

# Processamento de Sinais de Descargas Parciais utilizando Wavelets e Variação Total

Paulo V. do C. Batista, Hilton de O. Mota e Flávio H. de Vasconcelos

**Resumo**—Técnicas de processamento de sinais são desenvolvidas com o intuito de auxiliar no processo de manutenções em equipamentos, evitando falhas e paradas indesejadas. Uma dessas falhas é conhecida como descarga parcial. O objetivo deste trabalho é identificar as descargas parciais de um sinal, aplicando um método conhecido como Variação Total com *Wavelets*. São utilizados sinais sintéticos e medidos em laboratório contendo ruídos gaussianos, harmônicos e impulsivos. Os resultados obtidos são promissores e mostram que o método reconstrói bem o sinal, mantendo as descargas.

**Palavras-Chave**—Processamento de Sinais, Wavelets, Variação Total, Descargas Parciais.

**Abstract**—Techniques of signal processing are developed with the purpose of assisting in the process maintenance in equipment, avoiding failures and unwanted stops. One such fault is known as partial discharge. The objective of this work is to identify the partial discharges of a signal, applying a method known as Total Variation with Wavelets. Synthetic and laboratory signals containing gaussian, harmonic and impulsive noises are used. The results obtained are promising and show that the method reconstructs well the signal, maintaining the discharges.

**Keywords**—Signal Processing, Wavelets, Total Variation, Partial Discharge.

## I. INTRODUÇÃO

Descargas parciais (DPs) são descargas elétricas que acontecem parcialmente no interior de sistemas de isolamento. Como discutido por Mota *et al* [1], apesar de apresentarem como características localidade e baixa energia, geralmente aparecendo em forma de pulsos elétricos de curta duração (Fig. 1), sua reincidência pode ocasionar defeitos nos sistemas de isolamento devido às alterações que causam nas estruturas físicas e químicas dos materiais. Em casos mais extremos, podem ocorrer rupturas no isolamento de equipamentos elétricos, causando graves falhas de operação, como por exemplo em sistemas de alta tensão. Assim, visando possibilitar intervenções e manutenções programadas em equipamentos, são desenvolvidas e utilizadas técnicas de processamento de sinais.

Entre as diversas técnicas existentes, a Transformada de *Wavelets* (TW) tem sido cada vez mais utilizada, pois entre outras características, permite a decomposição do sinal em componentes localizados no tempo (translação do sinal) e na escala (dilatação/contração do sinal). Isso favorece a representação de sinais especificamente localizados, como é o caso de sinais de DPs.

Paulo Vitor do Carmo Batista, Hilton de Oliveira Mota e Flávio Henrique de Vasconcelos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil, E-mails: paulovitorsi@gmail.com, hilton@cpdee.ufmg.br, fvasc@cpdee.ufmg.br. O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil", FAPEMIG (APQ-01178-14) e IFNMG.

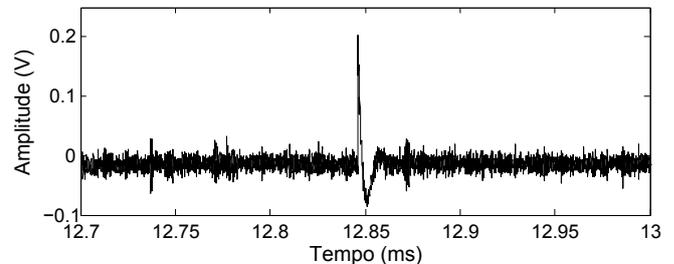


Fig. 1. Descarga Parcial

Em uma variação da TW, Coifman e Donoho [2] propuseram aplicar os métodos tradicionais de eliminação de ruídos não apenas ao sinal original, mas a versões deslocadas circularmente, obtendo como sinal reconstruído a média dos sinais obtidos individualmente para cada deslocamento. Esse método é conhecido como Transformada de *Wavelets* não-dizimada ou invariante ao deslocamento.

Um método frequentemente utilizado para eliminação de ruídos em imagens digitais, como apresentado por Condat [3], Figureiredo *et al* [4] e Strong e Chan [5], é a Variação Total (VT) que, proposto por Rudin *et al* [6], é um tipo de otimização restrita. O VT baseia-se no princípio de que os sinais com oscilações excessivas, possivelmente associadas a ruídos, possuem alta variação total. Busca-se então minimizar essa variação total sujeito a restrições que são impostas usando multiplicadores de Lagrange.

O objetivo deste trabalho é aplicar o método proposto por Ding e Selesnick [7], em sinais de descargas parciais medidos em laboratório e gerados por modelos numéricos, utilizando o algoritmo SALSA (*Split Variable Augmented Lagrangian Shrinkage Algorithm*) e a VT. Baseados em análises e testes estatísticos, os resultados são relevantes, mostrando que o método aplicado a sinais reais produz excelentes níveis de atenuação de diversos tipos de ruído.

Este artigo está estruturado a partir desta introdução, e conta na segunda seção com os trabalhos relacionados, onde são discutidas algumas técnicas de processamento de sinais; na terceira seção é explicado o método de Variação Total com *Wavelets*, bem como os parâmetros e famílias empregadas; na quarta seção são apresentados os sinais utilizados; na quinta seção são mostrados os resultados obtidos bem como uma discussão sobre eles; a sexta seção conta com as conclusões e trabalhos futuros; e por fim, as bibliografias consultadas.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

A Transformada de *Wavelets* Discreta fornece um conjunto de coeficientes que associados a respectivas funções



$$\beta = \frac{(1 - \eta)\sqrt[3]{N}\sigma}{4} \quad (8)$$

$$a = \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

em que  $\sigma$  e  $\eta$  são definidos empiricamente neste trabalho, respectivamente como 0.15 e 0.99 para os sinais sintéticos. Para os sinais medidos, o parâmetro  $\sigma$  variou para cada sinal, pois os melhores resultados foram atingidos usando os valores apresentados na Tabela I.

O critério para a escolha da família a ser utilizada no processamento do sinal foi a relação entre a curva e a descarga parcial. Essa medida é dada pelo coeficiente de correlação, que como visto em Ma *et al* [16], possui maior valor para a família *Daubechies 2*.

Ainda em Ma *et al* [16], entre as *wavelets* disponíveis, a *Daubechies 2* possui quase todas as propriedades necessárias, como compactação, duração limitada, ortogonalidade e assimetria para análise de pulsos irregulares e transitórios rápidos.

Por fim, empiricamente adotou-se 4 níveis de decomposição para os sinais sintéticos. Já para os sinais medidos, a quantidade de níveis é apresentada na Tabela I.

TABELA I  
CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS MEDIDOS

| Índice do Sinal | Tipo do Ruído                       | Sigma | Eta  | Níveis |
|-----------------|-------------------------------------|-------|------|--------|
| 1               | Harmônico                           | 0.01  | 0.99 | 5      |
| 2               | Harmônico                           | 0.007 | 0.99 | 5      |
| 3               | Impulsivo                           | 0.02  | 0.99 | 10     |
| 4               | Impulsivo sincronizado à Rede 60 Hz | 0.09  | 0.99 | 3      |
| 5               | Harmônico                           | 0.09  | 0.99 | 5      |

Uma função *hard - thresholding* possui alta sensibilidade a pequenas mudanças, ou seja, se a entrada é um pouco menor que um determinado limiar, pode-se obter uma saída muito diferente da desejada. Por esse motivo, uma função de *thresholding* contínua pode produzir melhores resultados. Assim, a função de penalidade  $\phi$  utilizada foi a arc-tangente mostrada na Equação 10,

$$\phi(x; a) = \begin{cases} \frac{2}{a\sqrt{3}} \left( \operatorname{atan} \left( \frac{1 + 2a|x|}{\sqrt{3}} \right) - \frac{\pi}{6} \right), & \text{se } a > 0, \\ |x|, & \text{se } a = 0. \end{cases} \quad (10)$$

#### IV. SINAIS UTILIZADOS

Com o objetivo de avaliar os métodos de filtragem digitais, é necessário primeiramente utilizar sinais previamente conhecidos, permitindo assim comparar os resultados qualitativa e quantitativamente. Para este trabalho foram gerados 60 sinais sintéticos, sendo 20 corrompidos por ruído gaussiano, 20 corrompidos por ruído impulsivo e 20 corrompidos por ruído harmônico.

Além desses sinais, aplicou-se o método à 5 sinais medidos no laboratório de medição e instrumentação computacional da Universidade Federal de Minas Gerais. Todos eles fazem parte de uma base de dados de sinais de DPs oriundos de pesquisas contidos em Mota *et al* [17].

#### V. RESULTADOS

Dados os sinais apresentados na Seção IV, objetiva-se com o método, filtrar o sinal preservando as descargas parciais (pulsos) nele contidas.

A Fig. 2, apresenta um sinal simulado com descargas parciais regularmente espaçadas corrompido por ruído gaussiano, e o mesmo sinal após aplicação do método de filtragem WATV. Como pode ser visto, o método apresentou excelentes níveis de atenuação do ruído gaussiano, eliminando-o quase totalmente. Além disso, manteve as descargas parciais apresentando baixo nível de atenuação da amplitude das mesmas.

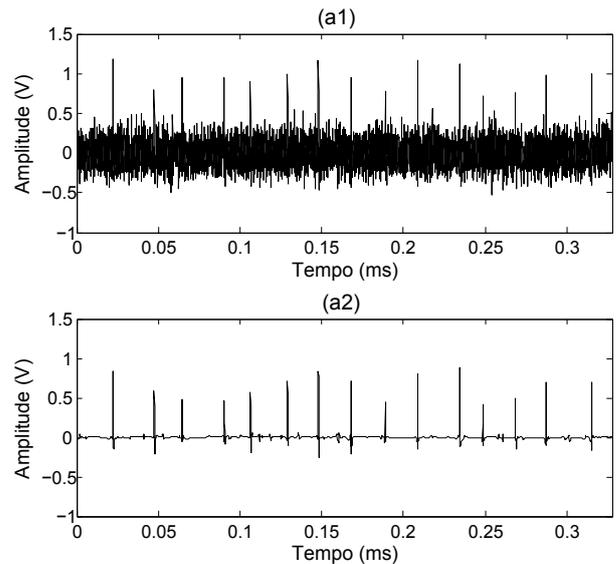


Fig. 2. Sinal Sintético com Ruído Gaussiano

A Fig. 3 corresponde a um sinal simulado com descargas parciais regularmente espaçadas corrompido por ruídos impulsivos. Como pode ser visto, os ruídos impulsivos foram praticamente eliminados e as descargas parciais foram levemente atenuadas.

A Fig. 4 representa um sinal simulado com descargas parciais regularmente distribuídas corrompido por ruído harmônico do tipo AM. A mesma figura apresenta também o sinal após aplicar o método WATV. Nota-se que obteve-se excelente atenuação do ruído, sendo este praticamente eliminado, além de manter as descargas parciais que foram levemente atenuadas.

Após empregar o método em sinais simulados e verificar sua eficiência, aplicou-se o mesmo a sinais medidos em laboratório.

A Fig. 5 corresponde ao sinal 1 da Tabela I, e possui ruído predominantemente harmônico e diversas descargas parciais concentradas entre os instantes 12 ms e 15 ms. Ao aplicar o método, percebe-se no sinal filtrado a eliminação quase total do ruído harmônico e a manutenção das descargas parciais, que foram suavemente atenuadas.

Assim como o sinal 1 mostrado na Fig. 5, o sinal 5, mostrado na Fig. 6, possui ruído predominantemente harmônico, com alguns ruídos impulsivos distribuídos. Diferentemente do sinal anterior, ele possui apenas três descargas parciais entre os instantes 9 ms e 14 ms, que após aplicação do método foram

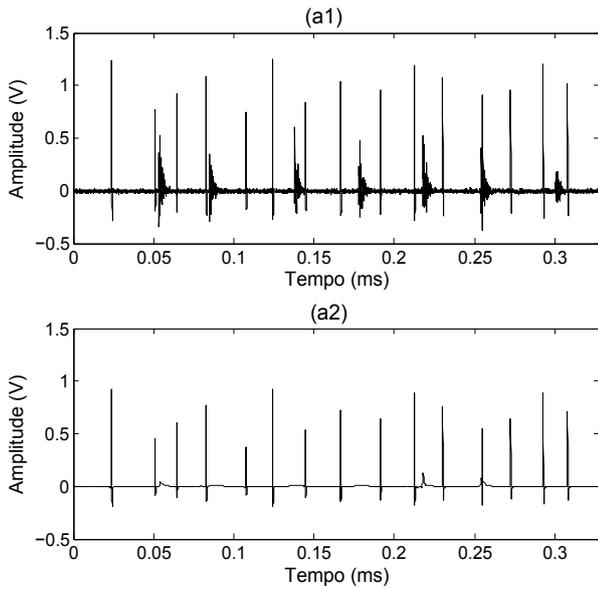


Fig. 3. Sinal simulado com Ruído Impulsivo

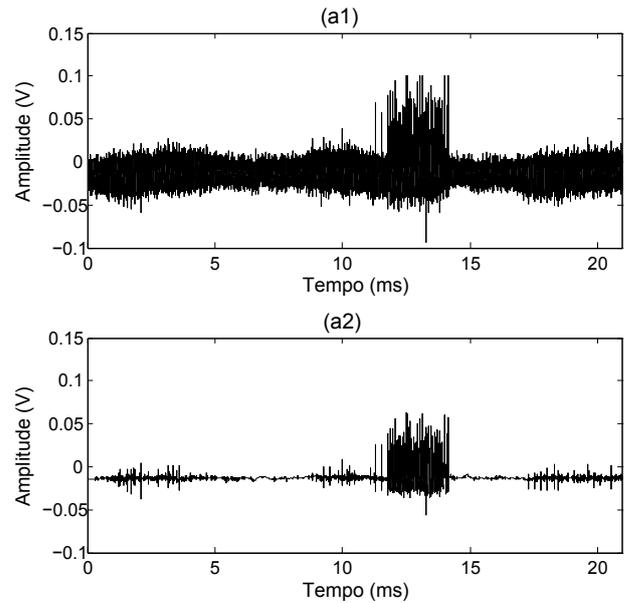


Fig. 5. Sinal 1 medido com Ruído Harmônico

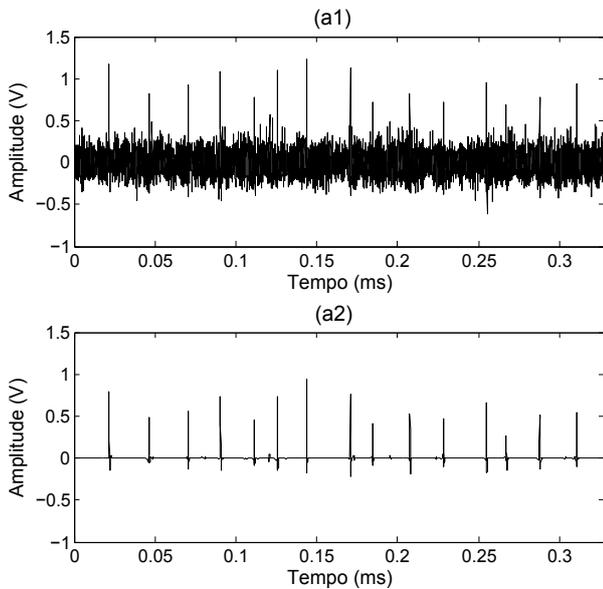


Fig. 4. Sinal simulado com Ruído Harmônico

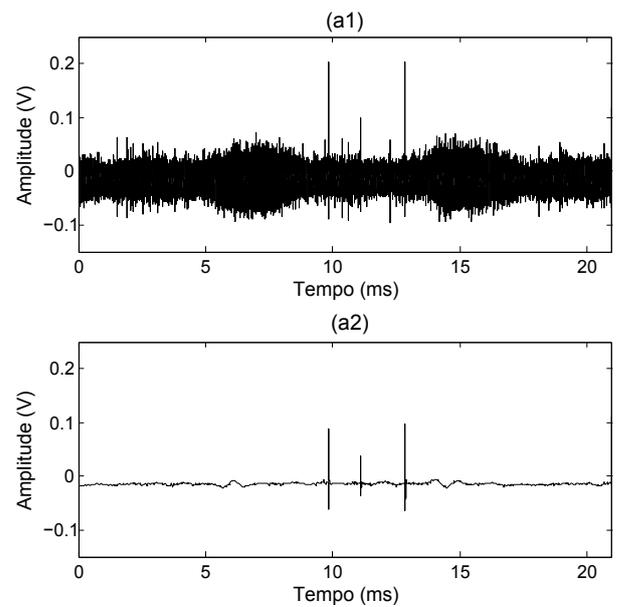


Fig. 6. Sinal 5 medido com Ruído Harmônico

mantidas com suave atenuação. Como pode ser visto, o ruído harmônico bem como os ruídos impulsivos foram removidos, mostrando que para este tipo de sinal o método apresentou-se muito eficiente.

Como pode ser visto na Fig. 7, o sinal 2 também é composto por ruído harmônico do tipo AM. No entanto, este sinal possui diversas descargas parciais entre os instantes 1 ms e 4 ms com amplitudes que variam entre 0.02 V e 0.1 V. Assim como no resultado do método aplicado ao sinal 1, o ruído contido neste sinal não foi totalmente eliminado, mas houve atenuação do mesmo e as descargas parciais foram mantidas.

A Fig. 8 corresponde ao sinal 3 que contém, ao longo de sua duração, diversos ruídos impulsivos. No entanto, como mostrado em a2 e a3 na Fig. 9, nos instantes 10.28 ms e 11.76 ms acontecem duas descargas parciais com amplitudes

aproximadas de 0.2 V e 0.1 V respectivamente. Além disso, ressaltar-se um ruído impulsivo de amplitude aproximada de 0.2 V que ocorre aos 16.14 ms mostrado em a4, que foi totalmente eliminado.

Por fim, o sinal 4 mostrado na Fig. 10, possui predominantemente ruído harmônico, duas descargas parciais nos instantes 10.2 ms e 11.6 ms e, no instante 14.98 ms apresenta um ruído impulsivo com amplitudes positiva e negativa de aproximadamente 0.5 V, como mostrados respectivamente em a2, a3 e a4 na Fig. 11. Após aplicar o método, as descargas foram mantidas e os ruídos harmônico e impulsivo foram totalmente eliminados.

Após analisar os resultados do método em sinais sintéticos e medidos, é feita uma análise estatística de sua eficiência. Uma

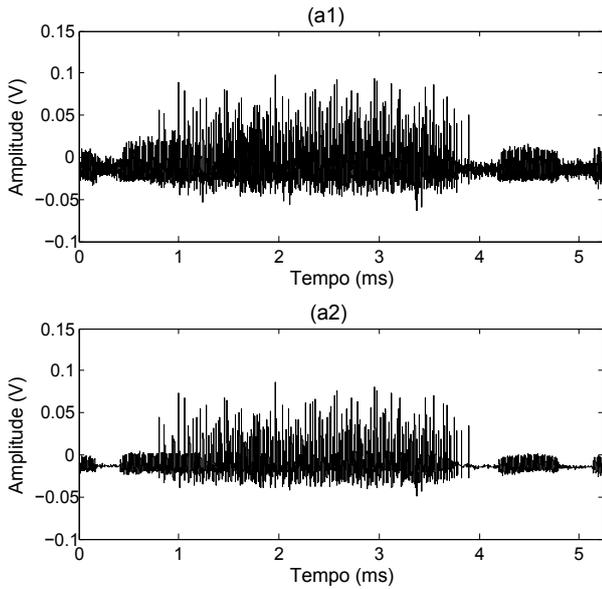


Fig. 7. Sinal 2 medido com Ruído Harmônico

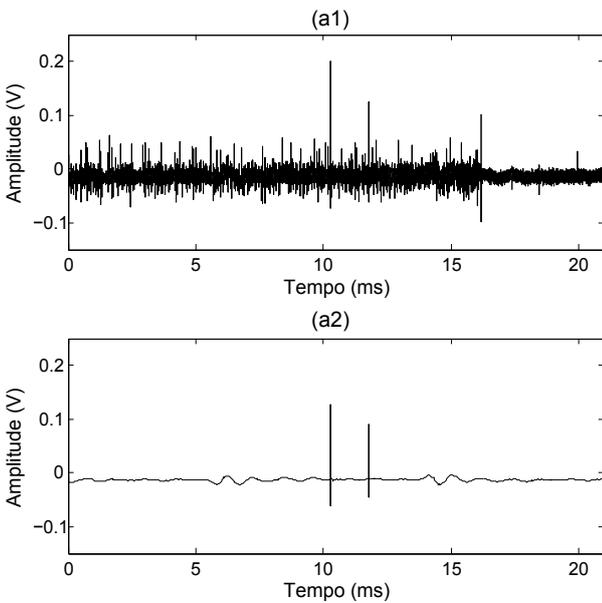


Fig. 8. Sinal 3 medido com Ruído Impulsivo

boa medida para atestar sua precisão é o RMSE (*Root Mean Square Error*) (11), que calcula a raiz do erro quadrático médio entre o sinal desejado e o sinal obtido.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \hat{x}_n)^2} \quad (11)$$

Assim, na Tabela II são apresentados os valores de RMSEs para os métodos WATV e ODBPD nos 60 sinais simulados. Percebe-se então que o método WATV apresentou maior RMSE apenas para o sinal 12 corrompido por ruído gaussiano.

A partir dessa análise, realizou-se um teste estatístico para verificar se o método WATV é melhor que o método ODBPD para os sinais utilizados. Primeiramente verificou-se

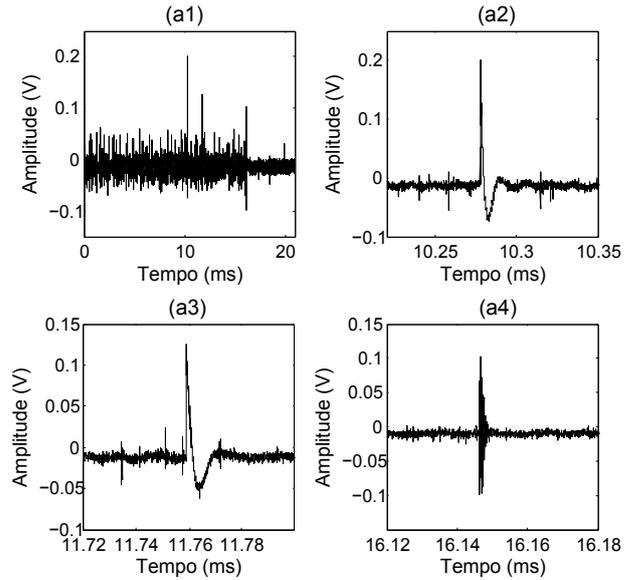


Fig. 9. Detalhes Sinal Medido com Ruído Impulsivo

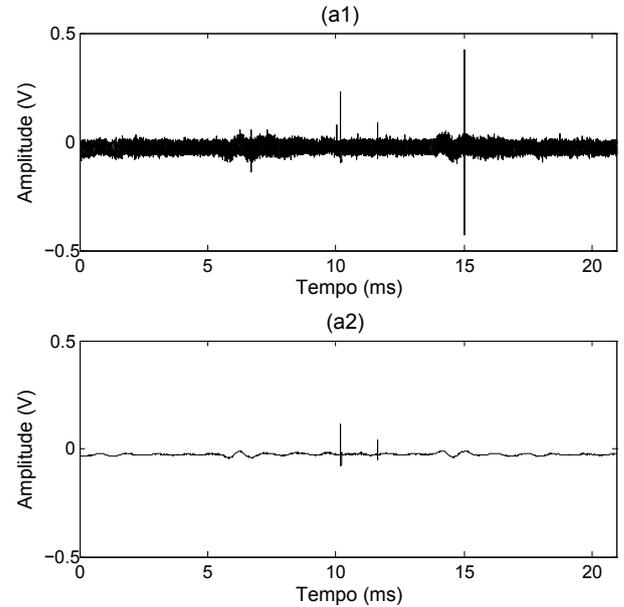


Fig. 10. Sinal 4 medido com Ruído Impulsivo Sincronizado à Rede

a premissa de normalidade dos resíduos realizando o teste estatístico de Shapiro-Wilk. Como mostrado na Tabela III, todos os  $p$ -valor são superiores a 0,05 e portanto, a premissa de normalidade dos resíduos é atendida em todos os casos.

Visto que os dados vem de uma distribuição normal, aplicou-se então o Teste T pareado unilateral, para verificar se o método WATV é estatisticamente equivalente ou melhor que o método ODBPD. Como apresentado na Tabela IV, os  $p$ -valor de  $4.284 e-05$ ,  $7.437e-11$  e  $2.305e-09$  comprovam que para todos os sinais testados o método WATV apresenta-se mais eficiente que o método ODBPD.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a aplicação do método de Variação Total com *Wavelets* utilizando o algoritmo SALSA para

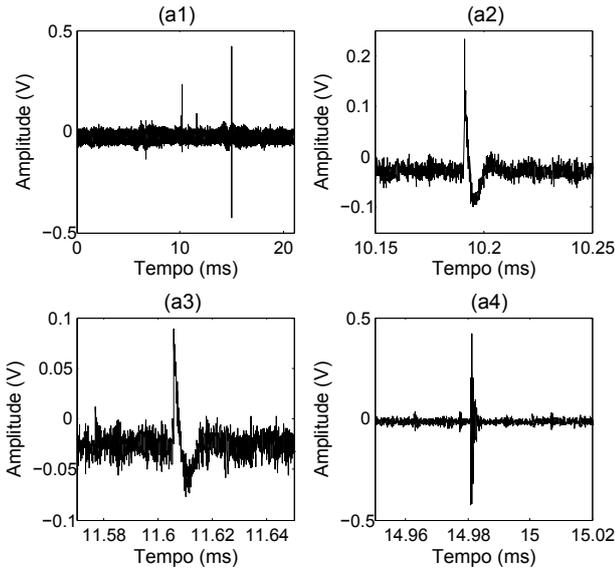


Fig. 11. Detalhe Sinal medido com Ruído Impulsivo Sincronizado à Rede

TABELA II  
RMSES DOS SINAIS UTILIZADOS

| Sinal | Gaussiano     |               | Impulsivo |               | Harmônico |               |
|-------|---------------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
|       | ODDBPD        | WATV          | ODDBPD    | WATV          | ODDBPD    | WATV          |
| 1     | 0.0417        | <b>0.0362</b> | 0.0390    | <b>0.0222</b> | 0.0322    | <b>0.0231</b> |
| 2     | 0.0406        | <b>0.0350</b> | 0.0362    | <b>0.0231</b> | 0.0293    | <b>0.0222</b> |
| 3     | 0.0396        | <b>0.0388</b> | 0.0270    | <b>0.0192</b> | 0.0305    | <b>0.0219</b> |
| 4     | 0.0404        | <b>0.0339</b> | 0.0370    | <b>0.0219</b> | 0.0304    | <b>0.0231</b> |
| 5     | 0.0409        | <b>0.0374</b> | 0.0381    | <b>0.0224</b> | 0.0322    | <b>0.0249</b> |
| 6     | 0.0395        | <b>0.0359</b> | 0.0380    | <b>0.0246</b> | 0.0322    | <b>0.0218</b> |
| 7     | 0.0440        | <b>0.0370</b> | 0.0294    | <b>0.0227</b> | 0.0301    | <b>0.0228</b> |
| 8     | 0.0392        | <b>0.0357</b> | 0.0369    | <b>0.0219</b> | 0.0306    | <b>0.0236</b> |
| 9     | 0.0435        | <b>0.0345</b> | 0.0315    | <b>0.0205</b> | 0.0301    | <b>0.0219</b> |
| 10    | 0.0406        | <b>0.0349</b> | 0.0226    | <b>0.0182</b> | 0.0336    | <b>0.0256</b> |
| 11    | 0.0406        | <b>0.0376</b> | 0.0324    | <b>0.0206</b> | 0.0307    | <b>0.0219</b> |
| 12    | <b>0.0365</b> | 0.0371        | 0.0383    | <b>0.0211</b> | 0.0329    | <b>0.0224</b> |
| 13    | 0.0395        | <b>0.0382</b> | 0.0375    | <b>0.0215</b> | 0.0293    | <b>0.0236</b> |
| 14    | 0.0414        | <b>0.0394</b> | 0.0366    | <b>0.0227</b> | 0.0319    | <b>0.0229</b> |
| 15    | 0.0371        | <b>0.0359</b> | 0.0412    | <b>0.0220</b> | 0.0288    | <b>0.0217</b> |
| 16    | 0.0410        | <b>0.0368</b> | 0.0374    | <b>0.0212</b> | 0.0285    | <b>0.0214</b> |
| 17    | 0.0394        | <b>0.0354</b> | 0.0268    | <b>0.0193</b> | 0.0290    | <b>0.0213</b> |
| 18    | 0.0378        | <b>0.0377</b> | 0.0336    | <b>0.0219</b> | 0.0302    | <b>0.0242</b> |
| 19    | 0.0365        | <b>0.0392</b> | 0.0272    | <b>0.0199</b> | 0.0305    | <b>0.0216</b> |
| 20    | 0.0450        | <b>0.0415</b> | 0.0252    | <b>0.0184</b> | 0.0331    | <b>0.0233</b> |

TABELA III  
TESTE SHAPIRO-WILK

| Tipos de Ruído<br>p-valor | Teste Shapiro-Wilk |           |           |
|---------------------------|--------------------|-----------|-----------|
|                           | Gaussiano          | Impulsivo | Harmônico |
|                           | 0.6392             | 0.2203    | 0.4989    |

TABELA IV  
TESTE T PAREADO

| Tipos de Ruído<br>p-valor | Teste T Pareado |            |            |
|---------------------------|-----------------|------------|------------|
|                           | Gaussiano       | Impulsivo  | Harmônico  |
|                           | 4.284 e-05      | 7.437 e-11 | 2.305 e-09 |

eliminação de ruídos gaussianos, harmônicos e impulsivos em sinais de descargas parciais sintéticos e gerados em laboratório.

Entre os ruídos apresentados, os impulsivos são mais complexos de serem extraídos devido a sua similaridade com as

próprias descargas parciais. Com os resultados apresentados, e após comparação estatística com método da literatura, conclui-se que o método WATV obteve expressivos níveis de eliminação de ruídos, sendo mais eficiente que o método ODBPD.

Em trabalhos futuros pretende-se realizar outras métricas de avaliação de filtragem, comparar o WATV a outros métodos da literatura e utilizar outros sinais sintéticos e medidos.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais (IFNMG-PBQS) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG-APQ-01178-14) pelo suporte financeiro oferecido.

REFERÊNCIAS

- [1] H. d. O. Mota, F. H. Vasconcelos, and C. L. de Castro, "A comparison of cycle spinning versus stationary wavelet transform for the extraction of features of partial discharge signals," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 2, pp. 1106–1118, 2016.
- [2] R. R. Coifman and D. L. Donoho, "Translation-invariant de-noising," in *Wavelets and statistics*. Springer, 1995, pp. 125–150.
- [3] L. Condat, "A direct algorithm for 1-d total variation denoising," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 11, pp. 1054–1057, 2013.
- [4] M. A. Figueiredo, J. B. Dias, J. P. Oliveira, and R. D. Nowak, "On total variation denoising: A new majorization-minimization algorithm and an experimental comparison with wavelet denoising," in *Image Processing, 2006 IEEE International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 2633–2636.
- [5] D. Strong and T. Chan, "Edge-preserving and scale-dependent properties of total variation regularization," *Inverse problems*, vol. 19, no. 6, p. S165, 2003.
- [6] L. I. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms," *Physica D: nonlinear phenomena*, vol. 60, no. 1-4, pp. 259–268, 1992.
- [7] Y. Ding and I. W. Selesnick, "Artifact-free wavelet denoising: non-convex sparse regularization, convex optimization," *IEEE signal processing letters*, vol. 22, no. 9, pp. 1364–1368, 2015.
- [8] D. L. Donoho, "De-noising by soft-thresholding," *IEEE transactions on information theory*, vol. 41, no. 3, pp. 613–627, 1995.
- [9] X. Ma, C. Zhou, and I. Kemp, "Dsp based partial discharge characterisation by wavelet analysis," in *Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2000. Proceedings. ISDEIV. XIXth International Symposium on*, vol. 2. IEEE, 2000, pp. 780–783.
- [10] W. M. Cuenca, J. M. Seixas, and A. F. Levy, "Análise de componentes principais para identificar descargas parciais em transformadores de potência," in *Brazilian Symposium on Neural Nets, Rio de Janeiro, Brazil, 2004*.
- [11] I. Mitiche, G. Morison, A. Nesbitt, M. Narborough, P. Boreham, and B. Stewart, "An evaluation of total variation signal denoising methods for partial discharge signals," in *Electrical Insulation Conference (INSUCON), 2017 INSUCON-13th International*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [12] F. T. de Azevedo Silva and H. de Oliveira Mota, "Partial discharge signal processing using overcomplete dictionaries and sparse representations," in *Electrical Insulation Conference (EIC), 2017 IEEE*. IEEE, 2017, pp. 388–391.
- [13] H. de Oliveira Mota, L. C. D. da Rocha, T. C. de Moura Salles, and F. H. Vasconcelos, "Partial discharge signal denoising with spatially adaptive wavelet thresholding and support vector machines," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 2, pp. 644–659, 2011.
- [14] M. V. Afonso, J. M. Bioucas-Dias, and M. A. Figueiredo, "Fast image recovery using variable splitting and constrained optimization," *IEEE transactions on image processing*, vol. 19, no. 9, pp. 2345–2356, 2010.
- [15] M. Nikolova, M. K. Ng, and C.-P. Tam, "Fast nonconvex nonsmooth minimization methods for image restoration and reconstruction," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 19, no. 12, pp. 3073–3088, 2010.
- [16] X. Ma, C. Zhou, and I. Kemp, "Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 3, pp. 446–457, 2002.
- [17] H. Mota and F. Vasconcelos, "A partial discharge data acquisition system based on programmable digital oscilloscopes," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE*, vol. 2. IEEE, 2001, pp. 994–999.