

Algoritmo para compressão de sinais da rede elétrica com abordagem dissociativa entre estado estacionário e distúrbios [★]

Jorge Cormane ^{*} Francisco A. de O. Nascimento ^{**}

^{*} Engenharia de Energia, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, DF, (e-mail: jcormane@unb.br).

^{**} Engenharia de Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF (e-mail: assis@ene.unb.br)

Abstract: In this work, an algorithm for the compression of power grid signals with dissociative approach between steady state and disturbances is presented. This approach combines perturbation segmentation with a dynamic bit allocation strategy in the transform domain. Variation of the word length allows to allocate more or less bits for representation according to the energy variation of the transformed coefficients of each segment of the signal. The performance evaluation of the algorithm was performed using real signal records of events occurred in the electric grid. Values of $SNR > 40$ dB for compression ratios between 8:1 and 16:1 obtained in simulations show that there is a promising field for such applications in smart grid environments.

Resumo: Neste trabalho, é apresentado um algoritmo para a compressão de sinais da rede elétrica com abordagem dissociativa entre regime permanente e distúrbios. Esta abordagem combina uma segmentação de distúrbios com uma estratégia de alocação dinâmica de bits no domínio da transformada. A variação do comprimento da palavra permite alocar mais ou menos bits para representação de acordo com a variação da energia dos coeficientes transformados de cada segmento do sinal. A avaliação do desempenho do algoritmo foi realizada utilizando registros de sinais reais de eventos ocorridos na rede elétrica. Valores de $SNR > 40$ dB para relações de compressão entre 8:1 e 16:1 obtidos nas simulações, mostram que existe um campo promissor para este tipo de aplicações nos ambientes das redes elétricas inteligentes.

Keywords: Data compression; smart grid; transform coding; dynamic bit allocation;

Palavras-chaves: compressão de sinais; redes elétricas inteligentes; codificação por transformadas; alocação dinâmica de bits.

1. INTRODUÇÃO

A integração de tecnologias emergentes em torno das redes elétricas tem sido uma tendência natural do setor elétrico nas últimas décadas, onde grande parte dos investimentos das empresas transmissoras e distribuidoras é destinada a fortalecer tecnologicamente sua infraestrutura operacional. A ideia principal por trás deste movimento do setor elétrico consiste em tornar as redes elétricas convencionais, redes mais modernas ou “inteligentes” no futuro.

No ambiente das redes elétricas inteligentes, o intercâmbio de informações entre as áreas do sistema elétrico de potência se intensificou em razão da incorporação de mais equipamentos para monitoramento e controle da rede, fazendo com que seja indispensável digitalizar, transmitir e armazenar as informações coletadas. Os registros relativos a distúrbios em grandezas como tensões e correntes antes, durante e depois do evento são armazenados em bancos de dados para análises de desempenho operacional e como prova diante possíveis reclamações dos consumidores ou requerimentos do órgão regulador. Não obstante, avan-

ços tecnológicos expressivos possibilitam que a informação possa ser representada de forma mais eficiente, isso significa, menos espaço em memória de massa para armazenamento de bancos de dados específicos e, menor tempo de alocação de canal de comunicação para transmissão da informação de um ponto remoto até uma estação base. Para atender simultaneamente estas exigências são empregadas técnicas de compressão de dados de forma a complementar a infraestrutura de tecnologias da informação e da comunicação (TICS).

Neste ponto é necessário diferenciar aplicações do segmento das tecnologias da informação e das comunicações das aplicações na digitalização dos processos das redes de energia elétrica. Do ponto de vista das comunicações, a principal meta é obter a melhor representação para uma dada largura de banda do canal de comunicação. Em outras palavras, o nível de distorção da informação codificada pode variar de acordo com a taxa de compressão oferecida pelo meio de comunicação (disponibilidade de bits por segundo).

Do ponto de vista das redes de energia elétrica, a fidelidade da forma de onda reconstruída após o processo de codificação constitui o parâmetro mais importante, para tanto,

[★] Este trabalho foi realizado no âmbito do Edital FAPDF 04/2017. TOA 1373/2017 e Processo: 193.001.474/2017.

a taxa de bits utilizada para representar a informação pode variar para se ajustar à fidelidade exigida para a representação da forma de onda a ser codificada. Neste trabalho, é apresentado um algoritmo para a compressão de sinais da rede elétrica com abordagem dissociativa entre regime permanente e transitórios.

2. ALGORITMO DE COMPRESSÃO

A abordagem explora a natureza do sinal, e faz uso paralelo de diferentes técnicas de compressão de dados que levam em consideração as características espectrais do sinal. Considera-se, que os sinais coletados pelos equipamentos de medição ($x[n]$) podem ser expressos matematicamente como uma soma das contribuições de vários fenômenos que afetam a Qualidade da Energia Elétrica - QEE (Ribeiro et al., 2007), (Zhang et al., 2011). Estes fenômenos são representados matematicamente na equação (1), como uma soma de seqüências no domínio do tempo.

$$x[n] = f[n] + h[n] + i[n] + t[n] + v[n], \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (1)$$

onde, os sinais $f[n]$, $h[n]$, $i[n]$, $t[n]$ e $v[n]$ representam, respectivamente, as componentes fundamental e harmônicas, as componentes inter-harmônicas, os transitórios e o ruído. Os sinais $f[n]$, $h[n]$ e $i[n]$, são considerados fenômenos de regime permanente, mesmo que as componentes inter-harmônicas exibam baixas amplitudes em relação às componentes fundamental e harmônicas. Porém, para efeitos da aplicação desta abordagem, somente $f[n]$ e $h[n]$ serão considerados fenômenos de regime permanente por apresentar a maior fração da energia do sinal. Nesse sentido, podemos rescrever a equação (1) de forma que, $x[n]$ possa ser dividida em uma seqüência que contenha a energia do sinal em regime permanente ($s[n]$) e uma outra que represente o resíduo (diferença) entre as duas anteriores ($u[n]$). A representação matemática que descreve estas análises é apresentada nas equações (2), (3) e (4).

$$x[n] = s[n] + u[n] + v[n], \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$s[n] = f[n] + h[n], \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (3)$$

$$u[n] = i[n] + t[n], \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

A finalidade desta representação matemática dos sinais de potência consiste em melhorar o desempenho da compressão de dados a partir da identificação das características espectrais de cada segmento de sinal. No regime permanente, o espectro do sinal mostrará pouca variação da amplitude e da frequência dos seus coeficientes transformados, que faz com que seja suficiente uma alocação fixa de bits para representação. Na presença de distúrbios, será necessário alocar mais bits do que no regime permanente por causa do aumento da faixa dinâmica do espectro do sinal (variação acentuada da amplitude e da frequência dos coeficientes dentro do espectro do sinal). Neste sentido, o algoritmo compacta separadamente as parcelas $s[n]$ e $u[n]$, bem como desconsidera a parcela $v[n]$ do sinal $x[n]$.

A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do algoritmo de compressão proposto. O sinal original é segmentado em janelas de tamanho N , chamadas de $x[n]$. O valor de N é igual à quantidade de amostras em um ciclo da frequência fundamental da rede elétrica, que por sua vez é

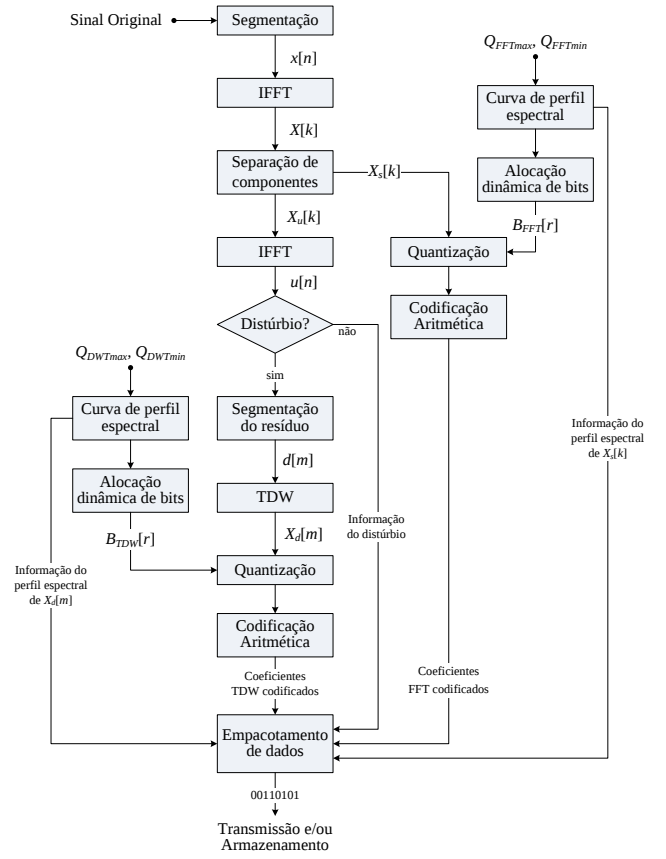


Figura 1. Diagrama de blocos do algoritmo de codificação.

uma potência inteira de dois. A seguir, é usada a transformada rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transform (FFT)*, para calcular as amplitudes e os ângulos de fase das componentes do espectro. No domínio da frequência, os coeficientes associados às componentes fundamental e harmônicas ($X_s[k]$), são identificados e separados do espectro para serem quantizados por meio de uma curva de perfil espectral representada como um vetor de alocação de bits ($B_{FFT}[r]$). As componentes deste vetor são os comprimentos da palavra que descrevem o comportamento dos coeficientes referidos acima. Os comprimentos da palavra máximo (Q_{FFTmax}) e mínimo (Q_{FFTmin}) do vetor de alocação $B_{FFT}[r]$ são dois parâmetros predefinidos pelo usuário que permitem o ajuste do ganho de compressão do algoritmo. Estes dois parâmetros correspondem umas das entradas do algoritmo. Os coeficientes quantizados são logo codificados com um codificador aritmético para eliminar as possíveis redundâncias.

A seqüência de resíduo ($u[n]$), é obtida por meio do cálculo da transformada inversa de Fourier, do inglês *Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)*, para o restante dos coeficientes do espectro ($X_u[k]$). Desta forma, os elementos da seqüência $u[n]$ representam os coeficientes que contêm a energia das inter-harmônicas, transitórios e ruído contidos em $x[n]$.

O comportamento aleatório de $u[n]$, faz com que sua natureza dinâmica possa ser bem representada com a transformada Wavelet discreta (TWD), contudo, é necessário entender que ainda é possível eliminar porções de $u[n]$ que são irrelevantes para o cálculo da TDW, devido à pouca energia presente nas amostras. É por isso, que foram

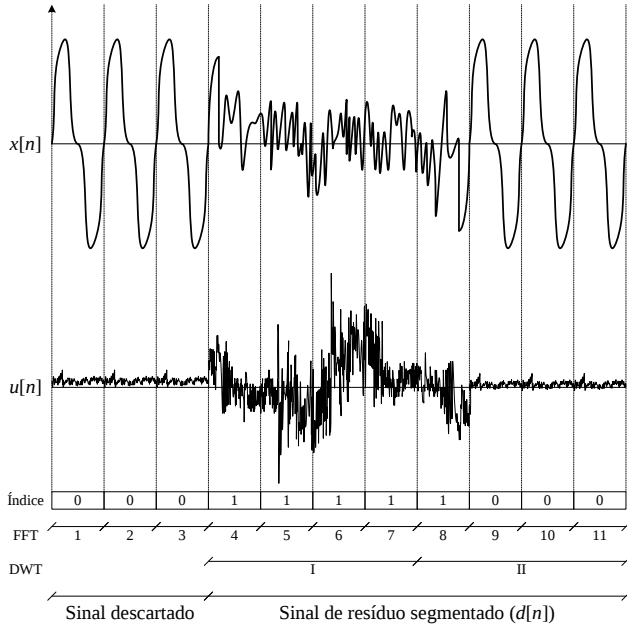


Figura 2. Operação do algoritmo de codificação.

programadas as etapas de identificação e segmentação do distúrbio da sequência de resíduo, cujo resultado consiste na extração das amostras que apresentam a maior energia ($d[m]$), e no descarte automático das amostras restantes.

Na sequência, a Figura 2, ilustra a separação do sinal $s[n]$ de $x[n]$. Em geral, observa-se que as janelas de $u[n]$ que se superpõem ao sinal de regime permanente (1, 2, 3, 9, 10 e 11), apresentam menor variância que aquelas que se superpõem ao distúrbio (janelas 4, 5, 6, 7 e 8), isso porque durante a separação dos sinais a maior parte da energia foi retirada com as componentes fundamental e as componentes harmônicas. Assim, as janelas que contêm as amostras de baixa energia podem ser consideradas como ruído. A sequência de distúrbio ($d[m]$) é determinada pelas janelas 4, 5, 6, 7 e 8, onde as amostras apresentam a maior variância de $u[n]$.

Durante a detecção é gerado um índice binário que estabelece a localização das janelas que fazem parte do sinal de distúrbio, garantindo que a informação do resíduo possa ser segmentada para favorecer a compressão. Na detecção são utilizadas janelas de tamanho igual a um ciclo da frequência fundamental, enquanto, a segmentação é executada em conjuntos de quatro janelas. Caso o número de janelas não seja múltiplo de quatro o ultimo grupo de janelas será completado com as janelas seguintes depois da ocorrência do distúrbio, tal e como se ilustra na Figura 2.

Após estas etapas é calculada a TDW para a sequência $d[m]$. A quantização dos coeficientes $X_d[m]$ é executada de forma similar ao caso dos coeficientes $X_s[k]$. Onde os comprimentos da palavra $Q_{TDW_{max}}$ e $Q_{TDW_{min}}$ são inseridos pelo usuário para calcular a curva de perfil espectral e produzir o vetor de alocação de bits ($B_{TDW}[r]$).

2.1 Algoritmo de detecção de transitórios

O algoritmo se fundamenta na quantificação da variação que experimenta a faixa dinâmica do sinal quando do

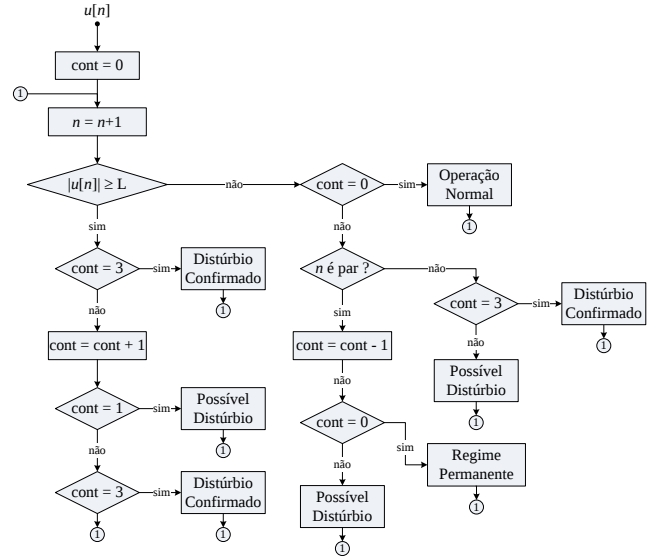


Figura 3. Diagrama de blocos do algoritmo de detecção de transitórios.

passo do regime permanente (menor variação) ao estado transitório (maior variação) e vice-versa. Isso acontece analogamente com a largura de banda do sinal. Para detectar o transitório precisamos de estimar o comportamento em frequência a partir do conjunto de amostras do sinal no domínio do tempo. Portanto, vamos detectar distúrbios cujo espectro de frequência possua componentes superiores à quadragésima componente harmônica da frequência fundamental. Qualquer outra componente de frequência acima disto é considerada distúrbio. O raciocínio usado para determinar este valor, se alicerça na escolha da quantidade de componentes harmônicas que permitem alcançar o máximo valor de referência para o DHT global. Em (ANEEL, 2019) e (ONS, 2019) são apresentados os valores de referência individuais e globais para a distorção harmônica total (DHT) para cada nível de tensão. Os valores de DHT estão em porcentagem da tensão fundamental. Esse patamar é atingido com as amplitudes máximas permitidas das primeiras seis componentes harmônicas, porém, como nem sempre isso acontece, é essencial contar com uma quantidade mais conservadora de componentes harmônicas que contemple esta situação.

O módulo de $u[n]$, é comparado com um valor de referência (L). Quando o módulo do valor do resíduo é maior ou igual ao valor prefixado, o contador é incrementado do zero e, quando satisfaz três vezes esta condição o distúrbio é confirmado. Caso contrário, o contador é decrementado de uma unidade, a cada duas amostras até o valor mínimo zero. Quando o distúrbio é confirmado pela primeira vez, automaticamente é armazenada uma variável com o número do segmento. O estado final do contador em cada segmento se converte no estado inicial do contador no segmento seguinte. O diagrama de blocos simplificado do algoritmo é ilustrado na Figura 3.

A Figura 4 ilustra a operação do algoritmo de detecção de transitórios. Verifica-se, que o contador indica as transições entre os diferentes valores da sequência tomando como referência o limiar (L). Qualquer amostra de $u[n]$ com módulo maior ou igual que L , será entendido como parte do

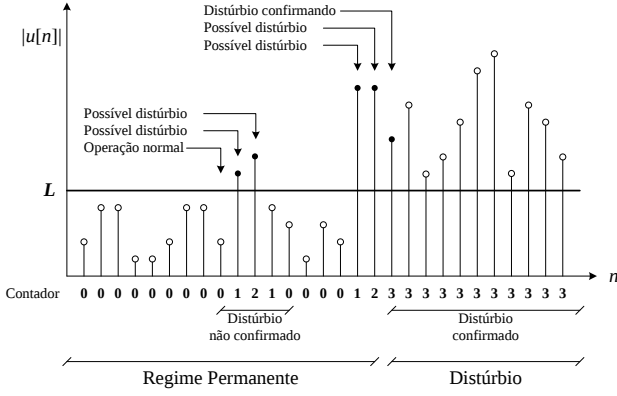


Figura 4. Operação do algoritmo de detecção de transitórios.

Informação do distúrbio	Coefficientes FFT codificados	Coefficientes DWT codificados	Curva de perfil da FFT, Q_{FFTmax} , Q_{FFTmin}	Curva de perfil da DWT, Q_{DWTmax} , Q_{DWTmin}
-------------------------	-------------------------------	-------------------------------	---	---

Figura 5. Estrutura dos dados compactados pelo algoritmo.

distúrbio contido na sequência e incrementará o contador. O uso do contador permite a localização do início e do final do transitório, o que possibilita sua segmentação e sua compressão. As amostras que tem valores menores ao limiar são descartadas, por serem consideradas ruído do sinal em regime permanente. Neste trabalho, foi assumido um limiar (L) igual a 1,56% da faixa dinâmica do sinal original. Esse valor é equivalente ao 3,12% da faixa dinâmica do sinal em regime permanente. O valor de referência não restringe a generalidade do processo. Portanto, esta percentagem pode ser modificada sem causar grande alteração no resultado final da compressão.

A estrutura dos dados compactados de cada segmento de sinal gera um bloco de dados como ilustrado na Figura 5. O bloco de dados está formado pela informação do distúrbio, pelos coeficientes codificados das transformadas de Fourier e wavelet, e pela informação das curvas de perfil de cada um dos espectros. Sobre o distúrbio são armazenados os ponteiros que indicam a posição de $d[n]$ dentro de $u[n]$. Entretanto, sobre as curvas, são armazenados o tipo de curva e os comprimentos mínimo e máximo que as definem. Isto para cada uma das transformadas. Os blocos são concatenados de forma a gerar um arquivo de dados compactado.

Destaca-se, que a informação lateral tem uma relação direta com a capacidade de adaptação da técnica de compressão. Em outras palavras, para melhorar o mapeamento dos dados a técnica de compressão terá que utilizar uma maior quantidade de informação lateral.

2.2 Algoritmo de decodificação

O desempacotamento, a decodificação e a quantização inversa dos dados são realizados simultaneamente de forma a se ter acesso à informação dos coeficientes de cada bloco compactado. Após a obtenção dos coeficientes $\hat{X}_s[k]$ e $\hat{X}_d[m]$, são aplicadas as transformadas inversas de Fourier e wavelets, respectivamente. As informações sobre a localização do distúrbio em conjunto com $\hat{d}[m]$, são as entradas

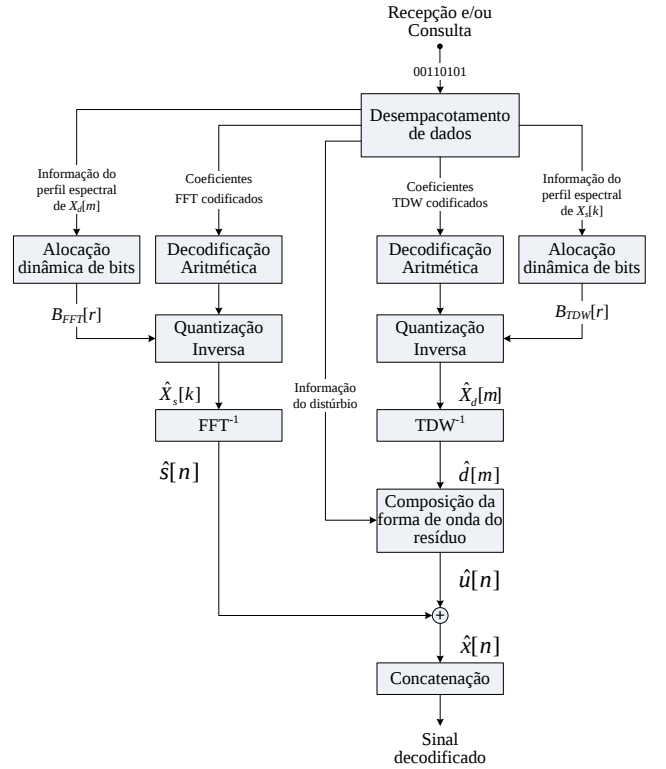


Figura 6. Diagrama de blocos do algoritmo de decodificação.

ao bloco encarregado pela localização temporal das janelas do distúrbio dentro da sequência da forma de onda do resíduo. A sequência $\hat{u}[n]$ é constituída pela superposição localizada de $\hat{d}[m]$ sobre uma sequência de zeros do mesmo comprimento de $u[n]$. Por fim, os sinais $\hat{u}[n]$ e $\hat{s}[n]$ são somados para obter o segmento decodificado. O sinal decodificado obtido pela concatenação sucessiva de segmentos de $\hat{x}[n]$ com comprimento igual a N amostras. O diagrama de blocos que descreve o decodificador é mostrado na Figura 6.

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

No banco de dados de sinais utilizado para os testes do algoritmo, os registros oscilográficos são organizados de acordo com as causas dos distúrbios e com os locais de medição. Cada registro, contém as formas de onda dos três sinais de tensão e de corrente além da corrente do neutro, sendo em total 7 sinais armazenados. Na maioria dos casos, as formas de onda abrange segmentos de formas de onda que descrevem o regime permanente nos instantes anteriores e posteriores ao distúrbio (doe, 2011).

Para verificar o desempenho do algoritmo de compressão, foram utilizados as formas de onda de tensão e de corrente correspondentes aos registros identificados com os números 21839 e 21867, respectivamente. As formas de onda de tensão (21839) e de corrente (21867), são expostas na Figura 7 e na Figura 8, respectivamente. Destaca-se, que as formas de onda foram coletadas com uma taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo para uma frequência fundamental de 60 Hz (resultando em uma frequência de amostragem de 15360 amostras por segundo) e digitalizadas usando um comprimento da palavra de 16 bits por amostra.

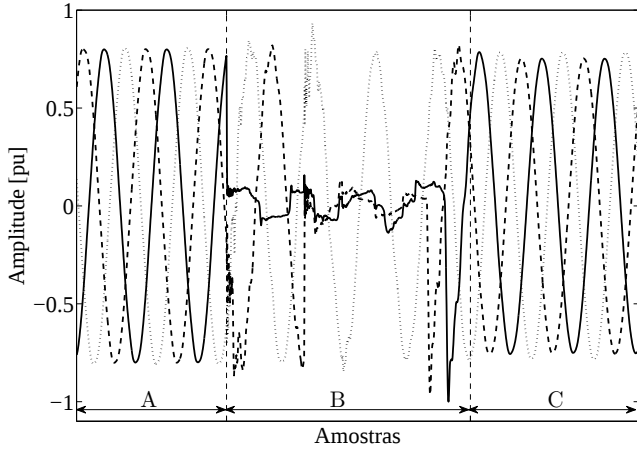


Figura 7. Formas de onda do distúrbio de tensão (Evento 21839).

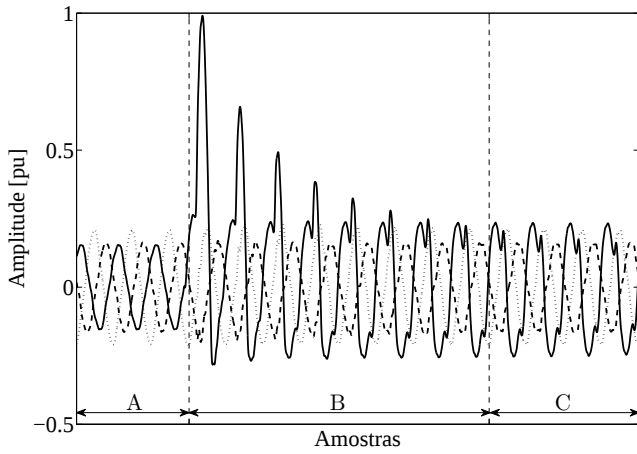


Figura 8. Formas de onda do distúrbio de tensão (Evento 21867).

Observa-se que os dois conjuntos de sinais têm amostras durante os segmentos de pré-distúrbio (A), distúrbio (B) e pós-distúrbio (C). O distúrbio no sinal de tensão, corresponde ao afundamento causado por uma falta bifásica seguida de um desligamento nas fases de um transformador. No caso do distúrbio de corrente, um transitório é gerado durante a manobra em uma das fases.

Nas Figuras 9 e 10, é mostrado o comportamento da técnica de compressão em termos da quantidade de bits por fase, resultante da compactação dos 60 ciclos do sinal de tensão (evento 21839) e dos 120 ciclos do sinal de corrente (evento 21867), respectivamente. Na Figura 9, pode ser observado que a quantidade de bits para compressão da componente fundamental e das componentes harmônicas (barras brancas), não apresenta variação expressiva durante o regime permanente prévio (primeiros 45 ciclos) e posterior (últimos 7 ciclos) ao distúrbio. Durante o distúrbio, é incrementada significativamente a quantidade de bits para representação (barras azuis), devido à aparição de componentes de frequência adicionais (transitório) e ao aumento da faixa dinâmica das componentes sempre presentes.

No sinal de corrente mostrado na Figura 10, o distúrbio apresenta diferentes durações em cada uma das três fases.

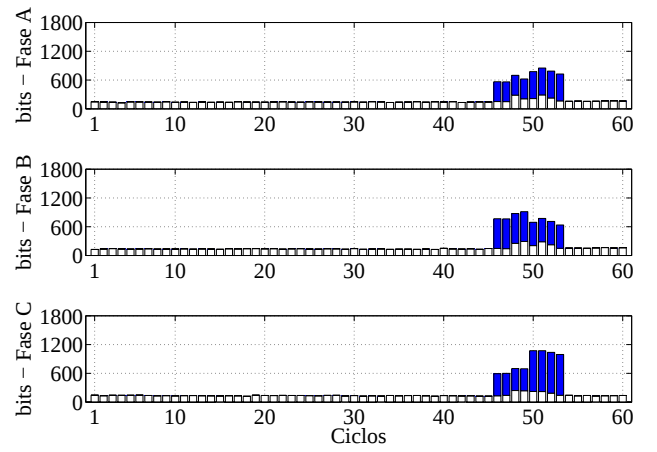


Figura 9. Quantidade de bits para compressão por período da frequência fundamental para o Evento 21839 ($Q_{FFTmax}=16$ e $Q_{TDWmax}=8$). Fundamental e Harmônicas (Barras Brancas). Distúrbio (Barras Azuis).

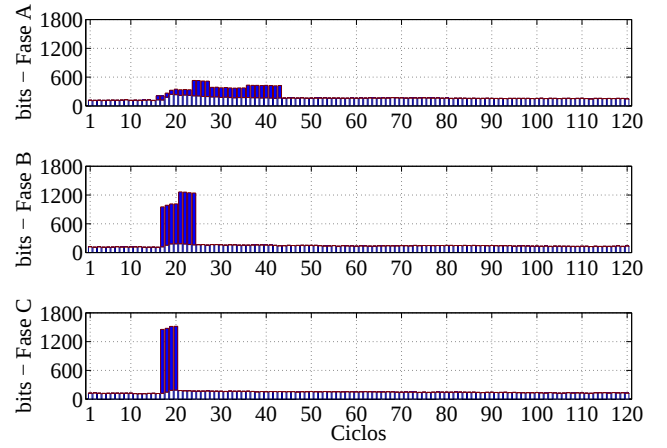


Figura 10. Quantidade de bits para compressão por período da frequência fundamental para o Evento 21867 ($Q_{FFTmax}=16$ e $Q_{TDWmax}=8$). Fundamental e Harmônicas (Barras Brancas). Distúrbio (Barras Azuis).

Na fase A, o distúrbio inicia após 15 períodos do regime permanente, enquanto, as fases B e C iniciam um ciclo depois. Verifica-se que após o final do distúrbio, a quantidade de bits por período experimenta um acréscimo em relação ao valor exibido antes do início do distúrbio, isto é, pelo fato de ter acontecido uma mudança das condições de operação da rede elétrica após o distúrbio, tal como mostrado na Figura 8. Nos exemplos propostos, é mostrado que a técnica de compressão consegue acompanhar as mudanças do comportamento dos sinais pelo fato de explorar sua natureza do distúrbio.

Devido às perdas resultantes do processo de quantização dos coeficientes transformados, faz-se necessária a escolha de uma medida de distorção. O desempenho do algoritmo de compressão foi objetivamente medido usando parâmetros de avaliação do desempenho amplamente utilizados na literatura para a avaliação da compressão desse tipo de sinais. A seguir: relação de compressão, do inglês *Compression Ratio - CR*, a relação sinal ruído, do inglês *Signal-*

to-noise ratio - SNR , a taxa de bits, do inglês *Bit Rate* - BR , o economia de espaço, do inglês *Space Savings* - SS e o erro quadrático médio, do inglês *Mean Square Error* - MSE (Sayood, 2017; Salomon, 2006; Jayant and Noll, 1984).

A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados das simulações para os comprimentos de palavra $Q_{FFTmax} = 16$ e $Q_{TDWmax} = 8$.

Tabela 1. Resultados de simulação do algoritmo para $Q_{FFTmax} = 16$ e $Q_{TDWmax} = 8$.

Parâmetro	21839			21867		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
CR	18,81:1	18,32:1	17,78:1	26,10:1	19,80:1	21,41:1
SNR	58,65	58,51	64,45	46,69	45,22	49,67
BR	0,851	0,873	0,899	0,818	0,808	0,747
SS	94,68	94,54	94,38	94,89	94,95	95,33

Neste trabalho, os valores de SNR superiores a 40 dB são considerados bons resultados independentemente do valor de CR associado. Porém, o ideal é que o valor de CR alcançado pelo algoritmo seja o melhor possível. Com esse nível de resolução, a forma de onda não apresenta distorção visível, em outras palavras, existe um perfeito ajuste na faixa dinâmica como também, se tem uma boa reprodução das pequenas amplitudes e das variações de largura espectrais, mostrando alto grau de fidelidade da representação da forma de onda decodificada quando comparada com a forma de onda original. De forma que, se este sinal fosse usado por um especialista como evidência para um diagnóstico baseado em uma inspeção visual, a perda de informação ocasionada pelo processo de compressão não teria impacto na sua decisão. Na Figura 11 são apresentadas as curvas de desempenho do algoritmo de compressão para os sinais de teste em termos dos valores de SNR e CR .

Observa-se na Figura 11, que para valores de CR entre 8:1 e 16:1, em geral, os valores de SNR apresentam os melhores resultados e um comportamento estável. Para este intervalo de operação o algoritmo exibe valores de BR que variam entre 1 e 2 bits por amostra e de SS que variam entre 87,5% e 93,7%. No caso de valores de CR superiores a 16:1 e inferiores a 24:1, o algoritmo apresenta resultados inferiores aos obtidos na faixa anterior, mas ainda se mantém um valor de SNR acima de 40 dB. Para este intervalo de operação o algoritmo exibe valores de BR que variam entre 1 e 0,67 bits por amostra e de SS que variam entre 93,7% e 95,8%. Por fim, para valores de CR acima de 24:1, o algoritmo apresenta resultados inferiores com valores de SNR abaixo de 40 dB.

Em geral, as curvas da Figura 11 mostram que o comportamento dos resultados do algoritmo quando testado com sinais de corrente foi similar ao obtido com os sinais de tensão, porem observa-se que os valores de SNR se mantiveram na faixa definida entre 40 dB e 50 dB. pode ser verificado que no distúrbio de corrente existe um número significativo

A seguir são mostrados na Figura 12 os resultados da avaliação do efeito da compressão no cálculo dos parâmetros de QEE. Os resultados incluem uma curva média do MSE calculado para cada um dos parâmetros de QEE calculados para cada fase do registro. A seguir a descrição

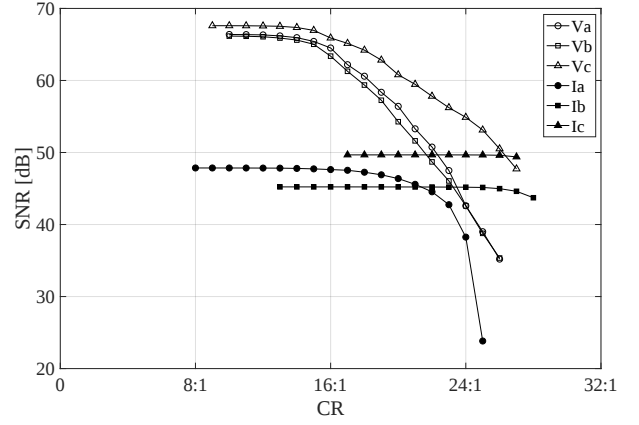


Figura 11. Curvas de desempenho do algoritmo calculadas para cada uma das fases da tensão do registro 21839 (marcadores vazios) e da corrente do registro 21867 (marcadores cheios).

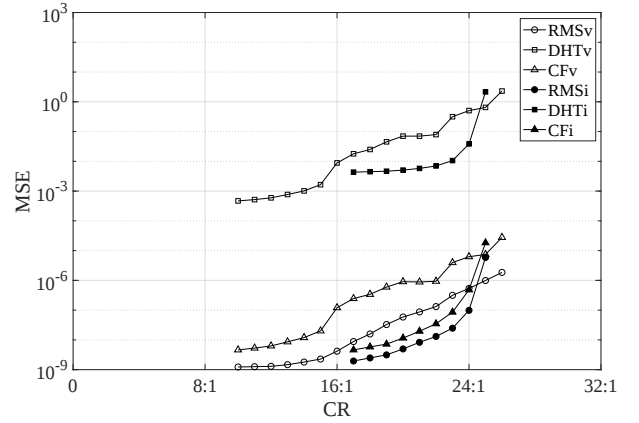


Figura 12. Curvas do erro de reconstrução do sinal após a compressão dos sinais de tensão do registro 21839 (marcadores vazios) e de corrente do registro 21867 (marcadores cheios).

dos parâmetros de QEE : valor quadrático médio, do inglês *Root Mean Square* - RMS , distorção harmônica total, do inglês *Total Harmonic Distortion* - THD e fator de crista, do inglês *Crest Factor* - CF .

As curvas do MSE mostram que os parâmetros de QEE calculados a partir dos sinais reconstruídos exibem valores muito próximos aos calculados a partir dos sinais originais, quando o algoritmo de compressão age dentro de determinada faixa de operação. Para os dois conjuntos de sinais de teste usado neste trabalho, valores de CR no intervalo ($16 < CR < 32$) é mais do que suficiente para alcançar um valor de SNR superior a 40 dB e se obter um erro tolerável ($MSE < 10^{-3}$) no cálculo dos parâmetros de QEE. O anterior indica que o algoritmo de compressão apresentado é capaz de prover ganhos de compressão razoáveis sem comprometer o processo de análise da informação.

4. CONCLUSÃO

No algoritmo proposto, é aproveitado o fato que a maior parte da informação está contida nas componentes fun-

damental e harmônicas para projetar uma arquitetura de codificação diferenciada que permita abordar de forma separada os fenômenos de regime permanente e os distúrbios do sinal. Verificou-se para os sinais utilizados nos testes, que o desempenho do algoritmo proposto está relacionado com a faixa de operação em termos da relação sinal ruído e da relação de compressão. Isto acontece porque o ajuste na faixa dinâmica e a adaptação às variações de largura de banda espectrais são feitas usando alocação dinâmica de bits. A partir da avaliação dos resultados obtidos nas simulações, pode-se manifestar que a abordagem dissociativa empregada no algoritmo de compressão mostrou-se como uma alternativa promissora para a codificação de formas de onda de distúrbios em redes elétricas.

REFERÊNCIAS

- (2011). Doe/epr national database repository of power system events. URL <http://expertmonitoring.com/doelibrary/default.asp>. Electric Power Research Institute, Inc. Último acesso em 01/07/2011.
- ANEEL (2019). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional. módulo 8 - qualidade da energia elétrica. URL <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>.
- Jayant, N. and Noll, P. (1984). *Digital Coding of Waveforms*. Prentice-Hall.
- ONS (2019). Procedimentos de rede: Submódulo 2.8 gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e dos barramentos dos transformadores de fronteira, e de seus componentes. URL <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>.
- Ribeiro, M., Park, S., Romano, J., and Mitra, S. (2007). A novel mdl-based compression method for power quality applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1), 27–36.
- Salomon, D. (2006). *Data Compression*. Springer, 4th edition.
- Sayood, K. (2017). *Introduction to Data Compression*. Morgan Kaufman, 5th edition.
- Zhang, M., Li, K., and Hu, Y. (2011). A high efficient compression method for power quality applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 6(6), 1976–1985.