

COMPRESSÃO DE TRANSITÓRIOS DE SINAIS DE ENERGIA ELÉTRICA

Luiz F. C. Gontijo, Francisco A. de O. Nascimento, *Member, IEEE*, G. Castellano

Resumo— Este trabalho investiga o desempenho de algoritmos de compressão de entropia em sistemas de compressão de dados baseado em transformadas para sinais obtidos em redes elétricas. O algoritmo possui três etapas. Na primeira é aplicada a Transformada Wavelet no sinal digitalizado. Na segunda etapa o vetor de coeficientes transformados é quantizado com modelos de estimativa do envoltório espectral. Finalmente, na última etapa, ocorre a codificação de entropia considerando o vetor de símbolos gerados a partir do vetor de coeficientes quantizados. Neste trabalho são investigados os efeitos do uso de diversas técnicas de codificação de entropia nas métricas de desempenho.

Palavras-Chave— Compressão de dados, redes inteligentes, codificação, transformada wavelet, quantização.

Abstract— This work investigates the performance of entropy compression algorithms in data compression systems based on transformations for signals in electrical networks. The algorithm consists of three stages. In the first the wavelet transform is applied in the digitized signal. In the second step the transformation coefficient vector is quantized with spectral wrap estimation models. Finally, in a last step, an entropy coding takes place considering the vector of symbols generated from the vector of quantized coefficients. In this paper we investigate the effects of the use of several entropy coding techniques on performance metrics.

Keywords— Data compression, smart grid, coding, wavelet transform, quantization.

I. INTRODUÇÃO

A expansão das redes inteligentes (*smart grids*) vem sendo acompanhada do crescimento da quantidade de informação gerada, a qual deve ser interpretada para a garantia do bom funcionamento do sistema. Esta densidade de informações disponibilizadas apresenta desafios novos e atuais, como a necessidade do uso eficiente da largura de banda disponível e da segurança dos dados, como apresentado em [1] - [3].

Para a obtenção das informações da rede elétrica, deve-se considerar sistemas medidores e de captação de informação, os quais estão em constante evolução, como apresentado em [4]. A informação, assim, deve ser armazenada e processada de maneira eficiente, seja por uma estações base, como em [5] ou por celulares, como apresentado em [6]. Os dados apresentados por estes medidores podem fornecer informações acerca dos próprios sinais da rede ou até de medidas acerca da qualidade da energia [7].

A informação deve ser apresentada de maneira eficiente à outros dispositivos; aproveitando o tempo de canal disponível

Luiz F. C. Gontijo, Universidade de Brasília - Brasília, e-mail: lz.gontijo@gmail.com; Francisco A. de O. Nascimento, Universidade de Brasília - Brasília, e-mail: assis@ene.unb.br.

e sua memória útil. Para isso é necessário diminuir a redundância da informação transmitida, o que afeta diretamente a quantidade de informação do sinal. Técnicas de compressão de dados, dessa forma, são boas alternativas para este caso.

O sistema de compressão do sinal de rede elétrica apresentado neste trabalho possui três processos sucessivos. O primeiro processo trata da aplicação de uma transformada, a qual concentrará a energia do sinal em coeficientes. O segundo processo é correspondente à quantização do vetor de coeficientes transformados. Por fim, o terceiro processo trata da codificação, ou compressão, de entropia do vetor de coeficientes quantizados. Neste última passo, ocorre a diminuição da redundância do sinal dada a alocação inteligente de bits para cada um dos valores presentes no vetor. Alguns algoritmos de compressão de entropia são utilizados como base para este trabalho, como a codificação huffman [8] e aritmética [9].

Diversos trabalhos acerca da compressão de sinais em redes inteligentes foram publicados nos últimos anos. Muitos dos algoritmos apresentados usam Transformadas Wavelet, como em [10]-[12]. Aplicações da Transformada de Fourier também estão presentes neste tema, como em [13]. Alguns trabalhos usam até mesmo Lógica Fuzzy, como em [14], e Redes Neurais, como em [15].

Este trabalho apresenta um sistema que tem como objetivo a compressão de um sinal de entrada. Com tal sistema é possível a comparação entre alguns algoritmos de quantização e compressão do sinal. Para isso são implementadas duas técnicas de quantização e cinco variações de métodos de compressão, gerando dez combinações de resultados para cada sinal analisado. Em todos os algoritmos há a aplicação de transformadas wavelet seguidas da quantização do sinal, para que, ao final do procedimento, possa ser aplicada a codificação de entropia desejada. Todos os dados usados em simulação são provenientes de medições reais a partir de redes de distribuição de energia.

O texto é dividido da seguinte forma. A seção II apresenta a visão geral dos algoritmos de codificação e decodificação. A seção III formula matematicamente e demonstra exemplos dos algoritmos de quantização. A seção IV apresenta os algoritmos de codificação utilizados e o formato do arquivo final. A seção V apresenta os resultados e suas respectivas análises. A seção VI apresenta discussões e análises acerca dos resultados apresentados. A seção VII, por fim, consolida a conclusão deste trabalho.

II. ESQUEMA BÁSICO DE CODIFICAÇÃO

A Figura 1 apresenta o diagrama de codificação de sinal. O sinal de entrada, o qual pode ser de tensão ou de corrente, é segmentado em janelas de tempo com N amostras, sendo N um valor inteiro de potência de 2. Após a segmentação o sinal é dado por $x[n]$, a amplitude de cada amostra, com n o índice referente ao tempo de amostra.

O vetor $W[k]$ é calculado para cada uma das segmentações do sinal com o uso da Transformada Discreta Wavelet (TDW). Dessa forma, este vetor tem também tamanho N , em que o valor $W[k]$ apresenta a amplitude do sinal transformado no índice de frequência k .

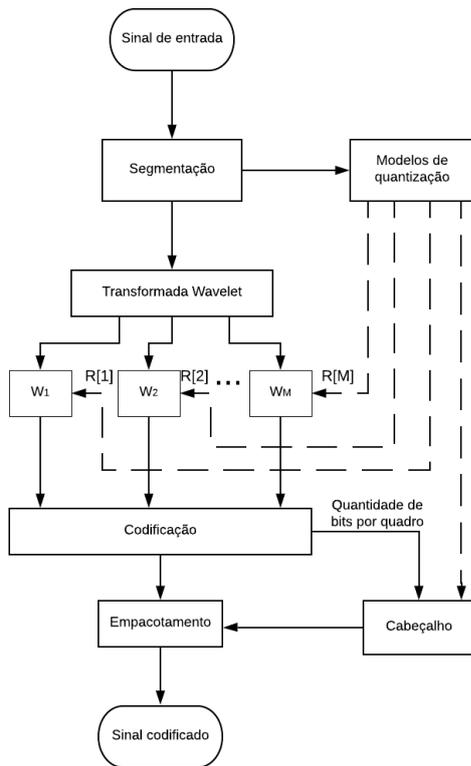


Fig. 1. Diagrama de bloco do sistema de codificação

O espectro do sinal no domínio da Transformada Wavelet é segmentado em sub-bandas de número correspondente ao nível de detalhamento da transformada. As sub-bandas são especificadas por índices de W_1 a W_M , sendo M a quantidade de níveis de decomposição da transformada do sinal transformado, calculado pela Equação 1.

$$M = \log_2 N \quad (1)$$

Após a quantização do vetor de coeficientes da Transformada Wavelet é realizada a codificação por entropia. Este processo tem o objetivo de diminuir a redundância residual dos coeficientes quantizados. Após a quantização e codificação de entropia para cada segmento de sinal, é adicionado, como informação lateral, a tabela de probabilidade de símbolos informações sobre o modelo de quantização, possibilitando a posterior reconstrução do sinal de entrada.

O cabeçalho do arquivo comprimido apresenta informações acerca do modelo de quantização e dos coeficientes codificados. Esta informação possibilita a reconstrução do sinal de entrada.

A descompressão do sinal é apresentada na Figura 2. Esta etapa é realizada com o processo inverso da codificação, sendo iniciada com o desempacotamento do arquivo, processo o qual separa as palavras-código, construídas a partir da codificação de entropia. Em seguida, a informação do cabeçalho é interpretada e os símbolos são decodificados de acordo com o algoritmo de compressão utilizado, produzindo o vetor de coeficientes quantizados. Este vetor é então segmentado de acordo com o número M de coeficientes de detalhamento da Transformada Wavelet para que seja aplicada a quantização inversa em cada palavra-código. Após a quantização inversa, são obtidos os coeficientes transformados no domínio da Transformada Wavelet, os quais correspondem ao espectro do sinal transformado após a reconstrução espectral. Por fim, a Transformada Discreta Inversa Wavelet (TDIW) é aplicada após a reconstrução espectral. Cada segmento codificado no processo apresentado pela Figura 1 passa por este processo de descompressão; dessa forma, tais segmentos são concatenados ao fim do sistema apresentado na Figura 2 para ser obtido o sinal no domínio do tempo.

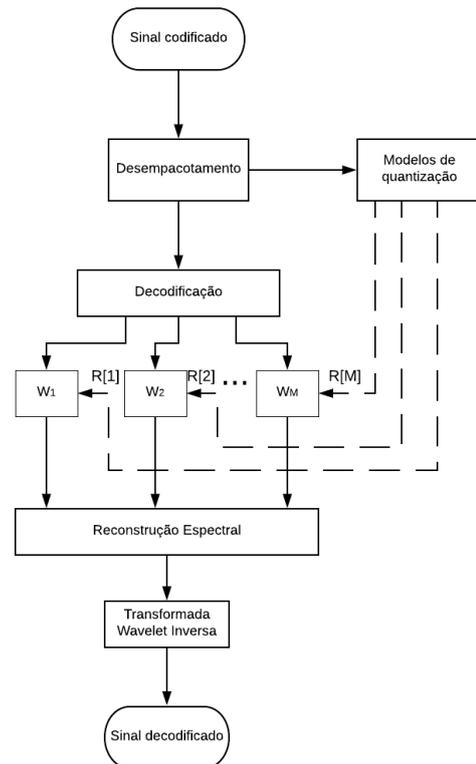


Fig. 2. Diagrama de bloco do sistema de decodificação

III. ALGORITMO DE QUANTIZAÇÃO

O algoritmo de quantização do vetor de coeficientes transformados é baseado na estimação do envoltório espectral. Este algoritmo apresenta característica decrescente de forma

a alocar uma maior quantidade de bits para a quantização de componentes de mais baixa frequência, e uma menor quantidade de bits para coeficientes de maior frequência. O espectro é segmentado em termos dos níveis de decomposição da TDW. Cada coeficiente dentro de um mesmo nível de decomposição da transformada é tratado de forma análoga. Para a implementação da quantização, a faixa dinâmica dos coeficientes transformados é ajustada de acordo com o procedimento descrito abaixo. O valor absoluto máximo é calculado pela Equação (2).

$$W_{max} = \max [|W[k]|]_{k=0,1,\dots,N-1} \quad (2)$$

Para o número de decomposições possíveis em sub-bandas do sinal transformado deve-se considerar o valor M dado pela Equação (1).

O sinal quantizado é denotado como $U[k]$. Dessa forma, a quantização de $W[0]$, que corresponde ao coeficiente de aproximação a_M do sinal transformado, ocorre como apresentado nas Equações (3) e (4).

$$U[0] = \left\lceil \frac{W[0]}{W_{max}} \mu_0 \right\rceil \quad (3)$$

$$\mu_0 = 2^{R[M+1]} - 1 \quad (4)$$

Na Equação (4) a componente $R[i]$ representa a forma de quantização utilizada e será detalhada nas próximas duas sub-seções. Seu índice i varia de $i = 1, 2, \dots, M, M + 1$.

Para as outras $N - 1$ componentes, correspondentes às outras sub-bandas do sinal transformado, a quantização é realizada seguindo as Equações (5) e (6).

$$U[2^{M-m} + d] = \left\lceil \frac{W[2^{M-m} + d]}{W_{max}} \mu_m \right\rceil \quad (5)$$

$$\mu_m = 2^{R[m]} - 1 \quad (6)$$

Nas Equações (5) e (6) tem-se que $m = 1, 2, \dots, M$ e $d = 1, 2, \dots, (2^{M-m} - 1)$, em que m indica o nível de decomposição do sinal transformado e d o índice de decomposição dentro de cada nível do sinal transformado. O coeficiente $U[1]$ é calculado como apresentado na Equação (7)

$$U[1] = \left\lceil \frac{W[1]}{W_{max}} 2^{R[10]} - 1 \right\rceil \quad (7)$$

Neste trabalho são implementadas duas técnicas diferentes para a quantização dos coeficientes: o modelo linear decrescente e o modelo raiz quadrada decrescente. Tais modelos de quantização são detalhados nas próximas sub-seções.

A. Modelo Linear Decrescente

O perfil espectral linear das sub-bandas do sinal transformado pode ser modelado a partir das Equações (8) e (9).

$$R[m] = \Theta_{max} - a(2^{M-m} - 1) \quad (8)$$

$$a = \frac{\Theta_{max} - \Theta_{min}}{2^{M-1}} \quad (9)$$

Na Equação (8) tem-se que $m = 1, 2, \dots, M, M + 1$ e a indica o coeficiente angular utilizado neste modelo de quantização. O valor Θ_{max} é o maior tamanho do símbolo, em bits, que o sinal transformado pode ser quantizado e, da mesma forma, Θ_{min} é o tamanho mínimo, também em bits.

B. Modelo Raiz Quadrática Decrescente

Esta quantização é formulado pela Equação (10).

$$R[m] = \frac{\Theta_{max}}{\sqrt{\beta}} \sqrt{2^{M-m} - \beta} \quad (10)$$

O valor de β é dado pela Equação (11).

$$\beta = \frac{2^{M-1} \Theta_{max}^2}{\Theta_{max}^2 - \Theta_{min}^2} \quad (11)$$

IV. ETAPA DE COMPRESSÃO

Esta sessão apresenta as três formas diferentes de codificação de entropia. A primeira codificação tratada é a huffman com segmentação. Esta codificação é iniciada com a divisão do vetor de coeficientes quantizados em duas, quatro ou oito partes para que ocorra a codificação huffman em cada uma das partes independentemente. Como apresentado em [16], seus resultados são melhores quando comparados com a codificação huffman recorrente formulada em [8]. Para comparação, além da aplicação das técnicas huffman com segmentação, a técnica de compressão huffman recorrente, isto é, sem segmentação, apresentada em [8] também é considerada neste sistema.

Já a codificação aritmética, como apresentada em [9], tem como base a subdivisão de intervalos sucessivos com a probabilidade da ocorrência dos respectivos símbolos da palavra. A codificação aritmética recursiva codifica cada símbolo de entrada dado pelos coeficientes do vetor do sinal quantizado de acordo com os diferentes métodos especificados em [16] e [17].

A estrutura do arquivo de dados após a compressão é apresentada na Figura 3.

O cabeçalho apresenta qual foi o tipo de transformada wavelet usada, além do comprimento da palavra e especifica o algoritmo de quantização atribuído, fornecendo valores de Θ_{max} e Θ_{min} . Uma palavra-código que apresenta a quantidade total de bits em cada quadro de dados codificados é apresentada no início do arquivo gerado após a compressão. Além disso, cada quadro de dados deve apresentar um fator de normalização o qual possibilita a quantização inversa do sinal. Cada coeficiente codificado, após a compressão, é apresentado em seu corpo além da tabela de símbolos escrita para cada forma de compressão empregada.

V. RESULTADOS

As métricas objetivas utilizadas neste trabalho para a avaliação de desempenho são: Relação Sinal-Ruído (RSR), em decibéis, como apresentado na Equação (12), e a Taxa de Compressão (TC) definida em (13). As simulações dos algoritmos propostos foram realizadas usando distúrbios em sinais de energia elétrica disponíveis em banco de dados on-line em [18]. Apenas os registros com formas de onda de perturbações

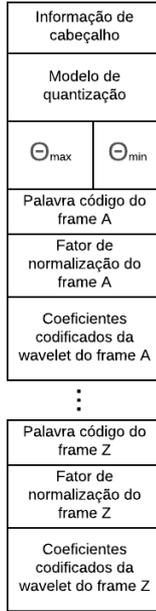


Fig. 3. Estrutura do arquivo de dados após a compressão

em sistemas de potência coletados com 256 amostras por ciclo da fundamental e um comprimento de palavra de 16 bits por amostra foram selecionados. Para avaliar o desempenho dos algoritmos, foram utilizados 60 registros de tensão trifásica e 36 registros de correntes trifásicas pertencentes ao repositório do banco de dados. Foi escolhida a Coiflet 5 como a família de Transformada Wavelet por fornecer melhores resultados em aplicações semelhantes, como apresentado em [12].

$$RSR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_x^2}{\sigma_e^2} \right) \quad (12)$$

$$TC = \frac{N_y}{N_{y'}} \quad (13)$$

O valor σ_x^2 , na Equação (12), representa a variância do sinal original e σ_e^2 a variância do sinal reconstruído. Já na Equação (13), N_y é a quantidade total de bits para representar o sinal original e $N_{y'}$ a quantidade de bits para representar o sinal compactado.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as curvas para desempenho médio quando aplicada a compressão de sinais de corrente e de tensão do banco de dados [18]. Nestes dois casos simulados, são investigados o desempenho comparativo para as técnicas de codificação de entropia implementadas. Os resultados são obtidos para o algoritmo raiz quadrática decrescente usado na alocação de bits e quantização dos coeficientes da Transformada Wavelet.

Na Figura 6 são apresentados resultados comparativos para os dois algoritmos de estimação do envoltório espectral, linear decrescente e raiz quadrática decrescente, utilizando o método de Huffman como módulo de codificação de entropia.

VI. DISCUSSÃO

Pode-se observar nas Figuras 4 e 5 que se obtém uma melhoria significativa para a técnica de codificação de Huff-

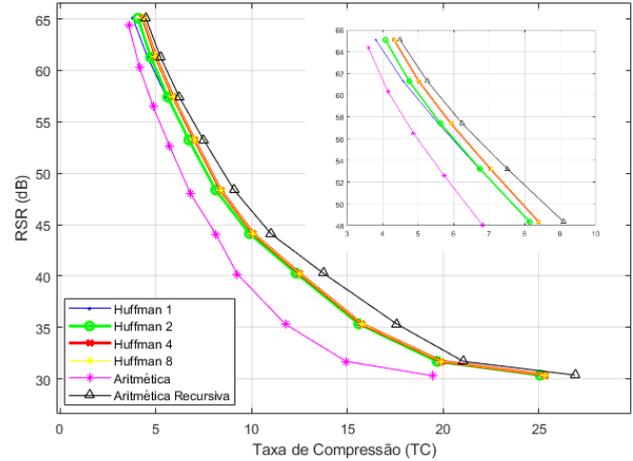


Fig. 4. Compressão do sinal de corrente da fase A utilizado o modelo estimador de envoltório espectral linear decrescente

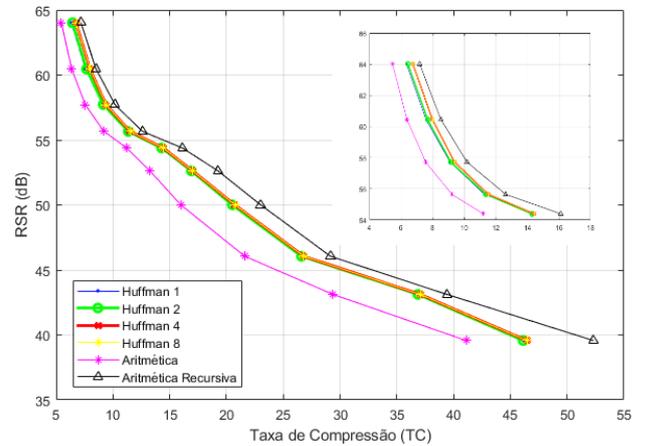


Fig. 5. Compressão do sinal de tensão da fase A utilizado o modelo estimador de envoltório espectral raiz quadrática decrescente

man quando se segmenta o vetor de coeficientes quantizados em duas, quatro e oito sub-sequências. A ideia básica de se segmentar uma sequência longa de símbolos para a técnica de codificação de Huffman é de proporcionar a construção das tabelas de probabilidade de símbolos diferentes para cada sub-sequência de símbolos. Isto faz com que o comprimento ótimo do código que represente cada símbolo seja muito menor quando comparado com a sequência original não segmentada. Deve ser observado que neste caso haverá uma quantidade maior de tabelas de probabilidades de símbolos, em um número proporcional à quantidade de segmentos da sequência original, para serem adicionadas como informação lateral. Contudo, dadas as características de periodicidade dos sinais oriundos de redes elétricas, a abordagem proporciona uma melhoria na taxa de bits geral para a técnica.

Comparando as formas de codificação empregadas: codificação aritmética não-recursiva, codificação de Huffman (com uma ou mais segmentações) e codificação aritmética recursiva, observa-se que a codificação aritmética recursiva apresenta um desempenho médio superior as outras técnicas implementadas. Neste caso apresentado, os sinais de tensão e

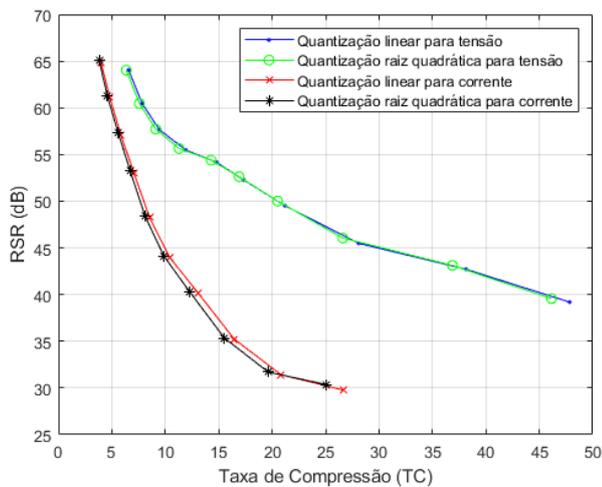


Fig. 6. Compressão do sinal de tensão da fase A utilizado o modelo estimador de envoltório espectral linear e raiz quadrática decrescente

corrente digitalizados da rede elétrica são sinais de característica periódica, salvo transitórios de banda larga e desvios na frequência fundamental. Cada janela de sinal utilizada como entrada da Transformada Wavelet apresenta quatro períodos da frequência fundamental da rede, 60Hz, produzindo um vetor de coeficientes esparsos, o que indica grandes corridas de zeros. Essa característica, a qual produz muitas sequências regulares de símbolos (coeficientes quantizados e não-nulos) e de zeros, se beneficia da segmentação recursiva [16]-[17]. Assim sendo, já se esperava uma boa taxa na compressão de símbolos como resultado da codificação aritmética recursiva.

Observa-se que os resultados de simulação para os dois algoritmos de quantização (modelo de estimação de envoltório espectral linear decrescente e raiz quadrática decrescente) são significativamente diferentes para sinais de tensão e de corrente elétrica (Figura 6). Como se comentou anteriormente, os sinais de corrente apresentam maiores distorções, quando comparados ao de tensão. Assim apresentam uma menor taxa de compressão para a mesma relação sinal-ruído, quando comparados aos sinais de tensão. Contudo, observa-se pouca diferença entre os resultados para a compressão de sinais de tensão e para os sinais de corrente, entre si. Ocorre a quase sobreposição das duas curvas médias de $TC \times RSR$. A similaridade entre as curvas é devido a alocação dinâmica de bits entre os dois algoritmos também ser similar.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma técnica de compressão de sinais oriundos de redes elétricas. A técnica é baseada em Transformada Wavelet, na quantização do vetor de coeficientes transformados por meio do uso de modelo estimador do envoltório espectral e pela codificação de entropia. Foram investigados diversos algoritmos de codificação de entropia. Face a regularidade e a esparsidade da sequência de símbolos produzidos após a quantização do vetor de coeficientes transformados, a codificação aritmética recursiva apresentou melhor

desempenho dentre as técnicas de entropia e configurações estudadas.

A quantização do vetor de coeficientes transformados com base na estimação do envoltório espectral da Transformada Wavelet se mostrou mais eficiente. Os resultados de simulação mostraram desempenho similares entre o modelo de envoltório espectral linear decrescente e o modelo raiz quadrática decrescente.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à FAPDF pelo apoio prestado para a apresentação deste trabalho no XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBRT 2019).

REFERÊNCIAS

- [1] AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century", *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 3, n. 5, p. 34–41, Sept 2005. ISSN 1540-7977
- [2] IPAKCHI, A.; ALBUYEH, F. "Grid of the future", *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 7, n. 2, p. 52–62, March 2009. ISSN 1540-7977
- [3] H. Jiang, K. Wang, Y. Wang, M. Gao and Y. Zhang, "Energy big data: A survey", *IEEE Access*, Vol. 4. Pp. 3844 – 3861, 2016
- [4] Nataša S. Živic, Obaid Ur-Rehman, Christoph Ruland "Evolution of smart metering systems", *23rd Telecommunications Forum Telfor (TEL-FOR)*, p. 635 - 638, 2014.
- [5] M. Erol-Kantarci, and H. T. Mouftah, "Energy-Efficient Information and Communication Infrastructures in the Smart Grid: A Survey on Interactions and Open Issues", *IEEE Communication Surveys Tutorials*, Vol. 17, No. 1, pp. 179-197, 2015.
- [6] Arunima S. Pattanayak ; Bhawani Shankar Pattnaik ; Bikash Narayan Panda, "Implementation of a smart grid system to remotely monitor, control and schedule energy sources using Android based mobile devices", *9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, p. 1-5, 2014.
- [7] Mihaela M. Albu, Mihai Sănduleac, Carmen Stănescu, "Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring in Emerging Networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 8, p. 485-492, 2017.
- [8] David A. Huffman., "A method for the construction of minimum-redundancy codes", *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, September 1952.
- [9] Witten, Ian H.; Neal, Radford M.; Cleary, John G., "Arithmetic Coding for Data Compression", 1987.
- [10] N. C. F. Tse, J. Y. C. Chan, Wing-Hong Lau, J. T. Y. Poon, and L. L. Lai, "Real-Time Power-Quality Monitoring with Hybrid Sinusoidal and Lifting Wavelet Compression Algorithm", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 4, pp. 1718-1726, 2012.
- [11] J. Ning, J. Wang, W. Gao, and C. Liu, "A wavelet-based data compression technique for smart grid", *IEEE Transactions Smart Grid*, Vol. 2, No. 1, pp. 212–218, Mar. 2011.
- [12] Jorge Cormane; Francisco Assis de O. Nascimento "Spectral Shape Estimation in Data Compression for Smart Grid Monitoring", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, pp. 1214 - 1221, 2016.
- [13] N. C. F. Tse, J. Y. C. Chan, Wing-Hong Lau, J. T. Y. Poon, and L. L. Lai, "Real-Time Power-Quality Monitoring with Hybrid Sinusoidal and Lifting Wavelet Compression Algorithm", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 4, pp. 1718- 1726, 2012
- [14] W. R. A. Ibrahim and M. M. Morcos, "Novel data compression technique for power waveforms using adaptive fuzzy logic", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, pp. 2136–2143, Jul. 2005.
- [15] S. K. Meher, A. K. Pradhan, and G. Panda, "An integrated data compression scheme for power quality events using spline wavelet and neural network", *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 69 Nos. 2-3, pp. 213–220, 2004.
- [16] Skretting, Karl and Husøy, John Håkon and Aase, Sven Ole, "Improved Huffman coding using recursive splitting", *Proceedings of Norwegian Signal Processing*, NORSIG, 1999.
- [17] Arithmetic Coding and Huffman Coding in MATLAB. [Online]. Available: <http://www.uix.no/karlsk/proj99/index.html>.
- [18] Electric Power Research Institute, Inc. (Aug. 1, 2018). National Database repository of Power System Events.[Online]. Available:<http://expertmonitoring.com/doelibrary/default.asp>.