

# Diagnóstico de Disjuntores: Aplicação da Transformada *Wavelet* a Sinais Reais de Resistência Dinâmica de Contato

Wallysson de Vasconcelos Sousa, Francisco Marcos de Assis, Tarso Vilela Ferreira, Adriano Costa de Oliveira

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Universidade Federal de Campina Grande

Campina Grande/PB - Brasil

**Resumo** — Neste trabalho é proposto um método de análise da curva de Medição de Resistência Dinâmica de Contato. O método consiste na aplicação da Transformada *Wavelet* para obter os coeficientes de detalhe das curvas de resistência dinâmica de contato, as quais foram obtidas utilizando diferentes velocidades de abertura e diferentes correntes de teste. Com base na energia associada a cada curva de detalhe, realiza-se a classificação do nível de degradação dos contatos de disjuntores. Os resultados preliminares indicam que o método proposto é capaz de identificar com acurácia diferentes graus de degradação dos contatos de disjuntores.

**Palavras-chave** — Disjuntores, medição da resistência dinâmica de contato, controle de velocidade, Transformada *Wavelet*.

## I. INTRODUÇÃO

Os disjuntores de alta tensão são dispositivos de proteção eletromecânicos cuja finalidade é conduzir, interromper e restabelecer correntes em um ponto da rede elétrica. Seu acionamento ocorre manualmente ou automaticamente através de relés de proteção.

As técnicas de medição de resistência para avaliar o grau de degradação dos contatos dos disjuntores possuem a vantagem de evitar desmontagens desnecessárias durante uma manutenção, que podem tomar muito tempo. Além do mais, novos problemas podem ser gerados durante as etapas de desmontagem e montagem, como a introdução de impurezas no óleo ou a danificação de juntas de vedação, tornando o equipamento sujeito a falhas de operação e, consequentemente, reduzindo sua confiabilidade.

A alta temperatura provocada pela formação de arcos elétricos no processo de abertura dos disjuntores é a principal causa de desgaste nos contatos de disjuntores. Portanto, os contatos de arco, responsáveis pela condução das correntes de arco, são os mais afetados pela alta temperatura [2,3].

Quando os contatos de arco se encontram degradados, pode ocorrer a reigitação do arco, ocasionando a diminuição da capacidade de interrupção de corrente do dispositivo. Além disso, podem-se ocasionar sobreaquecimentos que extrapolem o limite térmico dos disjuntores, causando um desgaste acelerado do equipamento, o que gera o risco de explosões dos dispositivos.

A aplicação de técnicas de apoio à decisão pode facilitar a viabilização do monitoramento, através do acompanhamento apropriado de cada disjuntor instalado no sistema elétrico, criando um banco de dados dos equipamentos, permitindo o diagnóstico a partir da Medição de Resistência Dinâmica de Contato (MRD).

Neste trabalho, propõe-se a análise baseada na Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) das curvas obtidas pela MRD, no auxílio à tomada de decisão na avaliação das condições da câmara de extinção de disjuntores. Em particular, uma técnica para diagnosticar o estado dos contatos no interior das câmaras de extinção de disjuntores de potência.

As curvas de resistência dinâmica dos disjuntores foram obtidas com controle de velocidade e de corrente. Para reduzir a velocidade de abertura dos contatos, foi concebido um sistema constituído por um redutor de velocidade acoplado a um motor assíncrono que, por sua vez, foi acionado através de um inversor de frequência.

Para controlar a corrente dos ensaios de MRD, foi utilizado um sistema de medição originalmente desenvolvido por [1]. No sistema proposto, a injeção da corrente de teste é implementada a partir da associação de uma bateria estacionária em série com resistores ajustáveis de cromo-alumínio-ferro. O sistema de medição de corrente consiste em um *shunt* de corrente combinado a um transdutor de tensão, fornecendo um sinal de tensão proporcional a corrente de teste.

Os ensaios de MRD realizados com redução de velocidade de abertura dos contatos fornecem resultados com maior reprodutibilidade, e o aumento da corrente de teste reduz as interferências provenientes de películas de óleo e impurezas. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFCG).

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### A. Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos responsáveis pelas manobras e proteção nos sistemas elétricos, contribuindo em grande parte para a sua confiabilidade, economia e continuidade de operação. Desse modo, garantir que os

disjuntores tenham plenas condições de realizar as manobras solicitadas é essencial. Uma manutenção apropriada permitirá que disjuntores possam exercer as suas funções de forma eficiente.

A função de proteção do sistema exercida pelos disjuntores implica em altos esforços mecânicos, dielétricos e térmicos durante suas operações de abertura e fechamento. A separação física dos contatos principais, durante uma operação de abertura para interrupção de corrente, faz surgir um arco no espaço entre os contatos. Esse fenômeno elétrico pode causar danos irreparáveis ao dispositivo seccionador.

Os contatos responsáveis pela condução de corrente durante o arco são os contatos de arco que são feitos de materiais resistentes ao arco. De acordo com [4], os materiais usados na confecção do contato de arco são tungstênio ou molibdênio, que têm condutividades muito menores que os usados no contato principal.

Na Figura 1, é possível observar uma ilustração de um disjuntor tripolar, a pequeno volume de óleo (PVO).

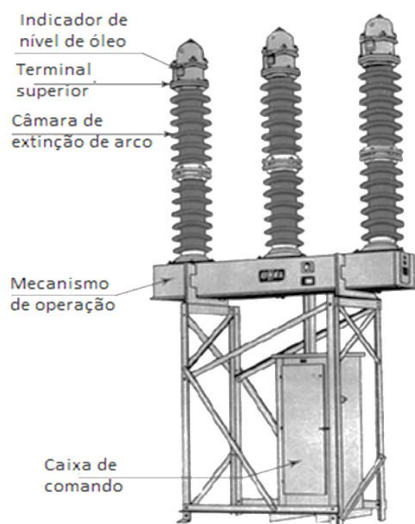


Figura 1 – Ilustração de um disjuntor tipo PVO[4].

Os disjuntores em operação devem satisfazer as seguintes condições [5]:

- abrir e fechar o circuito no menor tempo possível;
- conduzir e suportar termicamente a corrente de carga do sistema;
- suportar térmica e mecanicamente a corrente de curto-circuito do sistema por um determinado tempo, de acordo com as especificações do fabricante;
- isolar a tensão do sistema, em relação à terra, e entre seus polos, independentemente das condições ambientais;
- possuir resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações ocasionadas nas operações de fechamento e abertura.

A manutenção de disjuntores é executada com o equipamento desenergizado. O disjuntor é retirado de operação do circuito, ficando fora de serviço, a fim de testá-

lo e repará-lo. Na avaliação do estado do disjuntor são analisados geralmente os seguintes parâmetros: tempo de fechamento, tempo de abertura, sincronização de operação dos contatos, testes de vibração, testes dos circuitos elétricos e resistência estática dos contatos principais.

#### B. Medição da Resistência Dinâmica de Contato

O ensaio de MRD mede a resistência durante o processo de abertura dos contatos, resultando em uma curva de resistência  $R$  ( $\Omega$ ) em função do tempo de abertura (s) ou da distância dos contatos (mm). A curva gerada na MRD permite uma avaliação mais precisa do estado dos contatos principais e contatos de arco, quando comparado aos resultados obtidos no ensaio de resistência estática de contato [2]. A inserção da informação acerca dos contatos de arco permite uma visão mais ampla do estado geral do equipamento, dentre outras vantagens já apresentadas.

Os ensaios de MRD realizados com velocidade nominal de abertura dos contatos e utilizando os níveis mínimos de corrente de teste indicados pelas normas IEC e ANSI (50 A e 100 A, respectivamente) costumam ter baixa reprodutibilidade dos resultados e a alta interferência proveniente de películas de óleo e vibrações mecânicas, que comprometem a confiabilidade do diagnóstico [5].

Duas formas de contornar esta limitação imediatamente apresentam-se: limitar a corrente ou limitar a velocidade de abertura.

#### C. Transformada Wavelet

As Transformadas de *Wavelets* foram introduzidas em meados anos 80 pela Escola Francesa (Morlet, Grossmann, Meyer, Battle, Lemarié, Torrèsani, etc.), originárias de estudos de curta duração associada a pacotes de ondas acústicas sísmicas [7]. O termo cunhado originariamente era *ondellettes*, que significa algo como "ondinhas" e *wavelets* correspondem a uma versão anglofônica. Qualitativamente, duas características são exigidas para uma função  $\psi(\cdot)$ , chamada de *Wavelet*-mãe: Oscilação (associada com termo "ondas"); e decaimento rápido no tempo – curta duração (associada com o diminutivo "ondinhas"). Todas as funções usadas como núcleos da transformação correspondem a versões comprimidas/expandida de uma mesma onda mãe [8].

A semelhança da transformada wavelet com a transformada de Fourier está na forma como ambas decompõem o sinal fazendo uso de outras funções. Todavia, a transformada wavelet usa uma base de funções oriundas de translações e escalonamentos de uma base mãe  $\psi(t)$  [10]. Uma *wavelet* tem sua energia concentrada no tempo para dar uma ferramenta de análise de fenômenos transitórios, não-estacionários ou variantes no tempo.

A Transformada *Wavelet* Contínua, denotada por sua sigla em inglês como  $CWT_{(a,b)}$ , é definida pela Equação (1).

$$CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (1)$$

em que:  $x(t)$  é o sinal analisado;  $\psi_{a,b}$  é a *wavelet*;  $a$ ,  $b$  são constantes, e indicam a escala e o deslocamento.

Para fins de processamento digital, TWD será utilizada. Na TWD, os fatores de escala e de translação não mais variam continuamente, mas em valores inteiros. Um caso particular dos fatores de escala e translação é da forma dada por (2):

$$a = a_0^j \quad b = ka_0^j b_0 \quad (2)$$

em que  $j$  e  $k \in \mathbb{Z}$ ,  $a_0 > 1$ ,  $b_0 > 0$ .

A escolha de  $a_0 = 2$  e  $b_0 = 1$  é conveniente, pois possibilita a construção das *wavelets* de modo que o conjunto  $\psi_{j,k}(t)$  constitua uma base ortonormal [6]. Tais valores para os fatores de escala e translação implicam a versão discreta da *Wavelet* filha dada por (3):

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi(2^{-j}t - k) \quad (3)$$

No caso de sinais discretos, a TWD será uma série, chamada Série *Wavelet* Discreta no Tempo (SWDT), e os coeficientes da TWD podem ser determinados por um algoritmo baseado em banco de filtros.

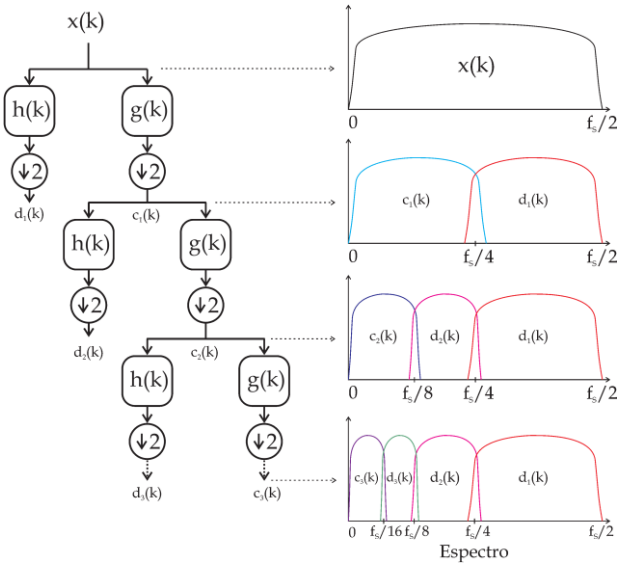


Figura 2 – Esquema de Banco de Filtros TWD [11].

Os filtros  $h(k)$  e  $g(k)$  são filtros passa-baixa e passa-alta respectivamente. Observando a Figura 2, nota-se que o coeficiente de aproximação da escala 1,  $c_1(k)$ , é obtido pela filtragem do coeficiente de aproximação do sinal original,  $x(k)$ , seguida de uma sub-amostragem por 2. Não obstante, percebemos que o coeficiente de detalhe,  $d_1(k)$ , (também chamado Coeficiente *Wavelet*) da escala 1 é obtido pela filtragem do sinal original seguida de uma sub-amostragem por 2. Os outros coeficientes ( $c_2(k)$ ,  $d_2(k)$ ,  $c_3(k)$ ,  $d_3(k)$ ) das camadas subsequentes de filtragem *Wavelet* seguiram a mesma estrutura descrita anteriormente, sendo feita as filtrações a partir dos coeficientes de aproximação da camada superior.

### III. METODOLOGIA

Os ensaios de MRD foram realizados em um disjuntor Siemens PVO, tipo 3AC2711-4, de média tensão com um sistema desenvolvido no próprio laboratório, detalhado em

[1]. O sistema é composto por um osciloscópio digital de 4 canais, uma bateria estacionária de 12 V / 220 Ah, resistores produzidos a partir de fios de cromo-alumínio-ferro ( $0,040 \Omega \sim 1,2 \Omega / 4 \text{ kW}$ ) e sensores de corrente e tensão. A amplitude da corrente de teste no ensaio de contato é definida em função da tensão da bateria e da quantidade de resistores inseridos em série ao circuito.

A fim de controlar a velocidade de abertura do disjuntor, um redutor de velocidade acoplado a um motor assíncrono que, por sua vez, foi acionado por um inversor de frequência. Nos ensaios de MRD, a tensão contínua proveniente da bateria é aplicada sobre os terminais do disjuntor e a amplitude da corrente de teste é controlada através do ajuste dos resistores de cromo-alumínio-ferro, instalados em série com os contatos do disjuntor.

A medição de corrente foi realizada por intermédio de um *shunt* (500 A / 60 mV) e um transdutor de tensão (60 mV / 5 V). Os sinais de corrente e da queda de tensão sobre os contatos do disjuntor são medidos com o auxílio de dois canais do osciloscópio simultaneamente.

Na Figura 3, é mostrado o esquema de obtenção das curvas de MRD de forma simplificada.

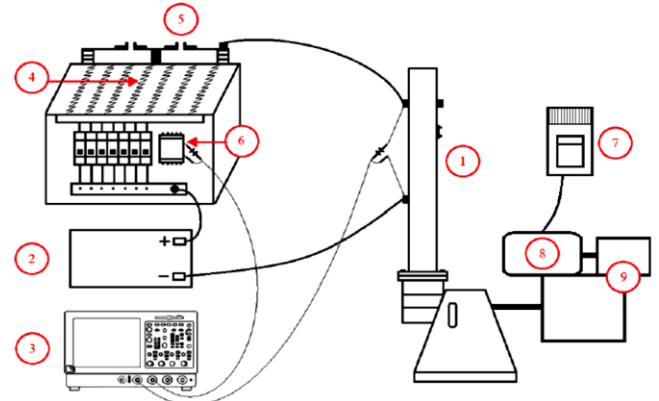


Figura 3 – Ilustração simplificada do arranjo experimental.

Na Figura 4, é mostrado o arranjo experimental de obtenção das curvas de MRD.

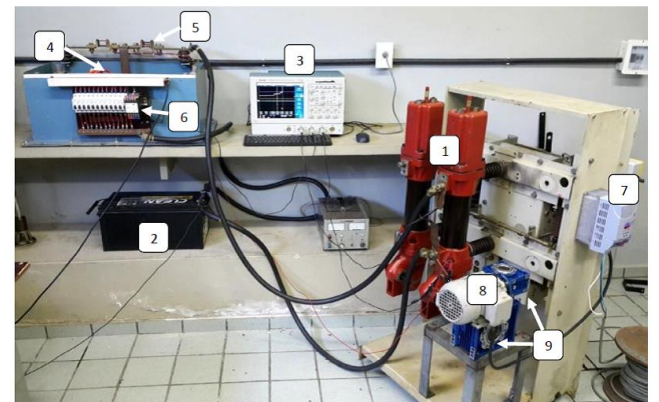


Figura 4 – Arranjo experimental.

Nas Figuras 3 e 4, identificam-se: (1) disjuntor; (2) bateria estacionária; (3) osciloscópio digital; (4) resistores de cromo-alumínio-ferro; (5) shunt de corrente; (6) transdutor de tensão;

(7) inversor de frequência; (8) motor assíncrono; (9) redutor de velocidade.

Os ensaios de MRD em velocidade nominal de abertura dos contatos devem ser realizados com a aplicação de uma corrente de teste de no mínimo 200 A, a fim de reduzir as interferências provenientes de películas de óleo e impurezas. Os ensaios de MRD realizados com este modelo de disjuntor ou modelos semelhantes deveriam utilizar uma velocidade de abertura dos contatos inferior a 0,2 m/s.[5]

Para os ensaios no disjuntor, foram utilizados três conjuntos de contatos com diferentes níveis de degradação. Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas fotografias dos contatos fixos e móveis das três amostras ensaiadas, respectivamente.



Figura 5 – Amostras de contato fixo do disjuntor.



Figura 6 – Amostras de contato móvel do disjuntor.

Os vetores digitalizados de tensão e corrente medidos no decorrer das operações de abertura são transmitidos para um computador. Esses dados são processados por uma rotina computacional desenvolvida no Matlab®, resultando nas curvas de resistência dinâmica.

#### IV. RESULTADOS

Devido às limitações de tamanho do texto, o escopo deste artigo se limitou a analisar a TWD a partir de uma injeção de corrente de 200 A e uma velocidade de abertura entre 0,168~0,173 m/s, as curvas classificadas tem conhecimento prévio do estado de degradação dos contatos.

As curvas de resistência apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9 foram obtidas a partir de ensaios de MRD com redução de velocidade de abertura dos contatos, e representam as amostras X (novo), Y e Z, respectivamente. A corrente de

teste aplicada foi de 200 A. Para cada configuração de ensaio (combinação entre os parâmetros descritos anteriormente) foram realizadas 6 medições, com taxa de amostragem de 125.000 amostras por segundo.

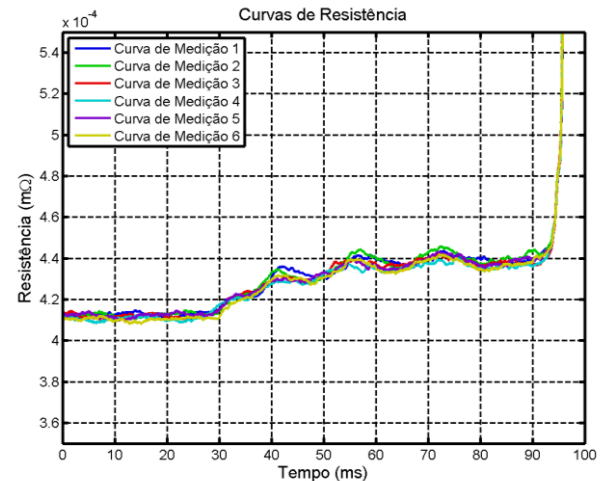


Figura 7 – Curvas de MRD em baixa velocidade da amostra X.

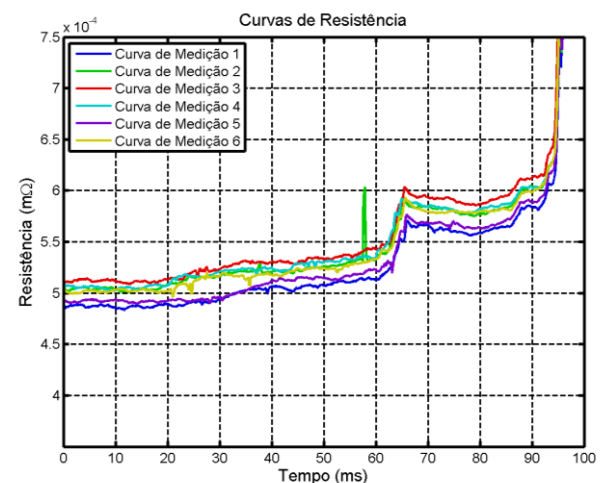


Figura 8 – Curva de MRD em baixa velocidade da amostra Y.

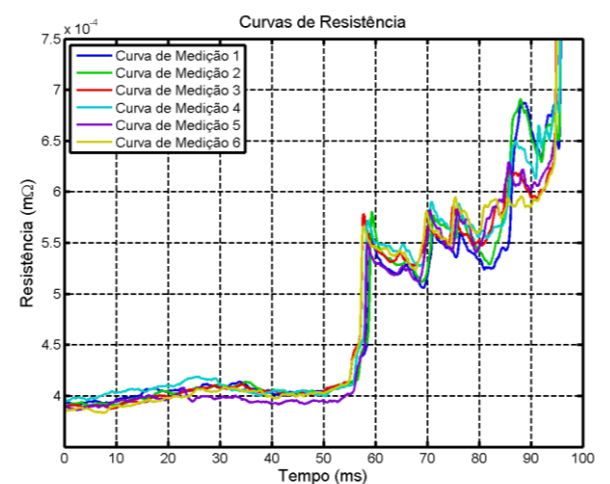


Figura 9 – Curva de MRD em baixa velocidade da amostra Z.

As famílias wavelets utilizadas foram a Haar, Daubechies 4, 6 e 8, Coiflet 5, 6 e 12 e Symlet 8. O número que segue o nome da família indica o número de coeficientes dos filtros da TW. Com propósito ilustrativo, apresentam-se na Figura 10 e na Figura 11 os resultados da decomposição da família Daubechies 12, relativamente ao contato Z. Na Figura 10 apresentam-se os coeficientes de aproximação da terceira escala, enquanto que na Figura 11 apresentam-se os coeficientes de detalhes das três escalas envolvidas.

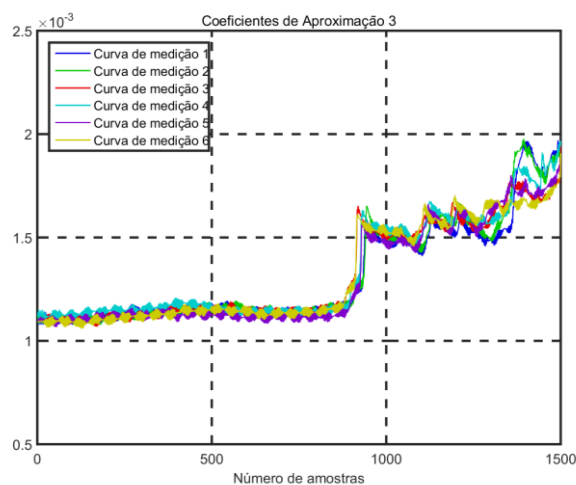


Figura 10 – Curvas de aproximação da amostra Z - Daubechies 12.

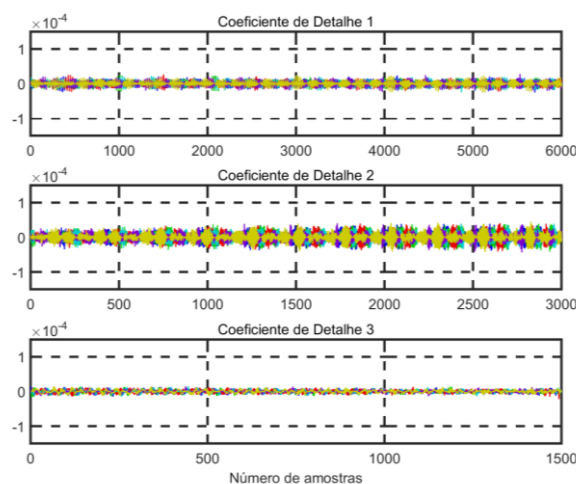


Figura 11 – Curvas de detalhes amostra Z – Daubechies 12.

É evidente, que para sinais pouco comportados, com muitas discontinuidades ou com muitas variações, maior será o valor da energia dos coeficientes de detalhe. Assim, a classificação do nível dos contatos de disjuntores deve ser feita utilizando-se a energia do coeficiente de detalhe. Após a aplicação da TWD, calculou-se a energia dos coeficientes de detalhe em cada nível e as curvas foram classificadas em ordem crescente do valor desta energia.

O terceiro nível da decomposição apresentou os melhores resultados para todas as famílias testadas, caracterizando-se assim, como o mais adequado para a classificação dos sinais analisados.

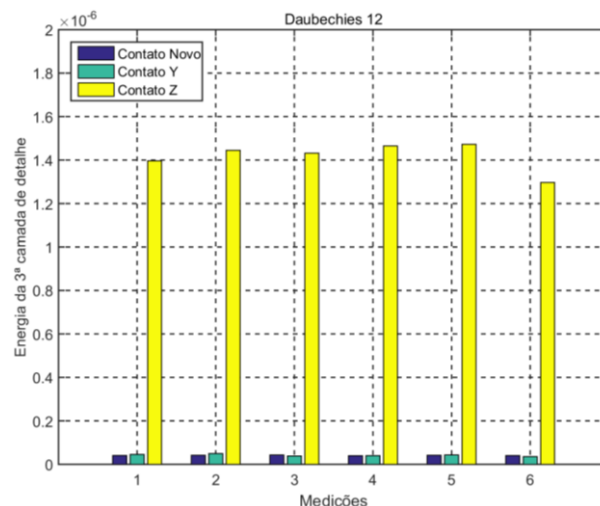


Figura 12 –Energia dos coeficientes de detalhe em função das medições realizadas para a Wavelet Daubechies 12.

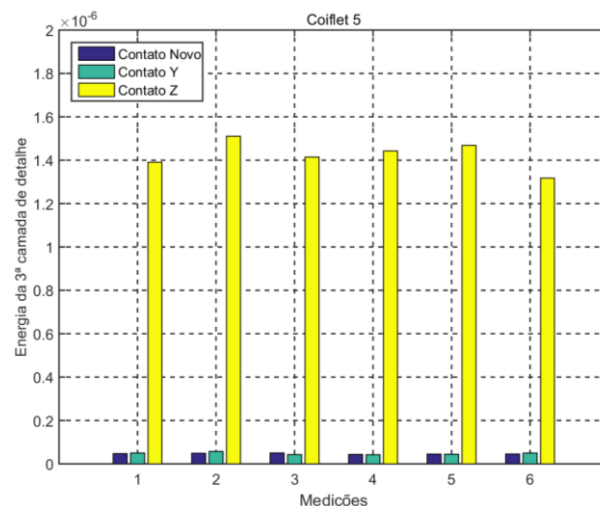


Figura 13 – Gráfico de Coluna Energia do coeficiente de detalhe em função das medições realizadas para a Wavelet Coiflet 5.

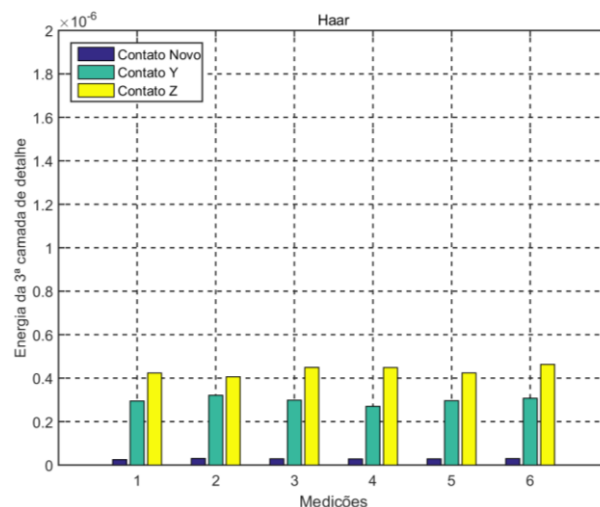


Figura 14 – Gráfico de Coluna da Energia do coeficiente de detalhe em função das medições realizadas para a wavelet Haar.

Na Figura 12, Figura 13 e Figura 14 são apresentados os valores de energia dos coeficientes de detalhe da terceira escala, para as famílias Daubechies, Coiflet 5 e Harr, respectivamente. Percebe-se que para a Figura 12 e para a Figura 13 é menos evidente a distinção entre o contato X (novo) do contato Y, nas primeiras medições. No caso da família Haar, na Figura 14, fica evidente que todos os contatos têm valor de energia da curva de coeficiente de detalhe da MRD discrepante em qualquer das 6 medições.

A transformada Haar apresentou os melhores resultados dentre as três famílias testadas para todos os níveis. O 3º nível de decomposição foi o que se mostrou mais eficiente, pois em todas as medições a discrepância entre os níveis de energia do coeficiente de detalhe ficou mais evidente. Este resultado corrobora com o estudo apresentado por Castro (2012) [9].

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma técnica para diagnosticar o estado dos contatos no interior das câmaras de extinção de disjuntores de potência e as correlacionam recorrendo a algoritmos baseados em Transformadas *Wavelets*. As curvas utilizadas na pesquisa foram obtidas de ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, utilizando dois sistemas para controle de corrente e de velocidade de abertura dos contatos. A partir dos resultados experimentais, comprovou-se que os resultados dos ensaios de MRD, nas condições apresentadas, garantem maior confiabilidade ao diagnóstico.

A técnica proposta é capaz de detectar correlações entre os resultados obtidos e os possíveis desgastes internos sem necessidade de desmontagem dos equipamentos, além de aumentar a margem de certeza em relação às medições de MRD. Com base nos resultados, pode-se dizer que a transformada Haar mostrou-se como a mais adequada entre as três Transformadas *Wavelets* avaliadas, para os exemplos de casos estudados. Este fenômeno provavelmente ocorre devido à forte correlação das wavelet mãe da família haar com os platôs de resistência que se formam nos gráficos, como pode-se observar na Figura 9 e na Figura 10.

O nível de desgaste nos contatos foi identificado nos ensaios de resistência dinâmica. Os contatos identificados visualmente com o maior nível de degradação do contato apresentaram maior energia do coeficiente de detalhe em todas as famílias *wavelets* estudadas.

É necessário o estudo de outras famílias *wavelets*, bem como outras formas de abordagem dos sinais de MRDC, com intuito de se obter resultados ainda mais robustos.

Como limitação da técnica apresentada, percebe-se que os resultados dos ensaios são mais confiáveis quando mantida a total reprodutibilidade do ensaio, ou seja: preserva-se o mesmo modelo de disjuntor, mesma corrente de teste e mesma velocidade de abertura.

## AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG pelo financiamento da pesquisa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) do Departamento de Engenharia Elétrica da (UFCG) pelo apoio na publicação dos trabalhos.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. T. SOUZA, "*Diagnóstico de Contatos de Disjuntores Baseado na Resistência Dinâmica de Contato e Lógica Fuzzy*". Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015. *Tese de Doutorado*.
- [2] LANDRY M., MERCIER A., OUELLET G., RAJOTTE C., CARON J., ROY M., & BRIKCI F., "*A New Measurement Method of the Dynamic Contact Resistance of HV Circuit Breakers*," in Proc. 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1002-1009
- [3] LANDRY M., TURCOTTE O., & BRIKCI F., "*A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breaker*," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, pp. 710-716, Apr. 2008. M. Kezunovic, M. Knezev, Z. Djekic, "Automated Circuit Breakers Monitoring". *Power Systems Engineering Research Center – PSERC*, pp. 01–38, 2007.
- [4] BHEL. *Handbook of switchgears*. New York: McGraw-Hill Professional. 2006
- [5] A. C. OLIVEIRA, "*Ensaio de Resistência Dinâmica em Disjuntores: Análise de Sensibilidade da Corrente e da Velocidade de Abertura dos Contatos*". Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2015. *Dissertação de Mestrado*.
- [6] BURRUS, C. S., Gopinath, R. A., Gou, H. "*Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*". New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1998. (Castro, 2012)
- [7] B.B. HUBBARD., "*Ondes et ondelettes: La saga d'un outil mathématique*", Pour la Science, 1995.
- [8] OLIVEIRA, H. M., "*Análise de Fourier e Wavelets: Sinais Estacionários e Não Estacionários*". Recife – PE: Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco - 2007.
- [9] CASTRO, F. N., "*Resistência Dinâmica de Disjuntores: Transformada Wavelet Aplicada à Tomada de Decisão*". Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - 2012.
- [10] WALKER, J. S., "*A primer on wavelets and their scientific applications*." 2ª Edição. ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 1999.
- [11] FERREIRA, T. V. "*Estimação inteligente da poluição de isolamentos elétricos baseada nos VECSE do ruído ultrassônico*". Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2011. *Tese de Doutorado*.