

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROQUE EDUARDO DAPPER

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
ALGORITMOS DE COMPRESSÃO APLICADOS À
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Porto Alegre

2013

ROQUE EDUARDO DAPPER

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
ALGORITMOS DE COMPRESSÃO APLICADOS À
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Computação - Processamento de Sinais

ORIENTADOR: Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin

Porto Alegre

2013

ROQUE EDUARDO DAPPER

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE
ALGORITMOS DE COMPRESSÃO APLICADOS À
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin, UFRGS

Doutor pela INPG – Grenoble, França

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilson Ignácio Wirth, UFRGS

Doutor pela Universitaet Dortmund - Unido, Alemanha.

Prof. Dr. Letícia Vieira Guimarães, UFRGS

Doutor pela Muroran Institute of Technology – Muroran, Japão.

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil.

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Júnior

Porto Alegre, Agosto de 2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial a minha querida esposa por todo o apoio e suporte nos momentos difíceis e por toda a compreensão pela minha ausência durante a elaboração deste trabalho. E agradeço a Deus pelo maior presente que poderia me dar, minha tão esperada filha Raquel!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

À meu orientador por toda a colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

À Embrasul Indústria Eletrônica pela oportunidade de desenvolver este projeto, bem como por toda a confiança em meu trabalho.

À Cristiano Thiele por toda colaboração no processo de implementação dos módulos de compressão em VHDL.

À Vinícius Souza e Rosângela de Mendes Ávila pela colaboração durante o processo de revisão desta dissertação.

E agradeço em especial à César David Paredes Crovato pela imensa colaboração e pelas inúmeras discussões durante o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Os equipamentos de análise de qualidade da energia elétrica, em sua grande parte, salvam a forma de onda amostrada somente no entorno do instante onde é detectado algum distúrbio, tipicamente um transiente. Essa limitação se deve em grande parte aos limites de armazenamento das memórias retentivas e ao alto custo que estas representam para um equipamento. No entanto uma nova geração de analisadores está se tornando cada vez mais comum, os analisadores de registro contínuo. Essa família de analisadores, além de salvar relatórios baseados no cálculo de parâmetros pré-estabelecidos também realiza o armazenamento contínuo da forma de onda amostrada. Essa abordagem permite que, conforme evoluam as ferramentas matemáticas para análise da qualidade da energia elétrica, novas análises sejam feitas sobre os dados coletados, tirando assim novas conclusões sobre um sistema elétrico. No entanto, para poder aplicar esta abordagem é necessário que o armazenamento dessas informações seja feito da forma mais eficiente possível, dado o grande volume de dados amostrados ao longo de todo um período de análise. Este trabalho visa o desenvolvimento de um algoritmo de compressão de registros de qualidade da energia elétrica, bem como sua implementação em hardware reconfigurável. Os algoritmos de compressão desenvolvidos estão baseados em um sistema de compressão composto por diferentes técnicas de compressão utilizadas em conjunto. Os métodos propostos fazem uso do algoritmo Deflate como algoritmo de compressão sem perdas. Para melhorar a capacidade de compressão do algoritmo Deflate, técnicas de transformação, aproximação polinomial e codificação de dados são aplicadas como meio para diminuir a entropia dos dados e assim aumentar a eficiência de compressão. Por fim, é apresentada a implementação dos algoritmos de compressão polinomial e Deflate, os quais foram implementados em linguagem VHDL e sintetizados para uso em FPGA.

Palavras-chave: Compressão. Deflate. Qualidade da Energia Elétrica. Hardware Reconfigurável.

ABSTRACT

Most of the power quality analyzers, just records the waveform of the sampled signals around the moment where a transient disturbance is detected. This limitation is due to the storage limits of the retentive memories and the high cost that it represents in a equipment. However a new generation of analyzers is becoming very common, the continuous logging power quality analyzers. This family of analyzers, as well as records reports based on the calculation of pre-defined parameters also performs the continuous storage of the sampled waveform. This approach allows new analysis on the collected data, thus allowing new conclusions about an electrical system. However, in order to apply this approach is required that the storage of such information is done as efficiently as possible, given the large amount of sampled data recorded in the entire period of analysis. This work aims to develop a compression algorithm to records of power quality as well as its implementation on reconfigurable hardware. The compression algorithms were developed based on a compression system composed of different compression techniques used together. The proposed algorithms make use of the Deflate algorithm as a lossless compression algorithm. The compression rate of the Deflate algorithm it is improved through the preprocessing of the data using techniques like polynomial transformation and data encode, as a way to reduce the date entropy. It is also presented in the work the implementation of the algorithms in VHDL language for use in FPGA devices.

Keywords: Compression. Deflate. Power Quality. Reconfigurable Hardware.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MONITORAÇÃO DE QEE	14
1.2	EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE QEE	15
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	19
1.4	VISÃO GERAL DO TRABALHO	21
2	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	22
2.1	NORMAS	23
2.1.1	NORMA IEC 61000	24
2.1.2	NORMA IEEE 1159	26
2.1.3	NORMA EN50160	27
2.1.4	PRODIST	27
2.2	ANALISADORES DE QEE	29
2.3	REGISTROS DE QEE	34
2.3.1	Variações	34
2.3.1.1	Variações de tensão e corrente	37
2.3.1.2	Flutuação de tensão	39
2.3.1.3	Desbalanço de tensão	40
2.3.1.4	Harmônicos de tensão e corrente	41
2.3.1.5	Variação de frequência	43
2.3.2	Eventos	44
2.3.2.1	Transitórios	45
2.3.2.2	Eventos de variação de tensão	47
2.3.3	Oscilografia do Sistema Elétrico	50
3	ALGORITMOS DE COMPRESSÃO	52
3.1	ALGORITMOS DE COMPRESSÃO SEM PERDAS	54
3.1.1	Algoritmo RLE	54
3.1.2	Algoritmos Estatísticos	55
3.1.3	Algoritmos baseados em dicionário	58
3.1.4	Algoritmo Deflate	60
3.2	ALGORITMOS DE COMPRESSÃO COM PERDAS	62
3.3	ALGORITMOS DE COMPRESSÃO APLICADOS À QEE	63
3.4	AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE COMPRESSÃO	66
4	DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS DE COMPRESSÃO APLICADOS À QEE	67
4.1	DESENVOLVIMENTO DOS MÓDULOS BÁSICOS DE COMPRESSÃO	67
4.1.1	Algoritmo de Compressão Polinomial	67
4.1.2	Algoritmo ILZ	74
4.1.3	Algoritmo Deflate	76
4.1.3.1	Codificação dos campos de dados	77
4.1.3.2	Codificação das tabelas Shannon-Fano	80
4.2	ALGORITMO DE COMPRESSÃO DE REGISTROS DE QEE	81
4.3	ALGORITMO DE COMPRESSÃO DE OSCILOGRAFIA	86
4.4	SIMULAÇÕES	91
5	IMPLEMENTAÇÃO EM HARDWARE RECONFIGURÁVEL	95

5.1 ARQUITETURA DO SISTEMA	95
5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MÓDULO COMPRESSOR POLINOMIAL	97
5.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DEFLATE	101
5.3.1 Implementação do codificador ILZ	101
5.3.2 Implementação do codificador Shannon-Fano	104
5.3.3 Implementação do Codificador Deflate.....	109
6 CONCLUSÃO.....	111
REFERÊNCIAS	114
ANEXO A: PRODUÇÃO CIENTÍFICA	119

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Analisador de QEE desenvolvido pela <i>General Electric</i> em 1920.....	16
Figura 2: Rede de analisadores de QEE.	17
Figura 3: Conexão de um analisador de QEE em um sistema elétrico de baixa tensão.....	30
Figura 4: Modelo de um sistema de aquisição de um analisador de QEE.....	31
Figura 5: Frequência característica de um filtro <i>anti-aliasing</i> de um analisador de QEE.....	32
Figura 6: Modelo de um sistema de aquisição sobreamostrado de um analisador de QEE	32
Figura 7: Modelo de um sistema de aquisição com sincronismo baseado na interpolação do sinal adquirido (GALLO, 2006).	33
Figura 8: Exemplo do efeito de flutuação de tensão causa pela operação de um forno a arco.	40
Figura 9: Espectro de frequências da corrente de um forno de indução.....	43
Figura 10: Corrente gerada por uma descarga atmosférica.	46
Figura 11: Transitório oscilatório causado pela energização de um banco de capacitores.	47
Figura 12: Classificação dos eventos de tensão.....	48
Figura 13: Afundamento de tensão: (a) tensão eficaz, (b) forma de onda da tensão.....	49
Figura 14: Passos do algoritmo Shannon-Fano	56
Figura 15: Exemplo de uma árvore Huffman	57
Figura 16: Construção de duas árvores Huffman a partir de um mesmo alfabeto	57
Figura 17: Ilustração da Janela Deslizante.	58
Figura 18: Código LZ.....	59
Figura 19: Modelo do módulo compressor polinomial.	68
Figura 20: Processo de aproximação polinomial.....	71
Figura 21: Estrutura de dados do módulo compressor polinomial.....	72
Figura 22: Código LZ gerado para uma correspondência no dicionário.....	74
Figura 23: Códigos ILZ.....	75
Figura 24: Formato geral de um código Deflate	77
Figura 25: Codificação Deflate do código ILZ 1	78
Figura 26: Codificação Deflate dos códigos ILZ tipo 2 e 3	80
Figura 27: Codificação dos códigos Shannon-Fano	80
Figura 28: Cabeçalho da codificação de um dicionário	81
Figura 29: Medição de tensão agregada a 200 ms.....	82
Figura 30: Arquitetura do algoritmo de compressão de parâmetros de QEE.....	83
Figura 31: Estrutura de dados do arquivo de compressão de parâmetros de QEE.....	85
Figura 32: Modelo do algoritmo de compressão de oscilografia	88
Figura 33: Sinal transitório que compõe o banco de dados da IEEE 1159.1.	93
Figura 34: Modelo de conexão do CODEC-PQ.....	96
Figura 35: Arquitetura do módulo de compressão polinomial.....	97
Figura 36: Módulo de codificação do compressor polinomial.....	100
Figura 37: Arquitetura de um codificador LZ de alta performance	102
Figura 38: Arquitetura do compressor ILZ.	103
Figura 39: Arquitetura do módulo codificador Shannon-Fano.	105

Figura 40: Arquitetura do módulo ordenador de entrada.	106
Figura 41: Arquitetura de geração das tabelas Shannon-Fano.	108
Figura 42: Arquitetura do módulo codificador Deflate.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Seções da norma IEC 61000.....	25
Tabela 2: Cabeçalho da estrutura de dados do módulo compressor polinomial	72
Tabela 3: Vetor de resíduos representado como uma matriz.....	73
Tabela 4: Codificação do campo de distância	79
Tabela 5: Cabeçalho do arquivo de compressão de parâmetros de QEE	86
Tabela 6: Cabeçalho do arquivo de compressão dos registros de oscilografia.	90
Tabela 7: Parâmetros do algoritmo utilizados nos ensaios.....	91
Tabela 8: Análise da taxa de compressão	92
Tabela 9: Comportamento da compressão de um conjunto de sinais formado a partir do banco de dados da IEEE 1159.1	94
Tabela 10: Comportamento da compressão de um conjunto de sinais formado por sinais estacionários.	94
Tabela 11: Constantes.....	98
Tabela 12: Recursos Utilizados na implementação do compressor polinomial	101
Tabela 13: Recursos utilizados na implementação do codificador ILZ.	104
Tabela 14: Recursos utilizados na implementação do codificador Shannon-Fano.	108
Tabela 15: Recursos utilizados na implementação do codificador Deflate.....	110

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
CODEC-PQ	Circuito Integrado de Compressão e Descompressão de Registros de QEE
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DHT	Distorção Harmônica Total
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FFTMR	<i>FFT Mixed Radix</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of electrical and Electronic Engineers</i>
ILZ	<i>Improved LZ</i>
MAC	<i>Multiply and Accumulate</i>
PE	<i>Processing Element</i>
PL	<i>Long term probability</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PPGEE	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
PPM	Partes Por Milhão
PST	<i>Short-term probability</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RLE	<i>Run-length encoding</i>
WDFT	<i>Warped DFT</i>

1 INTRODUÇÃO

O interesse por Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem aumentado significativamente nos últimos anos, tanto por parte dos consumidores, quanto por parte de concessionárias de energia elétrica. São muitos os motivos que levam ao interesse em QEE, mas um dos principais motivos está relacionado à mudança do padrão das cargas presente no sistema elétrico (LU, 2005; SANTOSO, 1996). Devido à evolução da área de eletrônica, cada vez mais dispositivos eletrônicos e processos automatizados estão presentes em residências e indústrias. Nesse processo de automação, cada vez mais se fazem presentes retificadores, inversores de frequências e dispositivos dotados de fontes chaveadas. A presença desses equipamentos provoca consequências significativas no sistema elétrico. Essas cargas têm um comportamento essencialmente não linear, o que acaba por contribuir para o aumento da presença de distorção harmônica, distorção inter-harmônica e distúrbios transitórios no sistema elétrico. No entanto ao mesmo tempo em que esses dispositivos perturbam o sistema elétrico, são muito suscetíveis a distúrbios elétricos (RIBEIRO, 2001; HUANG, 2009).

A busca por processos produtivos cada vez mais eficientes também tem influenciado muito no interesse pela QEE. Fábricas estão cada vez menos tolerantes a paradas de produção devido a falhas em equipamentos de automação, uma vez que os custos associados a essas falhas são cada vez maiores. No entanto não são somente os consumidores industriais os maiores interessados na QEE. Consumidores residenciais estão cada vez mais exigentes e buscam cada vez mais a disponibilidade contínua de energia elétrica (STONES, 2001; DUGAN, 1996).

Entretanto não são somente os consumidores que estão sujeitos a falhas devido a problemas de QEE, mas também concessionárias. Por exemplo, a distorção harmônica causada por cargas não lineares também pode causar o disparo de relés de proteção, aquecimento de linhas de distribuição e transmissão, bem como aumenta o risco de

ressonância devido ao crescente número de capacitores para correção do fator de potência presentes no sistema elétrico (CIVIDINO, 1992).

Apesar de cada vez mais presentes, a distorção harmônica e os distúrbios transitórios de tensão não são os únicos causadores de falhas no sistema elétrico. Entre os principais culpados pelas falhas em sistemas elétricos, indicados na literatura, estão os afundamentos de tensão e as interrupções de tensão de curta e longa duração. A geração distribuída de energia e o uso de energia renovável, como grandes parques eólicos, também têm ganhado significativa atenção devido aos problemas causados no sistema elétrico, como variações de tensão, flutuação de tensão (*flicker*) e distorção harmônica (DUGAN, 1996; STONES, 2001).

1.1 MONITORAÇÃO DE QEE

Conforme (DUGAN, 1996), o monitoramento da QEE está associado ao processo de coleta e transformação de um conjunto bruto de medições de tensão e corrente, amostradas durante um período contínuo, em informações pertinentes para interpretação e análise da QEE.

São diferentes os motivos que levam a um procedimento de análise da QEE, no entanto, antes de iniciar qualquer procedimento, os objetivos daquela análise devem ser claramente definidos, pois são os objetivos que irão definir o equipamento necessário, a quantidade de equipamentos, a disposição dos mesmos, bem como sua parametrização (DUGAN, 1996).

Na presença de equipamentos ou processos produtivos apresentando falhas, por muitas vezes, faz-se necessária a análise da QEE para identificar as possíveis causas. Nesse caso é necessário extrair o maior número possível de informações da medição de tensão e corrente: medidas de valores eficazes de tensão e corrente integralizados em diferentes períodos de integração, espectro de harmônicos, detecção medição de transitórios, desbalanço entre fases. O tempo necessário para caracterizar um problema de QEE varia muito em função da causa

daquele problema, podendo levar poucos minutos ou até dias, quando for necessária a caracterização completa de um processo para identificar a causa do problema (BROSHI, 2007; GALLO, 2006).

O monitoramento permanente para fins estatísticos de redes de distribuição e de transmissão é cada vez mais comum. Um número crescente de companhias de transmissão e distribuição está monitorando de forma permanente suas redes, como forma de prover informações de desempenho de fornecimento de energia para seus clientes (DUGAN, 1996).

Campanhas de medição são requisitadas por órgãos reguladores para avaliação do sistema elétrico, tipicamente com o intuito de avaliar a qualidade do serviço prestado, definir novos índices de QEE, bem como avaliar os distúrbios de QEE presentes no sistema elétrico. O tempo de duração dessas campanhas varia significativamente com a natureza do evento que se busca caracterizar, podendo durar desde uma semana até um ano, quando se busca caracterizar um grande sistema de transmissão ou distribuição ao longo de todas as estações do ano (BOLLEN, 2006; JUREWICZ, 1990).

1.2 EQUIPAMENTO DE ANÁLISE DE QEE

A medição da QEE é dada através da medição da tensão e da corrente do sistema elétrico. Segundo o ponto de vista de medição, não há diferença entre as medições de tensão e corrente feitas por dispositivos de controle ou proteção de um analisador de QEE. A diferença está na forma que são processadas e analisadas essas informações medidas. Os equipamentos de análise monitoram e armazenam as informações de QEE extraídas dessas medições, conforme configurações pré-estabelecidas (BOLLEN, 2006).

No princípio os analisadores de QEE tinham uma capacidade de processamento e análise muito limitada. Poucas informações eram salvas e as parametrizações eram poucas ou inexistentes. O primeiro analisador de QEE que se tem registro foi desenvolvido pela General

Eletric em 1920, conforme ilustra a Figura 1. Esse equipamento tinha a capacidade de armazenar a informação de descargas atmosféricas em uma bobina de papel, indicando nesta a data e horário em que o distúrbio ocorreu (DUGAN, 1996).



Figura 1: Analisador de QEE desenvolvido pela *General Eletric* em 1920. (DUGAN, 1996)

A capacidade de processamento dos analisadores de QEE evoluiu muito nas últimas décadas, juntamente com a evolução de todas as áreas ligadas à eletrônica, o que permitiu significativas melhorias nesses dispositivos.

Diferentemente daquele primeiro analisador desenvolvido pela *General Eletric* os analisadores atuais são capazes de monitorar e armazenar simultaneamente diferentes distúrbios de QEE. Ainda, os limiares de detecção, bem como as características próprias do processamento de determinados distúrbios podem ser parametrizadas.

Não foi somente a capacidade de processamento e configuração dos equipamentos que evoluiu, a forma de armazenamento e acesso aos dados também mudou. Analisadores atuais fazem uso de memórias *FLASH* ou cartões de memória de alta capacidade, permitindo assim

o registro de longos períodos de análise. O acesso às informações pode ser feito de forma local através de telas gráficas, as quais permitem a visualização de relatórios e formas de onda armazenados no próprio equipamento, ou ainda remotamente através de algum barramento de dados, evitando assim a necessidade de deslocamento de um técnico para coletar as informações do analisador em seu ponto de medição. A facilidade do uso de redes de comunicação permitiu a gestão de complexos sistemas de análise de QEE, por exemplo, grandes parques industriais ou grandes centros de distribuição (GALLO, 2006; HUA, 2009).

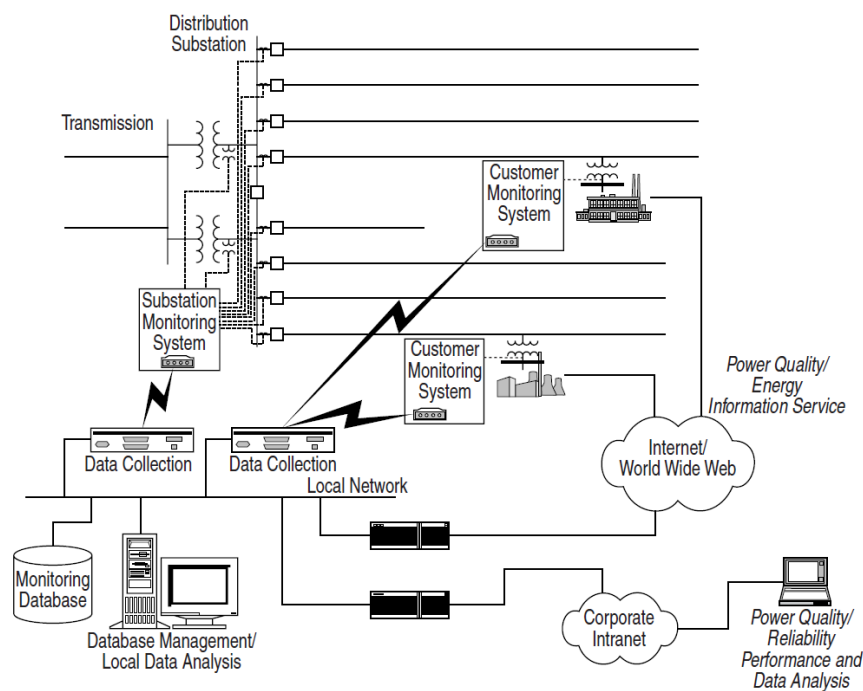


Figura 2: Rede de analisadores de QEE.
(DUGAN, 1996)

A Figura 2 ilustra uma rede de analisadores de QEE, onde equipamentos foram instalados em diferentes pontos de um pólo industrial. Esses equipamentos transmitem seus registros para concentradores de dados, os quais tornam os dados disponíveis para análise.

A parametrização é uma das etapas mais importantes em um procedimento de análise de QEE. Os relatórios gerados pelos equipamentos retratam a realidade do sistema elétrico para aquela parametrização, isto é, distúrbios são analisados e detectados conforme

parametrização especificada. Caso o equipamento tenha sido parametrizado de forma inapropriada, em relação aos parâmetros de monitoração, a análise gerada pelo equipamento pode levar a conclusões erradas quanto à severidade ou mesmo em relação ao número de ocorrências de um determinado distúrbio ou transiente (BROSHI, 2007).

Os parâmetros de QEE, como forma de reduzir o volume de dados armazenados, são agregados em períodos pré-estabelecidos e um valor representativo médio para aquele período é gerado. Os sinais amostrados, que geraram aquelas grandezas, são então descartados depois de realizadas as análises de QEE. Apesar da crescente capacidade de processamento e análise embarcada nos analisadores, esses ainda são limitados no que diz respeito ao armazenamento dos sinais de tensão e corrente amostrados. Os equipamentos, em sua grande parte, salvam a forma de onda amostrada somente no entorno do instante onde é detectado algum distúrbio, tipicamente um transiente. Essa limitação se deve em grande parte aos limites de armazenamento das memórias retentivas e ao elevado custo que estas representam para um equipamento. No entanto uma nova geração de analisadores está se tornando cada vez mais comum, os analisadores de registro contínuo. Essa família de analisadores, além de salvar relatórios baseado em parâmetros pré-estabelecidos, para rápido acesso à análise desejada, também realizam o armazenamento contínuo da forma de onda amostrada (BROSHI, 2007; DUGAN, 1996).

Essa classe de analisadores permite que novas análises sejam feitas sobre os dados amostrados, evitando desperdício de tempo e dinheiro, uma vez que todas as informações e eventos ocorridos no sistema elétrico estão registrados. Não há o risco de eventos não serem detectados devido a alguma parametrização incorreta.

Essa abordagem permite que, conforme evoluam as ferramentas matemáticas para análise de QEE, novas análises sejam feitas sobre os dados coletados, tirando novas conclusões sobre um sistema elétrico. No entanto, para poder aplicar esta abordagem é

necessário que o armazenamento dessas informações seja feito da forma mais eficiente possível, dado o grande volume de dados amostrados ao longo de todo um período de análise da QEE.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

Em um analisador de QEE moderno são salvos basicamente dois conjuntos de dados: registros de QEE, que irão compor um relatório e a amostragem dos canais de tensão e corrente (oscilografia). Os registros de QEE são formados por indicadores e índices de QEE definidos pelas normas, entre os quais podemos relacionar as tensões e correntes eficazes agregadas em diferentes tempos de integração, as informações de distorção harmônica e inter-harmônica, flutuação de tensão, desbalanço de tensão, entre outras variáveis definidas. As grandezas de QEE exibem um comportamento essencialmente não estacionário, enquanto a oscilografia do sistema de aquisição apresenta períodos estacionários, quando não há ocorrência de eventos transitórios. A oscilografia da medição é dada pelo salvamento dos pontos adquiridos pelo sistema de aquisição do equipamento a uma taxa suficientemente alta que permita realizar as análises futuras de QEE com as precisões requeridas pelas normas.

Memórias de armazenamento retentivo representam um percentual bastante significativo no custo final de um equipamento de análise, ou mesmo em um concentrador de dados, para tanto seu uso deve ser feito de forma eficiente. Uma vez que a eficiência no uso de uma memória está associada à quantidade de informação salva, uma forma de aumentar a eficiência de armazenamento está na compressão das informações registradas.

Este trabalho objetiva o desenvolvimento e implementação em hardware reconfigurável de dois algoritmos de compressão aplicados a QEE. Um primeiro algoritmo destinado à compressão de parâmetros de QEE e um segundo algoritmo responsável pela compressão da oscilografia de medição. A proposta deste trabalho parte da necessidade da

empresa Embrasul Indústria Eletrônica, empresa especializada no desenvolvimento de equipamento para análise de QEE, em desenvolver um analisador de QEE com a capacidade de registro contínuo da oscilografia de medição. No entanto, para um analisador de QEE comportar o registro contínuo da oscilografia de medição, faz-se necessária compressão dos registros de medição.

Um algoritmo de compressão para QEE deve ser rápido e de baixo custo computacional para que possa ser implementado em um sistema embarcado com capacidades de processamento limitadas em relação a computador convencional. Ainda, os dados compactados devem ser de rápida descompressão, de forma a permitir que sejam feitas análises de longos períodos de monitoramento de forma rápida, assim como deve permitir o acesso a períodos intermediários, para que não seja necessário descompactar todo um bloco de análise para se analisar apenas um pequeno período temporal.

Para comportar a compressão do grande volume de dados, respeitando as temporizações do sistema de amostragem, faz-se necessária a implementação dos algoritmos de compressão em hardware. No entanto, o custo de um hardware reconfigurável, tipicamente uma FPGA, que comporte a implementação de um algoritmo de compressão para QEE é bastante elevado, e significativo em relação ao custo de um equipamento de análise. A solução para este problema passa pelo desenvolvimento de um circuito integrado dedicado para esta tarefa.

Este trabalho é parte do desenvolvimento e implementação do circuito integrado de compressão de registros de QEE desenvolvido pela Embrasul. Este trabalho visa o desenvolvimento de um algoritmo de compressão de registros de QEE e oscilografia, bem como sua implementação em hardware reconfigurável. A implementação em hardware reconfigurável é parte da etapa de desenvolvimento do circuito integrado, servindo como etapa de validação funcional algoritmos de compressão.

Os algoritmos de compressão desenvolvidos estão baseados em um sistema misto de compressão, composto por diferentes técnicas de compressão utilizadas em conjunto. Os métodos propostos fazem uso do algoritmo Deflate como algoritmo de compressão sem perdas. Para melhorar a capacidade de compressão do algoritmo Deflate, técnicas de aproximação polinomial e codificação do sinal são aplicadas, como forma de diminuir a entropia do sinal. Os algoritmos desenvolvidos têm baixo custo computacional, baixo custo de implementação e alta taxa de compressão, permitindo que sejam implementados em sistemas embarcados.

1.4 VISÃO GERAL DO TRABALHO

O trabalho está dividido em sete capítulos. Os primeiros três capítulos apresentam a fundamentação teórica necessária para compreender o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 2 são apresentados os conceitos de QEE envolvidos com o trabalho, nesse capítulo são apresentados os distúrbios de QEE avaliados, índices e normas. Os fundamentos teóricos necessários à compreensão das técnicas aplicadas na compressão dos registros de QEE são apresentados no capítulo 3.

O capítulo 4 apresenta uma revisão bibliográfica sobre técnicas de compressão de sinais na área de QEE.

Os capítulos 5 e 6 dissertam sobre o desenvolvimento e implementação dos algoritmos de compressão. O capítulo 5 apresenta o modelamento dos algoritmos de compressão desenvolvidos, bem como a simulação desses algoritmos para sinais sintéticos em ambiente MATLAB[®]. A implementação dos algoritmos em hardware reconfigurável é apresentada no capítulo 6.

As considerações finais e conclusões dos trabalhos desenvolvidos são apresentadas no capítulo 7.

2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Na literatura podem ser encontradas diferentes definições para QEE. As definições variam muito em função do ponto de vista abordado. Do ponto de vista de um fornecedor de energia, QEE pode ser definida como a confiabilidade do sistema. Nesse enfoque busca-se garantir o fornecimento de energia, isto é, o foco da QEE está nos índices de interrupção de serviço (COLNAGO, 2010). Um usuário poderia definir QEE como qualquer desvio manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte na falha ou na má operação de um equipamento (BOLLEN, 2006; DUGAN, 1996).

Mesmo entre as normas, as definições para o conceito de QEE são conflitantes. O dicionário do IEEE define QEE como o conceito de fornecer energia para um equipamento para que esse opere de forma apropriada. A IEC usa outra abordagem para essa definição, para a IEC o termo QEE é definido como as características da eletricidade em um dado ponto do sistema elétrico avaliado em relação a um conjunto de parâmetros técnicos de referência. Esta definição de QEE não está relacionada com o desempenho do sistema elétrico ou dos equipamentos nela conectada, mas sim na capacidade de medir e quantificar o desempenho do sistema elétrico (BOLLEN, 2006).

Alguns autores, como (BOLLEN, 2006; DUGAN, 1996) buscam uma definição mais ampla para o conceito de QEE. Esses autores definem QEE como a combinação da qualidade da corrente e tensão, onde a qualidade dessas grandezas é definida como qualquer desvio da medida em relação ao seu valor ideal. Em (BOLLEN, 2006) a tensão e a corrente ideal para um sistema elétrico são definidas como duas grandezas senoidais em que amplitude e frequência são iguais a seus valores nominais. Ainda tensão e corrente devem ter mesma frequência e fase. Qualquer desvio dessas grandezas em relação ao ideal é classificado como um distúrbio. Essa definição de QEE inclui mais distúrbios que aqueles que normalmente são considerados parte da QEE, por exemplo: variações de frequência e fator de potência não

unitário. Um distúrbio de QEE pode ser originado por um distúrbio na tensão ou na corrente, mas isso é geralmente difícil de distinguir. Essa dificuldade de distinguir entre um distúrbio de tensão ou corrente é uma das razões pela qual o termo qualidade da energia elétrica é utilizado.

2.1 NORMAS

Independente do interesse de consumidores sejam eles industriais ou residenciais, da comunidade científica ou mesmo de concessionárias de energia no estudo de QEE, nada pode ser feito em relação à melhora dos parâmetros de QEE sem a definição de normas que regulamentem o sistema elétrico de forma coerente à realidade de cada região.

As normas têm por função definir de forma clara os distúrbios elétricos e parâmetros de QEE, assim como medi-los e quantificá-los. Também devem definir os direitos e deveres tanto de consumidores quanto de concessionárias de energia elétrica.

Definições para os fenômenos de QEE podem ser encontradas em diferentes normas, as quais muitas vezes diferem em determinados conceitos (BOLLEN, 2006; GALLO, 2006).

A IEC define um conjunto de documentos, internacionalmente aceito, sobre numeração IEC 61000-4-XX, os quais definem os fenômenos de QEE, os métodos de cálculo e os requisitos de precisão dos equipamentos de medição. A principal motivação dessa norma está na definição de métodos e requisitos comuns para garantir que diferentes dispositivos de análise de QEE de diferentes fabricantes obtenham mesmos resultados para uma mesma análise, permitindo assim a comparação de análises realizadas em diferentes sítios quando utilizados diferentes analisadores (DUGAN, 1996; BROSHI, 2007). A IEEE também define um conjunto de documentos, sobre numeração IEEE 1159, o qual define um conjunto de distúrbios de QEE.

A definição de distúrbios e seus procedimentos para monitoração é parte da função das normas. As normas também têm por função definir índices de QEE a serem atendidos por concessionárias, limites para distúrbios que podem estar presentes em um sistema elétrico ou serem gerados em uma planta industrial.

Não há hoje uma padronização mundialmente aceita em relação aos limites e índices de QEE. Essa desregulamentação se deve em grande parte às grandes diferenças entre as atividades econômicas e industriais de cada região, o que acaba por definir uma regulamentação mais ou menos avançada. Na Europa a Norma EN50160 é amplamente aceita, porém alguns países definem regulamentações próprias, por exemplo, a Noruega, que define a Norma NVE com limites que condizem com a realidade do sistema elétrico daquele país (BROSHI). Nos Estados Unidos os limites são definidos pela Norma IEEE 1159. Essa Norma, em relação aos limites, está focada na definição de limites aceitáveis para os níveis de distorção harmônica nos pontos de entrega das concessionárias (JUNIOR, 2009).

No Brasil, a ANEEL elaborou um conjunto de documentos, os quais regulamentam o setor de distribuição de energia elétrica, o qual é subdividido em nove módulos. O módulo 8 é responsável por estabelecer os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

2.1.1 NORMA IEC 61000

A IEC definiu um conjunto de documentos, que compõem a norma IEC 61000, a qual lida com parâmetros e definições relacionadas à compatibilidade eletromagnética de equipamentos e sistemas elétricos. Conforme Tabela 1, a norma IEC 61000 é dividida em nove partes.

Tabela 1: Seções da norma IEC 61000

Seção	Nome	Descrição
1	Considerações Gerais	Esta seção da norma trata de considerações gerais, princípios fundamentais, definições e terminologias necessárias para o entendimento da norma.
2	Ambiente	Esta seção define características do ambiente onde a norma se aplica à classificação de ambientes e os níveis de compatibilidade.
3	Limites	Esta seção define os limites para emissões eletromagnéticas que podem ser geradas por equipamentos ou sistemas conectados a um determinado ambiente.
4	Técnicas de medição e ensaio	Esta seção define de técnicas de medição e avaliação de diferentes grandezas.
5	Guia de instalação e mitigação	Esta seção define um guia para instalação de equipamentos e sistemas em diferentes ambientes e mitigação de falhas.
6	Definições Diversas	Esta seção define níveis de emissão e imunidade para equipamentos e sistemas requeridos por equipamentos e sistemas específicos.
9	Diversos	Definições diversas relacionadas à compatibilidade eletromagnética.

Os documentos que definem os métodos de medição de QEE fazem parte da quarta seção da norma, com numeração 61000-4-XX. Os requerimentos para caracterização e medição dos fenômenos de QEE estão descritos no documento IEC 61000-4-30. Esse documento faz referência a dois outros documentos, IEC 61000-4-7 e 61000-4-15, quando o mesmo se refere aos distúrbios de distorção harmônica e flutuação de tensão, respectivamente. O documento 61000-4-30 se tornou a base para atualização dos documentos da norma IEEE 1159, o que representa um avanço no caminho da internacionalização das normas de QEE.

A definição de limites e níveis de compatibilidade do sistema elétrico é de responsabilidade do órgão regulamentador do sistema elétrico de cada país. No entanto os documentos definidos pela IEC servem como um guia para que cada órgão defina os limites coerentes ao sistema elétrico de cada país ou região (BOLLEN, 2006).

Os níveis de compatibilidade de distúrbios conduzidos de baixa frequência originados em sistemas elétricos públicos são definidos no documento IEC 61000-2-2, enquanto o documento IEC 61000-2-4 reserva-se à definição desses distúrbios em sistemas elétricos industriais. Com poucas exceções os níveis definidos nessas normas são basicamente os mesmos definidos na norma EN50160.

A Norma IEC 61000 disponibiliza dois documentos com recomendações de limites para emissão de harmônicos de corrente por equipamentos conectados em sistemas elétricos de baixa tensão. O documento IEC 61000-3-2 define os limites para equipamentos com correntes inferiores à 16 ampères por fase, enquanto o documento IEC 61000-3-4 define os limites para equipamentos com correntes superiores a 16A. Em sistemas elétricos de média e alta tensão, a regulamentação de limites para emissão de harmônicos de corrente é definida pelo documento IEC 61000-3-6.

2.1.2 NORMA IEEE 1159

A norma IEEE 1159, bastante difundida nos Estados Unidos, define as diretrizes gerais e definições para monitoração da QEE. Essa norma é dividida em três grupos, responsáveis por definir diferentes aspectos da regulamentação de QEE.

O grupo de trabalho responsável pela IEEE 1159.1 trabalha no desenvolvimento de diretrizes para instrumentação e medição de diferentes tipos de fenômenos de QEE, o que envolve requisitos de taxas de amostragem, sincronização da amostragem, precisão dos conversores analógicos digitais. A definição e a caracterização dos diferentes fenômenos de QEE ficam sobre responsabilidade do grupo de trabalho da IEEE 1159.2. Conforme Bollen (2006), atualmente os dois grupos trabalham em conjunto com a IEC para a definição de um padrão internacional de QEE.

O grupo de trabalho 1159.3 trabalha na definição de um formato de arquivo que possa ser utilizado como padrão para troca de informações de monitoração de QEE entre diferentes equipamentos e aplicações, o qual seja independente de fabricante. A IEEE definiu o formato PQDIF, o qual suporta o armazenamento de informações que incluem espectro harmônico, envelopes de tensão eficaz, estatísticas de QEE, medições de regime permanente, bem como formas de onda de distúrbios (BOLLEN, 2006).

2.1.3 NORMA EN50160

A norma EN 50160 é a norma europeia que trata dos requisitos de qualidade do fornecimento de energia elétrica. Esse documento especifica as características de tensão, no ponto de fornecimento de energia aos consumidores e em redes públicas de distribuição de baixa e média tensão sobre condições normais de operação (DUGAN, 1996).

A norma define um conjunto de distúrbios e parâmetros de QEE a serem avaliados, suas características e limites que devem ser respeitados. Também são definidos os métodos e procedimentos de medição dos parâmetros de QEE. A metodologia de medição definida na EN 50160 se tornou a base para a definição da norma IEC para medição de QEE, IEC 61000-4-30 (BOLLEN, 2006).

2.1.4 PRODIST

A atividade do sistema elétrico brasileiro é regulamentada através dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), um conjunto de documentos elaborado pela ANEEL, os quais normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O PRODIST é dividido em nove módulos, sendo o módulo 8 do PRODIST responsável pela regulamentação das questões associadas à QEE.

O módulo 8 do PRODIST estabelece os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Para a qualidade do produto, o módulo 8 define a terminologia, caracteriza os fenômenos, os parâmetros e os valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE. Em relação à qualidade do produto são considerados os seguintes aspectos:

- a) tensão de regime permanente;
- b) fator de potência;
- c) harmônicos;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) flutuação de tensão;
- f) variações de tensão de curta duração;
- g) variação de frequência.

Com relação aos fenômenos de QEE avaliados pelo PRODIST, a norma define a caracterização de cada fenômeno, a metodologia e os requisitos para medição e os valores de referência.

Para a qualidade dos serviços prestados é definida a metodologia para avaliação dos indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica, dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais e do sistema de atendimento às reclamações dos consumidores, definindo padrões e responsabilidades.

2.2 ANALISADORES DE QEE

Um analisador de QEE é um dispositivo capaz de medir tensão e corrente em sistemas monofásicos e polifásicos, e, através dessas grandezas medidas, calcular os parâmetros de análise de QEE.

A Norma IEC 61000-4-30 define três classes de equipamentos para análise de QEE, A, S e B. Equipamentos da classe A são equipamentos mais precisos, tipicamente utilizados quando necessário verificar o atendimento de requisitos da norma ou resolver disputas contratuais. Conforme especificado na norma IEC 61000-4-30, a medição de qualquer parâmetro de QEE realizada com dois equipamentos diferentes, que atendam os requisitos da classe A, será equivalente, respeitando as incertezas definidas para aquele parâmetro comparado. Equipamentos classe S têm requerimentos de processamento e precisão inferiores em relação aos equipamentos classe A, sendo assim, tipicamente são utilizados para análise e avaliação de problemas de QEE. A classe B corresponde ao grupo de equipamentos que atendem regulamentações antigas da norma (MCEACHERN, 2009).

Analisadores de QEE são tipicamente dispositivos de medição de tensão e corrente polifásicos. Conforme ilustra a Figura 3, a conexão desses equipamentos no sistema elétrico pode ser feita de forma direta em sistema de baixa tensão. Em sistemas de média e alta tensão, analisadores são conectados ao sistema através de transformadores rebaixadores de tensão e transformadores de corrente.

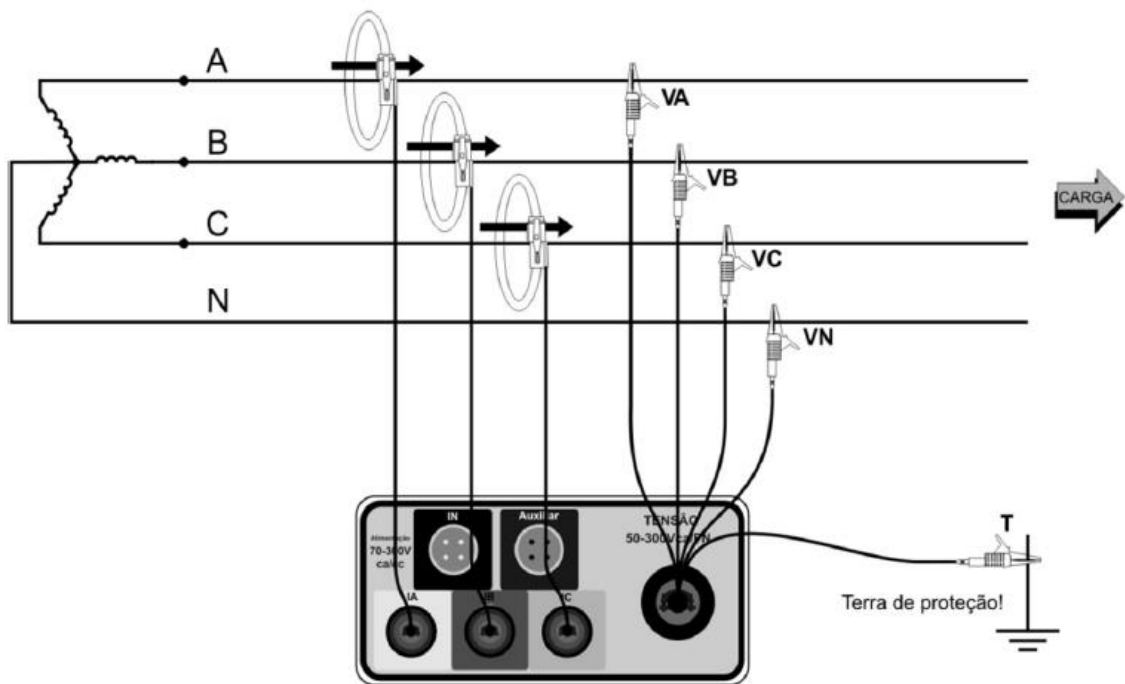


Figura 3: Conexão de um analisador de QEE em um sistema elétrico de baixa tensão (EMBRASUL, 2013)

Equipamentos de análise utilizam em sistemas de baixa tensão sensores do tipo rogowski ou transformadores de corrente para condicionamento de corrente. Em situações que se faz necessária à medição do nível DC de corrente são usados sensores de efeito Hall. Como transdutores de tensão, tipicamente, são utilizados divisores de tensão resistivos ou transformadores de tensão (SALEM, 2005; FERRERO, 2001).

O primeiro passo na monitoração de sinais de QEE é dado pela aquisição dos sinais de tensão e corrente. Um sistema de aquisição em um analisador de QEE tem por função condicionar os sinais e convertê-los do domínio analógico para o domínio digital para serem processados digitalmente pelo equipamento (BOLLEN, 2006). A Figura 4 ilustra uma proposta para um sistema de aquisição de sinais de QEE.

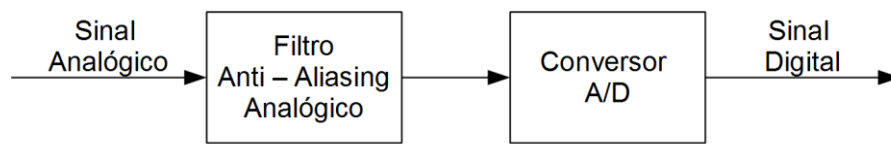


Figura 4: Modelo de um sistema de aquisição de um analisador de QEE (BOLLEN, 2006)

O primeiro passo na aquisição de um sinal, seja de tensão ou corrente, é o condicionamento do sinal. Nessa etapa o sinal a ser medido é convertido em níveis de tensão compatíveis com a faixa de tensão do conversor analógico-digital. O conversor analógico digital tem por finalidade quantizar o sinal e convertê-lo do domínio contínuo para o domínio discreto, para que possa ser processado digitalmente. No entanto, antes do sinal ser convertido, é necessário garantir que o sinal tenha banda de frequência limitada. Pelo teorema de Nyquist o sinal deve ser amostrado com frequência maior que duas vezes a frequência da componente de mais alta frequência, para garantir que não ocorra o efeito de *aliasing*. A banda limitada do sinal é garantida através de um filtro passa baixa, filtro *anti-aliasing*. A especificação da frequência de corte desse filtro varia entre dispositivos, pois depende da banda de frequência que o equipamento se propõe a analisar e da taxa de amostragem do sistema de aquisição.

A banda de frequência entre a máxima frequência de interesse para análise harmônica e a frequência de Nyquist do sistema de aquisição definem a banda de transição do filtro, conforme ilustra a Figura 5. Bandas de transição estreitas implicam em filtros *anti-aliasing* de alta ordem. Filtros de alta ordem em hardware além de serem caros e ocuparem muita área, inserem atrasos de fase do sinal adquirido, o que interfere diretamente na precisão da detecção de eventos.

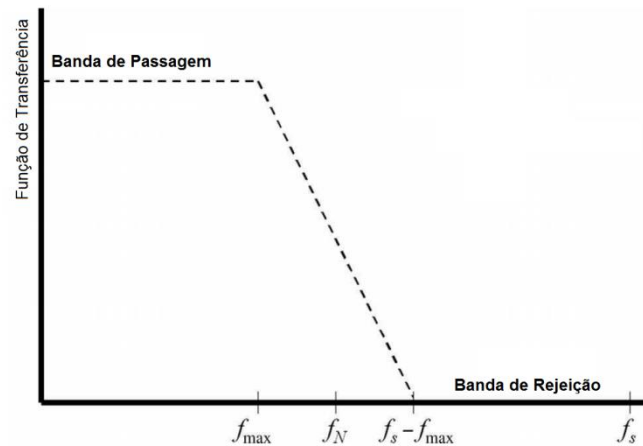


Figura 5: Frequência característica de um filtro *anti-aliasing* de um analisador de QEE (BOLLEN, 2006)

Na Figura 5 f_{\max} descreve a máxima frequência de interesse, enquanto f_N e f_s , descrevem respectivamente a frequência de Nyquist e a frequência de amostragem do sistema.

Em (BOLLEN, 2006) é proposto um modelo alternativo para filtragem e aquisição de sinais, ilustrado na Figura 6. A ordem dos filtros é reduzida através do uso da técnica de sobreamostragem do sinal. A sobreamostragem do sinal além de aumentar a banda de transição do sinal, o que por sua vez implica na redução da ordem do filtro, também implica na melhora da relação sinal ruído do sinal adquirido.

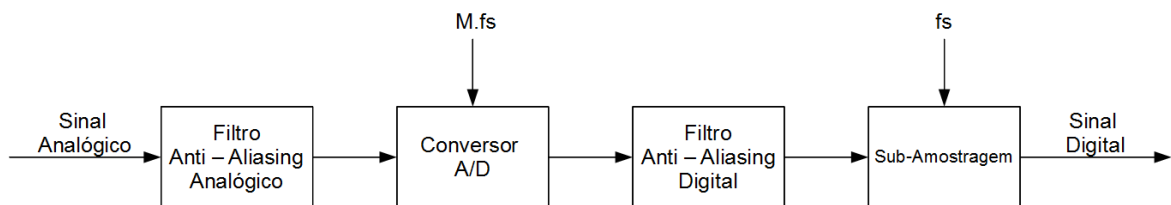


Figura 6: Modelo de um sistema de aquisição sobreamostrado de um analisador de QEE (BOLLEN, 2006)

Conforme Figura 6 o sinal é amostrado a uma taxa M vezes maior. Esse sinal então é filtrado digitalmente, com banda de passagem igual à banda de interesse na análise harmônica do sinal e por sua vez subamostrado para assim se obter o sinal na taxa de amostragem desejada pelo equipamento. Este processo de subamostragem do sinal é fundamental para diminuir o volume de dados a ser processado e armazenado na memória do dispositivo.

Conforme especificado pela Norma IEC 61000-4-7 a amostragem do sinal deve ser sincronizada com a frequência do sistema elétrico, isto é, a amostragem deve ser realizada a taxas múltiplas da frequência do sistema. Para garantir o sincronismo a frequência da rede deve ser medida e seu valor utilizado na atualização da frequência de amostragem. A Norma IEC 61000-4-30 recomenda o uso de um bloco PLL para sincronizar a frequência de amostragem com a frequência do sistema, no entanto, deixa aberto o uso de outros mecanismos de sincronismo. O uso de janelamento não é recomendado pela Norma, uma vez que é permitido somente em caso de perda de sincronismo da frequência da rede.

Gallo (2006) propõe um sistema de sincronismo alternativo ao apresentado pela norma IEC 61000-4-7, conforme ilustra a Figura 7. Nesse modelo o sinal é sobre amostrado e armazenado em uma memória, indicada pela letra D, e então interpolado com uma frequência síncrona com a frequência do sistema elétrico pelo módulo indicado pela letra G. Conforme a Norma IEC 61000-4-30 a informação de frequência deve ser medida e atualizada a cada 10 segundos. No modelo proposto a medição de frequência é realizada pelo módulo indicado pela letra C. A atualização da frequência de interpolação ocorre juntamente com atualização da medida de frequência, o que garante determinismo ao sistema de aquisição, uma vez que é conhecido o instante de atualização da frequência de interpolação.

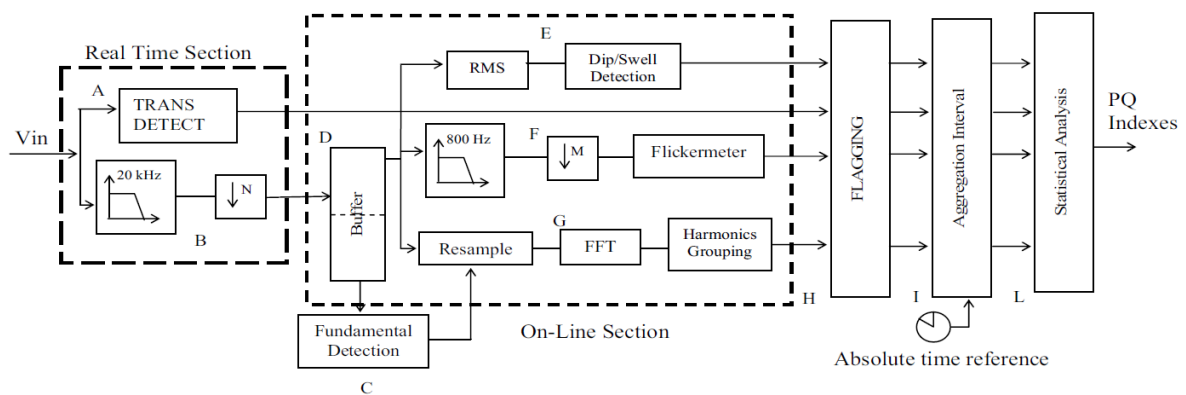


Figura 7: Modelo de um sistema de aquisição com sincronismo baseado na interpolação do sinal adquirido (GALLO, 2006).

2.3 REGISTROS DE QEE

Os distúrbios em QEE podem ser divididos em dois grupos: variações e eventos. Variações são classificadas como distúrbios de regime permanente que requerem medição contínua. Eventos são perturbações súbitas que têm um instante de início e de fim bem definidos. Enquanto as variações requerem medição contínua para serem avaliadas, o processo de medição de eventos é iniciado somente quando detectada a ocorrência do mesmo. Nesse processo normalmente são definidos limiares para indicar quando um evento deve ser medido e registrado. Essa divisão entre eventos é feita em grande parte das normas, no entanto a nomenclatura utilizada difere (BOLLEN, 2006).

2.3.1 VARIAÇÕES

A medição da variação da frequência do sistema elétrico é um exemplo típico de variação de um parâmetro de QEE. Por exemplo, poderia-se optar por medir a frequência do sistema a cada segundo, o que após o período de sete dias de medição resultaria em 604800 medidas de frequência. Através desse conjunto de medidas são extraídas informações estatísticas, por exemplo, média, desvio padrão, 95% percentil, entre outras informações estatísticas. Os resultados da análise estatística de um conjunto de parâmetros são referidos como os índices do ambiente analisado (BOLLEN, 2006).

A Norma IEC 61000-4-30 define as seguintes variações a serem analisadas:

- a) tensão;
- b) frequência;
- c) flutuação de tensão;
- d) harmônicos de tensão;
- e) inter-harmônicos de tensão;
- f) desbalanço de tensão;

- g) corrente;
- h) harmônicos de corrente;
- i) inter-harmônicos de corrente.

Com exceção do desbalanço de tensão, todas as demais variações correspondem a medidas monofásicas, portanto em sistemas polifásicos faz-se necessária a medição de cada variação independentemente para cada fase do sistema.

Para atender os requisitos da Norma IEC 61000-4-30, assim como grande parte das normas em vigência, não é obrigatória a medição de corrente. A medição de variações relacionadas à corrente é recomendada para auxiliar na detecção da causa de uma variação ou evento de tensão.

As medições de variações, conforme Norma IEC 61000-4-30, são avaliadas utilizando amostras referentes ao período de aproximadamente 200 ms. Esse período é de aproximadamente 200 ms, pois se refere ao período de 10 ciclos da rede elétrica para sistemas com frequência nominal de 50Hz e 12 ciclos de rede para sistemas com frequência nominal de 60Hz. O período de análise corresponde a exatos 200 ms, quando o sistema elétrico está funcionando exatamente na frequência nominal.

O armazenamento das variações de QEE, calculadas a cada 200 ms, durante longos períodos de análise, representa um grande volume de dados. Com o intuito de resolver esse problema a Norma IEC 61000-4-30 definiu o conceito de agregação. O conceito de agregação envolve o cálculo de um valor representativo a um período maior de amostragem, através da média das medidas das variações calculadas utilizando períodos menores. Além do período básico de análise de 10/12 ciclos de rede, a norma IEC 61000-4-30 definiu através da agregação de valores os períodos de 150/180 ciclos de rede, 10 minutos e 2 horas. Alguns analisadores de QEE permitem o armazenamento em períodos customizados, além dos

definidos pela norma, permitindo ainda o armazenamento dos valores máximos e mínimos medidos para durante período agregado.

Durante a medição de variações de parâmetros de QEE, caso ocorra algum evento, esse será contabilizado múltiplas vezes, pois esse será registrado como um evento ao mesmo tempo em que influenciará nas estatísticas das variações. Para solucionar esse problema a norma IEC 61000-4-30 definiu o conceito de marcação. O conceito de marcação de medições, sejam elas agregadas ou não, é utilizado para prevenir que eventos afetem os índices de conformidade do ambiente onde está sendo avaliada a QEE.

A detecção de um evento vai marcar o período básico de medição de todas as variações analisadas e de todos os períodos agregados que possuem aquele período básico onde ocorreu o evento. Os períodos marcados não são contabilizados nas estatísticas da medição. Conforme Norma IEC 61000-4-30, as medições são marcadas na ocorrência dos seguintes eventos: afundamento de tensão, elevação de tensão, interrupção de tensão e transitórios. A marcação de eventos é muito dependente da parametrização do equipamento, uma vez que a norma não define os limiares que determinam a ocorrência de um evento, podendo assim a medição realizada variar de um equipamento para outro em função da parametrização, o que acaba por dificultar a comparação de resultados entre diferentes ambientes.

Os órgãos regulamentadores do sistema elétrico, no Brasil a ANEEL, definem níveis de conformidade para cada parâmetro de QEE, que devem ser respeitados pelas distribuidoras de energia. Quando requisitados pelo órgão regulamentador, as distribuidoras devem apresentar os relatórios, os quais são compreendidos pela avaliação estatística da variação parâmetros de QEE para o período requisitado.

2.3.1.1 Variações de tensão e corrente

O método de medição de tensão e corrente eficaz definido na Norma IEC 61000-4-30 aplica-se à análise de sinais estocásticos quasi-estacionários, não sendo recomendado esse método para detecção e avaliação de eventos. Para a detecção de eventos são definidos métodos específicos para cada evento. Nos períodos onde são detectados eventos, o valor eficaz calculado, para fins estatísticos, é desconsiderado.

Quanto ao procedimento de cálculo, a norma não define uma equação, mas sim o conjunto de pontos a ser utilizado para calcular o valor eficaz. Conforme definição, o valor eficaz deve ser calculado a partir de um conjunto de pontos amostrado com frequência de amostragem sincronizada com a frequência do sistema elétrico amostrado. Ainda esse conjunto deve corresponder a 10 ciclos do sistema elétrico, para sistemas que operam em 50 Hz e 12 ciclos para sistemas de 60 Hz.

Além do conjunto de pontos a ser utilizado, a norma IEC especifica também quais parâmetros devem ser considerados no cálculo do valor eficaz. Deve ser considerado no cálculo, além da amplitude da componente fundamental, harmônicos e inter-harmônicos.

O valor eficaz de um sinal elétrico pode ser calculado de diferentes formas, mas entre os métodos mais utilizados na literatura pode-se citar o cálculo no domínio tempo utilizando o conjunto de pontos amostrados. A Equação (1) apresenta a expressão para o cálculo do valor eficaz no domínio tempo.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2} \quad (1)$$

Em (1) x_i representa cada ponto amostrado, enquanto N representa o número de pontos que compõem o conjunto.

O valor eficaz também pode ser calculado utilizando a representação do conjunto amostrado no domínio frequência. A representação no domínio frequência pode ser feita

através de ferramentas como a Transformada Discreta de Fourier (DFT) ou seu algoritmo eficiente, a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Essa representação no domínio frequência já se faz necessária em equipamentos de análise de QEE, para efeitos de análise de distorção harmônica.

Para que o cálculo do valor eficaz, tanto no domínio tempo quanto no domínio frequência, produza resultados coerentes é fundamental que os pontos sejam amostrados utilizando uma taxa de amostragem sincronizada com a frequência do sistema elétrico, e o conjunto de pontos utilizado no cálculo deve corresponder a um número inteiro de ciclos.

O procedimento de cálculo de tensão e corrente é idêntico, no entanto as precisões definidas pela norma IEC para essas grandezas se diferenciam. A precisão da medida dessas grandezas é diretamente influenciada pela precisão dos transdutores utilizados. Para medição da tensão do sistema elétrico tipicamente são utilizados como transdutores resistores de precisão. É possível encontrar resistores específicos para medição de tensão, com tolerâncias inferiores a 100 PPM. Como transdutores para medição de corrente em sistemas elétricos são utilizados tipicamente sensores magnéticos, como transformadores de corrente, bobinas de rogowski. A precisão desses sensores é muito inferior àquela apresentada por sensores resistivos, além de serem muito dependentes da temperatura, necessitando calibração em função da temperatura. A exatidão desses sensores varia em torno de 0,1% a 2% dependendo da qualidade do transdutor. Em aplicações muito específicas, onde a corrente é controlada, é possível medir a corrente utilizando sensores resistivos mais precisos, mas nesse tipo de aplicação é necessário abrir o sistema elétrico para introduzir o medidor, o que não é muito prático em ambientes industriais.

A Norma IEC 61000-4-30 define um ambiente para avaliação da precisão de medição do dispositivo. Nas condições de teste definidas, a incerteza na medição da tensão eficaz, para um equipamento classe A, não deve exceder de 0.1% do valor nominal de medição do

equipamento. Para um equipamento classe S a incerteza não deve exceder 0.5% do valor nominal do equipamento. Em relação à medição de corrente, a incerteza na medição não deve exceder 0,1% do valor de fundo de escala para equipamentos classe A e 1% para equipamentos classe S.

2.3.1.2 Flutuação de tensão

O distúrbio de flutuação de tensão é caracterizado pela variação sistemática do envelope da tensão instantânea, modulação, ou pela variação aleatória da tensão eficaz. A amplitude dessas variações tipicamente não ultrapassa $\pm 10\%$ do valor nominal da tensão do sistema (ELNADY, 2002).

Flutuações de tensão podem ser descritas como a modulação da tensão da frequência fundamental, como segue em (2).

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot [1 + m(t)] \cdot \cos(2\pi f_0 t) \cdot \quad (2)$$

Em (2) V descreve o valor da tensão da frequência fundamental, nesse caso é tratada como a portadora, f_0 a frequência da fundamental e $m(t)$ o sinal modulante. Conforme (BOLLEN, 2006) a Equação (2) pode descrever qualquer distúrbio de tensão pela apropriada escolha do sinal modulante $m(t)$.

Cargas que apresentam continuamente variações rápidas na magnitude da corrente de carga são as principais causadoras das variações de tensão. Entre os exemplos mais comuns de cargas podemos citar motores, máquinas de solda elétrica, motores de compressores. Fornos a arco são a causa mais comum de flutuação de tensão em sistemas de distribuição e transmissão (GOLOVANOV, 2008; ELNADY, 2002). Um exemplo de uma medição de corrente de carga de um forno a arco, bem como sua influência na linha de distribuição são ilustrados na Figura 8.

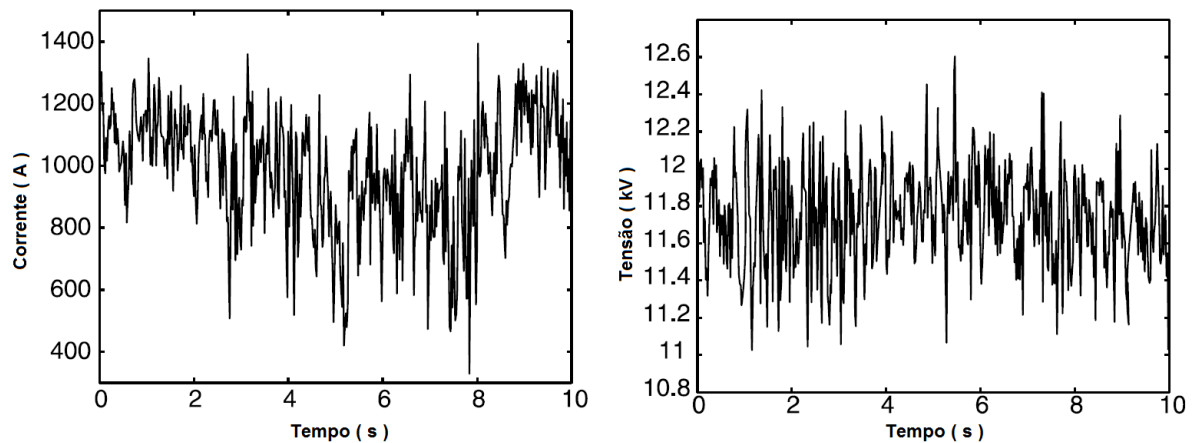


Figura 8: Exemplo do efeito de flutuação de tensão causa pela operação de um forno a arco. (BOLLEN, 2006)

O efeito de cintilação luminosa, conhecido na literatura como *flicker*, é devido aos efeitos da flutuação de tensão sobre lâmpadas. A Norma IEC 61000-4-15 avalia o distúrbio de flutuação de tensão a partir da medição dos efeitos de cintilação luminosa causada (ELNADY, 2002). A Norma IEC 61000-4-15 define a metodologia de medição, a qual está baseada na simulação da função de transferência entre lâmpada, olho e cérebro, a qual produz a métrica definida como PST. O PST é resultado de uma análise estatística, sendo gerado um novo valor representativo a cada 10 minutos de avaliação. Uma segunda métrica é definida, o PLT, o qual é definido como a média do PST durante um intervalo de 2 horas. Essa é a métrica utilizada para verificação dos níveis de compatibilidade segundo as normas (DUGAN, 1996).

2.3.1.3 Desbalanço de tensão

O desbalanço de tensão de um sistema trifásico é definido como a máxima variação da tensão eficaz das fases em relação à tensão eficaz média das três fases dividido pela tensão eficaz média das três fases, conforme é expresso na Equação (3). O desbalanço de tensão é definido de forma mais rigorosa através do uso de componentes simétricas, nessa definição é descrito como a razão entre a componente sequência negativa ou zero pela componente de sequência positiva das tensões de fase (JUNIOR, 2009; DUGAN, 1996).

$$Desbalanço(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\beta = \frac{|V_{AB}|^4 + |V_{BC}|^4 + |V_{CA}|^4}{(|V_{AB}|^2 + |V_{BC}|^2 + |V_{CA}|^2)^2} \quad (4)$$

Em (4) β é expresso utilizando as tensões de linha do sistema trifásico. Os desequilíbrios de tensão são expressos em percentual e seus valores típicos variam entre 0,5 e 2% (IEEE 1159, 1995).

Um dos principais fatores causadores do desbalanço de tensão é o desbalanço de correntes em um sistema trifásico. O desbalanço de corrente se deve principalmente à distribuição inadequada de cargas monofásicas nos circuitos trifásicos, ocasionando um consumo de corrente desequilibrado entre as fases do sistema (BOLLEN, 2006).

2.3.1.4 Harmônicos de tensão e corrente

Com a evolução da área de eletrônica a presença de cargas não lineares está se tornando cada vez mais frequente no sistema elétrico. Essas cargas têm importantes consequências no sistema elétrico. Cargas não lineares são responsáveis pela distorção da forma de onda, da forma da corrente e por consequência da forma de tensão devido ao fluxo da corrente distorcida pelas impedâncias do sistema (HEGAZY, 1994).

Uma forma de onda distorcida, porém periódica, pode ser representada como o somatório infinito de senóides através da série de Fourier. A Equação (5) descreve a representação de uma função através da série de Fourier.

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot Y_h \cdot \cos(h\omega t + \theta_h) \quad (5)$$

O termo Y_0 descreve o nível DC da função, enquanto o termo Y_h descreve o valor eficaz da componente fundamental e seus harmônicos. A frequência angular do sistema elétrico e a fase de cada componente são descritos, respectivamente, pelos termos ω e θ_h . Os demais termos são chamados de harmônicos e possuem frequência múltipla inteira da

frequência fundamental. Em sistemas digitais para a análise de distorção harmônica é tipicamente FFT.

A Norma IEC 61000-4-7 define os métodos de medição e análise de distorção harmônica, assim como define índices para avaliação da distorção harmônica. O índice mais utilizado na avaliação da distorção harmônica é o índice de distorção harmônica total (DHT), conforme definido na Equação (6).

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} Y_h^2}}{Y_1} \quad (6)$$

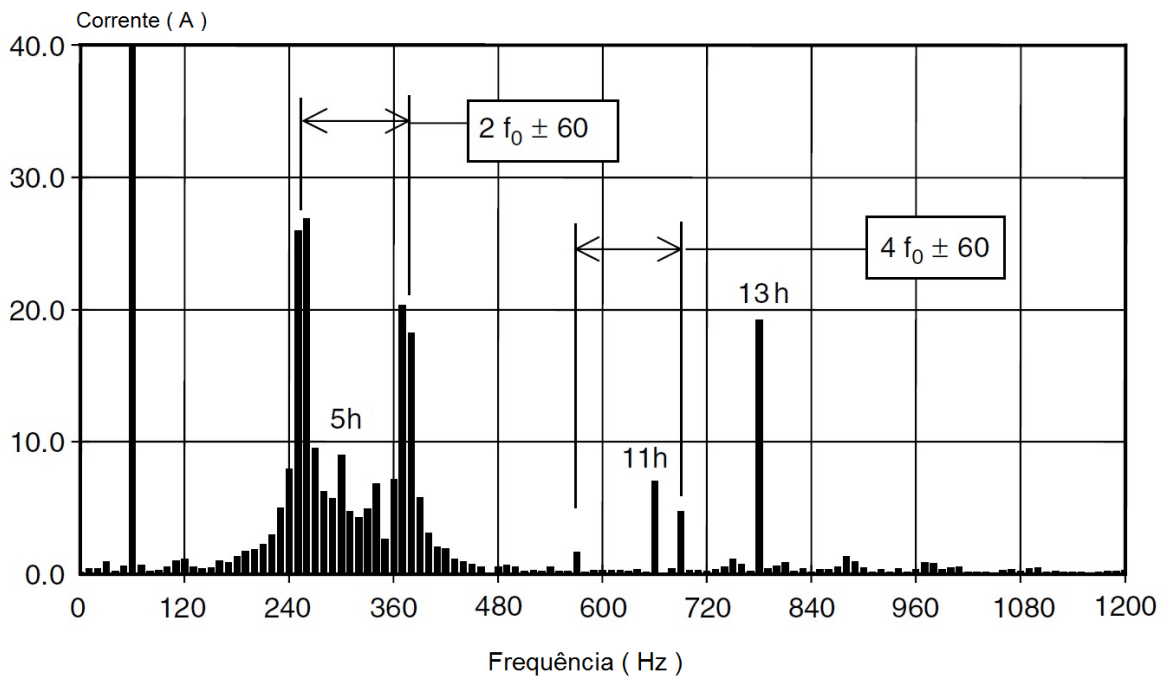
A DHT é definida a razão entre a raiz quadrada do somatório do conteúdo harmônico e a amplitude da componente fundamental, expresso como um percentual da componente fundamental. Em (6) Y_h representa as componentes harmônicas e inter-harmônicas, enquanto Y_1 representa a amplitude da componente fundamental.

A Norma IEC 61000-4-7 define que a distorção harmônica deve ser analisada sobre um conjunto de pontos referente à amostragem de 10 ou 12 ciclos, dependendo da frequência do sistema elétrico, amostrados a taxa de 128 pontos por ciclos. A análise de sistemas elétricos, utilizando 10 ciclos para sistemas de 50 Hz e 12 ciclos para sistemas de 60 Hz, garante não somente a caracterização de harmônicos da frequência do sistema elétrico, mas também de inter-harmônicos múltiplos de 5 Hz.

Inter-harmônicos são componentes de sinal que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema, por exemplo, uma componente de 150 Hz em um sistema de 60 Hz. Componentes inter-harmônicos podem aparecer no sistema como componentes discretos ou ocupando uma banda de frequências, o que é mais comum de ser observado quando a frequência inter-harmônica não é múltipla de 5 Hz (DUGAN, 1996).

Assim como acontece com o efeito de distorção harmônica, inter-harmônicos também são causados por cargas não lineares. Entre os principais causadores de inter-harmônicos no

sistema elétrico estão os dispositivos eletrônicos chaveados de potência, por exemplo, conversores e inversores de frequência e fontes de potência, que possuem frequência de chaveamento não múltipla da frequência do sistema elétrico. Outras fontes importantes de inter-harmônicos são os fornos a arco e os fornos de indução. Inter-harmônicos também podem ser gerados por variações constantes e abruptas de cargas, como por exemplo, partidas constantes de motores. A Figura 9 ilustra o comportamento inter-harmônico da corrente de um forno de indução.



**Figura 9: Espectro de frequências da corrente de um forno de indução
(DUGAN, 1996)**

A Norma IEC 61000-4-7 não analisa isoladamente uma componente inter-harmônica, pois tipicamente as distorções inter-harmônicas não são múltiplas de 5 Hz, causando assim, o efeito de espalhamento espectral em uma faixa de frequências. Então, para simplificar a análise, várias frequências inter-harmônicas são agrupadas, segundo diferentes critérios, e esses agrupamentos serão então utilizados na análise de distorção inter-harmônica.

2.3.1.5 Variação de frequência

Variações de frequência são definidas como o desvio no valor da frequência fundamental do sistema elétrico em relação ao valor nominal. No Brasil o valor nominal adotado é 60 Hz, mas em alguns países é adotada a frequência de 50 Hz (JUNIOR, 2009).

Variações na frequência do sistema elétrico são causadas devido às variações de velocidade de geradores em função de desequilíbrios entre a potência gerada e a solicitada pelas cargas conectadas ao sistema. A amplitude da variação, assim como sua duração, depende das características das cargas e da resposta do sistema de controle a variações de carga. Grandes variações na frequência são tipicamente em função da entrada ou desconexão de grandes cargas ou geradores no sistema, mudando assim, significativamente a configuração do sistema. No entanto, tais variações são pouco frequentes em sistemas largamente interconectados (DUGAN, 1996).

Variações de frequência têm importantes consequências sobre cargas conectadas ao sistema, entre as principais podemos citar: variações de horário em relógios, variações de velocidade em motores, variações de fluxo magnético em motores e transformadores, falhas de sincronismo em dispositivos PLL (BOLLEN, 2006).

A Norma IEC 61000-4-30 recomenda que a frequência do sistema seja medida e atualizada a cada intervalo de 10 segundos. Como método de medição é recomendada a medição através do método de contagem de cruzamentos por zero, no entanto, outros métodos são permitidos, desde que atendam aos requisitos de precisão definidos na norma. A incerteza admitida na medição da frequência para equipamentos classe A é de 10 mHz, enquanto equipamentos classe S devem ter incerteza de medição inferior a 50 mHz.

2.3.2 EVENTOS

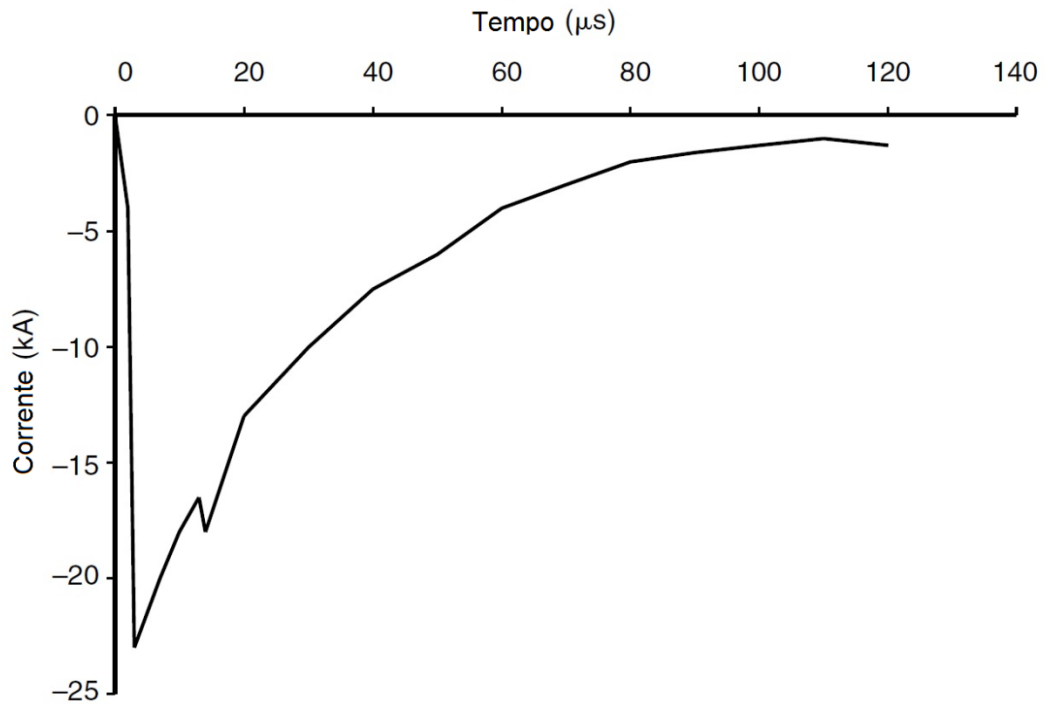
O processamento de eventos é diferente do processamento de variações. Enquanto variações são calculadas através do agrupamento de múltiplos ciclos, eventos, como por

exemplo, de afundamento de tensão, sobretensão ou interrupção são calculados em janela de apenas um ciclo. Em relação ao armazenamento, variações são calculadas e armazenadas periodicamente, eventos são registrados somente quando a gravidade do evento supera um limiar ou duração pré-estabelecida. Essa seção apresenta alguns eventos de QEE encontrados na literatura e definidos nas normas.

2.3.2.1 Transitórios

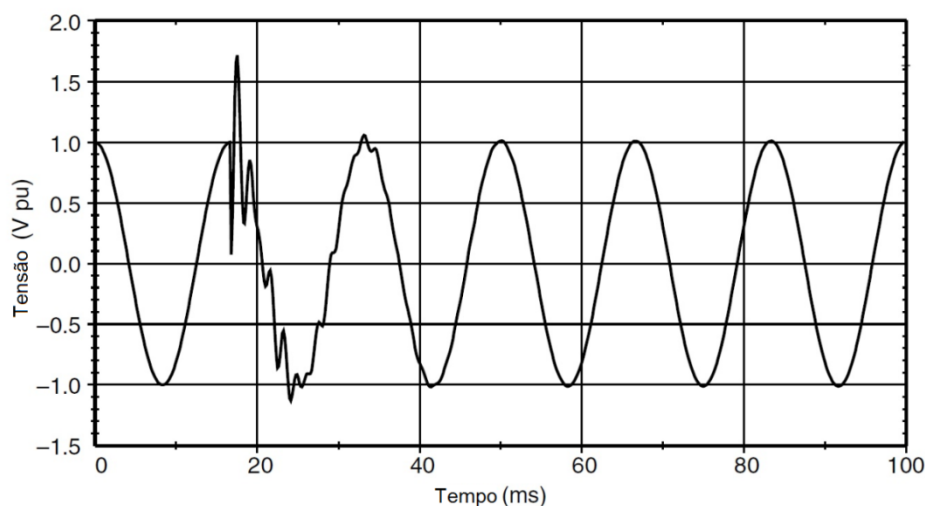
O termo transitório é proveniente da teoria de circuitos elétricos, o qual é definido como a componente de tensão ou corrente, de duração finita, devida a mudança entre dois estados de regime permanente. Na análise de sistemas elétricos de potência o termo transitório é utilizado para descrever qualquer evento de tensão ou corrente de duração igual ou inferior a um ciclo. Esses eventos são tipicamente causados pelo chaveamento de dispositivos eletrônicos de potência, energização e desenergização de cargas indutivas, capacitivas e linhas de distribuição e transmissão, eliminação de faltas, ou mesmo por descargas atmosféricas (JUNIOR, 2009).

Um transiente impulsivo é definido como uma mudança abrupta na condição de regime permanente da tensão ou corrente de duração finita. São caracterizados pelo tempo de subida e descida e pela amplitude do impulso. Uma descarga atmosférica é o exemplo mais comum de transitório impulsivo (DUGAN, 1996). A Figura 10 ilustra o comportamento de um transitório impulsivo.



**Figura 10: Corrente gerada por uma descarga atmosférica.
(IEEE 1159, 1995)**

Transitórios oscilatórios são definidos como oscilações iniciadas abruptamente com frequência de oscilação diferente da frequência do sistema elétrico e duração finita. São caracterizados pela composição harmônica da oscilação, pelo tempo de subida, pelo tempo de amortecimento da oscilação e pela amplitude máxima da oscilação. Transitórios oscilatórios apresentam componentes harmônicas de 300 Hz a 5 MHz, com tempos de duração variando de poucos microssegundos até 50 ms. A Figura 11 ilustra o comportamento típico de um transitório oscilatório.



**Figura 11: Transitório oscilatório causado pela energização de um banco de capacitores.
(DUGAN, 1996)**

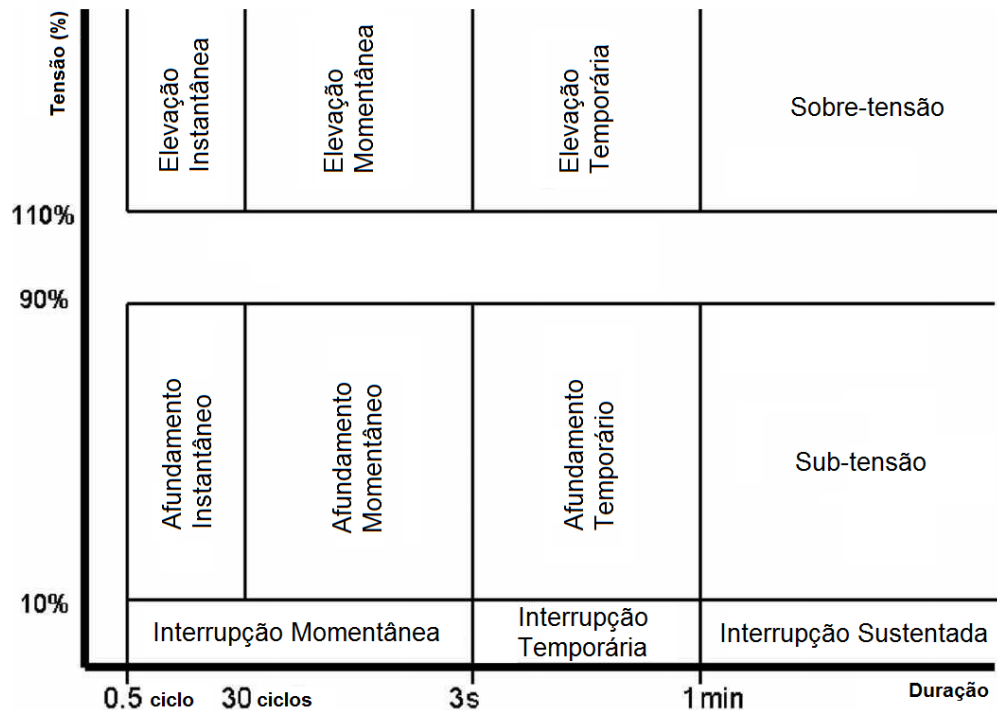
A Norma IEC 61000-4-30 não especifica os requisitos necessários para aquisição e medição de eventos transitórios. São definidas na cláusula A4 algumas recomendações para detecção e classificação de eventos transitórios. A Norma IEEE 1159 fornece melhor documentação quanto à caracterização dos eventos transitórios impulsivos e transitórios, porém também não são especificados métodos para detecção e medição, ficando a cargo dos fabricantes de analisadores de QEE a definição.

2.3.2.2 Eventos de variação de tensão

Eventos relacionados à variação da tensão do sistema elétrico são muito comuns no sistema elétrico. Esses eventos são classificados em função do percentual da variação e duração do evento, conforme as seguintes categorias:

- a) elevação de tensão;
- b) afundamento de tensão;
- c) sobretensão;
- d) subtensão;
- e) interrupção de tensão.

A Figura 12 ilustra a classificação dos eventos de tensão em função da variação percentual da tensão e da duração do evento.



**Figura 12: Classificação dos eventos de tensão.
(IEEE 1159, 1995)**

Elevações de tensão superiores a 10% em relação ao valor nominal e com duração inferior a 3 minutos são classificadas como elevações de tensão. Caso a duração do evento ultrapasse 3 minutos esse é classificado como um evento de sobretensão. As condições de elevação de tensão e sobretensão são tipicamente resultado da desconexão de uma grande carga ou de falhas na regulação de tensão do sistema.

Afundamentos de tensão e interrupções são em geral resultado de faltas no sistema elétrico ou resultado da interrupção de circuitos para isolar uma falta. Afundamentos de tensão também podem ser causados pela entrada de uma grande carga no sistema, persistindo até o sistema regular a tensão do sistema, seja através da elevação da tensão de saída de um transformador, entrada de um novo gerador ou outro mecanismo. A Figura 13 ilustra o

comportamento da tensão eficaz e instantânea da rede em relação à ocorrência de um afundamento de tensão.

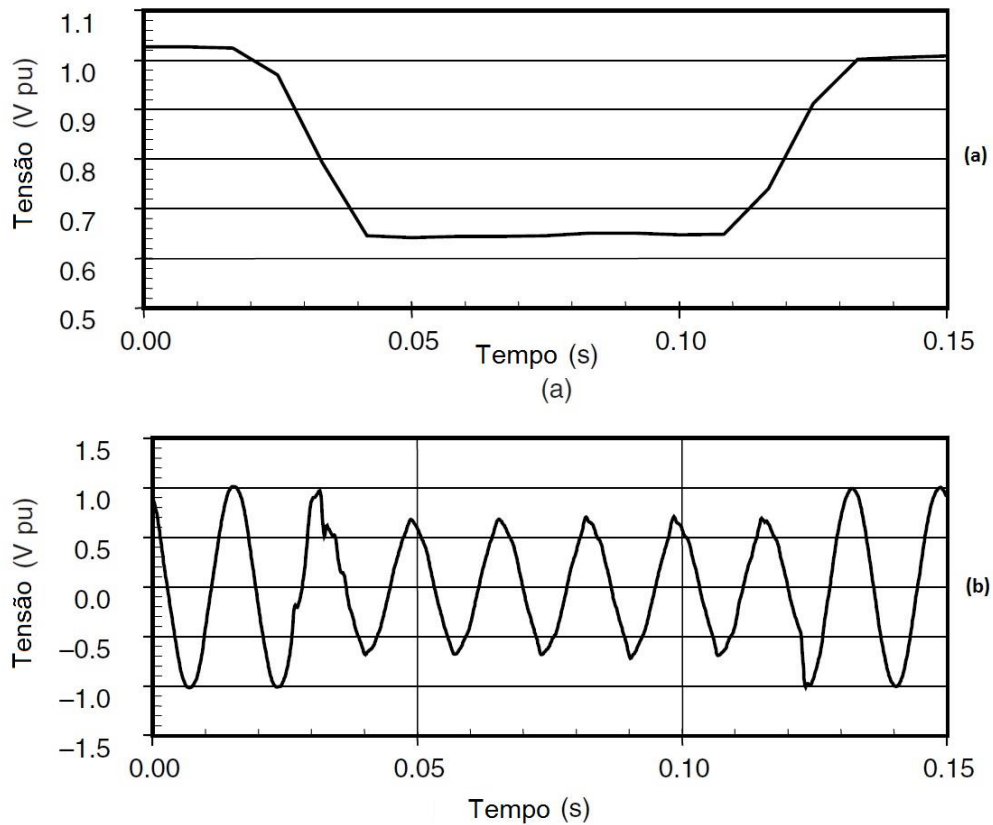


Figura 13: Afundamento de tensão: (a) tensão eficaz, (b) forma de onda da tensão. (DUGAN, 1996)

Afundamento de tensão é definido como a redução do valor eficaz da tensão abaixo de 90% do valor nominal, porém superior a 10% com duração do evento inferior a 3 minutos. Caso a duração do evento seja superior a 3 minutos o evento é classificado como subtensão. Reduções no valor eficaz da tensão do sistema abaixo de 10% do valor nominal são classificadas como interrupção. O evento relacionado à queda do valor eficaz da tensão a níveis inferiores a 10% é classificado como interrupção. Em função da duração do evento, interrupções podem ser classificadas como de curta ou longa duração. Interrupções com duração inferior a 3 minutos são classificadas como interrupções de curta duração, enquanto aquelas superiores a 3 minutos são classificadas como interrupções de longa duração.

Eventos de elevação, afundamento e interrupção de tensão com duração inferior a 1 minuto podem ainda ser classificados como instantâneo, momentâneo ou temporário. Eventos instantâneos têm duração de até 30 ciclos. Eventos com duração de 30 ciclos a 3 segundos são classificados como momentâneos. Por fim eventos com duração de 3 segundos a 1 minuto são classificados como temporários.

Diferentemente do cálculo de parâmetros relacionados a variações de grandezas de QEE, os quais são calculados baseados no agrupamento de múltiplos ciclos, eventos são calculados e detectados ciclo a ciclo, de modo a permitir melhor detecção do instante de início e fim do evento.

2.3.3 OSCILOGRAFIA DO SISTEMA ELÉTRICO

Análises de QEE estão diretamente relacionadas à parametrização dos dispositivos utilizados na medição. Eventos são detectados em função dos limiares configurados. Variações são calculadas e armazenadas em períodos definidos pelo usuário. Devido a uma parametrização errada, distúrbios podem não ser detectados, o que não significa que não tenham ocorrido. Por exemplo, eventos transitórios podem deixar de serem detectados devido a um limiar configurado excessivamente alto, ou ainda, variações de tensão podem ser suprimidas caso o período de agregação seja maior que a frequência da variação presente no sistema (BROSHI, 2007).

Nesse sentido, as análises ficam restritas ao que foi detectado e registrado pelo equipamento no momento do registro, não correspondendo em sua totalidade à realidade do sistema elétrico. Uma solução possível para esse problema está no registro contínuo da forma de onda de todos os canais do sistema de aquisição, o que permite pós-processamento, utilizando diferentes parametrizações, dos sinais amostrados para análise e avaliação do sistema em relação a diferentes níveis de perturbação.

O registro da oscilografia deve atender aos requisitos de amostragem definidos nas normas vigentes, de forma a permitir que os sinais amostrados sejam processados e deles obtidos os parâmetros de QEE, segundo diferentes parametrizações de análise e detecção de eventos. Conforme a Norma IEC 61000-4-30, a amostragem deve ter taxa de amostragem mínima de 128 pontos por ciclos. Essa taxa de amostragem permite o cálculo de todos os parâmetros de QEE e a detecção de eventos. Alguns equipamentos, no entanto, registram a oscilografia a taxas superiores, podendo em alguns equipamentos atingir 1024 pontos por ciclos. Tais taxas de amostragem permitem não somente a detecção de eventos transitórios, mas também a análise da envoltória do evento com maior detalhamento.

3 ALGORITMOS DE COMPRESSÃO

O volume de dados a ser processado, transmitido e armazenado cresce com a mesma velocidade com que dispositivos eletrônicos e a área de tecnologia da informação evoluem. Cada vez são necessárias mais informações para análise estatística, avaliação de qualidade e tomada de decisão em processos. Sistemas estão cada vez mais interligados, o que aumenta por sua vez o volume de dados transmitidos e recebidos, no qual o volume impacta diretamente no tempo e no custo da comunicação. No entanto, o custo de memórias para armazenamento retentivo, assim como o custo das redes de dados não reduziram seus valores na mesma velocidade do aumento do volume de dados. Em função dos custos envolvidos no armazenamento e transmissão de dados, torna-se necessário o uso eficiente desses recursos, por exemplo, através da compressão dos dados (HONEA, 1993).

Solomon (2004) define compressão de dados como o processo de converter uma sequência de dados de entrada em outra com tamanho inferior. Essa sequência pode representar tanto um arquivo ou um buffer em uma memória. Todo o conjunto de dados pode ser compactado até um determinado limite sem que haja perda de informação. Esse limite é definido pelo conceito de entropia do sinal. A entropia mede a quantidade de informação contida em um sinal, conforme descreve a Equação (7) (JALALEDDINE, 1990).

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \cdot \log_2 P_i \quad (7)$$

A Equação (7) define o número médio de *bits* para codificar um símbolo. Na Equação (7) P_i define a probabilidade de ocorrência de um dado símbolo, enquanto N determina o número de símbolos que compõem aquele conjunto. A entropia de um conjunto de dados depende da probabilidade P_i de cada símbolo. Para um dado conjunto de símbolos a entropia máxima ocorre quando a probabilidade de ocorrência de todos os símbolos é igual. Nesse comportamento está baseada a definição do conceito de redundância, o qual é definido como

a diferença entre a maior entropia possível para um conjunto de dados e a entropia calculada em função da distribuição de probabilidade do conjunto, conforme descreve a Equação (8).

$$R = \left[- \sum_{i=1}^N P \cdot \log_2 P \right] - \left[- \sum_{i=1}^N P_i \cdot \log_2 P_i \right] = \log_2 n + \sum_{i=1}^N P_i \cdot \log_2 P_i \quad (8)$$

A partir do conceito de redundância pode-se mensurar o quanto é possível comprimir um conjunto de dados sem que haja perda de informações. Um conjunto de dados é dito completamente comprimido quando sua redundância é zero.

Todo conjunto de dados possui uma estrutura de representação dos dados, a qual deve ser explorada para atingir uma representação menor e mais eficiente. Existem diferentes algoritmos para compressão de dados, baseados em diferentes técnicas e adequados para diferentes tipos de dados, mas todos baseados no mesmo princípio, reduzir a redundância do conjunto de dados a ser comprimido. Algoritmos de compressão podem ser divididos em dois grandes grupos: algoritmos de compressão sem perdas e algoritmos de compressão com perdas (SOLOMON, 2004).

Algoritmos de compressão sem perdas podem ser classificados, em função da forma que exploram a redundância de um conjunto dos dados, em três grupos: algoritmos de codificação de comprimento (RLE), algoritmos estatísticos e algoritmos baseados em dicionário. Algoritmos de codificação de comprimento buscam a substituição de símbolos que ocorrem em sequência por códigos que indicam o número de vezes que aquele símbolo ocorreu em sequência. Algoritmos estatísticos exploram a redundância do conjunto de dados através da atribuição de códigos de tamanho dependente da frequência do símbolo. Símbolos que ocorrem com maior frequência são substituídos por códigos com tamanho reduzido em relação a códigos com menor frequência. Em algoritmos baseados em dicionário, sequências de símbolos são substituídas por códigos pertencentes a um dicionário que descreve cada sequência. Esses algoritmos caracterizam-se por permitirem reconstrução do conjunto original

de dados, sem perda de informações, a partir da representação compactada. São utilizados em aplicações que não permitem a perda de informações, por exemplo, arquivos de texto, tabelas de dados, códigos executáveis de aplicativos, entre outros (KRAUS, 2009).

Em contraste aos algoritmos de compressão sem perdas, há um conjunto de algoritmos em que a compressão está baseada na remoção de informações dos dados a serem compactados, ou seja, os algoritmos de compressão com perdas. Nesses algoritmos não é possível reconstruir o conjunto original de dados a partir da representação compactada. Parte dos algoritmos de compressão com perdas está baseada no conceito de remoção de informações como meio para aumentar a redundância do sinal. Esse conjunto de dados com maior grau de redundância é então melhor compactado por algum algoritmo de compressão sem perdas. Fazem parte desse grupo os algoritmos de aproximação polinomial, algoritmos de quantização e os algoritmos baseados na transformação do domínio de representação do conjunto de dados (ZHAONING, 2002; RIBEIRO, 2001).

Nas seções que seguem são apresentados os algoritmos de compressão que foram utilizados na elaboração dos algoritmos de compressão de dados de QEE.

3.1 ALGORITMOS DE COMPRESSÃO SEM PERDAS

Algoritmos de compressão sem perdas também são conhecidos como codificadores de entropia. Codificadores de entropia criam uma nova codificação para os símbolos, a qual é mais eficiente que a representação nativa (SOLOMON, 2004; DUTTWEILER, 1995).

3.1.1 ALGORITMO RLE

O algoritmo RLE é um algoritmo de compressão sem perdas que explora a redução da redundância de um conjunto de dados através da identificação de símbolos que ocorram em sequência. O algoritmo varre o conjunto de dados a ser compactado e substitui cada sequência de dados composta pela repetição em sequência de um mesmo símbolo por um código de

repetição, o qual contém as informações de qual símbolo está repetido e do número de vezes em que esse se repete (TIWARI, 2012).

3.1.2 ALGORITMOS ESTATÍSTICOS

A compressão de dados através de algoritmos estatísticos está baseada na atribuição de códigos com comprimento dependente da frequência de ocorrência de cada símbolo. Códigos com menor comprimento são atribuídos a símbolos com maior ocorrência. Entre os algoritmos classificados nessa categoria podemos citar os algoritmos de Shannon-Fano e Huffman. O algoritmo Shannon-Fano foi um dos primeiros algoritmos estatísticos desenvolvidos e serviu de base para o desenvolvimento de algoritmo de Huffman (BABU, 2010).

A diferença entre esses algoritmos está na forma como atribuem os códigos aos símbolos de cada conjunto de dados. Ambos os algoritmos iniciam com a representação dos símbolos ordenados em função da probabilidade de ocorrência. No entanto, enquanto o algoritmo Shannon-Fano está baseado na divisão recursiva da tabela ordenada de símbolos até que todos os símbolos seja codificados, o algoritmo Huffman baseia-se na codificação através da representação da distribuição da tabela a partir de uma árvore binária (SOLOMON, 2004).

No algoritmo Shannon-Fano primeiramente o alfabeto é dividido em dois conjuntos com probabilidades de ocorrência similares. A todos os símbolos de um conjunto é atribuído o código 0, enquanto ao outro conjunto é atribuído o código 1. Cada conjunto é então dividido recursivamente em dois novos conjuntos com distribuição de frequência aproximada e novos *bits* são adicionados aos códigos anteriores. A divisão recursiva de cada conjunto é finalizada quando restarem somente dois símbolos ao conjunto. A Figura 14 apresenta um exemplo.

	Prob.	Steps				Final
1.	0.25	1	1			:11
2.	0.20	1	0			:10
3.	0.15	0		1	1	:011
4.	0.15	0		1	0	:010
5.	0.10	0	0		1	:001
6.	0.10	0	0	0	1	:0001
7.	0.05	0	0	0	0	:0000

Figura 14: Passos do algoritmo Shannon-Fano

O tamanho médio de uma codificação pode ser calculado, conforme descrito pela Equação (9).

$$\gamma = \sum_{i=0}^{N-1} P_i \cdot b \quad (9)$$

Em (9) P_i representa a probabilidade de ocorrência de cada símbolo, em que o número de símbolos que compõem o alfabeto é descrito por N . O número de *bits* de cada código é descrito por b . Calculando o tamanho médio da codificação apresentada na Figura 14, chega-se ao valor de 2.7 bits por símbolo. Esse valor é muito próximo à entropia do conjunto de dados, a qual é de 2.67 bits por símbolo. O algoritmo Shannon-Fano tem valor ótimo quando a distribuição de probabilidade de cada símbolo do alfabeto é uma potência negativa de 2.

O codificador Huffman inicia a construção da árvore a partir do agrupamento de símbolos com menor probabilidade. Símbolos são agrupados em pares formando um novo símbolo, com probabilidade igual à soma dos símbolos agrupados, e na sequência adicionados à árvore parcial. Quando a lista estiver reduzida a somente um símbolo auxiliar, o qual representa todo o alfabeto, a árvore estará completa. A cada ramo da árvore construída é atribuído um código 0 ou 1. O código, referente a cada símbolo do alfabeto, é formado pelo agrupamento dos códigos atribuídos a cada ramo no caminho percorrido do topo da árvore até

menor comprimento são atribuídos a símbolos que estão mais próximos do topo da árvore, que correspondem aos símbolos com maior probabilidade de ocorrência.

3.1.3 ALGORITMOS BASEADOS EM DICIONÁRIO

Algoritmos baseados em dicionário têm seu comportamento baseado na substituição de sequências de símbolos por códigos armazenados em um dicionário. A grande diferença entre os diferentes algoritmos propostos está na forma como é tratado o dicionário. Dicionários podem ser estáticos, isto é, são criados previamente, baseados em alguma informação prévia do conjunto de dados, ou podem ser dinâmicos. Dicionários dinâmicos são criados vazios ou com algum valor de inicialização, e então, atualizados em função das sequências codificadas ao longo do processo de compressão de um bloco de dados. Novas entradas podem ser inseridas no dicionário ou removidas, caso tenham baixa probabilidade de ocorrência (SOLOMON, 2004).

O algoritmo LZ77 foi publicado por Jacob Ziv e Abraham Lempel in 1977 (ZIV, 1977). Esse algoritmo serviu de base para o desenvolvimento de muitos algoritmos baseados em dicionário. O algoritmo LZ77 utiliza como dicionário a sequência de dados de entrada já codificada como dicionário. O codificador desse algoritmo possui uma janela deslizante, a qual é dividida em duas partes, conforme ilustra a Figura 17. A parte da esquerda, conhecida como dicionário, é composta pelos últimos N símbolos que já foram codificados. A parte da direita corresponde a um *buffer* de dados o qual corresponde a uma parte da informação que se busca compactar, conhecido como *buffer* de busca (TAHGHIGHI, 2010).

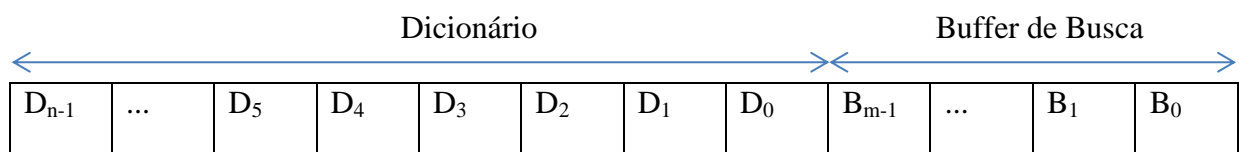


Figura 17: Ilustração da Janela Deslizante.

O codificador procura da esquerda para a direita a maior sequência que corresponda aos primeiros símbolos do *buffer* de busca. A cada nova sequência de dados codificada, a janela deslizante, composta pelo dicionário e pelo *buffer* de busca, é deslocada da direita para esquerda k vezes, onde k representa o tamanho da sequência codificada. Os símbolos mais antigos da janela deslizante são descartados enquanto novos símbolos são inseridos. A sequência codificada agora passa a fazer parte do dicionário. Cada sequência localizada é substituída por um código composto por três informações: distância, comprimento e próximo símbolo, conforme ilustrado na Figura 18. No início do processo de compressão o dicionário é inicializado com todas as posições zeradas e o *buffer* de busca é carregado com os primeiro m símbolos do *buffer* ou arquivo a ser compactado.

Distância	Comprimento	Próximo Símbolo
-----------	-------------	--------------------

Figura 18: Código LZ

A distância descreve a posição no dicionário onde foi localizada a correspondência, o comprimento descreve o tamanho da correspondência localizada, e por fim, o primeiro símbolo do *buffer* de busca que não pertence àquela correspondência é salvo. O tamanho de cada código gerado depende diretamente do tamanho do dicionário e do *buffer* de busca. O tamanho do código gerado, em *bits*, é calculado conforme descrito na Equação (10).

$$L = \log_2(CD) + \log_2(CC) + CL \quad (10)$$

Na Equação (10) CD descreve o comprimento do dicionário e CC o comprimento do *buffer* de busca. A variável CL descreve o número de *bits* ocupado para armazenar a informação do próximo símbolo. Em grande parte das implementações os símbolos ocupam unidades múltiplas de 8 *bits*. O bloco correspondente ao dicionário tipicamente é muito maior que o bloco referente ao *buffer* de busca. Em implementações comerciais, como o GZIP, o dicionário tem tamanho típico de 32 *kbytes*, enquanto o comprimento do *buffer* de busca é tipicamente inferior a 1 *kbyte*. Considerando CD igual a 32 *kbytes* e CC igual a 1024, cada

código ocuparia 33 *bits*. Assim, sequências de símbolos são substituídas por um código de 33 *bits*. No entanto quando nenhuma correspondência é localizada, um código, indicando tamanho 0 e apontando para a posição 0 do dicionário, é utilizado para codificar um símbolo, o que reduz assim a capacidade de compressão do algoritmo. O tamanho dos parâmetros impacta diretamente na performance de compressão do algoritmo. Quanto maior o dicionário, maior a probabilidade de encontrar uma correspondência, porém, maior é o código gerado, assim como, maior é o custo computacional para localizar uma correspondência (HWANG, 2001).

Muitas variações ao algoritmo LZ77 foram propostas para aprimorar diferentes aspectos do algoritmo. Em 1982 Storer e Szymanski desenvolveram o algoritmo LZSS, o qual descrevia melhorias em relação ao algoritmo LZ77. O algoritmo LZSS apresenta melhorias em relação ao processamento do dicionário e do buffer de busca. Mas a maior contribuição está relacionada à forma de representação dos códigos. No algoritmo LZSS literais e códigos de sequência são representados de forma diferente, pois códigos literais e códigos de sequência são precedidos de um *bit* para indicar na codificação que está sendo codificado um tipo de código ou outro. Códigos de sequência são codificados com dois campos, ao invés de três campos como utilizado. A mudança está na remoção do campo literal, mas mantendo os campos de distância e comprimento da sequência (CHANG, 2010).

3.1.4 ALGORITMO DEFLATE

O algoritmo Deflate, o qual está baseado na combinação dos algoritmos LZSS e Huffman, foi desenvolvido por Philip Katz. Esse algoritmo foi originalmente adotado por diversas ferramentas de compressão, como por exemplo: GZIP, ZIP e PKZIP. A especificação do algoritmo Deflate é de domínio público e está disponível no documento RFC1951. O processo de compressão desse algoritmo está baseado na modificação da representação de um

conjunto de dados através da remoção de informações redundantes contidas naquele conjunto. A representação de um conjunto de dados, quando compactada pelo algoritmo LZSS, é substituída por uma representação mais eficiente, que explora a repetição de sequências de dados em regiões próximas entre si. A representação compactada do algoritmo LZSS é composta por três entidades: literais, distância e comprimento. Distância e comprimento formam um código que descreve o comprimento e a localização de uma sequência de dados correspondente em um dicionário. No algoritmo LZSS o dicionário é composto pelo conjunto formado pelos últimos N dados processados, onde N é dependente da implementação do algoritmo. Literais descrevem os dados que não foram compactados, que não tiveram correspondências localizadas (SOLOMON, 2004; YAZDANPANAHAH, 2011).

O algoritmo Deflate inicialmente compacta um conjunto de dados utilizando o algoritmo LZSS. Num segundo passo, o algoritmo reduz as redundâncias das entidades que compõem a representação de dados. A redundância é reduzida através da substituição dos códigos gerados para cada entidade que compõe a codificação do algoritmo LZSS por representações mais eficientes codificadas através do algoritmo Huffman. São criadas duas árvores Huffman, uma para as entidades de comprimento e literais e outra para a distância. São criadas duas árvores, pois as entidades de comprimentos e literais possuem tamanhos similares. Literais são compostos por 256 símbolos, enquanto a entidade de comprimentos de comprimento é limitada em 258. A distância, no entanto, pode ser muito maior, pois seu tamanho depende do tamanho do dicionário. A representação da distância é codificada, sendo representada por um prefixo e um complemento. A informação de distância é então descrita pelo prefixo, o qual divide a distância em 32 faixas, seguido do complemento que tem tamanho variável em função da faixa. No algoritmo Deflate o tamanho do dicionário é limitado em 32 *kbytes* (CHANG, 2010).

3.2 ALGORITMOS DE COMPRESSÃO COM PERDAS

Os algoritmos de compressão de sinais com perdas podem ser classificados em duas categorias: compressão direta de sinais e compressão por transformação. A compressão direta de sinais está baseada na detecção de redundâncias diretamente sobre as amostras do sinal, enquanto métodos de compressão por transformação realizam a transformação do sinal para outro domínio, para então detectar redundâncias nesse sinal transformado (WEIMIN, 2008).

Maior parte das técnicas de compressão direta de sinais utilizam algoritmos de predição ou interpolação. Nesses algoritmos a redução da redundância é dada pela substituição de uma sequência de dados em torno de uma vizinhança por uma aproximação descrita por um polinômio. Cada algoritmo de compressão direta de sinais define um critério para aproximação da sequência de dados, a ordem do polinômio de aproximação, bem como sua representação. As técnicas mais difundidas na literatura estão baseadas na aproximação de uma sequência de dados por uma reta, no qual o número de pontos aproximado é definido por um limiar de erro. São aproximados aqueles pontos em que o erro é inferior ao limiar estabelecido. O trabalho elaborado por (JALALEDDINE, 1990) apresenta uma coletânea de métodos de aproximação.

A compressão por meio de transformação de domínio de representação, normalmente, não ocorre de forma isolada. O processo de transformação envolve a representação do conjunto de dados, por meio de uma transformada linear e ortogonal, em outro domínio onde a entropia daquele conjunto seja menor. Essa nova representação, com maior redundância, é então comprimida por algum algoritmo codificador de entropia (SOLOMON, 2004). Muitas transformadas ortogonais discretas foram desenvolvidas e aplicadas na compressão de dados: transformada de Karhunen-Loeve, Fourier, Wavelet, Haar, Walsh, entre outras. No entanto, na representação eficiente de sinais elétricos, as transformadas Wavelet e Fourier são as mais empregadas. A DFT, ou seu algoritmo eficiente a FFT, é empregada na análise de sinais

estacionários, enquanto transformada Wavelet é aplicada na decomposição de sinais não estacionários (BOLLEN, 2006).

3.3 ALGORITMOS DE COMPRESSÃO APLICADOS À QEE

O volume de estudos aplicados no campo de compressão de dados de QEE não cresceu com a mesma velocidade com que o interesse por QEE vem crescendo. Ainda há poucas publicações a respeito do assunto, e em sua grande parte direcionados à compressão de eventos transitórios. Poucos são os trabalhos direcionados à compressão de parâmetros de QEE e da oscilografia do sistema elétrico.

No artigo de (SANTOSO, 1997) é apresentado um dos primeiros trabalhos de compressão de dados dedicado à QEE. Nesse artigo é apresentada uma técnica de compressão de distúrbios de QEE baseada na transformada Wavelet. Primeiramente o sinal é decomposto com o uso da transformada Wavelet. A compressão do sinal é então executada no domínio Wavelet, através da remoção dos coeficientes da transformada que não estão relacionados com a descrição do distúrbio. Segundo os autores (SANTOSO, 1997) a amplitude dos coeficientes que descrevem o distúrbio são maiores que aqueles que não estão associados ao evento, como por exemplo, os coeficientes que descrevem o ruído associado ao sinal. São armazenados somente os coeficientes que têm amplitude superior a um limiar, enquanto os demais são removidos. O limiar está baseado no valor máximo absoluto dos coeficientes da transformada Wavelet associados a cada nível de detalhamento, como definido na Equação (11).

$$\mu = u \cdot \max(|d_s(n)|) \quad (11)$$

Em (11) u descreve um percentual e pode variar em 0 e 1. Um valor de 0,1 para u indica que coeficientes com amplitude inferior a 10% do valor máximo absoluto, daquele nível de detalhamento, serão removidos. A variável d_s descreve os coeficientes de

detalhamento de cada nível. Por fim os coeficientes remanescentes são codificados e armazenados juntamente com suas posições. Segundo resultados apresentados no artigo, o método apresenta taxas de compressão variando entre 16% e 33%.

Em (PANDA, 2002; DASH, 2003; SHANG, 2003) são apresentados métodos de compressão de eventos transitórios, os quais utilizam métodos baseados no trabalho apresentado em (SANTOSO, 1997). O método proposto por (PANDA, 2002) faz uso da Transformada Slantlet (SLT) para compressão. A SLT é uma transformada Wavelet ortogonal discreta com localização de tempo aprimorada. Esse trabalho também está baseado no processo de transformação do sinal e posterior descarte de coeficientes que não sejam representativos do distúrbio analisado. No entanto, nesse método o parâmetro de controle é a taxa de compressão. Uma vez definida a taxa de compressão são removidos os coeficientes da transformada para atingir a taxa de compressão definida. O trabalho proposto por (DASH, 2003) está fundamentado no trabalho desenvolvido por (SANTOSO, 1997), utilizando inclusive a mesma técnica para remoção dos coeficientes de menor energia. A contribuição desse trabalho está no emprego da transformada Spline em substituição a transformada Wavelet. Baseado no trabalho de (SANTOSO, 1997) os autores do trabalho (SHANG, 2003) apresentam uma análise da taxa de compressão e dos erros na reconstrução de sinais para diferentes funções Wavelet mãe no processo de transformação.

O trabalho desenvolvido em (RIBEIRO, 2001) apresenta mais um método de compressão de distúrbios de QEE baseado na transformada Wavelet. No entanto, diferentemente do trabalho apresentado por (SANTOSO, 1997), nesse trabalho as componentes senoidais são removidas, mantendo somente a informação referente ao distúrbio. A estimação da frequência das componentes senoidais é feita através de um filtro *notch* adaptativo, enquanto a fase é estimada por um filtro Kalman. Por fim, o sinal contendo

somente as informações do distúrbio é transformado para o domínio Wavelet e então compactado com o algoritmo LZW.

O trabalho apresentado em (RAMOS, 2002) discute os resultados apresentados no trabalho em (RIBEIRO, 2001). Conforme (RAMOS, 2002) as taxas de compressão apresentadas em (RIBEIRO, 2001) são reduzidas quando há presença de componentes harmônicos no sinal ou quando a estimação da frequência fundamental é imprecisa. Nesses casos, componentes de alta energia estarão presentes em todos os níveis de decomposição da transformada Wavelet. Em (RAMOS, 2002) é proposta uma nova técnica de estimação da frequência e da fase da componente fundamental do sinal. Em substituição ao estimador proposto em (RIBEIRO, 2001) é utilizado um filtro *notch* adaptativo e um filtro passa-baixa do tipo FIR de 64ª ordem para estimação tanto da frequência quanto da fase.

O trabalho apresentado por (RIBEIRO, 2007) apresenta uma evolução dos trabalhos desenvolvidos por (RIBEIRO, 2001; RAMOS, 2002). Nesse trabalho é proposto um novo método de codificação para sinais de tensão e corrente, o qual é uma generalização do método apresentado em (RAMOS, 2002). O método separa o sinal em duas componentes e aplica a cada componente uma técnica diferente de compressão. O sinal é dividido em uma componente determinista formada pela componente fundamental e seus harmônicos e inter-harmônicos, e numa componente não determinística, formada por transitórios e ruído. Conforme método proposto, as componentes senoidais são comprimidas pela codificação dos parâmetros que caracterizam cada componente. O processo adaptativo, baseado nos critérios apresentados no trabalho (BARRON, 1998), define os critérios de decomposição e compressão do sinal, os quais envolvem a escolha da melhor base que representa o sinal, em função de um dicionário de bases, envolve a definição do número de níveis de decomposição necessários e a definição do número de *bits* necessários na quantização dos coeficientes da transformada Wavelet. Os autores (RIBEIRO, 2007) também propõem um novo método para

detecção dos parâmetros das componentes senoidais (amplitude, frequência e fase), baseado no trabalho apresentado por (RIBEIRO, 2004). O método proposto consiste na combinação da Transformada *Warped* DFT (WDFT), bancos de filtros *notch* adaptativos e uma rede neural *multilayer perceptron*.

Em (KRAUS, 2009) é apresentada uma análise comparativa da performance de compressão de diferentes algoritmos de compressão sem perdas na compressão de parâmetros de QEE.

3.4 AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE COMPRESSÃO

Muitas são as definições de expressões para avaliar a performance de compressão encontradas na literatura. Uma das expressões mais difundidas para avaliar a performance de compressão tanto de algoritmos de compressão com perdas como algoritmos de compressão sem perdas é definida na Equação (12), a qual descreve a taxa de compressão.

$$TC = \left(\frac{S}{S_C} \right) \quad (12)$$

Em (12) a taxa de compressão é definida como a razão entre o tamanho em *bytes* do conjunto a ser comprimido, definido por S , e o conjunto comprimido, definido por S_C .

4 DESENVOLVIMENTO DOS ALGORITMOS DE COMPRESSÃO APLICADOS À QEE

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de dois algoritmos de compressão aplicados à QEE. O primeiro algoritmo apresentado tem como foco a compressão de registros de QEE, enquanto o segundo algoritmo objetiva a compressão da oscilografia de medição. Ambos os algoritmos foram modelados com foco na implementação em arquiteturas reconfiguráveis, como por exemplo, em FPGA.

Como ferramenta de desenvolvimento, modelamento e validação dos algoritmos, utilizou-se o MATLAB[®].

A primeira seção desse capítulo apresenta o desenvolvimento das técnicas de compressão que compõem os algoritmos de compressão aplicados à QEE desenvolvidos neste trabalho. Nas seções 2 e 3 são apresentados os algoritmos de compressão desenvolvidos e por fim na seção 4 são apresentados os resultados obtidos, em simulações, para a performance de compressão dos algoritmos.

4.1 DESENVOLVIMENTO DOS MÓDULOS BÁSICOS DE COMPRESSÃO

Os algoritmos de compressão discutidos nesta seção são utilizados no desenvolvimento dos algoritmos de compressão aplicados à QEE. Nessa seção é apresentado o desenvolvimento, assim como melhorias as propostas aos algoritmos. As modificações propostas visam o aumento de performance de compressão e execução dos algoritmos desenvolvidos.

4.1.1 ALGORITMO DE COMPRESSÃO POLINOMIAL

O algoritmo de compressão polinomial é um algoritmo de compressão com perdas, o qual visa diminuir a entropia do sinal para que então, algum algoritmo codificador de entropia

comprima o sinal com a máxima taxa possível. A Figura 19 ilustra os módulos que compõem esse algoritmo.

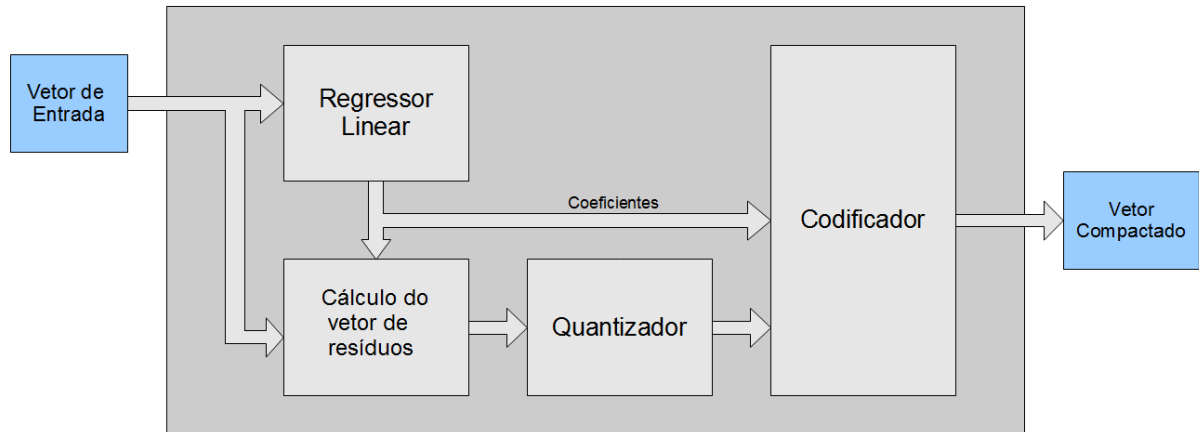


Figura 19: Modelo do módulo compressor polinomial.

Conforme Figura 19, o módulo é composto por quatro blocos principais:

- a) regressão linear;
- b) cálculo de resíduos
- c) quantização;
- d) codificação.

O módulo de regressão linear tem por função aproximar um conjunto de pontos pela melhor reta que descreve aquele conjunto. Uma reta é descrita por dois coeficientes: coeficiente angular e coeficiente linear, os quais são descritos respectivamente pelas Equações (13) e (14). A Equação (15) descreve a reta aproximada pelos coeficientes a e b .

$$a = \frac{N \cdot \sum_1^N (x_i \cdot y_i) - \sum_1^N x_i \cdot \sum_1^N y_i}{N \cdot \sum_1^N x_i^2 - (\sum_1^N x_i)^2} \quad (13)$$

$$b = \frac{N \cdot \sum_1^N x_i^2 \cdot \sum_1^N y_i - \sum_1^N x_i \cdot \sum_1^N y_i}{N \cdot \sum_1^N x_i^2 - (\sum_1^N x_i)^2} \quad (14)$$

$$y_i = ax_i + b \quad (15)$$

Em (13), (14) e (15) x e y descrevem as variáveis independentes e dependentes de uma função, respectivamente. O conjunto y é formado pelos pontos a serem compactados, os quais estão representados em ponto flutuante de precisão simples, enquanto o conjunto x , por simplicidade de implementação em *hardware*, é definido como um conjunto de N elementos inteiros, onde N descreve o número de pontos a serem aproximados pela equação, com seus valores definidos de 0 à $N-1$.

Cada conjunto de pontos a ser compactado é dividido em subconjuntos de N pontos e para cada subconjunto é calculado um par de coeficientes, os quais descrevem a melhor reta que aproxima aquele subconjunto de pontos. O número de pontos utilizados na regressão linear, descrito nas Equações (13) e (14) por N , impacta diretamente na qualidade da aproximação e na performance de compressão. Utilizar N muito grande implica em pior aproximação, caso a dispersão dos dados seja muito grande, porém reduz o número de coeficientes que necessitam ser armazenados.

O conjunto de pontos a ser compactado assim como os coeficientes da regressão linear, de cada subconjunto de pontos, é utilizado como entrada para o módulo de cálculo dos resíduos. A partir da reta calculada para cada subconjunto de N pontos, é calculado um vetor de resíduos, conforme descreve a Equação (16).

$$r(i) = y(i) - (a \cdot i + b) \quad (16)$$

Em (16) r descreve a diferença de cada ponto do subconjunto de N pontos, em relação a cada ponto correspondente da reta descrita pelos coeficientes que melhor aproximam aquele subconjunto.

O novo subconjunto formado pelos resíduos de cada subconjunto em relação à reta de aproximação é então quantizado. A quantização visa à transformação de um dado representado em ponto flutuante, seja de precisão simples ou precisão dupla, em um número inteiro. O número de *bits* utilizados na quantização é dependente da dispersão dos dados e da

implementação. Diferentes critérios de quantização podem ser definidos. O critério adotado neste trabalho está baseado no valor de fundo de escala, ou de referência, e na incerteza de medição definida na norma para a grandeza a ser compactada, conforme descreve a Equação (17).

$$r_q(i) = \text{round} \left(r(i) \cdot \frac{V_{ref}}{\left(\frac{I_p}{100}\right)} \right) \quad (17)$$

Em (17) o vetor quantizado r_q é descrito como o produto do vetor de resíduos r por um fator de quantização, seguido de um processo de arredondamento que visa a conversão de um número representado em ponto flutuante ou em ponto fixo. O fator de quantização é definido pelas constantes V_{ref} e I_p , na qual V_{ref} define o valor de referência definido na norma para aquela grandeza, ou ainda pode ser definido como o fundo de escala de medição. A constante I_p descreve a incerteza percentual definida na norma.

A representação em ponto fixo pode ser de tamanho fixo para todos os subconjuntos ou de tamanho variável, isto é, em função da quantização, utilizar a quantidade necessária de *bits* para representar aquele subconjunto. Na implementação com tamanho fixo para todos os subconjuntos, caso a quantização de algum ponto não seja possível de representar, com o número de *bits* definidos na representação de ponto fixo definida, diferentes estratégias podem ser adotadas. Pode-se representar aquele subconjunto em especial com um número maior de *bits* ou salvar o vetor de resíduos representando em ponto flutuante, indicando assim que aquele subconjunto não foi quantizado.

Antes do processo de cálculo do vetor de resíduos, o coeficiente angular da reta de aproximação pode ser zerado caso seu valor seja desprezível. É considerado como desprezível o coeficiente que tiver módulo menor que o fator de quantização.

Um exemplo que ilustra os resultados parciais do processo de cálculo da regressão linear, cálculo dos resíduos e por fim quantização é ilustrada na Figura 20.

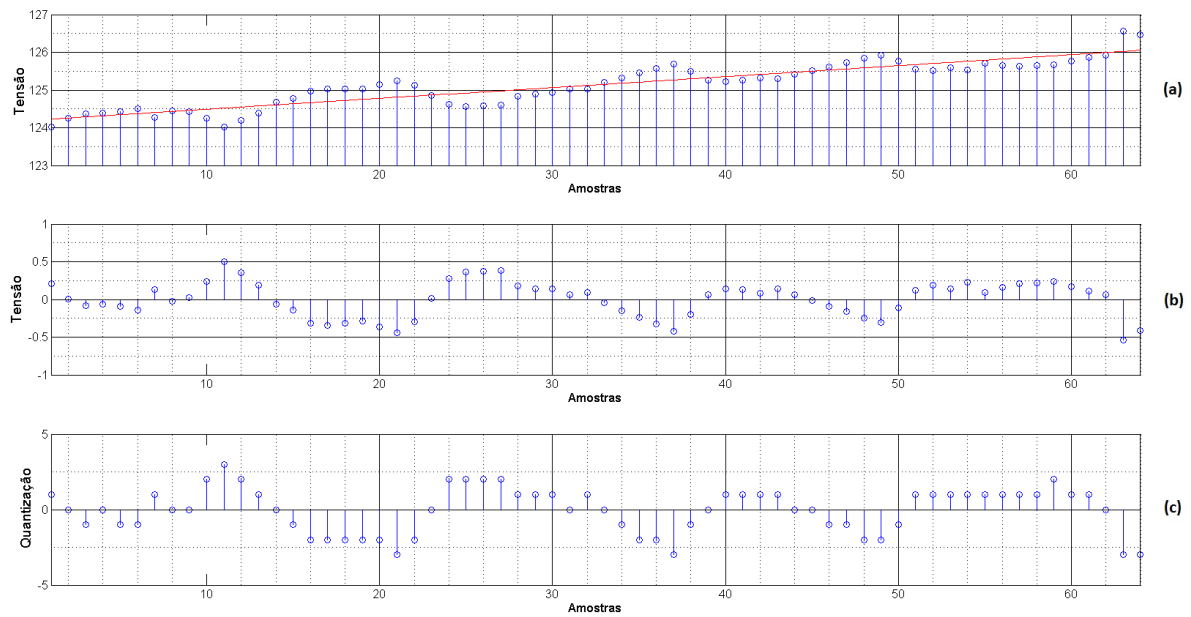


Figura 20: Processo de aproximação polinomial

(a) Vetor de dados e reta de aproximação (b) vetor de resíduos (c) vetor de resíduos quantizado.

A Figura 20a ilustra um subconjunto de 64 amostras de uma medição. Esse subconjunto, a partir do cálculo da regressão linear, é aproximado por uma reta. A partir dessa reta é calculado um vetor de resíduos, descrito pela diferença entre cada ponto do conjunto e seu ponto correspondente da reta. O resultado desse processo é ilustrado na Figura 20b. Por fim o vetor de resíduos é quantizado, o qual é ilustrado na Figura 20c.

O módulo codificador tem por finalidade agrupar os coeficientes das retas de aproximação e os vetores de resíduos de cada subconjunto em uma estrutura de dados, a qual é ilustrada na Figura 21.

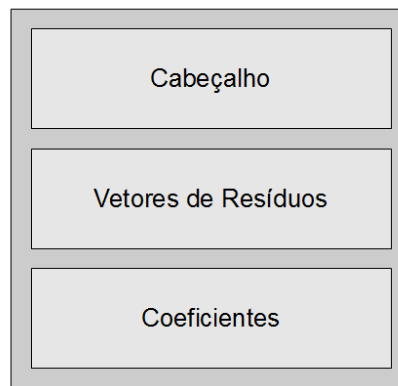


Figura 21: Estrutura de dados do módulo compressor polinomial

A estrutura de dados, conforme ilustrado na Figura 21, é composta por três blocos principais: cabeçalho, vetores de diferença e coeficientes de reta. O cabeçalho armazena informações necessárias para o processo de descompressão dos dados. A Tabela 2 apresenta os dados que compõem o cabeçalho, bem como sua descrição e o espaço ocupado.

Tabela 2: Cabeçalho da estrutura de dados do módulo compressor polinomial

Campo	Tamanho do Campo (bits)	Descrição
1	16	Número de subconjuntos
2	16	Número de pontos aproximados em cada aproximação
3	16	Número de <i>bits</i> utilizados na quantização
4	32	Parâmetro de referência da quantização
5	32	Parâmetro de incerteza da quantização

Para cada subconjunto é definido um par de parâmetros de quantização, descritos pelos parâmetros 4 e 5, os quais são alocados em sequência no cabeçalho.

Os vetores de resíduos são agrupados na parte central da estrutura de dados, no entanto, antes de serem armazenados esses vetores são codificados. Essa codificação tem por função reduzir a entropia dos dados. Para diminuir a entropia desse conjunto de pontos, é alterada a representação dos dados e a forma como são organizados na memória. Primeiramente a representação de números negativos é feita utilizando representação *bit* sinal ao invés da representação por complemento de 2, tipicamente utilizada em sistemas digitais. Em um segundo passo o armazenamento dos dados é reorganizado. Nessa nova organização, os dados são organizados horizontalmente, formando palavras de memórias, as quais

consistem de *bits* de mesmo peso de dados sequenciais, conforme ilustra a representação da Tabela 3.

Tabela 3: Vetor de resíduos representado como uma matriz

P_0	P_1	...	...	P_{n-1}	P_n
b15	b15	...	...	b15	b15
b14	b14	...	...	b14	b14
b13	b13	...	...3	b13	b13
...
b3	b3	...	...	b3	b3
b2	b2	...	...	b2	b2
b1	b1	...	...	b1	b1
b0	b0	...	...	b0	b0

A Tabela 3 ilustra os dados de um vetor de resíduos como uma matriz, onde cada coluna representa um ponto e as linhas representam os *bits* de cada ponto representado em ponto fixo. Nessa codificação cada palavra de memória é formada por *bits* de mesmo peso de pontos em sequência, como indicam as setas sobre a Tabela 3. Na implementação optou-se por palavras de 8 *bits*, neste caso a cada 8 *bits* de mesmo peso é formada uma nova palavra de memória. Essa codificação busca tirar proveito de aproximações em que os dados têm pequena dispersão em torno da reta de aproximação. Nessa condição, utilizando a codificação proposta, há a formação de cadeias de zeros nos *bits* mais significativos.

O último bloco da estrutura de dados é formado pelos coeficientes de aproximação das retas. São primeiramente dispostos na memória os coeficientes angulares de todas as aproximações, seguido pelos coeficientes lineares. Essa disposição busca tirar proveito da possibilidade dos coeficientes angulares a serem zerados, caso tenham amplitude inferior ao fator de quantização. Sequências de coeficientes zerados podem ser facilmente exploradas por codificadores de entropia.

4.1.2 ALGORITMO ILZ

Com base na especificação do algoritmo LZSS, foram propostas modificações para otimizar tanto a performance de compressão, quanto a performance de execução do algoritmo. A esse algoritmo deu-se o nome de *Improved LZ* (ILZ).

O princípio de compressão do algoritmo ILZ está baseado na substituição de sequências de dados por códigos que apontam para a posição do dicionário onde a correspondência foi localizada, bem como o comprimento. Caso não seja localizada uma correspondência para algum símbolo, esse símbolo é armazenado com um código específico, indicando que este é um símbolo não compactado. A Figura 22 ilustra os formatos dos códigos ILZ.

0	Literal (8)	
1	Distância (N)	Comprimento (M)

Figura 22: Código LZ gerado para uma correspondência no dicionário

O primeiro *bit* dos códigos ilustrados na Figura 22 tem por função identificar se o código trata de uma sequência compactada ou de um literal isolado. Caso não tenha sido localizada nenhuma correspondência no dicionário é emitido um código que armazena o literal que não foi localizado no dicionário, nesse caso o primeiro *bit* é identificado com o valor 0, seguido do símbolo literal. Quando localizada a correspondência de uma sequência é emitido um código identificado com o primeiro *bit* com valor 1. Seguem ao primeiro *bit* os campos de distância, o qual aponta para a posição do dicionário onde está localizada a correspondência, e o campo de comprimento, o qual indica quantos símbolos compõem aquela correspondência. O tamanho dos campos distância e comprimento, indicados pelas letras N e M, dependem do tamanho do dicionário e do *buffer* de busca.

Os subconjuntos de dados, gerados como saída do compressor polinomial, a serem compactados nesse trabalho apresentam sequências compostas por símbolos de valor 0 ou 255

em sequência. Com intuito reduzir codificação dessas sequências foi agregado ao codificador LZ um codificador RLE, o qual trata esses dois casos especiais. Para comportar o tratamento desses casos foi alterado o formato do código LZ, como segue na Figura 23.

Literal	00	Símbolo (8)	
LZ	01	Distância (N)	Comprimento (M)
RLE 0	10	Comprimento (M)	
RLE 255	11	Comprimento (M)	

Figura 23: Códigos ILZ

Conforme ilustra a Figura 23, na codificação proposta, o campo de identificação do código é formado por 2 *bits*. Foram inclusos dois códigos destinados à identificação de sequências contínuas de símbolos 0 e 255, as quais dizem respeito aos códigos 10 e 11. Na codificação dos códigos RLE não é necessária a informação de distância, somente o comprimento da sequência.

O processo de comparação dos símbolos a serem compactados com os símbolos do dicionário é bastante custoso computacionalmente, pois envolve uma quantidade muito grande de comparações, que aumenta diretamente com o aumento do tamanho do dicionário e do bloco de busca. Por exemplo, para um dicionário de 32768 símbolos, para cada símbolo que se busca codificar, deve-se compará-lo com todos os símbolos do dicionário. Para aquelas posições em que forem localizadas correspondências, a comparação continua para identificar qual o tamanho da correspondência, sendo ao final do processo selecionado a maior correspondência.

Implementações em hardware permitem a comparação de todos os símbolos do dicionário, com cada símbolo do bloco de busca, de forma paralela, através da implementação de N comparadores simultâneos, em que N é definido pelo tamanho do dicionário. O trabalho

apresentado por (BONGJIN, 1998) apresenta uma arquitetura de comparação paralela para a implementação do algoritmo LZ. No entanto, nessa arquitetura, a área destinada à implementação de comparadores, um para cada posição do dicionário, é bastante significativa, o que inviabiliza o uso dessa implementação em muitas arquiteturas, principalmente aquelas destinadas a sistemas embarcados. Uma solução para reduzir a área ocupada pelos comparadores e os elementos de memória, seria reduzir o tamanho do dicionário, no entanto a capacidade de compressão do algoritmo LZ está diretamente relacionada ao tamanho do dicionário.

A solução proposta passa pela divisão do dicionário em B blocos, no qual B indica o número de blocos. Então um bloco de dados de tamanho K, é compactado, utilizando como dicionário cada uma das B partes do dicionário. No fim do processo é selecionada entre as B compressões, correspondentes a cada bloco do dicionário, a que obteve melhor taxa de compressão, isto é, aquela em que foram gerados menos códigos LZ para representar o bloco comprimido. Assim passam a ser necessários N / B comparadores, ao invés dos N comparadores necessários originalmente. Essa solução permite redução no número de comparadores, sem necessidade de redução do tamanho do dicionário.

4.1.3 ALGORITMO DEFLATE

Nesse trabalho foram propostas melhorias ao algoritmo Deflate, as quais visam explorar características específicas do sinal a ser compactado e otimizar a performance do algoritmo para que seja executado em sistemas embarcados.

Primeiramente, por simplicidade de implementação em *hardware*, foi substituído o algoritmo Huffman pelo algoritmo Shannon-Fano. Originalmente no algoritmo Deflate eram criadas duas árvores Huffman, uma para codificar a informação de distância e outra para literais e comprimento das correspondências detectadas, os quais compartilham uma mesma

árvore Huffman. Nessa implementação, no entanto, são criadas três tabelas Shannon-Fano: distância, literais, e comprimento.

Outra modificação realizada Deflate diz respeito à inclusão de um compressor RLE ao algoritmo Deflate. O compressor RLE, por característica, substitui uma sequência de símbolos repetidos por um código de repetição. A codificação horizontal do vetor de resíduos tem por característica gerar com frequência sequências de *bytes* de valor 0 ou 255, dependendo da dispersão dos dados. Essas sequências específicas, com o intuito de melhorar a taxa de compressão, são tratadas separadamente por um compressor RLE, ao invés de dependerem de uma correspondência no dicionário LZ.

Mudanças também foram feitas na codificação dos códigos Deflate, e na codificação das árvores Huffman, as quais foram substituídas por tabelas Shannon-Fano. As tabelas Shannon-Fano têm uma codificação especial, utilizada para reduzir a memória por elas ocupada. Também foram definidas tabelas Shannon-Fano com códigos padrão. A codificação do campo de distância, no entanto, segue o formato definido na RFC1951.

4.1.3.1 Codificação dos campos de dados

Nesta seção é discutido o formato da codificação gerada para cada tipo de codificação que compõem o algoritmo Deflate. Essa codificação tem por finalidade, juntamente com o codificador Shannon-Fano, melhorar a performance de compressão dos dados compactados com o codificador ILZ. Essa codificação busca remover redundância da codificação ILZ através da redução da entropia de cada um dos campos que compõem a codificação, e também, através de uma representação mais eficiente de cada um dos quatro códigos definidos. A Figura 24 ilustra o formato geral de um código Deflate.

1	2	3	4
Literais (0 – 255)	Código Distância	Bits Extras	Comprimento
Código 256	Código 30		
	Código 31		

Figura 24: Formato geral de um código Deflate

Os quatro códigos definidos na codificação ILZ são codificados utilizando o formato geral definido na Figura 24, no entanto, os campos utilizados variam de um código para outro. São geradas três codificações Shannon-Fano, referentes aos campos 1, 2 e 4. O alfabeto do campo 1 é composto por 257 literais (0 a 256), no entanto, o literal 256 é utilizado como um código especial. O alfabeto do campo 2 é formado por 32 códigos, em que os códigos 0 a 29 correspondem à codificações de faixas de distâncias, e os códigos 30 e 31 são utilizados como códigos especiais. O alfabeto do campo 4 é dependente do tamanho máximo da sequência que pode ser detectada pelo codificador ILZ, nesse trabalho o alfabeto é composto por 256 símbolos que correspondem a faixa de 3 a 258. É utilizada a faixa iniciando em 3, porque sequências inferiores a 3, detectadas pelo codificador ILZ, são salvas como literais.

Em relação à formação dos códigos Deflate, por exemplo, um código ILZ do tipo 0, o qual corresponde a um dado literal, utiliza somente o primeiro campo do formato geral. No entanto, esse campo não é preenchido com o símbolo literal, mas sim com o seu código Shannon-Fano correspondente.

O código ILZ do tipo 1 corresponde a uma sequência de dados substituída pelo par (distância, comprimento). A Figura 25 ilustra o código ILZ no formato Deflate.

1	2	3	4
Literal 256	Código Distância	Bits Extras	Comprimento

Figura 25: Codificação Deflate do código ILZ 1

O campo 1, conforme ilustra Figura 25, é preenchido com o código Shannon-Fano correspondente ao literal 256. Esse código especial indica que há informação no campo 2. Em função desse código preenchido no campo 2 é definido se esta codificação corresponde a um código ILZ do tipo 1, 2 ou 3. Para um código ILZ do tipo 1, o campo 2 é preenchido com a codificação Shannon-Fano correspondente a uma das faixas de distância definidas na RFC1951. A informação de distância é complementada com a informação preenchida no

campo 3, a qual tem tamanho variável, que depende da faixa da distância. A Tabela 4 apresenta a divisão das faixas de distância e o tamanho, em *bits*, do campo 3 necessário para complementar a informação de distância.

Tabela 4: Codificação do campo de distância

Código	Faixa	Bits Extras
0	1	0
1	2	0
2	3	0
3	4	0
4	5,6	1
5	7,8	1
6	9-12	2
7	13-16	2
8	17-24	3
9	25-32	3
10	33-48	4
11	49-64	4
12	65-96	5
13	97-128	5
14	129-192	6
15	193-256	6
16	257-384	7
17	385-512	7
18	513-768	8
19	769-1024	8
20	1025-1536	9
21	1537-2048	9
22	2049-3072	10
23	3073-4096	10
24	4097-6144	11
25	6145-8192	11
26	8193-12288	12
27	12289-16384	12
28	16385-24576	13
29	24577-32768	13

Conforme Tabela 4, quando a faixa da distância corresponder a uma das faixas em que o número de *bits* extra é 0, o campo 3 não é inserido na codificação. Por fim, a codificação do código ILZ do tipo 1 é finalizada com a informação do campo 4, a qual corresponde a informação do comprimento da sequência de dados codificada.

Os códigos ILZ do tipo 2 e 3 correspondem a seqüências de dados codificados através do algoritmo RLE, em que o código 2 corresponde a uma seqüência de *bytes* de valor 0 e o código 3 a uma seqüência de *bytes* de valor 255. A codificação ILZ é ilustrada na Figura 26.

1	2	4
Código 256	Código 30	Comprimento
	Código 31	

Figura 26: Codificação Deflate dos códigos ILZ tipo 2 e 3

A codificação Deflate desses campos é composta somente pelos campos 1, 2 e 4. E o que diferencia esses dois códigos ILZ na codificação Deflate é o campo 2. Quando preenchido o campo 2 com o código Shannon-Fano referente ao código 30 do alfabeto desse campo, a codificação estará se referindo a um código ILZ tipo 2, caso contrário, quando preenchido o campo 2 com o código Shannon-Fano referente ao código 31 do alfabeto, essa codificação estará se referindo a um código ILZ do tipo 3.

4.1.3.2 Codificação das tabelas Shannon-Fano

As tabelas Shannon-Fano geradas, referentes aos campos 1, 2 e 4 da codificação Deflate devem ser armazenadas juntamente com a codificação dos dados para que esses possam ser decodificados. No entanto, as tabelas são armazenadas codificadas. Essa codificação visa reduzir a memória ocupada, que se dá pela redução da memória ocupada por símbolos do alfabeto que não tem código Shannon-Fano atribuído. O código Shannon-Fano de cada símbolo do alfabeto é armazenado seguindo o formato descrito pela Figura 27.

Comprimento do Código (L)	Código (M)
------------------------------	------------

Figura 27: Codificação dos códigos Shannon-Fano

O código é formado por dois campos, os quais têm tamanhos variáveis. O código correspondente a cada símbolo do alfabeto é armazenado sequencialmente seguindo o formato da Figura 27. O primeiro campo indica o tamanho do código gerado para aquele

símbolo, indicado por M no segundo campo. O segundo campo corresponde propriamente à informação do código gerado. O tamanho do primeiro campo depende do tamanho do maior código gerado no processo de geração da tabela Shannon-Fano. O tamanho do campo é calculado como definido na Equação (18).

$$L = \log_2(\log_2(\max(LC))) \quad (18)$$

Em(18), LC representa o tamanho de cada código gerado. A informação do tamanho do campo 1, representada por L é armazenada no cabeçalho da codificação da tabela. Cada tabela é precedida de um cabeçalho composto por dois campos, como segue na Figura 28.

TIPO (3)	L (5)
------------	-------

Figura 28: Cabeçalho da codificação de um dicionário

O primeiro campo do cabeçalho ocupa 3 *bits* e indica qual dos dicionários que está sendo codificado. No segundo campo é armazenada a informação do tamanho do primeiro campo da codificação dos códigos da tabela Shannon-Fano.

4.2 ALGORITMO DE COMPRESSÃO DE REGISTROS DE QEE

Esse algoritmo tem por objetivo comprimir dados relacionados à medição de parâmetros de QEE, como por exemplo:

- a) variações de tensão e corrente;
- b) variações de frequência;
- c) agrupamentos de harmônicos de tensão e corrente;
- d) desequilíbrio de tensão;
- e) *flicker*.

Alguns dos parâmetros de QEE definidos nas normas são registrados em períodos de tempo bem específicos (*flicker*, variações de frequência), no entanto, outros (variações de

tensão, agrupamentos de harmônicos e inter-harmônicos, desequilíbrio de tensão) são registrados e agregados em mais de um período de tempo.

Nesse trabalho está se assumindo que os parâmetros de QEE são representados em ponto flutuante de precisão simples, no entanto, outros formatos de representação numérica não inviabilizam o algoritmo.

As medições dos parâmetros de QEE, mesmo em pequena amplitude, são compostas por uma componente não estacionária. As medições de variações de tensão, por exemplo, mesmo em pequena amplitude, apresentam variações de uma medida agregada para outra, correspondentes a muitos fatores: incerteza da medida, variações de carga, variações do gerador, ruído, entre outros fatores. A Figura 29 ilustra uma medição de variação de tensão agregada em períodos de 200 ms.

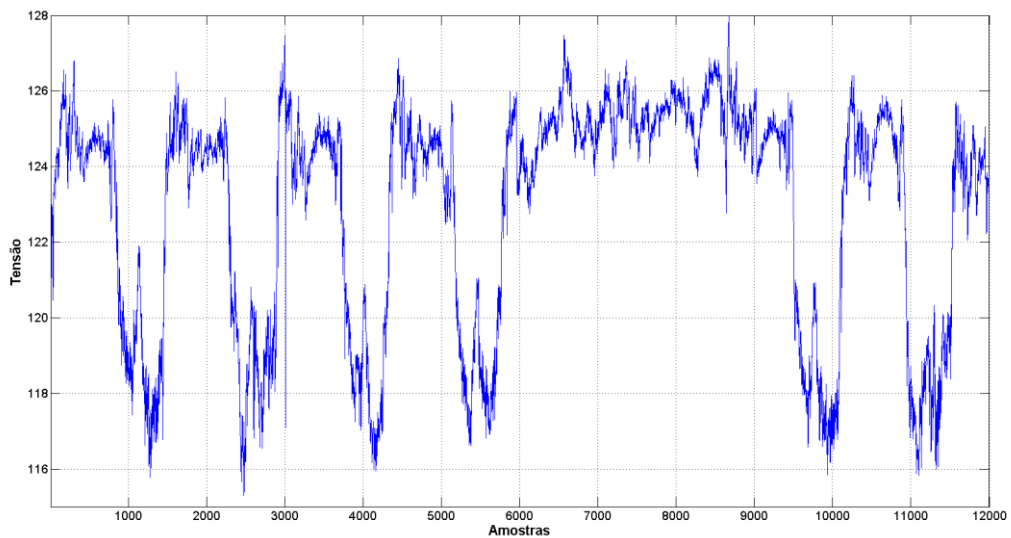


Figura 29: Medição de tensão agregada a 200 ms.

O algoritmo de compressão de parâmetros de QEE é composto por um conjunto de técnicas de compressão aplicadas em sequência. A Figura 30 apresenta as técnicas que compõem o algoritmo.

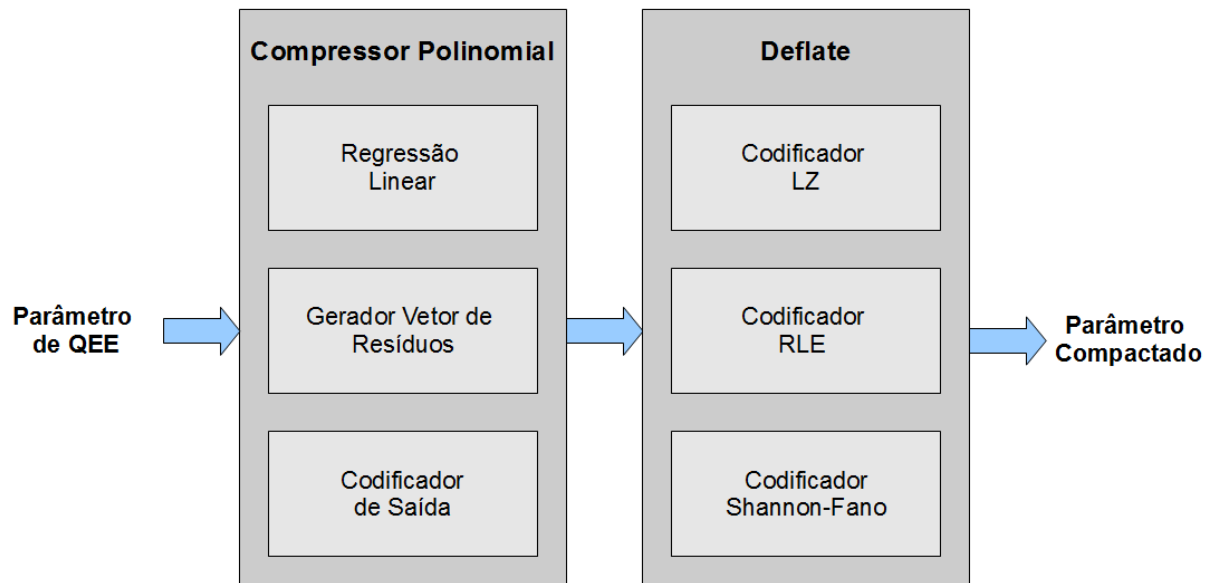


Figura 30: Arquitetura do algoritmo de compressão de parâmetros de QEE.

O algoritmo é composto por dois módulos principais, módulo compressor polinomial e o módulo Deflate, os quais são implementados a partir da composição de diferentes técnicas de compressão.

O sinal ilustrado na Figura 29, se dividido em pequenos conjuntos de pontos, pode ser aproximado por uma reta somada a um sinal não estacionário de amplitude inferior ao valor de fundo de escala da medição. Esse é um dos princípios utilizados pelo algoritmo de compressão desenvolvido. O módulo compressor polinomial aproxima um conjunto de pontos por uma reta, descrita por seus coeficientes, somado a um vetor de resíduos, o qual representa a componente não estacionária.

O vetor de resíduos antes de ser compactado pelo módulo Deflate é quantizado e codificado. A quantização é um método de compressão com perdas. O erro de quantização pode ser enxergado como um ruído de medição somado ao erro de medição do equipamento. Portanto, para não influenciar de forma significativa no processo de medição, o erro inserido pelo processo de quantização, somado ao erro de medição do equipamento, deve ser inferior à incerteza de medição definida pelas normas para aquele parâmetro de QEE.

Para alguns parâmetros de QEE, a Norma IEC 61000-4-30 define a incerteza de medição em relação a um valor de referência, que pode estar relacionado ao sistema a ser medido ou a uma característica do equipamento de medida. Nesses casos, a quantização é definida, conforme Equação (17), pelo valor de referência e pela incerteza de medição definida na Norma. Para aqueles parâmetros em que não está definido um parâmetro de referência, pode ser definido o fundo de escala da medida daquele parâmetro. Por exemplo, na medição da tensão eficaz, é definido como valor de referência o parâmetro U_{din} , o qual descreve o valor nominal do equipamento de análise de QEE.

A incerteza de medição, definida na Norma IEC, varia significativamente entre os diferentes parâmetros de QEE medidos. A incerteza também é dependente da classe de medição do equipamento de análise. A incerteza admitida pela Norma IEC 61000-4-30, para a medição da tensão eficaz, para um equipamento classe A é de 0.1 % do valor de referência U_{din} , enquanto para um equipamento classe S é de 0.5%. A incerteza na medição de harmônicos de tensão e corrente é de 5%, variando a faixa de medição em que esta incerteza deve ser atendida, em função da classe do equipamento da amplitude do harmônico medido. A faixa de medição também é função do valor nominal de medição definido pelo fabricante. Ainda há parâmetros em que tanto a definição da faixa de medição, quanto da incerteza, fica a critério do fabricante, como é o caso da medição de inter-harmônicos.

O processo de quantização é a única técnica de compressão com perdas que compõe esse algoritmo. A quantidade de informação removida do sinal é dependente da parametrização do módulo. Dependendo dos parâmetros escolhidos melhor ou pior é a aproximação dos vetores de resíduo, no entanto, maior ou menor será a quantidade de informação contida. Assim, ao passo que aproximações pobres podem vir a resultar em melhores taxas de compressão; são aumentados os erros inseridos no sinal armazenado.

Ao término do processo de compressão do sinal, pelo compressor polinomial, a saída desse módulo, a qual é composta pelos coeficientes da regressão linear e pelos vetores de resíduo codificados, é então transferida para o módulo Deflate. O módulo Deflate é algoritmo de compressão composto por um conjunto de técnicas de compressão sem perdas. A estrutura de dados resultante, a qual representa os dados ao fim do processo de compressão, é ilustrada na Figura 31.

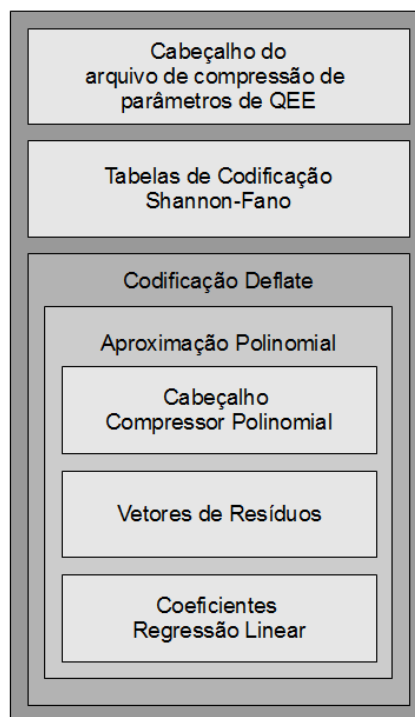


Figura 31: Estrutura de dados do arquivo de compressão de parâmetros de QEE.

Conforme ilustra a Figura 31, o arquivo é composto por três blocos principais: cabeçalho, tabelas de codificação Shannon-Fano e o bloco de dados compactados. O bloco de dados corresponde à saída do compressor polinomial codificada pelo algoritmo Deflate. A saída do compressor polinomial, a qual é dividida em três blocos principais (cabeçalho, vetores de resíduo, coeficientes) é tratada como um conjunto de *bytes*, independentemente do formato de representação de cada dado que compõe essa estrutura de dados, quando comprimida pelo módulo Deflate. No cabeçalho são armazenadas informações necessárias ao processo de descompressão. A Tabela 5 apresenta os dados que compõem o cabeçalho.

Tabela 5: Cabeçalho do arquivo de compressão de parâmetros de QEE

Campo	Tamanho do Campo (bits)	Descrição
TYPE	8	Identificação do tipo de tipo de arquivo e versão
BLOCK_LEN	8	Tamanho do bloco de dados compactado. Esse parâmetro é múltiplo de 512.
DICTION_LEN	8	Tamanho do dicionário utilizado pelo algoritmo ILZ. Esse parâmetro é múltiplo de 512
SEARCH_LEN	8	Tamanho do bloco de busca utilizado pelo algoritmo ILZ. Esse parâmetro é múltiplo de 64
NCODEWORDS	16	Número de código ILZ resultantes da compressão do bloco de dados
CHECKSUM	8	Código verificador do cabeçalho.

Compõem o cabeçalho do arquivo basicamente as parametrizações utilizadas na compressão dos dados pelo algoritmo ILZ. As demais parametrizações do algoritmo, como por exemplo, os parâmetros de quantização estão armazenados no cabeçalho do bloco de compressão polinomial. Ao final do cabeçalho foi inserido um campo de verificação de falhas, para verificar se no processo de armazenamento dos dados ou em uma eventual transmissão nenhuma informação foi corrompida.

4.3 ALGORITMO DE COMPRESSÃO DE OSCILOGRAFIA

Conforme os autores (RAMOS, 2002; RIBEIRO, 2007) um sinal elétrico pode ser decomposto em duas componentes como descrito na Equação (19).

$$x(n) = u(n) + v(n) \quad (19)$$

Em (19) a componente $u(n)$ descreve uma componente estacionária. Essa componente é basicamente composta por sinais senoidais, os quais descrevem a componente fundamental da rede elétrica, componentes harmônicos e componentes inter-harmônicos, conforme descrito pela Equação (5). A componente $v(n)$ descreve os eventos transitórios e ruído da medição.

A maior parte das técnicas de compressão de sinais elétricos, encontradas na literatura, está baseada na separação de componentes, conforme apresentado na Equação (19). No

entanto, a técnica de separação de componentes requer que as componentes transitórias sejam detectadas para então serem caracterizadas e comprimidas. Somente eventos detectados, por algum critério pré-definido, serão registrados, o que pode acarretar em perda de informação importante, caso algum evento importante não seja registrado. Ainda, as técnicas que compõem esse processo de separação e caracterização das componentes estacionárias e transitórias envolvem técnicas de processamento digital de sinais muito complexas de serem aplicadas em sistemas embarcados de tempo real (RIBEIRO, 2007).

A solução para o problema de perda de informações passa pelo registro contínuo da amostragem dos sinais de tensão e corrente. Com o registro da oscilografia dos canais de medição é possível pós-processar a medição, e assim, detectar eventos de diferentes níveis de severidade e também analisar os parâmetros de QEE em diferentes tempos de agregação.

O algoritmo proposto nesse trabalho segue o conceito de registro contínuo, dado pela compressão da amostragem dos canais de medição. O nível de detalhamento dos sinais é definido pela taxa de amostragem. A Norma IEC 61000-4-30 requer amostragem mínima de 128 pontos por ciclos para cálculo dos parâmetros de QEE, no entanto, a fim de melhorar a visualização de distúrbios transitórios, taxas de amostragem maiores podem ser utilizadas.

O algoritmo proposto não separa o sinal em componentes estacionária e transiente, no entanto, explora os períodos estacionários do sinal como forma de aumentar a taxa de compressão. Conforme (BOLLEN, 2006) não há sinais estritamente estacionários em sistemas elétricos reais, porém durante curtos períodos de tempo, quando as variações estatísticas nos parâmetros dos sinais são relativamente pequenas e lentas, o sinal pode ser analisado como estacionário. Nesses períodos em que o sinal pode ser analisado como estacionário, tipicamente, a energia do sinal está em sua grande parte concentrada na componente fundamental e em poucos harmônicos e inter-harmônicos. Outra vantagem do uso da FFT está fato dessa ferramenta já estar embarcada nos dispositivos de análise de QEE, uma vez que a

Norma IEC 61000-4-7 requer o cálculo de uma FFT *mixed radix* (FFTMR) de 1536 pontos para fins de análise de distorção harmônica. O algoritmo proposto é composto por diversas técnicas de compressão, conforme ilustra a Figura 32.

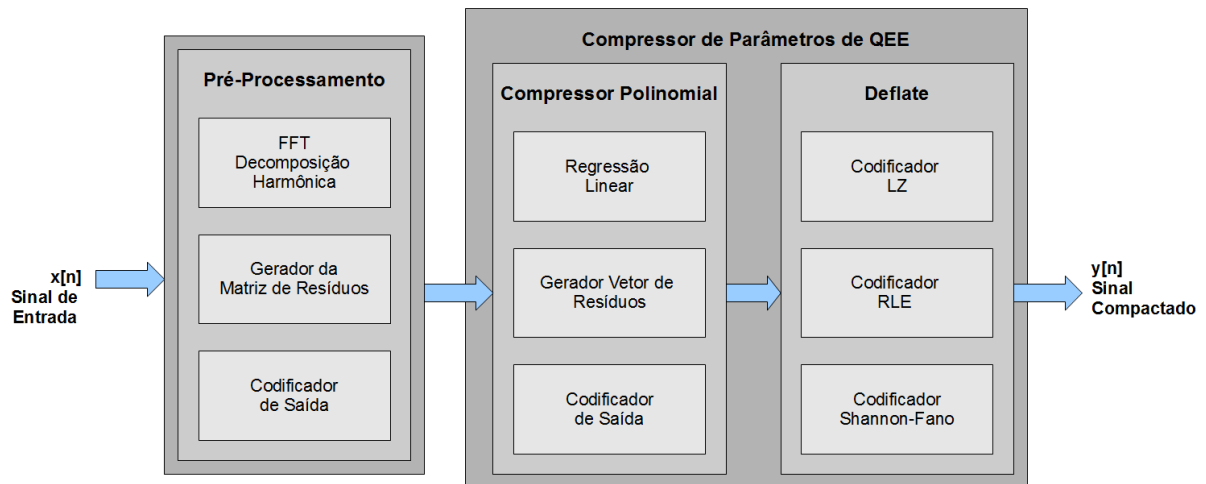


Figura 32: Modelo do algoritmo de compressão de oscilografia

O primeiro algoritmo, no modelo proposto na Figura 32, é dado por um módulo de pré-processamento do sinal, o qual é composto por três sub-módulos. Esse algoritmo de pré-processamento tem por função, transformar o sinal para o espaço frequência e então codificá-lo de tal forma que a informação contida no sinal seja concentrada em poucos pontos, reduzindo assim a redundância do sinal. A saída desse módulo de pré-processamento é então compactada pelo módulo formado pelo compressor polinomial e pelo algoritmo Deflate.

A descrição que segue é referente ao comportamento do algoritmo de pré-processamento, o qual considera o sinal amostrado a taxas de 128 pontos por ciclo, no entanto, outras taxas de amostragem são suportadas pelo algoritmo. Nesse trabalho consideram-se os sinais representados em ponto-flutuante de precisão simples, no entanto, representações em ponto fixo não inviabilizam a técnica.

A primeira etapa do pré-processamento do sinal é dada pela decomposição harmônica do sinal. Primeiramente, o sinal é dividido em blocos sobrepostos de 1536 pontos, e cada bloco é representado no domínio frequência através da FFTMR. Em sistemas amostrados à

taxa de 128 pontos por ciclo, cada bloco corresponde à amostragem de 12 ciclos consecutivos do sistema elétrico, em que o último ciclo de cada bloco é também utilizado como o primeiro ciclo do bloco seguinte. Essa sobreposição entre blocos é feita para reduzir o efeito de Gibbs, causado na reconstrução do sinal decomposto. Assim, no processo de reconstrução do sinal, depois de calculada a FFTMR inversa, é descartado em cada bloco o número de pontos correspondente a um ciclo de rede, sendo descartada metade dos pontos no início do sinal e a outra metade no final.

Como saída do módulo FFTMR, cada bloco de sinal é representado no domínio frequência por um vetor de 1536 números complexos. No entanto, no processo de compressão somente, somente 768 são utilizados, uma vez que, para sinais reais representados no domínio frequência pela FFTMR, a segunda metade dos pontos é o complexo conjugado da primeira metade.

A segunda etapa do processo de pré-processamento busca reduzir a entropia do sinal, quando este está em regime permanente. Inicialmente uma matriz é construída a partir do agrupamento de vetores referentes à N análises harmônicas consecutivas. A partir dessa matriz é criada uma segunda matriz, em que a primeira linha desta segunda matriz é a cópia da primeira linha da primeira matriz. As seguintes linhas da segunda matriz são obtidas do cálculo da diferença entre a primeira linha da matriz e a linha correspondente da primeira matriz. Esta matriz de resíduos corresponde ao cálculo da diferença entre a análise harmônica de um bloco de referência e os N blocos consecutivos. Nas situações, em que o sinal esteja em regime permanente, a tendência é que maior parte das linhas, que representam a diferença em relação ao bloco de referência, terão suas componentes harmônicas com amplitudes muito próximas de zero, concentrando a maior parte da informação no bloco de referência. Esse comportamento é especialmente interessante para o módulo de compressão polinomial.

O sinal de entrada para o módulo compressor polinomial é gerado pelo codificador de saída do módulo de pré-processamento. O codificador de saída tem por função transformar a matriz de resíduos em um vetor. Um vetor é criado a partir da concatenação de todas as linhas da matriz de resíduos. Esse vetor então é dividido em dois vetores, um formado pela parte real da matriz de resíduos e outro pela parte imaginária. Finalmente o vetor de saída é formado pela concatenação desses dois vetores.

O vetor de saída do módulo de pré-processamento é então codificado pelo compressor polinomial e então compactado pelo algoritmo Deflate, como se fosse um parâmetro de QEE.

Não há regulamentação definida no que diz respeito ao processo de registro da oscilografia, por conseguinte não está regulamentada a incerteza de medição admitida. Para tanto, se deve garantir que os erros adicionados ao registro da oscilografia, devido ao processo de compressão, não interfiram no processo de análise dos parâmetros de QEE.

A estrutura de dados resultante, a qual representa os dados ao término do processo de compressão, segue o formato definido na Figura 31, com a diferença em relação aos parâmetros do cabeçalho. A Tabela 6 descreve as informações que compõem o cabeçalho.

Tabela 6: Cabeçalho do arquivo de compressão dos registros de oscilografia.

Campo	Tamanho do Campo (bits)	Descrição
TYPE	8	Identificação do tipo de arquivo e versão
DICT_LEN	8	Tamanho do dicionário utilizado pelo algoritmo ILZ. Esse parâmetro é múltiplo de 512
SEARCH_LEN	8	Tamanho do bloco de busca utilizado pelo algoritmo ILZ. Esse parâmetro é múltiplo de 64.
NCODEWORDS	16	Número de código ILZ resultantes da compressão do bloco de dados
PPC	8	Taxa de amostragem (em pontos por ciclo). Esse parâmetro é múltiplo de 64.
N	8	Número blocos utilizados na construção da matriz de resíduos.
CHECKSUM	8	Código verificador do cabeçalho.

Basicamente, o cabeçalho do arquivo é composto pelas parametrizações utilizadas na compressão dos dados pelo algoritmo ILZ e dos parâmetros do módulo de pré-processamento.

As demais parametrizações do algoritmo, como por exemplo, os parâmetros de quantização, estão armazenados no cabeçalho do bloco de compressão polinomial.

4.4 SIMULAÇÕES

Não há uma regulamentação específica na área de QEE que trate da compressão de parâmetros de QEE. Poucos são os trabalhos que abordam esse tópico, uma vez que ainda são poucos os equipamentos de análise que implementam alguma tecnologia de compressão.

A fim de avaliar o comportamento do algoritmo, foi criado um banco de dados composto por medições de tensão e corrente oriundas de medições realizadas por equipamentos de análise de QEE. Em relação ao algoritmo de compressão de parâmetros de QEE, foi avaliada a performance de compressão somente em função da taxa de compressão. Apesar de o algoritmo ser classificado como um algoritmo de compressão com perdas, o erro inserido em cada ponto é controlado pela parametrização do módulo de quantização. A correta parametrização do módulo de compressão garante que o erro inserido na compressão de cada ponto registrado seja inferior ou equivalente ao erro de medição, podendo assim o erro de compressão ser desprezado.

A Tabela 7 apresenta a parametrização do algoritmo de compressão utilizada na análise da performance de compressão. Em relação ao módulo de quantização, devido a requisitos de implementação em *hardware*, definiu-se o uso de 16 *bits* para representação do vetor de resíduos quantizado.

Tabela 7: Parâmetros do algoritmo utilizados nos ensaios.

Campo	Parametrização	Descrição do Campo
BLOCK_LEN	32	Tamanho do bloco de dados compactado. Esse parâmetro é múltiplo de 512.
DICT_LEN	4	Tamanho do dicionário utilizado pelo algoritmo ILZ. Esse parâmetro é múltiplo de 512
SEARCH_LEN	4	Tamanho do bloco de busca utilizado pelo algoritmo ILZ. Esse parâmetro é múltiplo de 64

A Tabela 8 apresenta os resultados de compressão para sinais reais de tensão e corrente avaliados. Foi avaliada a compressão para incerteza de 0.1 e 0.5% requerida respectivamente por equipamentos Classe A e Classe S. O parâmetro de quantização relacionado ao valor de referência da tensão foi definido conforme U_{din} do equipamento utilizado e para a corrente definiu-se o fundo de escala do equipamento de medição.

Tabela 8: Análise da taxa de compressão

Classe	Máxima	Média	Mínima
A	16.23	9.83	5.83
S	25.87	14.75	9.89

Todos os parâmetros de QEE definidos na Norma IEC 61000-4-30 podem ser compactados a partir desse algoritmo, porém, cada parâmetro tem sua própria incerteza definida na Norma, sendo que o parâmetro da tensão eficaz é o que requer maior precisão na medição.

A taxa de compressão é muito dependente das características do sinal e do erro de quantização admitido pelo parâmetro a ser compactado. A compressão é melhor quando o vetor de diferenças tem baixa entropia, o que ocorre quando o sinal tem baixa dispersão em torno da reta de aproximação, necessitando assim poucos *bits* para representar os pontos quantizados.

Assim como ocorre na compressão de parâmetros de QEE, não há a definição de um banco de dados de sinais para análise e avaliação da compressão da oscilografia de medição. O que existe é um banco de dados elaborado pelo grupo de trabalho IEEE 1159.1, o qual define um conjunto de 60 sinais que descrevem diferentes distúrbios transitórios de QEE, em que, cada sinal tem duração de 6 ciclos do sistema elétrico amostrados à taxa de 256 pontos por ciclo. Esses sinais são largamente utilizados na literatura para análise de algoritmos de detecção de distúrbios e também para avaliação de algoritmos de compressão dedicados à

compressão de sinais transitórios. A Figura 33 ilustra um dos sinais que compõe o banco de dados.

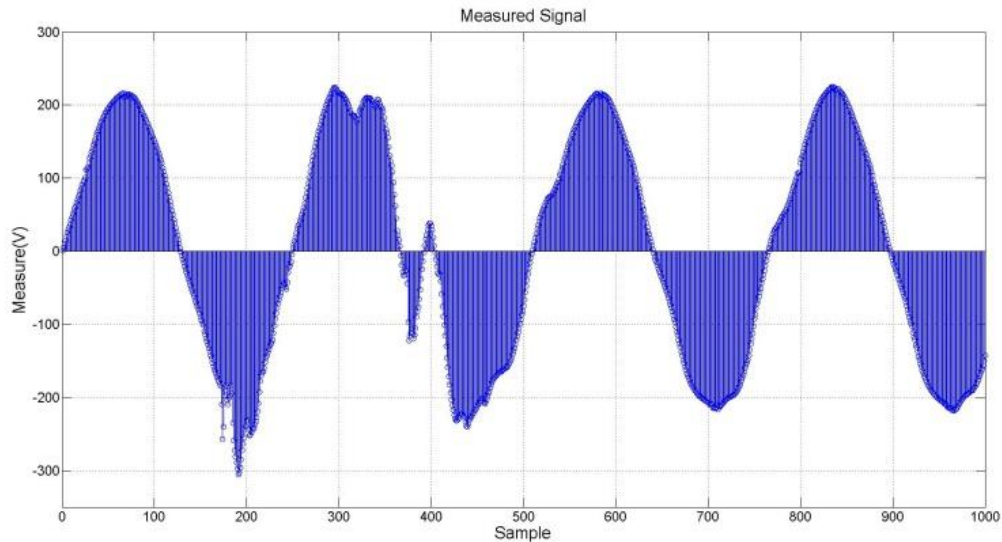


Figura 33: Sinal transitório que compõe o banco de dados da IEEE 1159.1.

Do ponto de vista da amostragem de oscilografia, os sinais definidos na IEEE 1159.1 têm curta duração. Para a compressão de um bloco de oscilografia, pelo algoritmo definido nesse trabalho, considerando a matriz de resíduos sendo gerada pela composição de 32 vetores, referentes a 6 ciclos do sistema elétrico amostrados à taxa de 256 pontos por ciclo, seria necessária a amostragem de 160 ciclos consecutivos do sistema elétrico.

Então, para analisar o algoritmo de compressão de oscilografia, foram definidos dois conjuntos de dados. O primeiro conjunto é formado por 50 sinais com 160 ciclos de duração, formados pelo agrupamento aleatório de sinais que compõem o banco de dados da IEEE 1159.1, o que cria um conjunto formado unicamente por sinais não estacionários. Esse conjunto de dados descreve uma situação muito particular e caótica em um sistema elétrico real, uma sequência de ciclos de rede formada por diferentes distúrbios transitórios em sequência. Esse teste visa analisar o comportamento do algoritmo sobre condições extremas, uma vez que a abordagem desse algoritmo busca explorar os períodos estacionários do sinal para aumentar a taxa de compressão.

Para avaliar o erro inserido no processo de compressão de oscilografia utilizou-se a definição do erro eficaz, que segue a Equação (20).

$$E_{RMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (S_u(i) - S(i))^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S(i)^2}} 100\% \quad (20)$$

O erro eficaz é definido como a razão entre o valor eficaz do erro e o valor eficaz do sinal original. Na Equação (20) S_u é definido como o conjunto de pontos do sinal reconstruído, enquanto S descreve o conjunto original.

A Tabela 9 ilustra os resultados obtidos no processo de compressão. Os resultados são avaliados em função da taxa de compressão e do erro eficaz do sinal reconstruído.

Tabela 9: Comportamento da compressão de um conjunto de sinais formado a partir do banco de dados da IEEE 1159.1

	Máximo	Médio	Mínimo
Taxa de Compressão	19.21	9.17	5.17
$E_{RMS}(\%)$	2.71	1.15	0.87

A Tabela 9 apresenta os valores máximos, mínimos e médios obtidos para cada parâmetro avaliado na compressão do conjunto de sinais não estacionários. Para avaliar o comportamento do algoritmo na compressão de sinais estacionários, foi elaborado um segundo conjunto sintético de sinais, composto por 50 sinais com duração de 160 ciclos e amostrados a 128 pontos por ciclo. A diferença entre cada sinal que compõe este conjunto está na composição harmônica e nos níveis de ruído introduzidos. No entanto, todos os sinais foram gerados respeitando os limites de distorção harmônica definidos na Norma IEC 61000-2-4. Os resultados obtidos para a compressão desse conjunto são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Comportamento da compressão de um conjunto de sinais formado por sinais estacionários.

	Máximo	Médio	Mínimo
Taxa de Compressão	279.33	48.23	21.58
$E_{RMS}(\%)$	0.282	0.128	0.087

5 IMPLEMENTAÇÃO EM HARDWARE RECONFIGURÁVEL

Este capítulo apresenta a implementação em arquitetura de hardware reconfigurável dos algoritmos de compressão polinomial e o algoritmo Deflate. Os módulos de compressão implementados são parte do projeto de um Circuito Integrado de Compressão e Descompressão de Registos de QEE (CODEC-PQ), desenvolvido pela Embrasul Indústria Eletrônica em parceria com UFRGS. O desenvolvimento destes algoritmos em hardware reconfigurável é parte do processo de teste e da validação conceitual dos algoritmos antes de sua implementação em arquitetura ASIC. Os módulos foram desenvolvidos em linguagem VHDL e sintetizados para uso em uma FPGA da família SPARTAN6 modelo LX75 da XILINX®.

A primeira seção apresenta o sistema onde serão utilizados os módulos de compressão. Na seção 2 é apresentada a implementação dos módulos que compõem o algoritmo de compressão polinomial. Por fim, na seção 3 é apresentada implementação em hardware reconfigurável do algoritmo Deflate.

5.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

O CODEC-PQ será utilizado como um co-processador, conectado a uma FPGA. A conexão entre os dispositivos é ilustrada na Figura 34.

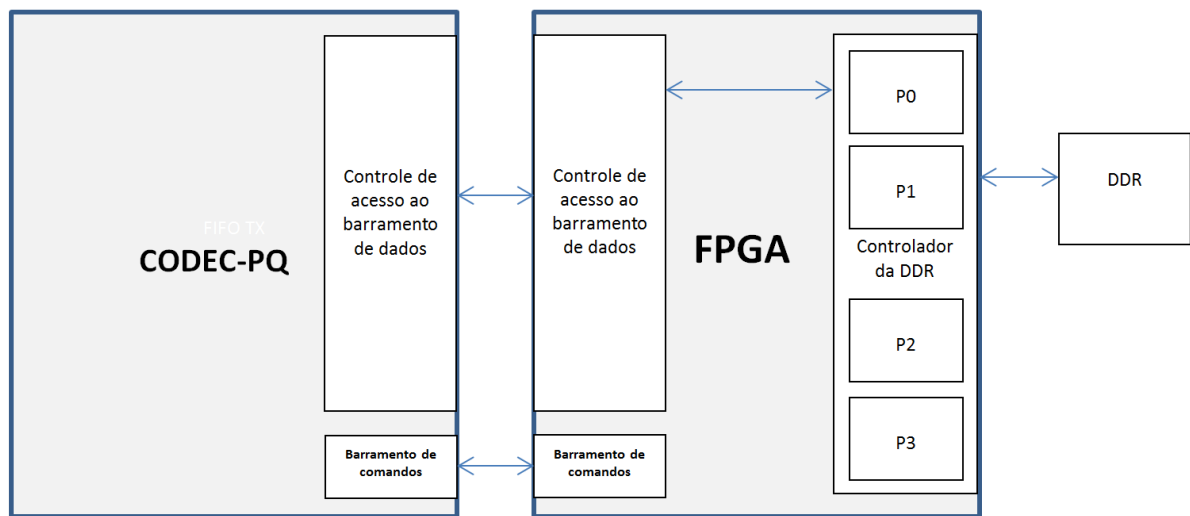


Figura 34: Modelo de conexão do CODEC-PQ

Conforme modelo proposto na Figura 34, o CODEC-PQ é conectado a uma FPGA. A esta FPGA também está conectada a uma memória DDR, onde são armazenados temporariamente os registros de QEE. A memória DDR está conectada a um controlador de memória interno a FPGA, o qual cria quatro portas multiplexadas para acesso ao barramento da memória DDR. A porta 0 é conectada ao CODEC-PQ através de um barramento de controle de acesso, dando assim acesso de leitura e escrita na DDR ao CODEC-PQ. Nesta memória são armazenados os dados temporários a serem compactados, bem como o resultado do processo e compressão. Uma vez comprimidos os dados, estes são transferidos da memória DDR para um cartão de memória. Devido ao acesso à memória DDR, não se faz necessária uma memória de grande capacidade conectada ao CODEC-PQ. No modelo proposto o CODEC-PQ é composto por um conjunto de pequenas memórias distribuídas, as quais compõem cada módulo de compressão ou descompressão, permitindo assim o processamento em pipeline de cada etapa do processo de compressão ou descompressão dos dados.

O processo de compressão e descompressão de registros é controlado pela FPGA através de um barramento de comunicação, o qual dá acesso a um banco de registradores. Através destes barramento a FPGA informa a posição na memória DDR onde estão os registros a

serem compactados, bem como a posição em que o registro compactado deve ser armazenado. Através deste barramento também é feita a parametrização do sistema de compressão.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MÓDULO COMPRESSOR POLINOMIAL

A implementação do módulo de compressão polinomial está dividida em dois módulos. O primeiro módulo, o qual é ilustrado na Figura 35, é responsável pelas etapas de regressão linear, geração do vetor de resíduos e quantização.

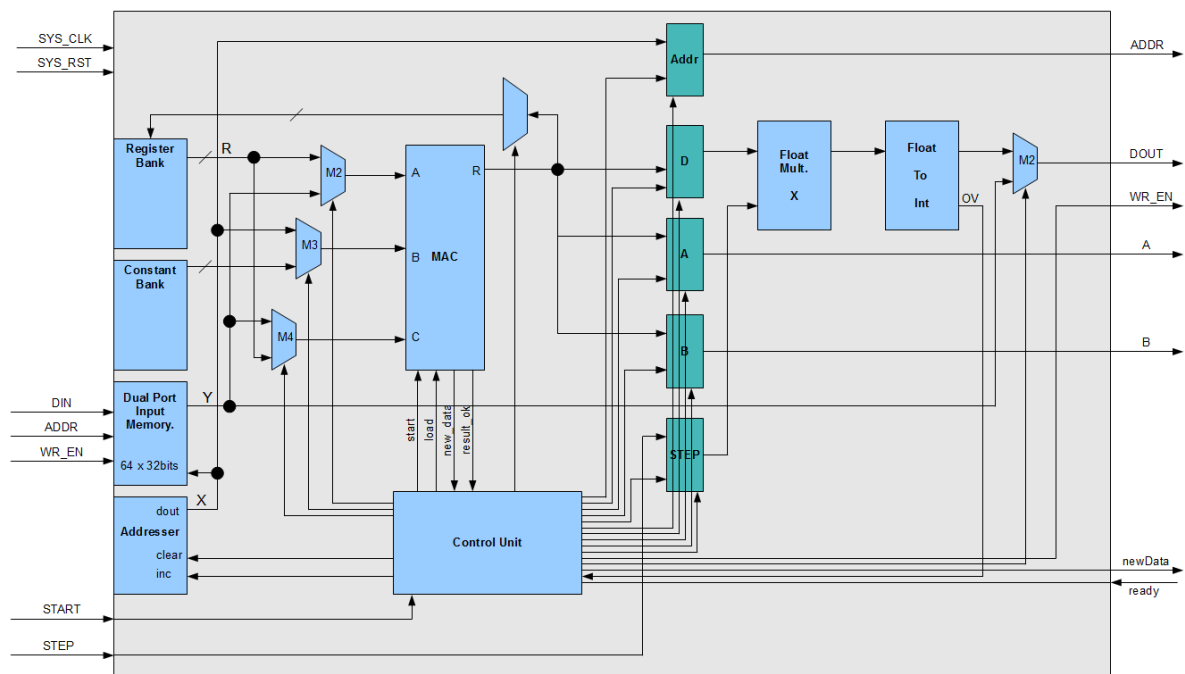


Figura 35: Arquitetura do módulo de compressão polinomial.

Conforme ilustra a Figura 35, o módulo é composto pelos seguintes blocos:

- a) unidade MAC de ponto flutuante;
- b) multiplicador de ponto flutuante;
- c) conversor de ponto flutuante para inteiro;
- d) memória dupla porta;
- e) controle de endereçamento;
- f) banco de registradores;

- g) banco de constantes;
- h) unidade de controle.

Na implementação do compressor polinomial, as expressões referentes ao processo de regressão linear, descritas pelas Equações (13) e (14), foram simplificadas. Todos os termos envolvendo somente a variável independente x_i foram substituídos por constantes, reduzindo assim significativamente o processo de cálculo. A Tabela 11 apresenta as constantes armazenadas na memória de constantes.

Tabela 11: Constantes

Endereço	Constante
0	0
1	1
2	-1
3	$-\sum X$
4	$\sum X^2$
5	N
6	$\frac{1}{N \cdot \sum_1^N x_i^2 - (\sum_1^N x_i)^2}$

Nessa implementação, conforme descrito nas Equações (13) e (14), N é definido em 64, isto é, a regressão linear é calculada para um conjunto de 64 pontos. Ao passo que o vetor de resíduos é quantizado em 16 *bits*. Nos casos em que a quantização de algum ponto ultrapassa a representação de ponto fixo de 16 *bits*, o conjunto é transferido para a memória no seu formato original, para evitar perdas significativas de informação.

O processo de compressão polinomial é iniciado quando a memória dupla porta de entrada é carregada com o conjunto de pontos a ser compactado e recebida a sinalização de início, dada pelo sinal *start*. Os cálculos de regressão linear, cálculo do vetor de resíduos e o cálculo da quantização são controlados pela unidade de controle. O primeiro processo executado é o cálculo dos coeficientes de regressão da reta, o qual está centrado no módulo MAC, no banco de registradores e na memória de constantes. As equações de regressão linear

são divididas em expressões menores e o resultado parcial de cada expressão é armazenado em um registrador do banco de registradores. Essa divisão das equações propicia que termos em comum nas Equações (13) e (14) sejam calculadas somente uma vez.

Uma vez finalizado o processo de regressão linear, dois processos são executados, o cálculo da matriz de resíduos e o cálculo de sua respectiva quantização. O processo de cálculo do vetor de resíduos é executado pela unidade MAC em conjunto com o banco de registradores. Enquanto o processo de quantização é executado pelo multiplicador de ponto flutuante e pelo conversor de ponto flutuante para ponto fixo. A quantização é calculada pelo produto de cada ponto do vetor de resíduos por um passo de quantização seguido por uma conversão de ponto flutuante para ponto fixo de 16 *bits*. Estes dois processos são executados em pipeline. Para cada ponto do vetor de resíduos calculado, em paralelo é calculada a quantização do ponto anterior.

Os pontos quantizados são transferidos para o módulo de codificação, o qual tem por função realizar a codificação do vetor de resíduos e montar a estrutura de dados do compressor polinomial. A Figura 36 ilustra a implementação do módulo de codificação.

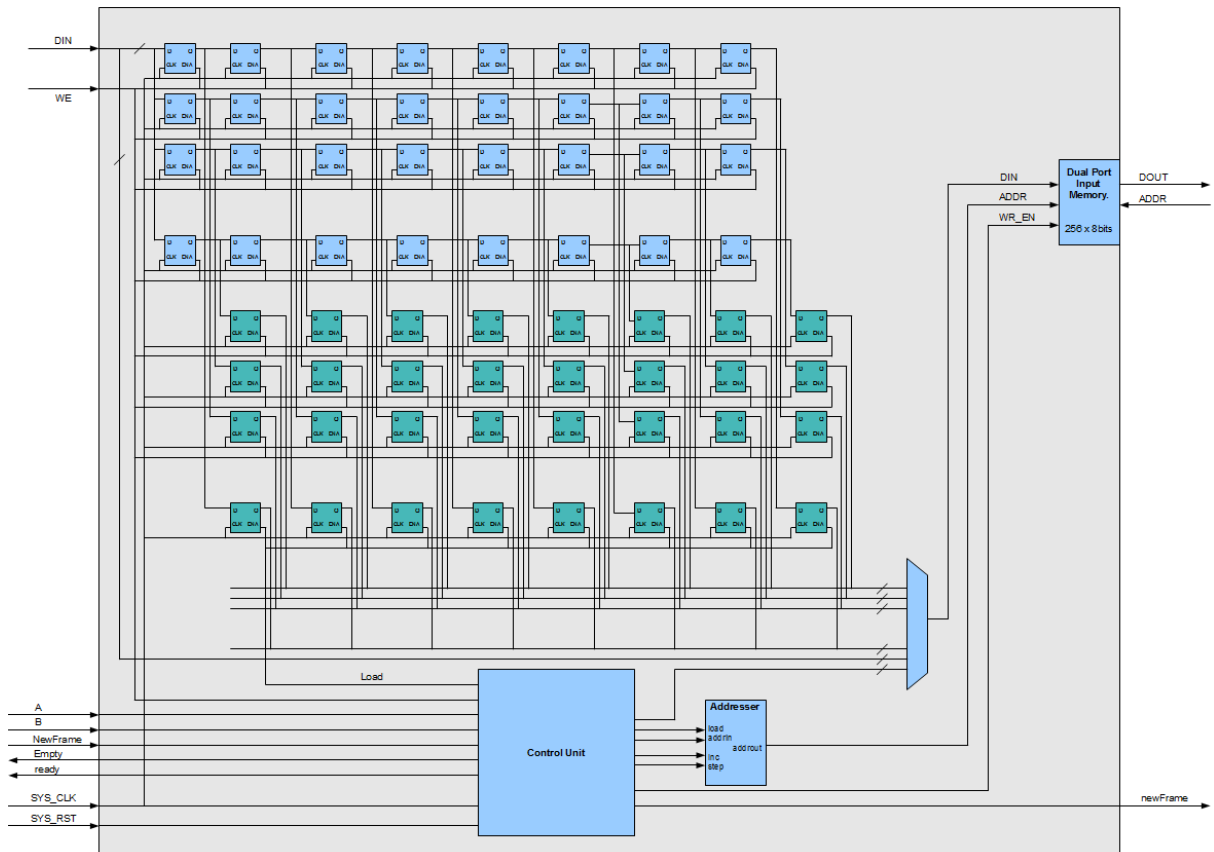


Figura 36: Módulo de codificação do compressor polinomial.

A entrada de dados do módulo codificador é formada por 16 cadeias compostas por 64 registradores de deslocamento. A cada palavra quantizada recebida essa é deslocada nessas cadeias de registradores de deslocamento. Ao receber os 64 pontos esse conjunto de registrador é copiado para um segundo conjunto organizado em 128 palavras de 8 *bits*. Essas 128 palavras são copiadas uma a uma para a memória de saída, a qual ao final do processo é copiada pelo barramento de dados do CODEC-PQ para a memória DDR.

Considerando o módulo operando à frequência de 100 MHz, o tempo máximo de execução do processo completo de compressão polinomial é de 72,4 μ s.

A Tabela 12 apresenta os recursos utilizados na síntese. A frequência máxima de operação admitida pelo módulo é de 103.87 MHz.

Tabela 12: Recursos Utilizados na implementação do compressor polinomial

Recurso	Utilizados	Disponível
<i>Slice Registers</i>	1746	93296
<i>Slice LUTs</i>	2221	46648
<i>Block RAM/FIFO</i>	1	172
DSP48A1s	1	132

5.3 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO DEFLATE

A implementação do algoritmo Deflate é dividida em três módulos: módulo ILZ, módulo Shannon-Fano e módulo de codificação. O algoritmo RLE é implementado como um processo do módulo ILZ.

As seções que seguem apresentam a implementação de cada módulo que compõem o módulo Deflate.

5.3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO CODIFICADOR ILZ

A implementação do módulo ILZ está baseado no trabalho apresentado por (BONGJIN, 1998). A arquitetura proposta nesse trabalho é ilustrada na Figura 37. A arquitetura proposta está baseada no armazenamento do dicionário em um registrador de deslocamento de tamanho igual ao tamanho do dicionário, o que permite rápida manipulação dos dados no dicionário e num módulo nomeado pelos autores como *Processing Element* (PE). A arquitetura é composta de um PE para cada índice do dicionário. O PE é responsável por comparar os dados do bloco de busca com cada posição do dicionário. A partir de um lógica de controle, a qual faz parte um decodificador de prioridade, é definida posição e o tamanho da maior correspondência localizada.

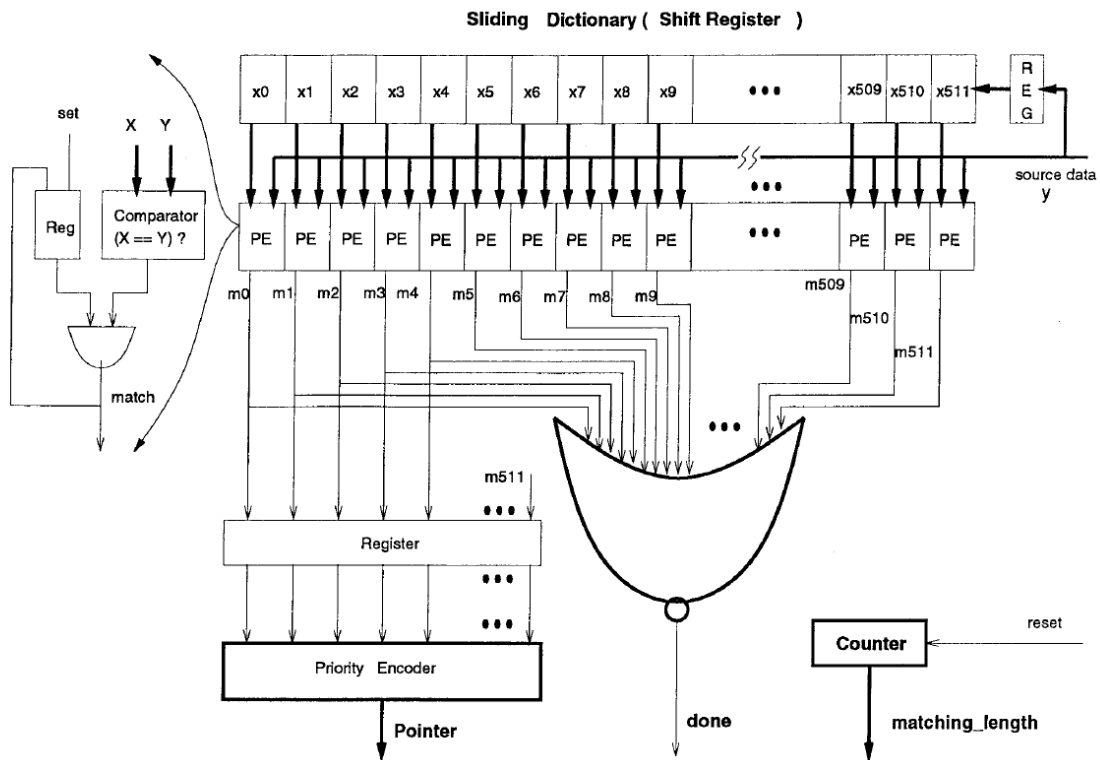


Figura 37: Arquitetura de um codificador LZ de alta performance

Na proposta desse codificador LZ, devido ao dicionário estar num registrador de deslocamento, a manipulação do mesmo é bastante simplificada. A cada novo dado do bloco de busca que é comparado, para inseri-lo no dicionário basta deslocar todo o registrador de deslocamento uma posição. O dado mais antigo será descartado e o novo dado vindo do bloco de busca será inserido na primeira posição do dicionário.

O codificador ILZ proposto neste trabalho reduz o número de PE necessários na implementação através do processamento do dicionário em blocos. Na implementação realizada foi definido um dicionário de tamanho 2048 com 512 PE. A arquitetura proposta é ilustrada na Figura 38.

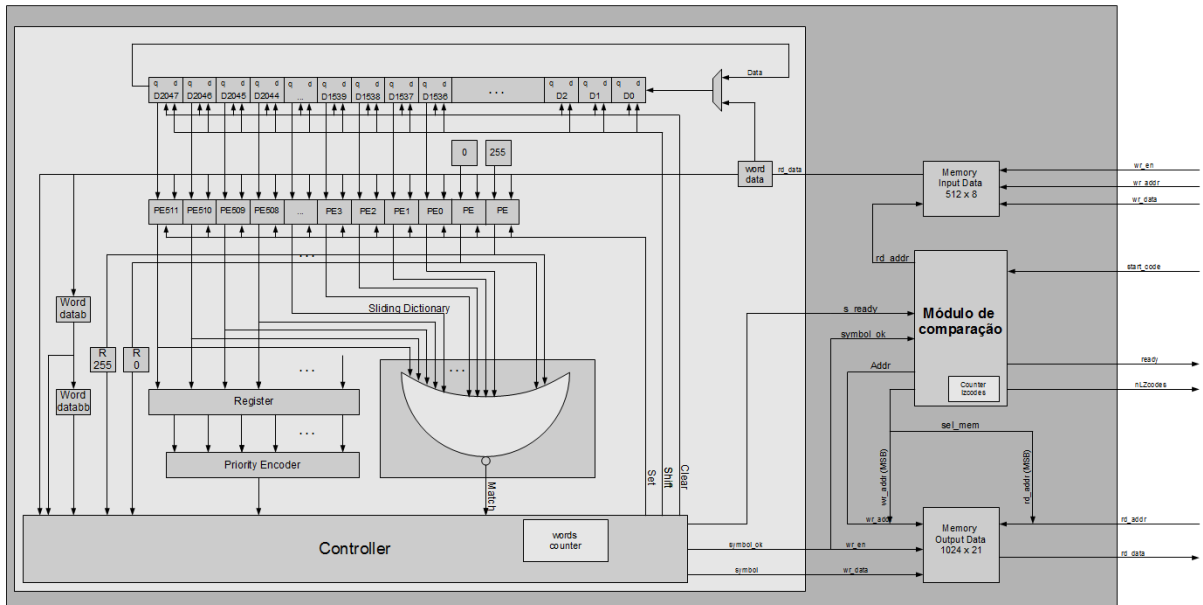


Figura 38: Arquitetura do compressor ILZ.

A arquitetura proposta na Figura 38, em relação a proposta da Figura 37, inclui uma memória de entrada, onde são inseridos blocos de dados a serem compactados, um módulo de comparação, responsável por verificar qual dos blocos compactados teve melhor taxa de compressão, e uma memória de saída.

No processo de compressão em blocos os PE comparam os dados do bloco de busca, os quais são representados pela memória de entrada com as últimas 512 posições do dicionário. A cada comparação com os dados do bloco de busca ao invés da última posição do dicionário ser descartada a mesma é rotacionada para primeira posição. Nesta condição os dados do bloco de busca também não são inseridos no dicionário. Os 512 dados do bloco de busca, os quais estão armazenados na memória de entrada são então compactados com cada bloco de 512 do dicionário, o qual é rotacionado de 512 em 512 posições pelo próprio processo de comparação com os dados do bloco de busca. Somente no bloco referente aos dados mais antigos do dicionário, que através de um MUX, é interrompido o processo de rotação e nesta condição os dados do bloco de busca são inseridos no dicionário.

Os dados do processo de compressão são salvos na memória de saída. Cada bloco compactado é comparado com o bloco anterior. Aquele que tiver maior taxa de compressão é mantido, sendo assim descartado o de menor taxa.

A identificação de sequências de dados de valor ou 255, utilizadas para a codificação RLE, é dada por dois PE que ao invés de compararem os dados do bloco de busca com a alguma posição do dicionário o fazem respectivamente com os valores 0 e 255.

A máxima frequência de operação, definida pela ferramenta de síntese, para esse módulo é de 128,83 MHz. A Tabela 13 apresenta os recursos utilizados na implementação.

Tabela 13: Recursos utilizados na implementação do codificador ILZ.

Recurso	Utilizados	Disponível
<i>Slice Registers</i>	6956	93296
<i>Slice LUTs</i>	7054	46648
<i>Block RAM/FIFO</i>	2	172
DSP48A1s	0	132

5.3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO CODIFICADOR SHANNON-FANO

O codificador Shannon-Fano é composto por quatro módulos principais:

- a) decodificador ILZ;
- b) ordenador de entrada;
- c) gerador da tabela;
- d) ordenador de saída;

A Figura 39 ilustra a organização dos módulos que compõem o codificador.

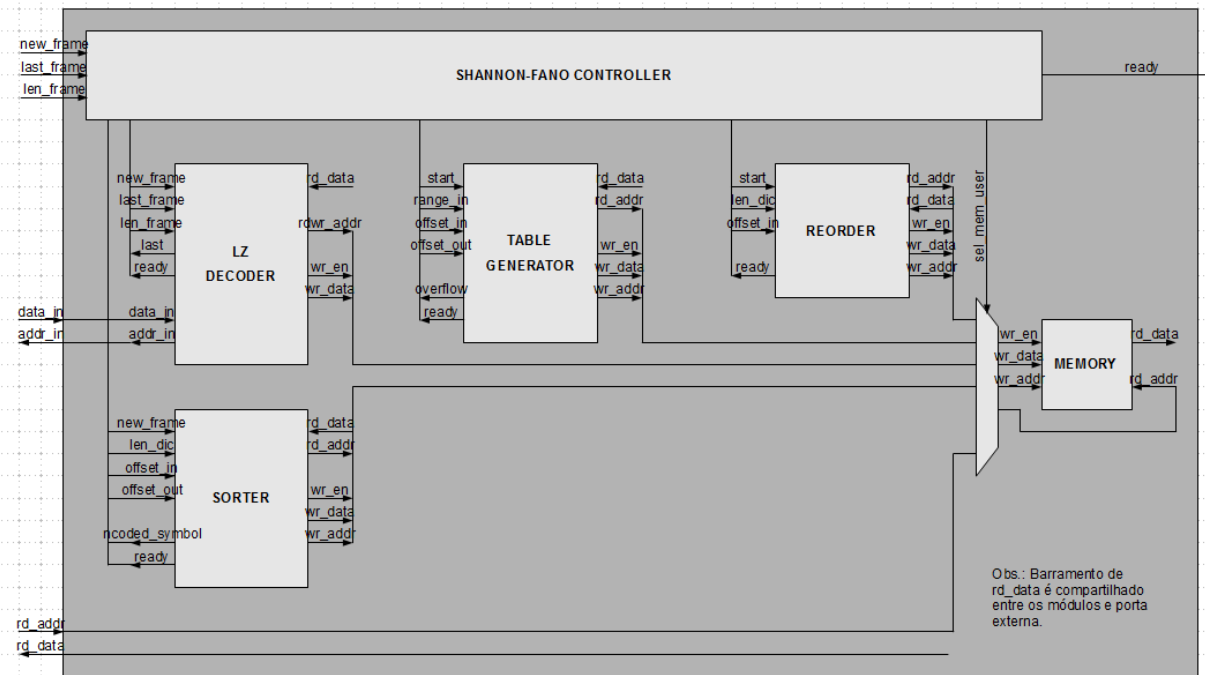


Figura 39: Arquitetura do módulo codificador Shannon-Fano.

Conforme ilustra a Figura 39, ainda compõem este módulo uma memória e um módulo controlador, responsável pelo controle de execução de cada módulo. A memória interna é uma memória dupla porta, a qual é compartilhada por todos os módulos que compõem o processo e também pela interface de saída do módulo.

O módulo decodificador ILZ tem por função decodificar os códigos ILZ do conjunto de dados compactados e assim gerar as distribuições de frequência dos campos literal, distância e comprimento. As distribuições de frequência são armazenadas na memória interna ao módulo, a qual será acessada pelo próximo módulo do processo.

Depois de criadas as distribuições de frequências, estas são ordenadas em função da ocorrência de cada símbolo pelo módulo ordenador de entrada. A arquitetura do módulo é ilustrada na Figura 40.

O módulo ordenador de entrada recebe como informações a localização da distribuição na memória interna, o número de símbolos que compõem a distribuição, bem como a posição onde deve ser armazenada a distribuição ordenada.

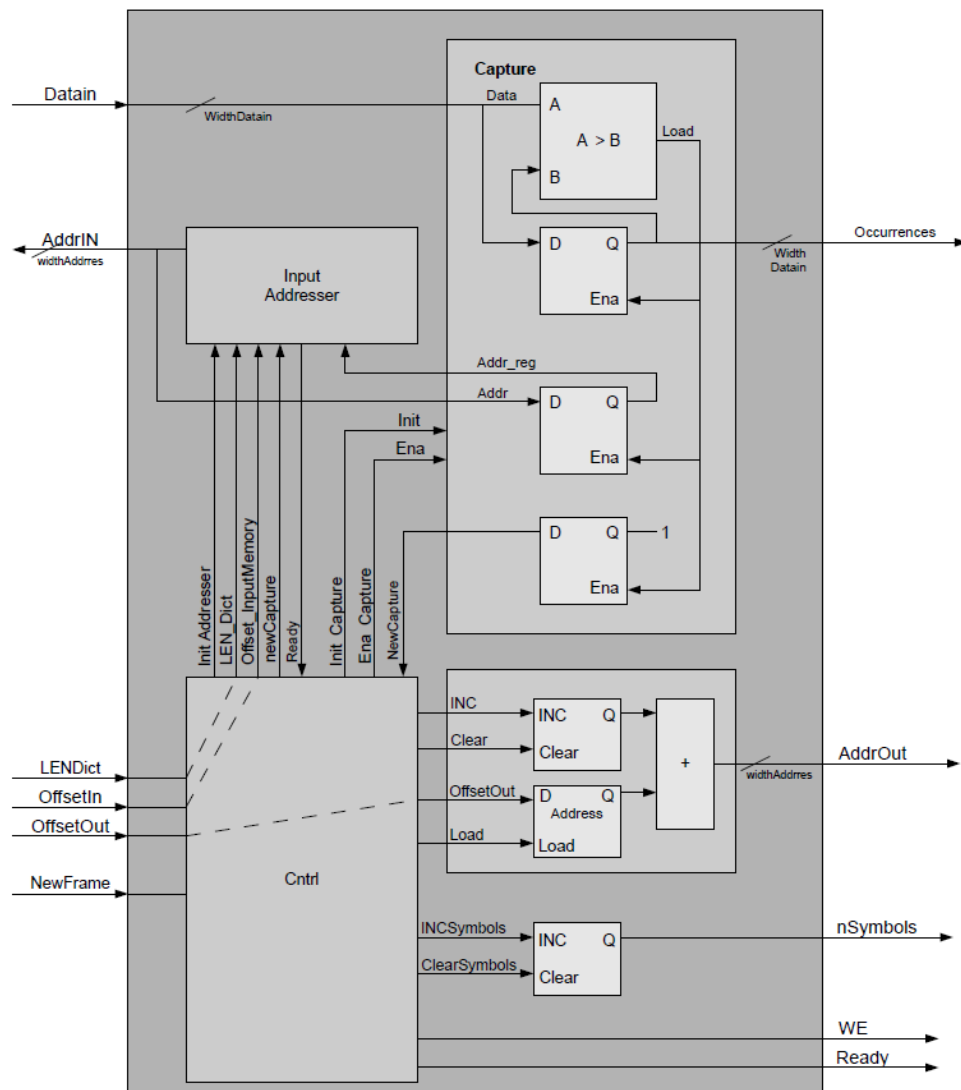


Figura 40: Arquitetura do módulo ordenador de entrada.

O módulo ordenador de entrada é composto por quatro módulos principais:

- a) módulo de endereçamento de entrada;
- b) módulo de captura;
- c) módulo de endereçamento de saída;
- d) módulo de controle.

O processo de ordenamento está baseado nos módulos de endereçamento de entrada e de captura. A cada iteração do processo de ordenamento, o módulo de endereçamento de entrada endereça todas as posições da distribuição de frequência que ainda não foram ordenadas. O símbolo com maior frequência de ocorrência, daqueles símbolos endereçados, é identificado pelo módulo de captura, o qual armazena o símbolo na posição de ordenamento indicada pelo módulo de endereçamento de saída. O símbolo de maior frequência também é informado ao módulo de endereçamento de entrada para que uma tabela de endereçamento seja atualizada, removendo assim aquele símbolo da próxima varredura. Esse processo reduz significativamente o tempo do processo de ordenamento, uma vez que o número de símbolos endereçados é diminuído a cada varredura. O controle da interação entre os módulos é realizado pelo módulo de controle, o qual também é responsável pela sinalização de entrada e saída do módulo ordenador. Este módulo recebe como parâmetros a informação da posição da distribuição de frequência na memória e a posição onde a distribuição ordenada deve ser salva, bem como a informação de quantos símbolos compõem aquela distribuição.

A partir das distribuições de frequência ordenadas são geradas as tabelas Shannon-Fano pelo módulo de geração de tabelas. A arquitetura desse módulo é ilustrada na Figura 41. Este módulo é composto de dois módulos principais: o módulo divisor e o módulo codificador. O módulo divisor executa o processo de divisão recursiva da distribuição de frequência em subconjuntos de igual probabilidade. A cada recursão do processo de divisão da distribuição a informação dos elementos que compõem um dos subconjuntos gerados no processo de divisão é armazenado na pilha. Ao reduzir cada subconjunto a dois elementos, o processo é continuado a partir dos subconjuntos armazenados na pilha, até que esta tenha esvaziado. O módulo codificador tem por função atualizar o código correspondente a cada símbolo durante o processo de divisão da distribuição de frequência.

Ao final do processo de geração das tabelas Shannon-Fano, os códigos gerados estão ordenados em função da distribuição de frequência dos símbolos que compõem cada tabela. A fim de simplificar o processo de codificação do módulo Deflate, os códigos gerados são reordenados, pelo módulo ordenador de saída, em função do ordenamento dos símbolos.

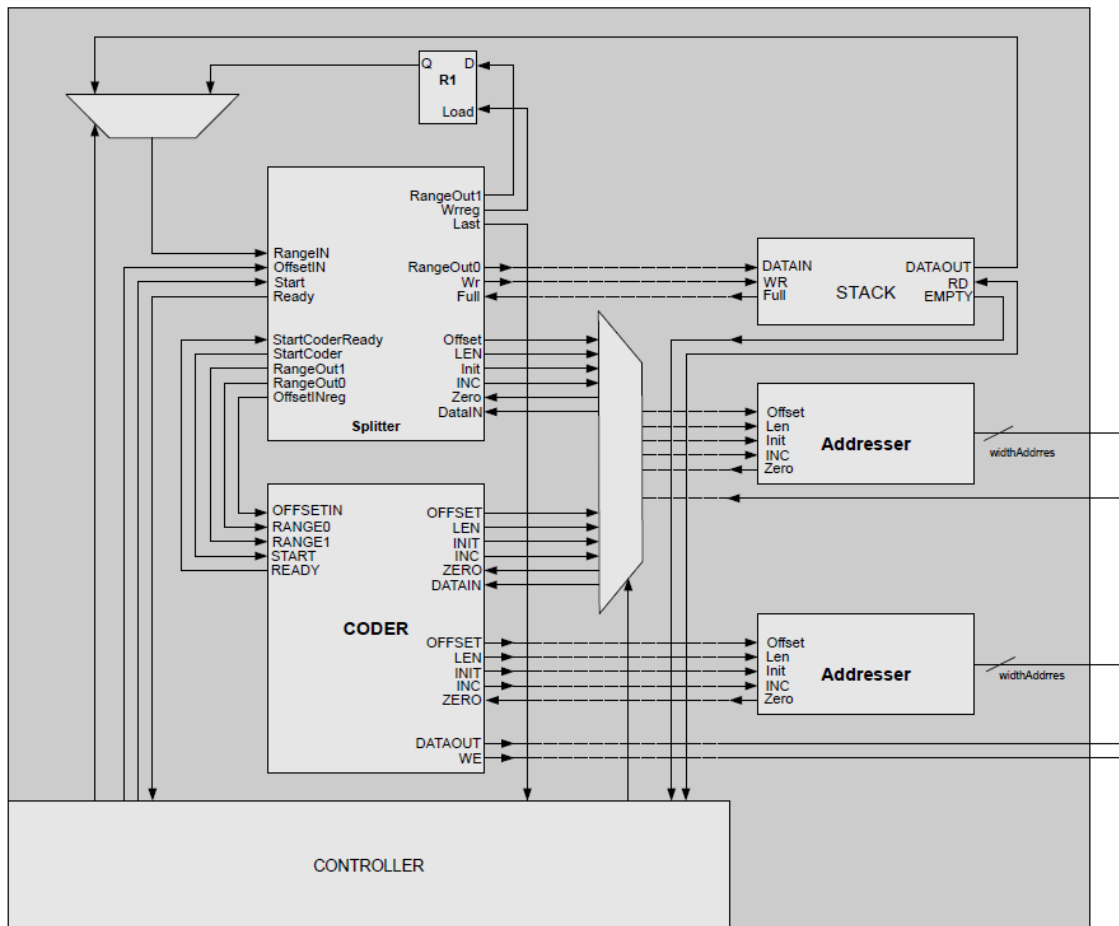


Figura 41: Arquitetura de geração das tabelas Shannon-Fano.

A Tabela 14 apresenta os recursos utilizados na síntese desse módulo. A frequência máxima de operação admitida pelo módulo é de 115.98 MHz.

Tabela 14: Recursos utilizados na implementação do codificador Shannon-Fano.

Recurso	Utilizados	Disponível
<i>Slice Registers</i>	1254	93296
<i>Slice LUTs</i>	2053	46648
<i>Block RAM/FIFO</i>	2	172
DSP48A1s	2	132

5.3.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CODIFICADOR DEFLATE

O módulo de codificação de dados é responsável por codificar os dados compactados e as tabelas Shannon-Fano geradas no formato definido pela especificação do algoritmo Deflate e montar a estrutura de dados definida na Figura 31. A implementação deste algoritmo, conforme ilustra a Figura 42, é dividida em três módulos:

- codificador do cabeçalho;
- codificador dos dicionários;
- codificador do bloco de dados.

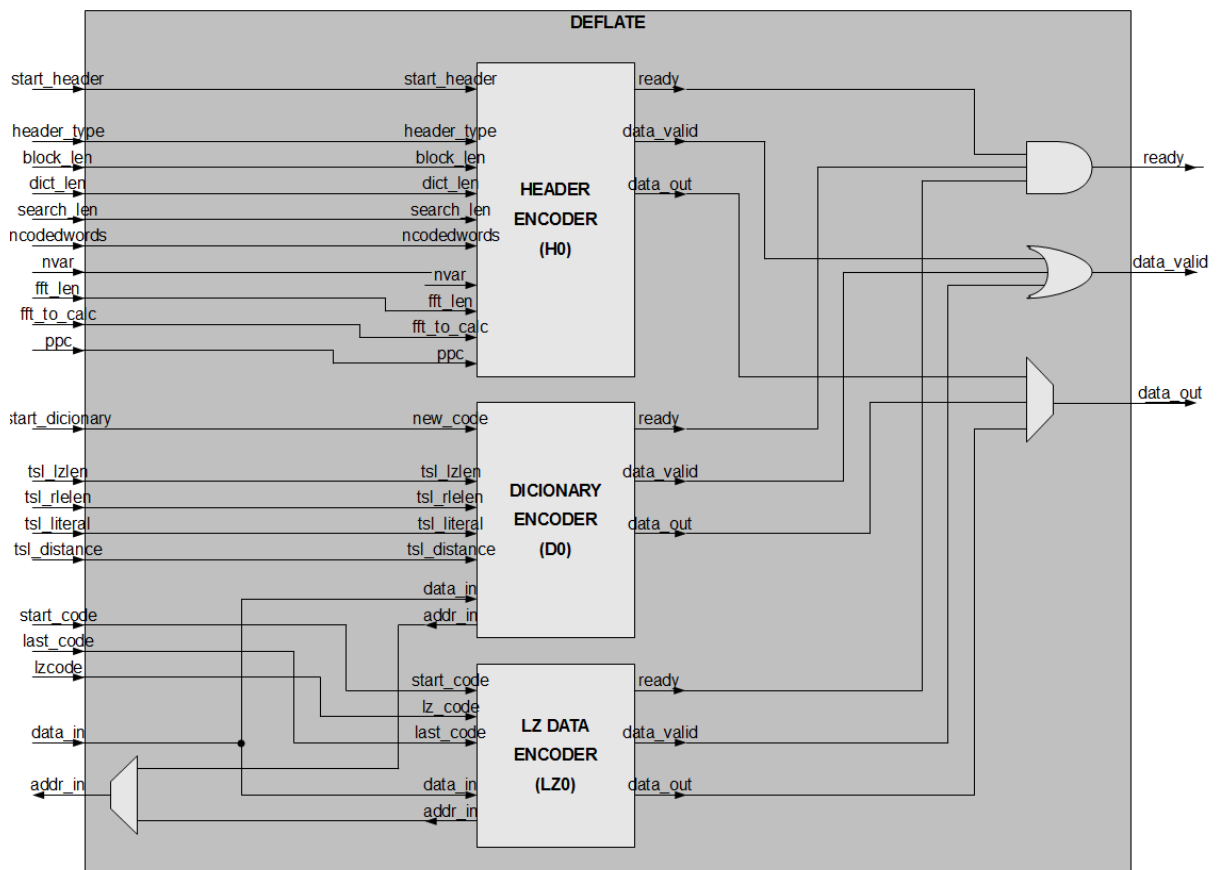


Figura 42: Arquitetura do módulo codificador Deflate.

Este módulo tem acesso a memória onde estão armazenadas as tabelas Shannon-Fano geradas e a uma memória externa onde está o bloco de dados compactado pelo compressor LZ que será codificado no formato Deflate.

Os dados de saída deste módulo são organizados em palavras de 8 *bits*, as quais são armazenadas em uma memória externa que será transferida ao final do processo para a memória DDR.

A máxima frequência de operação, definida pela ferramenta de síntese, para esse módulo é de 216,77 MHz. A Tabela 15 apresenta os recursos utilizados na implementação.

Tabela 15: Recursos utilizados na implementação do codificador Deflate.

Recurso	Utilizados	Disponível
<i>Slice Registers</i>	314	93296
<i>Slice LUTs</i>	401	46648
<i>Block RAM/FIFO</i>	2	172
DSP48A1s	0	132

6 CONCLUSÃO

Em um processo de análise da QEE, seja para detecção das causas de falha de equipamentos ou processos, ou para fins estatísticos, é fundamental o acesso ao maior número de informações possíveis relacionadas ao sistema analisado. No entanto, analisadores de QEE atuais ainda são muito limitados em relação ao registro de um processo de análise. Muitos equipamentos utilizados no mercado possibilitam o registro de somente alguns parâmetros de QEE previamente selecionados, e limitam a amostragem da forma de onda a poucos ciclos no entorno de algum evento transitório detectado. Esses registros de análise são bastante limitados, o que restringe o processo de análise do sistema monitorado àquelas informações registradas. Na falta de informações, por vezes, novas medições devem ser feitas, as quais causam impacto direto no tempo e no custo do processo. Muito dessa limitação passa pela falta de regulamentações e pesquisas destinadas à área de compressão de registros de QEE.

Nesse trabalho foram propostos dois algoritmos de compressão aplicados à compressão de registros de QEE, um algoritmo destinado à compressão de registros de parâmetros de QEE e outro responsável pela compressão da amostragem do sistema de aquisição. O algoritmo de compressão de parâmetros é composto por um algoritmo de compressão polinomial em conjunto com o algoritmo de compressão sem perdas Deflate.

No processo de desenvolvimento buscou-se a máxima reutilização das técnicas de compressão entre os algoritmos propostos, com o objetivo de reduzir a área ocupada na implementação em *hardware*. Para tanto, o algoritmo de compressão de oscilografia foi desenvolvido baseado em uma técnica de pré-processamento, com a finalidade de concentrar a informação e explorar os períodos estacionários do sinal, e assim utilizar em sua totalidade, o algoritmo de compressão de parâmetros de QEE.

Os grandes diferenciais do algoritmo de compressão polinomial, frente a outras técnicas encontradas na literatura, estão no seu tempo determinístico de execução e no

controle do erro máximo introduzido em cada ponto. Grande parte dos algoritmos de compressão polinomial envolve iterativos cálculos de regressão linear, aumentando o conjunto de pontos até que o erro de aproximação ultrapasse um limiar pré-definido. Esse processo é bastante intenso para um sistema embarcado, e em sinais muito dispersos pode ocasionar baixa compressão devido ao número excessivo de coeficientes. A proposta do vetor de resíduos soluciona esse problema, permitindo o cálculo de uma única regressão linear de tamanho pré-definido, o que torna o algoritmo determinístico em relação ao tempo de execução. O algoritmo de quantização, sendo a única técnica de compressão com perdas que compõem os algoritmos propostos, foi definido levando em consideração os parâmetros associados à definição dos erros admitidos pelas normas de medição: incerteza de medição e valor de referência ou fundo de escala da grandeza compactada.

Com relação à especificação do algoritmo Deflate, modificações foram propostas, de forma a otimizá-lo para a compressão dos dados gerados pelo compressor polinomial. Ainda foram propostas modificações visando a implementação do algoritmo em uma arquitetura de *hardware* reconfigurável. Entre as melhorias está a substituição do codificador Huffman pelo codificador Shannon-Fano, a inclusão de um compressor RLE e a proposta do algoritmo ILZ. Nessa última podemos destacar a proposta do processamento do dicionário em partes e da comparação simultânea do dado a ser compactado com todas as entradas do dicionário.

A taxa de compressão desse algoritmo é muito dependente das características estatísticas e de dispersão dos sinais. No entanto, mesmo em medições com sinais reais com alta dispersão, as taxas de compressão encontradas foram superiores a 5 vezes, atingindo em sinais menos dispersos taxas superiores a 25 vezes. O algoritmo de compressão de parâmetros de QEE é especialmente interessante para compressão de sinais compostos por componentes não estacionárias de baixa amplitude de variação dentro de um pequeno conjunto de pontos.

O módulo de pré-processamento contido no algoritmo de compressão de oscilografia está baseado na FFT, que é uma transformada largamente difundida e tem implementações disponíveis para diferentes arquiteturas e sua implementação já se faz necessária em um equipamento de análise QEE. O algoritmo também conta com uma matriz de resíduos, que assim como ocorre no algoritmo de compressão de parâmetros, visa reduzir a entropia dos dados. Nesse algoritmo, no entanto, não são quantizados pontos referentes a informações do domínio tempo, mas sim informações no domínio frequência. Nessa condição é possível definir na compressão diferentes passos de quantização, para diferentes faixas de frequência, em função da informação que se deseja reter. Uma das características importantes desse algoritmo é sua fácil adaptação a diferentes taxas de amostragem.

O algoritmo de compressão de oscilografia apresenta expressivas taxas de compressão, tanto para sinais estacionários quanto para sinais compostos por transitórios. Conforme ensaios realizados, as taxas de compressão dependem muito das características dos sinais, entretanto, mesmo para sinais não estacionários, com alto nível de distorção e repletos de transitórios, o algoritmo apresentou comportamento muito satisfatório, com taxas de compressão que chegam a mais de 5 vezes. No entanto, para sinais estacionários, foram alcançadas taxas superiores a 270 vezes e erros eficazes inferiores a 0.1%.

Os algoritmos propostos atingiram os requisitos necessários para um algoritmo de compressão dedicado a QEE. Apresentam baixo custo computacional, baixa ocupação de área, boas taxas de compressão e ainda permitem a compressão e a descompressão dos dados em pequenos blocos, permitindo o acesso fácil a períodos determinados do sinal.

Como trabalhos futuros é sugerido a inclusão de um algoritmo de detecção de transitórios com intuito de evitar que períodos compostos por transitórios sejam utilizados no algoritmo de compressão de oscilografia como bloco de referência no cálculo da matriz de resíduos, e degradar assim a compressão daquele bloco de sinal.

REFERÊNCIAS

- BABU, K.A.; KUMAR, V.S. Implementation of data compression using Huffman coding. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METHODS AND MODELS IN COMPUTER SCIENCE, 2010, New Delhi. **Proceedings . . .** [S.l.]: ICM2CS, 2010. p. 70-75.
- BARRON, A.; RISSANEN, J.; YU, B. The minimum description length principle in coding and modeling. **IEEE Transactions on Information Theory**, [S. l.], v. 44, n. 6, p. 2743-2760, Oct. 1998.
- BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. **Signal Processing Of Power Quality Disturbances**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- BONGJIN, J.; BURLESON, W.P. Efficient VLSI for Lempel-Ziv compression in wireless data communication network. **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 475-483, Sept. 1998.
- BROSHI, A. Empirical Mode Decomposition For Power Quality Monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER QUALITY AND UTILISATION, 9, 2007, Barcelona. **Proceedings . . .** [S. l.]: IPQU, 2007. p. 1-6.
- CHANG, W. et al. Performance evaluation of block LZSS compression algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE COMPUTER AND COMMUNICATION, 2, 2010, Wuhan. **Proceedings . . .** [S.l.]: IC FCC, 2010. v. 2, p.449-454.
- CIVIDINO, L. Power factor, harmonic distortion; causes, effects and considerations. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS ENERGY CONFERENCE, 14, 1992, Washington. **Proceedings . . .** [s.l.]: INTELEC, 1992. p. 506-513.
- COLNAGO, G. et al. Power quality real-time Monitoring System for the new Brazilian standard. In: ELECTRIC POWER QUALITY AND SUPPLY RELIABILITY CONFERENCE, 2010, Kuressaare. **Proceedings . . .** [s.l.:s.n.], 2010. p. 35-42.
- DASH, P. K. et al. Power quality disturbance data compression, detection, and classification using integrated spline wavelet and S-transform. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 595-600, Apr. 2003.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHEM, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical Power System Quality**. New York: McGraw-Hill, 1996.
- DUTTWEILER, D.L.; CHAMZAS, C. Probability estimation in arithmetic and adaptive-Huffman entropy coders. **IEEE Transactions on Image Processing**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 237-246, Mar. 1995.

ELNADY, A.; EL-KHATTAM, W.; SALAMA, M.M.A. Mitigation of AC arc furnace voltage flicker using the unified power quality conditioner. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2002, [S.l.]. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 2002. v. 2, p.735-739.

EMBRASUL. **Analisador de Energia RE7000: Manual de Instalação e Operação.** Porto Alegre, 2013. 41 p.

EURONORMS. **Voltage characteristics of the electricity supplied by public distribution systems, European/British Standart EN (EURONORMS) BS/EN 50160, CLC, BTTF68-6.** [S.l.], 1994.

FERRERO, A.; LAZZARONI, M.; SALICONE, S. A calibration procedure for a digital instrument for electric power quality measurement. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (IMTC), 18, 2001, Budapest. **Proceedings** New York: IEEE, 2001. p. 259-264.

GALLO, D.; LANDI, C.; RIGNANO, N. Real-Time Digital Multifunction Instrument for Power Quality Integrated Indexes Measurement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, 2006, Sorrento. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2006. p. 2271-2276.

GOLOVANOV, N. et al. Power quality impact of high capacity end-users. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 2008, Wollongong. **Proceedings . . .** [S.l.]: ICHQP, 2008. p. 1-5.

HEGAZY, Y.G.; SALAMA, M.M.A. Identifying the relationship between voltage harmonic distortion and the load of harmonic producing devices in distribution networks. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 1994, Halifax. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 1994. p. 25-28.

HONEA, D.M.; STEARNS, S. D. Lossless waveform compression: a case study. In: CONFERENCE RECORD OF THE TWENTY-SEVENTH ASILOMAR, 1993, Pacific Grove. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 1993. v. 2, p.1514-1518.

HUA, L. T.; XIA, Z. The design and implementation of Power Quality Monitor System. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM, 2, 2009, Shenzhen. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2007. v. 2, p. 34-37.

HUANG, N.; HUANG, W.; LIN, L. Review of power quality signal compression based on Wavelet theory. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TEST AND MEASUREMENT, 2009, Hong Kong. **Proceedings . . .** Hong Kong: ICTM, 2009. p. 235-238.

HWANG, S.; WU, C. Unified VLSI systolic array design for LZ data compression. **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 489-499, Aug. 2001.

IEEE STANDARDS BOARD. **IEEE Std 1159** – 1995: Recommended practice for monitoring electric power quality. [S.l.], 1995.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **Electromagnetic compatibility (EMC): IEC Standard 61000 (series)**. New York, 1990-2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment**. Geneva, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications**. Geneva, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Power quality measurement methods**. Geneva, 2008.

JALALEDDINE, S. et al. ECG data compression techniques-a unified approach. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 329-343, Apr. 1990.

JUNIOR, O. H. A. **Desenvolvimento De Uma Metodologia Para Identificar E Quantificar Distúrbios Da Qualidade Da Energia Elétrica**. 2009. 188 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

JUREWICZ, R. E. Power quality study-1990 to 1995. In: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATIONS ENERGY CONFERENCE, 1990, Orlando. **Proceedings . . .** [s.l.]: INTELEC, 1990. p. 443-450.

KRAUS, J.; TOBISKA, T.; BUBLA, V. Looseless encodings and compression algorithms applied on power quality datasets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 20, 2009, Prague. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 2009. p. 1-4.

LU, Z. et al. Empirical Mode Decomposition For Power Quality Monitoring. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION, 2005, Dalian. **Proceedings . . .** New York: IEEE PES, 2005. p. 1-5.

MCEACHERN, A.; EBERHARD, A. A new, ultra low cost power quality and energy measurement technology - The future of power quality measurement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION(CIRED), 20, 2009, Prague. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2009. p. 1-4.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional_PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, DF, 2007.

PANDA, G. et al. Data compression of power quality events using the slantlet transform. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 662-667, Apr. 2002.

RAMOS, F. R. et al. On signal processing approach for event detection and compression applied to power quality evaluation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUALITY OF POWER, 10, 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2002. p. 133-138.

RENNER, A. **Arquitetura de Um Decodificador de Áudio Para o Sistema Brasileiro de Televisão Digital e Sua Implementação em FPGA**. 2011. 99 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RIBEIRO, M. V.; DUQUE, A.; ROMANO, J. M. T. An Enhanced Data Compression Method for Applications in Power Quality Analysis. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 27, 2001, Denver. **Proceedings . . .** . New York: IEEE, 2001. p. 676-681.

RIBEIRO, M. V. et al. A Novel MDL-based Compression Method for Power Quality Applications. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 27-36, Jan. 2007.

RIBEIRO, M.V.; MITRA, S.K.; ROMANO, J.M.T. A novel approach for spectral analysis of monitored power systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 2004, [S. l.]. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 2004. p. 255-259.

SALEM, M.E. et al. Development of a DSP-Based Power Quality Monitoring Instrument for Real-Time Detection of Power Disturbances. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND DRIVES SYSTEMS, 2005, Kuala Lumpur. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 2005. p. 304-307.

SANTOSO, S. et al. Power quality assessment via Wavelet transform analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 924-930, Apr. 1996.

SANTOSO, S.; POWERS, E.J.; GRADY, W.M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 1250-1257, July 1997.

SHANG, L.; JAEGER, J.; KREBS, R. Efficiency analysis of data compression of power system transients using wavelet transform. In: POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. **Proceedings . . .** New York: IEEE, 2003. v. 4.

SOLOMON, D. **Data Compression: The Complete Reference**. New York: Springer, 2004.

STONES, J; COLLINSON, A. Power Quality. **Power Engineering Journal**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 58-64, Apr. 2001.

TAHGHIGHI, M.; MOUSAVI, M.; KHADIVI, P. Hardware implementation of a novel adaptive version of Deflate compression algorithm. In: IRANIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 18, 2010, Isfahan. **Proceedings . . .** [S.l.]: ICEE, 2010. p. 566-569.

TIWARI, B.; KUMAR, A. Aggregated Deflate-RLE compression technique for body sensor network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING, 6, 2012, Indore. **Proceedings . . .** [S.l.]: CONSEG, 1993. p. 5-7.

YAZDANPANA, A.; HASHEMI, M.R. A simple lossless preprocessing algorithm for hardware implementation of Deflate data compression. In: IRANIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 19, 2011, Tehran. **Proceedings . . .** [S. l.]: ICEE, 2011. p. 1-5.

ZHAONING, Z. et al. Power system fault data compression based on wavelet packet transform and vector quantization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, 2002, [S.l.]. **Proceedings . . .** [S.l.:s.n.], 2002. v. 4, p. 2600-2603.

ZIV, J.; LEMPEL, A. A universal algorithm for sequential data compression. **IEEE Transactions on Information Theory**, [S. l.], v. 23, n. 3, p. 337-343, May 1977.

ANEXO A: Produção Científica

Artigo Publicado no Congresso ICREPQ : **A Compression Method for Power Quality Data**

Artigo Publicado no Congresso ICREPQ como co-autor: **Accuracy and Data Compression Trade-Offs for Power Quality Disturbance.**