelos gráficos. Também calculou o erro entre os sinais reconstruídos e o sinal original - o cálculo foi realizado fazendo a diferença entre eles.

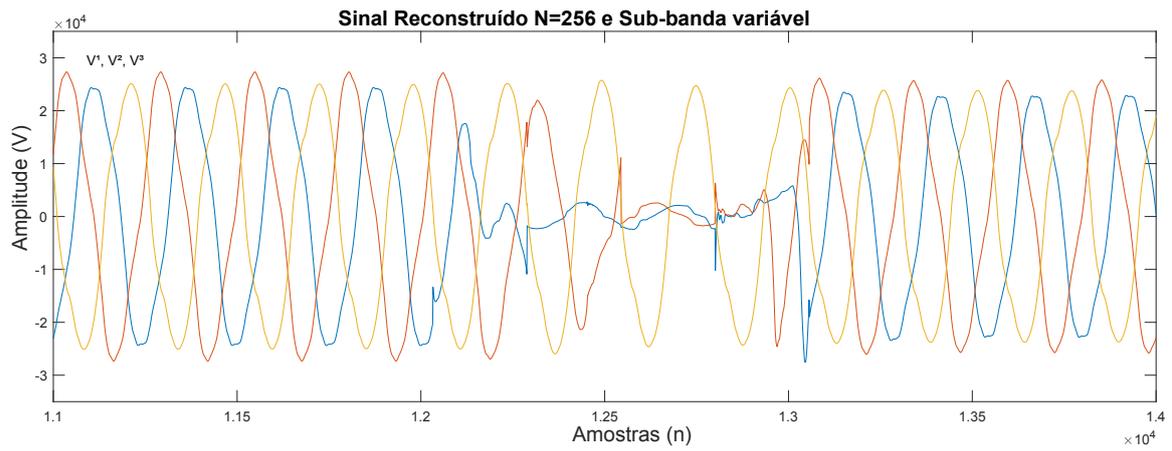


Figura 4.3. Sinal reconstruído de tensão com as três fases, com sub-banda variável e $N=256$.

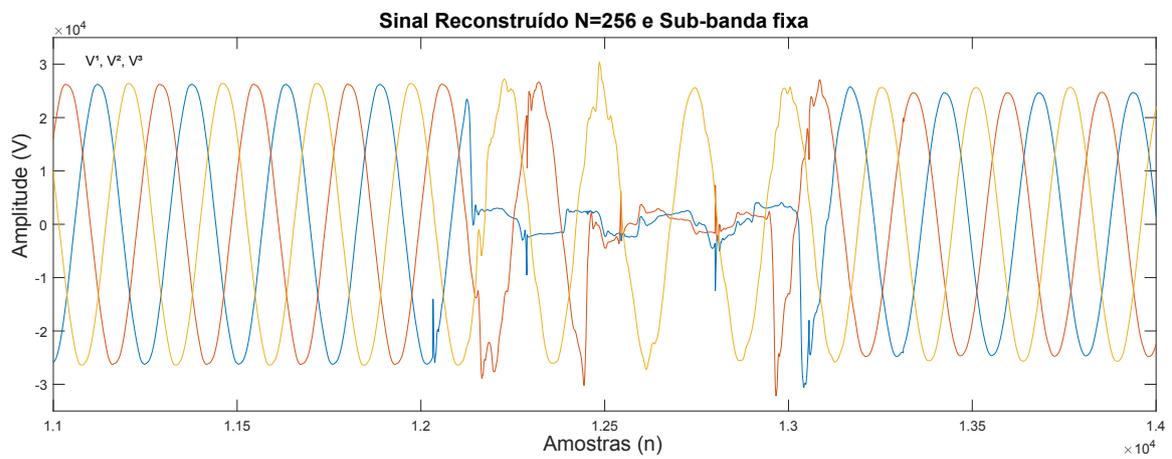


Figura 4.4. Sinal reconstruído de tensão com as três fases, com sub-banda fixa e $N=256$.

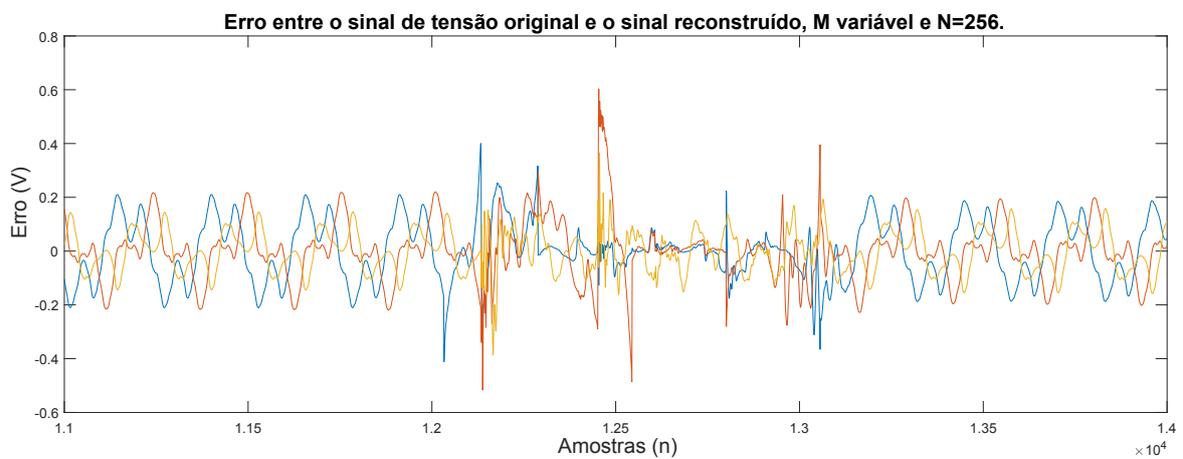


Figura 4.5. Diferença entre os sinais original e reconstruído, para o caso das sub-bandas variáveis

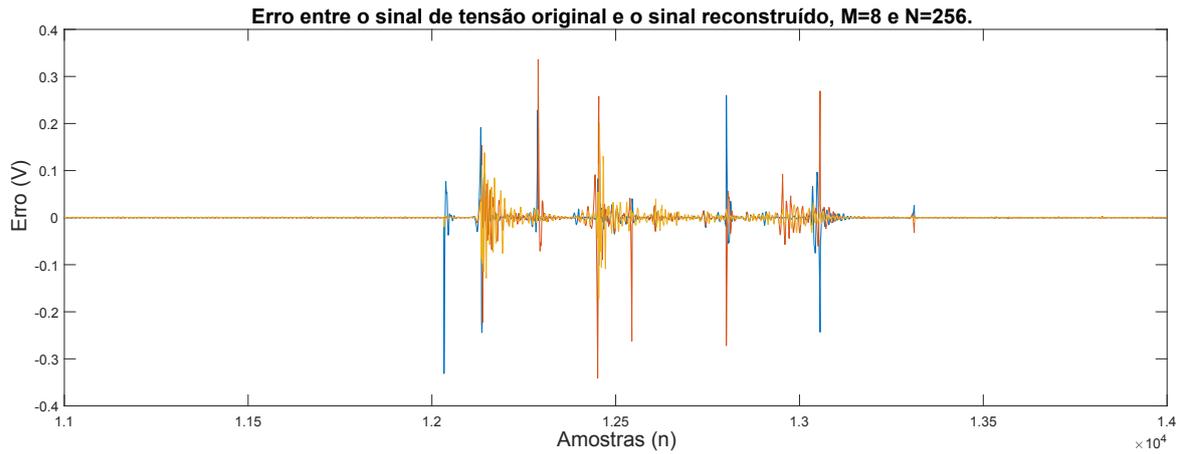


Figura 4.6. Diferença entre os sinais original e reconstruído, para o caso das sub-bandas fixas

Já para os sinais de corrente, os sinais reconstruídos são a 4.7 para o caso das sub-bandas variáveis e 4.8 para sub-bandas fixas. Os erros entre o sinal original e o sinal reconstruído estão respectivamente nas figuras 4.9 e 4.10.

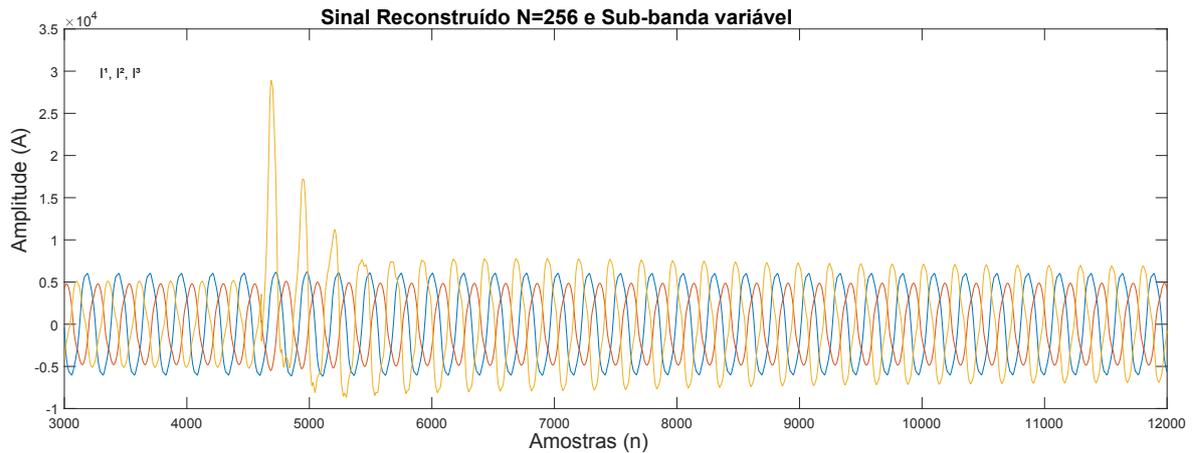


Figura 4.7. Sinal reconstruído de corrente com as três fases, com sub-banda variável e N=256.

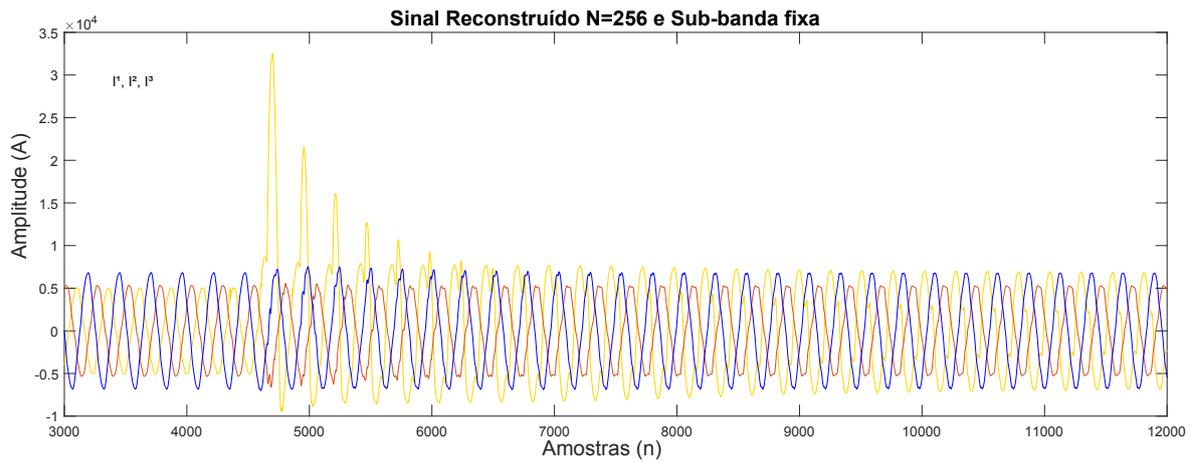


Figura 4.8. Sinal reconstruído de corrente com as três fases, com sub-banda fixa e $N=256$.

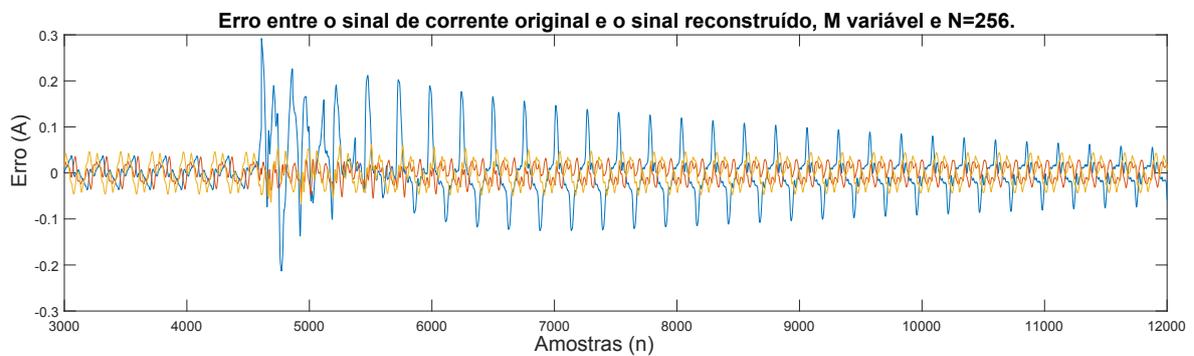


Figura 4.9. Diferença entre os sinais original e reconstruído, para o caso das sub-bandas variáveis

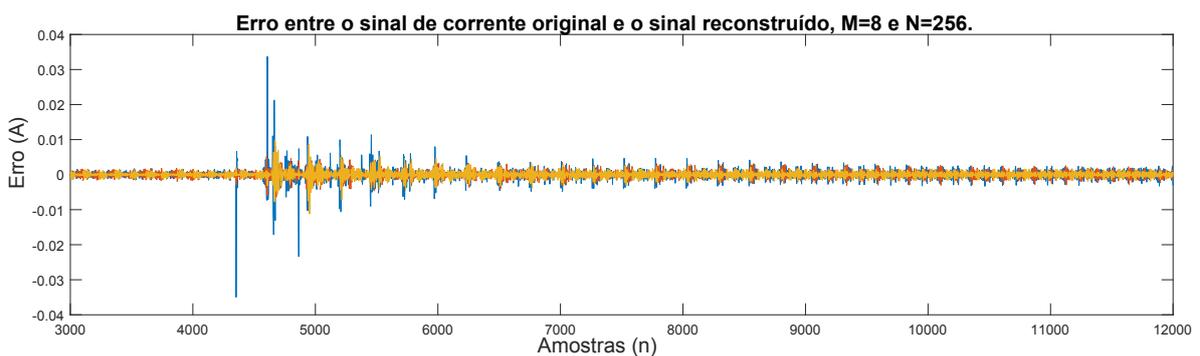


Figura 4.10. Diferença entre os sinais original e reconstruído, para o caso das sub-bandas fixas

Os procedimentos foram realizados para as janelas anteriormente citadas com $N=256$, $N=512$ e $N=1024$; para os casos da sub-banda fixa e variável, para os sinais de tensão e corrente. Aqui será apresentado os erros relativos a cada método. Os resultados obtidos

serão discutidos na próxima sessão. As tabelas a seguir mostram os resultados das análises de desempenho de cada técnica adotada, para as três fases. SNR é dado em (dB).

Tabela 4.1. Medição de Desempenho da Técnica para $N=256, M=8$

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	3,38	3,22	3,34	3,66	3,93	3,93
SNR	36,19	35,29	39,99	41,27	40,52	42,49
TB	5,32	5,57	5,37	4,90	4,58	4,57
MSNE	-36,19	-35,29	-39,99	-41,28	-40,52	-42,49
FC	70,41	69,01	70,11	72,74	74,53	74,61

Tabela 4.2. Medição de Desempenho da Técnica para $N=256$, e M variável

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	3,66	3,41	3,44	3,82	4,18	4,15
SNR	9,52	15,94	11,91	11,08	9,75	9,81
TB	4,91	5,27	5,22	4,71	4,30	4,33
MSNE	-9,52	-15,94	-11,91	-11,08	-9,76	-9,81
FC	72,69	70,72	70,96	73,83	76,10	75,93

Tabela 4.3. Medição de Desempenho da Técnica para $N=512, M=8$

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	13,18	2,99	3,09	3,53	3,81	3,83
SNR	36,46	35,53	39,93	41,13	40,59	42,42
TB	5,65	6,03	5,80	5,09	4,72	4,68
MSNE	-36,46	-35,53	-39,93	-41,13	-40,59	-42,42
FC	68,55	66,52	67,74	71,71	73,77	73,95

Tabela 4.4. Medição de Desempenho da Técnica para N=512, e M variável

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	3,34	3,01	2,96	4,04	4,04	4,08
SNR	9,40	14,90	11,90	11,07	9,76	9,81
TB	5,38	5,98	6,07	4,45	4,45	4,40
MSNE	-9,40	-14,90	-11,90	-11,07	-9,76	-9,81
FC	70,07	66,80	66,26	75,26	75,26	75,51

Tabela 4.5. Medição de Desempenho da Técnica para N=1024,M=8

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	2,94	2,79	2,83	3,44	3,70	3,74
SNR	36,26	37,76	39,95	41,89	40,64	42,53
TB	6,10	6,45	6,35	5,22	4,86	4,81
MSNE	-36,26	-37,76	-39,95	-41,89	-40,64	-42,53
FC	66,06	64,15	64,73	70,98	72,98	73,27

Tabela 4.6. Medição de Desempenho da Técnica para N=1024, e M variável

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	2,91	2,62	2,54	3,87	3,87	3,92
SNR	9,42	15,47	11,82	11,09	9,80	9,82
TB	6,17	6,84	7,07	4,65	4,65	4,58
MSNE	-9,42	-15,47	-11,82	-11,09	-9,80	-9,82
FC	65,69	61,96	60,67	74,16	74,16	74,52

4.1 DISCUSSÃO ACERCA DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos mostram que o tamanho da janela influencia na relação do sinal original, o sinal reconstruído, e também no no ganho de compressão. Assim, para janelas em que o N é menor, a relação taxa-distorção do sinal original com o sinal reconstruído tem melhor desempenho.

Os resultados da medição de desempenho (tabelas A.1, A.2 e A.3) mostram que a taxa de compressão diminui diretamente quanto mais se segmenta o sinal, mantendo o valor máximo para escrita da palavra. Se o sinal está mais decomposto em janelas, as quantidades de amostras nas janelas são menores, se tem mais janelas o ganho de compressão diminui. A relação de distorção do sinal original com o sinal reconstruído é pouco afetada com as variações de janela, o que não acontece com o GC.

Para o caso em que a quantização é realizada de maneira que o fator de escalonamento não parte do tipo de sinal desejado, e sim da quantidade de bits que se pode doar para a escrita do sinal, pode-se limitar o número de bits e avaliar até qual ganho de compressão é viável para que a informação não seja prejudicada.

As tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os métodos de desempenho para cada janela e sub-banda utilizada, para ambos sinais de potência. Na quantização baseada no tamanho dos coeficientes por sub-banda, as taxas de bits eram menores, no entanto o SNR no caso de sub-bandas fixas apresentaram melhores resultados do que as sub-bandas.

Assim, é notável a necessidade de avaliar quais critérios são de maior relevância para a aplicação. No entanto, mesmo nos casos em que o ganho de compressão e a taxa de bits apresenta maiores desempenho (M variável), a diferença entre o SNR faz reavaliar se a pequena diferença entre os ganhos de compressão compensam a diferença do SNR.

5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas no trabalho realizado. Serão também apresentadas propostas para possíveis trabalhos futuros sobre o tema.

As pesquisas realizadas a respeito das novas tecnologias no sistema elétrico convergiram para a importância do estudo de técnicas de compressão de sinais de potência. Tanto pela quantidade de dados armazenados pelo monitoramento do sistema integrado, quanto da transmissão dessas informações. A compressão de sinais é uma realidade para as demandas futuras de implementação efetiva das *smart grids*.

As técnicas estudadas aqui visaram a compressão por transformadas, e os estudos mostraram as diferentes aplicações para domínios diferentes. Ao estudar as transformadas para esse trabalho, a aplicação de *wavelets* apresentou ser a melhor escolha visto as análises multi-resoluções que essa transformada permite.

No trabalho foi possível perceber que as perdas do sinal reconstruído comparado ao sinal original é produto da quantização adotada no método. Isso, por que a codificação utilizada foi sem perdas. Assim, para a análise em questão conclui-se que as perdas pela compressão dos sinais de potência está diretamente relacionadas ao tamanho da palavra destinada ao sinal, durante a quantização do mesmo.

Isso se deu pois ao comparar a quantizações fixas - em que o escalonamento é realizado sem que a quantidade de bits destinadas são consideradas; com as quantização variável por sub-bandas, dos o ganho de compressão é maior, no entanto a relação SNR do sinal varia consideravelmente, como pode ser visto na figura 3.8.

De acordo com as tabelas de 4.1 a 4.6, para q quantização em sub-bandas fixas, em alguns casos, o TB é maior e em outros o TB é menor.

Em relação ao erro gerado, fica claro que para sub-bandas fixas em que a quantidade de amostras por sub-bandas é menor, o erro em relação ao sinal original é menor do que com sub-bandas variáveis em que a quantidade de amostras é maior por sub-banda. Assim, sub-bandas com grandes quantidades de amostras afetam o sinal reconstruído

além de consumir mais bits de palavra.

5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

As propostas para trabalhos futuros estão relacionadas ao melhoramento do método realizados nesse trabalho:

- Usar o domínio transformado de *wavelets* em duas dimensões;
- Aprofundar o método descrito com outros tipos de alocação de bits;

Referências Bibliográficas

- [1] National Institute of Standards e Technology. Roadmap for smart grid interoperability standards. 2012.
- [2] United States Federal Energy Regulatory Commission. Federal energy regulatory commission assessment of demand response e advanced metering. 2013.
- [3] Ministério de Minas e Energia. Relatório smart grid, 2010.
- [4] J.A.A. CORMANE. Compressão de dados para sinais de distúrbios no ambiente das redes elétricas inteligentes. *Tese de Doutorado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação, Departamento de Engenharia Elétrica e de Automação, Universidade de Brasília*, 2013.
- [5] F.A.C. Pires N. S. D. Brito. Aplicação da teoria wavelet na detecção e localização de distúrbios. *II Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 1997.
- [6] Joaquim Eloir Rocha. Qualidade da energia elétrica. *Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR, Curitiba*, 2016.
- [7] IEEE. Recommended practice for monitoring electric power quality. 1995.
- [8] ROIG V. F. SEGUNDO H. B. S. VEGA, T. Y. Evolution of signal processing techniques in power quality, 9th international conference on electrical power quality and utilisation - epqu2007. 2007.
- [9] GU I. Y. H BOLLEN, M. H. J. Signal processing of power quality disturbances. pages Wiley–Interscience, 2016.
- [10] Danton Diego Ferreira. Análise de distúrbios elétricos em sistemas de potência. *UFRJ*, 2010.
- [11] Jacqueline G. Moreto, Miguel; Rolim. Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. *Revista Controle & Automação Vol.21 no.4 - Universidade Federal de Santa Catarina*, 2010.

- [12] M. P. Tcheou. Análise e representação de sinais de oscilografia usando decomposições adaptativas redundantes. *Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro*, 2005.
- [13] SOUZA D. B.; SILVA S. D. Aplicação da medição inteligente para a redução de perdas técnicas e não técnicas na distribuição de energia elétrica, 2015.
- [14] Distributed vs. centralized generation: Battle of the ceos. Disponível em: <https://www.tdworld.com/grid-innovations/distribution/article/20964434/distributed-vs-centralized-generation-battle-of-the-ceos>. Acesso em Outubro de 2019.
- [15] What is the smart grid? Disponível em: https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/smart_grid.html. Acesso em Outubro de 2019.
- [16] Ege Sari, Umit Guz, e Hakan Gurkan. Data compression for smart grid infrastructure. 2018.
- [17] Yona Lopes, Natalia Fernandes, e Débora Muchaluat-Saade. Geração distribuída de energia: Desafios e perspectivas em redes de comunicação. page 325, 01 2015.
- [18] Dominik Unterweger, Andreas;Engel. Resumable load data compression in smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, (6), 2015.
- [19] A. C. F. Rodriguez. Compressão de dados de demanda elétrica em smart grid metering. pages 4–11, 2014.
- [20] M. A. Campitelli. Compressão de sinais ecg utilizando dwt com quantização não-linear e por sub-bandas. *Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília*, 2015.
- [21] Discrete sequences and their notation. Disponível em: https://flylib.com/books/en/2.729.1/discrete_sequences_and_their_notation.html. Acesso em Outubro de 2019.
- [22] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Teorema da amostragem. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~sam/Tele2/apontamentos/Amostragens.pdf>, 2016. Acesso em Outubro de 2019.
- [23] J. D. Gaskill. Linear systems, fourier transforms and optics. 1978.
- [24] Alfred Mertins. Signal analysis: Wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications, english (revised edition). 2001.

- [25] Stephane Mallat. A wavelet tour of signal processing: The sparse way. *Academic Press, ELSEVIER*, 2009.
- [26] Khalid Sayood. Introduction to data compression. *Fifth Edition, San Francisco, Morgan Kaufmann*, 6 de novembro de 2017.
- [27] Adhemar Bultheel. Wavelets with applications in signal and image processing. *Course material University of Leuven, Belgium*, 2006.
- [28] Jelena Vetterli, Martin & Kovačević. Wavelets and subband coding. *First published in 1995, Prentice-Hall*, 2007.
- [29] M. e Herley C. Vetterli. Wavelets and filter banks: Theory and design. *IEE Transactions on Signal Processing, Vol. 40 No 9*, 1992.
- [30] Marcel Henrique Trabuco. Compressão de sinais de s-emg em abordagens 1d e 2d. *Tese de Doutorado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação. Publicação PPGEA.TD – 122/17, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília*, 2017.
- [31] Khalid Sayood. Introduction to data compression. *San Francisco, Morgan Kaufmann*, 2000.
- [32] EPRI. Doe/epri national database repository of power systems events. acesso em: 30/05/2018. disponível em: [http : //pqmon.epri.com/disturbance_library/](http://pqmon.epri.com/disturbance_library/). *Electric Power Institute, Inc*, 2013.

A APÊNDICE - RESULTADOS PARCIAIS

Como já citado, nos estudos para que se chegasse a quantização por alocação de bits, foram avaliados alguns critérios em relação a testes iniciais realizados, com λ como um fator fixo para cada janela. Alguns critérios são utilizados para se ter uma base de comparação entre sistemas. Também utilizou-se desses parâmetros para avaliar os resultados para a quantização baseada em alocação de bits. As métricas utilizadas já foram citadas no capítulo 3.

Utilizando então desses parâmetros para a verificar o desempenho da técnica aqui utilizada, foi simulado os parâmetros de validação para os sinais de corrente e tensão, com janelas fixas de 1024 amostras (tabela A.1), 512 amostras (tabela A.2) e 256 amostras (tabela A.3). Manteve-se o parâmetro λ fixo em $\lambda = 2^Q$, com $Q = 8$.

Foram utilizadas simulações com janelas de 1024 amostras, (tabela A.1), com janelas de 512 (tabela A.2) e janelas de 256 (tabela A.3).

Tabela A.1. Medição de Desempenho da Técnica para $N=1024, M=8, Q=8$

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	11,29	11,55	11,76	12,34	12,14	12,62
SNR	45,93	46,16	46,50	48,04	51,30	57,03
TB	1,41	1,35	1,30	1,29	1,33	1,15
MSNE	-45,93	-46,16	-46,50	-48,04	-51,30	-57,03
FC	91,14	91,35	91,51	91,90	91,77	92,10

Tabela A.2. Medição de Desempenho da Técnica para $N=512, M=8, Q=8$

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	5,90	6,01	6,24	6,29	6,26	6,46
SNR	45,91	46,19	46,59	72,04	73,52	60,71
TB	2,70	2,60	2,34	2,54	2,56	2,30
MSNE	-45,91	-46,19	-46,59	-72,04	-73,52	-60,71
FC	83,07	83,38	84,04	84,11	84,04	84,57

Tabela A.3. Medição de Desempenho da Técnica para $N=256, M=8, Q=8$

Parâmetros	Tensão			Corrente		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
GC	3,13	3,17	3,29	3,28	3,23	3,32
SNR	49,00	49,29	49,73	45,95	46,59	43,43
TB	5,10	4,97	4,44	4,87	5,00	4,53
MSNE	-49,00	-49,29	-49,73	-45,95	-46,59	-43,43
FC	68,12	68,51	69,75	69,53	69,12	69,97