

METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE DESLOCAMENTO DE CONTATO EM DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO

HENRIQUE SANTANA¹, ADRIANO OLIVEIRA¹, HERBET SANTOS¹, REGINALDO GRIMALDI², EDSON COSTA¹, TARSO FERREIRA²

¹ *Laboratório de Alta Tensão, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande
Rua Aprígio Veloso, 882, 58429-900, Campina Grande, PB, Brasil*

² *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Sergipe
AV. Marechal Rondon, 882, 49100-000, São Cristóvão, SE, Brazil*

E-mails: henrique.santana@ee.ufcg.edu.br, adriano.oliveira@ee.ufcg.edu.br, herbet.sousa@ee.ufcg.edu.br, reginaldogrimaldi@gmail.com, edson@dee.ufcg.edu.br, tarso.ufs@gmail.com

Abstract— The contact travel curve provides information about the operating state of the drive system of the high voltage circuit breakers. Obtaining the contact displacement curve depends on the availability of the circuit breaker for the installation of trajectory sensors, if these sensors do not come embedded in the equipment structure. In this work, a methodology was presented to obtain the contact displacement curve in breakers where the installation of trajectory sensors is not foreseen. To do so, a rotary potentiometer was used as sensor, being installed in the crank that drives the rods responsible for moving the contacts of a small volume of oil circuit breaker. From the analysis of the results, it is concluded that it is possible to obtain this curve by means of the application of the proposed methodology, and it can be implemented in circuit-breakers driven by cranks and rods.

Keywords— High voltage circuit breaker, contact travel curve, drive mechanism, sensor, monitoring.

Resumo— A curva de deslocamento de contato fornece informações a respeito do estado operacional do sistema de acionamento dos disjuntores de alta tensão. A obtenção da curva de deslocamento de contato depende da disponibilidade do disjuntor para instalação de sensores de trajetória, caso estes sensores não venham embarcados na estrutura do equipamento. Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para a obtenção da curva de deslocamento de contato em disjuntores em que não é prevista a instalação de sensores de trajetória. Para tanto, foi utilizado um potenciômetro rotativo como sensor, sendo instalado na manivela que aciona as hastes responsáveis por movimentar os contatos de um disjuntor a pequeno volume de óleo. A partir da análise dos resultados, conclui-se que é possível obter a referida curva por meio da aplicação da metodologia proposta, podendo ser implementada em disjuntores acionados por meio de manivelas e hastes.

Palavras-chave— Disjuntor de alta tensão, curva de deslocamento de contato, mecanismo de acionamento, sensor, monitoramento.

1 Introdução

Os disjuntores de alta tensão são dispositivos de proteção eletromecânicos projetados para conduzir, restabelecer e interromper correntes elétricas no seu local de instalação (Ryan e Jones, 1989). Disjuntores geralmente são acionados para isolar parte de um circuito em caso de sobrecargas ou correntes de falha provenientes de curtos-circuitos. Sendo assim, estes equipamentos devem atuar o mais rápido possível, evitando efeitos térmicos e mecânicos que causam danos às pessoas ou às instalações elétricas protegidas (Bhel, 2006). Portanto, o monitoramento sistemático é um fator determinante para garantir o bom estado operativo dos disjuntores, fazendo com que as exigências básicas do sistema elétrico, como confiabilidade, economia e continuidade do fornecimento de energia elétrica possam ser atendidas (Garzon, 2002).

Os disjuntores devem ser capazes de satisfazer determinadas condições do sistema no qual se encon-

tram instalados, dentre elas se destacam: 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 pólos; possuir resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações geradas durante as operações de abertura e fechamento (Frontin, 2013). Devido a sua complexidade, vários parâmetros devem ser cuidadosamente monitorados e analisados a fim de se diagnosticar o estado operativo de disjuntores. São eles: tempo de fechamento dos contatos; tempo de abertura dos contatos; sincronização de abertura dos contatos; vibração durante as operações de abertura e fechamento; operação dos circuitos de comando; resistência dos contatos; nível e rigidez dielétrica do óleo (disjuntores a pequeno volume de óleo ou grande volume de óleo); pressão do gás (disjuntores a SF6 ou ar comprimido) (Gill, 2008).

Atualmente, as concessionárias de energia elétrica fazem uso de equipamentos de medição conhecidos como analisadores de disjuntores para aferir a maioria dos parâmetros supracitados. No entanto, o uso de tal equipamento tem certas complicações, visto que a obtenção dos parâmetros depende da disponibilidade do disjuntor para a instalação de sensores e transdutores. Na maioria dos casos, esses sensores e transdutores vêm embarcados na estrutura do disjuntor, sendo instalados na etapa de manufatura. Dessa forma, a medição de quaisquer parâmetros não previsto pelos fabricantes de disjuntores é inviabilizada, podendo resultar em falhas de operação devido a um diagnóstico deficiente do estado operacional do disjuntor.

A origem e consequência das falhas em disjuntores têm sido estudadas há muitos anos e as pesquisas apontam o sistema de acionamento do disjuntor como o principal causador dessas falhas (CIGRÉ, 2000 e Janssen *et al*, 2014). Sistemas de acionamento defeituosos afetam a capacidade de abertura e fechamento do disjuntor. Esses defeitos podem ser detectados por meio da avaliação da curva de deslocamento dos contatos, contudo, alguns disjuntores não disponibilizam meios para a obtenção da curva.

Sendo assim, neste trabalho é proposto um método para a obtenção da curva de deslocamento de contato, baseado na medição dos sinais provenientes de um potenciômetro acoplado ao mecanismo de acionamento do disjuntor. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT/UFCG).

2 Fundamentação Teórica

O sistema de acionamento possui a função principal de armazenar e fornecer energia mecânica destinada a movimentar os contatos do disjuntor durante as operações de abertura e fechamento (Garzon, 2002). Esse sistema deve ser capaz de operar independentemente do tempo no qual o disjuntor permaneça na posição aberta ou fechada e do tipo de mecanismo utilizado (Milasch, 1993).

Existem diferentes tipos de mecanismo de acionamento. A diferença se dá principalmente pelo meio utilizado para armazenar a energia mecânica necessária. Os principais meios de armazenamento são molas, pneumáticos e hidráulicos. Os mecanismos de acionamento se encontram interligados aos contatos do disjuntor. Os contatos podem ser movimentados individualmente ou simultaneamente, dependendo da necessidade do sistema no qual o disjuntor se encontra instalado (Stewart, 2004).

Na figura 1 é ilustrado um pólo de um disjuntor típico em corte, no qual podem ser observados os contatos e os componentes responsáveis pela sua movimentação.

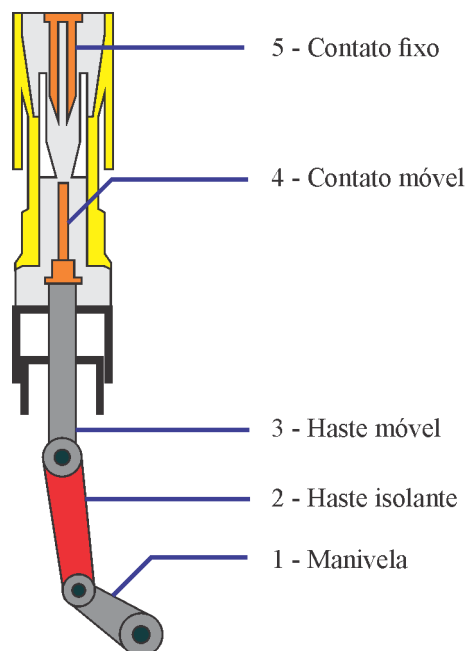


Figura 1. Vista de um pólo de um disjuntor em corte e dos componentes de movimentação dos contatos. Adaptado de (Huang et al., 2014)

A partir da Figura 1, na operação de abertura, a energia mecânica armazenada movimenta a manivela (1) que gira no sentido anti-horário, puxando a haste composta por material isolante (2) para baixo. O movimento da haste isolante faz com que a haste móvel (3) e o contato móvel (4) sejam puxados rapidamente para baixo, se separando e distanciando do contato fixo (5). No final da operação de abertura, o eixo atinge seu fim de curso e o contato móvel (3) assume sua posição final de abertura.

Na operação de fechamento, a energia mecânica armazenada movimenta a manivela (1) que gira no sentido horário, empurrando a haste composta por material isolante (2) para cima. O movimento da haste isolante faz com que a haste móvel (3) e o contato móvel (4) sejam empurrados rapidamente em direção ao contato fixo (5). Ao tocar o contato fixo, o contato móvel continua seu percurso dentro do mesmo de modo a aumentar a área de contato entre os dois. No final da operação de fechamento, o eixo atinge seu fim de curso e o contato móvel (3) assume sua posição final de fechamento.

Independentemente do modo como os contatos são movimentados, os mecanismos de operação devem satisfazer determinados parâmetros, dentre os quais, os mais importantes são a distância de separação entre os contatos e as velocidades de abertura e fechamento dos contatos. As velocidades de abertura e fechamento são importantes para a redução da degradação dos contatos devido à ação do arco elétrico. A distância de separação está relacionada à capacidade do disjuntor em resistir aos estresses dielétricos. Os parâmetros supracitados são afetados pelo desgaste natural do sistema de acionamento. Geralmente, esses parâmetros são obtidos por meio da

curva de deslocamento dos contatos no tempo (Bhel, 2006).

O teste de análise da curva de deslocamento de contato é realizado para determinar se o mecanismo de operação do disjuntor está funcionando corretamente. Geralmente é realizado em disjuntores de média e alta tensão e informa a posição dos contatos do disjuntor em relação ao tempo. Esta relação pode então ser usada para determinar a velocidade de operação do disjuntor para abertura e fechamento, a distância de separação e o intervalo de tempo para fechar e abrir, dentre outras. Os dados do tempo de operação do disjuntor podem ser usados para avaliar a condição das partes mecânicas de disjuntores, como mecanismo de operação, molas e amortecedores. Na Figura 2 é mostrada uma curva de deslocamento típica.

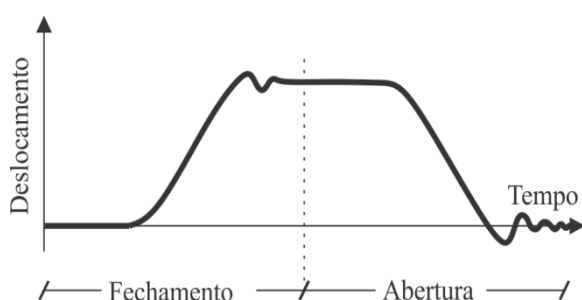


Figura 2. Curva de deslocamento de contato típica. Fonte: Adaptado de (Bhel, 2006).

Na figura é possível identificar as regiões da curva relativas às operações de abertura e fechamento. As oscilações ao final da abertura e fechamento e abertura ocorrem devido à mudança repentina de velocidade do contato ao atingir o final do seu curso.

As informações sobre o deslocamento dos contatos são obtidas por meio de sensores de trajetória de contato. Essencialmente, esses sensores são transdutores de posição acoplados ao mecanismo de acionamento do disjuntor (Niu, 2016). Os sensores são classificados de acordo com o sinal de saída, podendo ser analógicos ou digitais. Dentre os sensores analógicos, aqueles baseados em potenciômetros são os mais comuns, eles estão disponíveis em versões rotacionais e lineares (Niu, 2016). A principal vantagem dos sensores que utilizam potenciômetros é o custo relativamente inferior, quando comparados à outras tecnologias (Bhel, 2006).

Os sensores de trajetória devem ser capazes de suportar as forças e vibrações mecânicas inerentes das operações de abertura e fechamento dos contatos do disjuntor. Além disso, eles devem ser protegidos da poluição e de distúrbios eletromagnéticos. Os sensores de trajetória rotativos são mais fáceis de encapsular do que os lineares. Ademais, os sensores que estão permanentemente instalados no disjuntor devem possuir uma confiabilidade compatível com o tempo de vida do equipamento (Gill, 2008).

3 Metodologia

O objeto teste dos ensaios realizados neste trabalho é um disjuntor de média tensão do tipo PVO fabricado pela Siemens, apresentado na Figura 3.



Figura 3. Fotografia do disjuntor utilizado em laboratório.

Os dados de placa do disjuntor de ensaio estão listados na Tabela 1.

Tipo	3AC
Ano de fabricação	1978
Peso	120 kg
Corrente nominal	800 A
Tensão nominal	15 kV
Corrente de interrupção	12,5 kA
Frequência	50/60 Hz
Meio isolante	Óleo
Fabricação	Siemens

Tabela 1. Dados de placa do disjuntor utilizado.

O disjuntor utilizado possui percurso total do contato móvel de 12 cm, dos quais, 3 cm ocorrem depois dele tocar o contato fixo, durante a operação de fechamento. Dessa forma, a separação galvânica dos contatos se dá após o contato móvel se deslocar 3 cm, durante a operação de abertura.

O ensaio em alta corrente foi possível com a utilização de uma fonte de corrente composta por uma bateria estacionária de 12 V/220 Ah em conjunto com um banco de resistores. Esta associação foi capaz de fornecer valores de até 300 A aos pólos do disjuntor emulando, deste modo, uma condição de atuação prática do equipamento.

A atuação básica do disjuntor pode ser de seccionamento ou energização de um circuito. Para tanto, durante a operação do equipamento, os contatos móveis realizam a trajetória de fechamento (acoplamento) ou abertura (separação) dos contatos.

Para que se fosse possível adquirir uma representação da trajetória dos contatos internos do disjuntor durante sua operação, foi confeccionado um sensor de baixo custo, composto por um potenciômetro rotacional de 10.000 ohms energizado por uma bateria comum de 9V. Este potenciômetro foi instalado em uma estrutura metálica, que permitiu o acoplamento mecânico do pino do potenciômetro ao eixo de rotação do braço-mecânico (manivela) responsável pelo deslocamento do contato móvel.

Em resumo, o ensaio de deslocamento dos contatos do disjuntor foi realizado seguindo a montagem do aparato de ensaio apresentado na Figura 4.

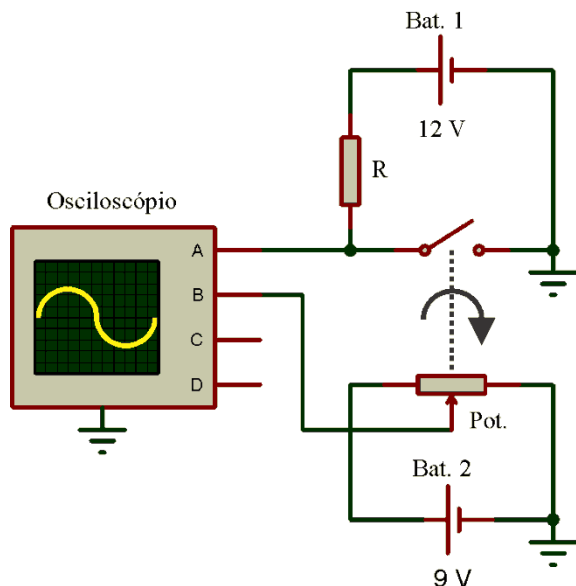


Figura 4. Esquema do arranjo de ensaio.

A aquisição dos sinais de tensão, provenientes do pólo do disjuntor e do sensor de deslocamento, foi possível com a utilização de um osciloscópio Tektronix MDS 2014. A configuração do osciloscópio foi ajustada para que o sinal de *trigger* percebesse mudança de valores da tensão presente nos terminais do pólo do disjuntor, diferentemente para os casos de abertura ou fechamento dos contatos.

Os sinais adquiridos por meio do osciloscópio foram então processados em computador, por meio da ferramenta Matlab®. A rotina desenvolvida no Matlab® tinha a função de realizar a conversão da tensão medida no potenciômetro em deslocamento do contato, representar graficamente os dados de deslocamento e encontro/separação dos contatos e identificar os pontos de cruzamento das curvas geradas. A análise de cada conjunto de dados é descrita no próximo tópico, o qual destina-se à análise dos resultados obtidos e à avaliação preliminar do sensor de baixo custo projetado e testado.

4 Resultados

Após a instalação do potenciômetro no pólo do disjuntor, foram adquiridas duas curvas de desloca-

mento de contato e do sinal de separação/encontro galvânico dos contatos, durante as operações de abertura e fechamento do disjuntor. Na Figura 5 é mostrada a primeira curva referente à operação de fechamento dos contatos.

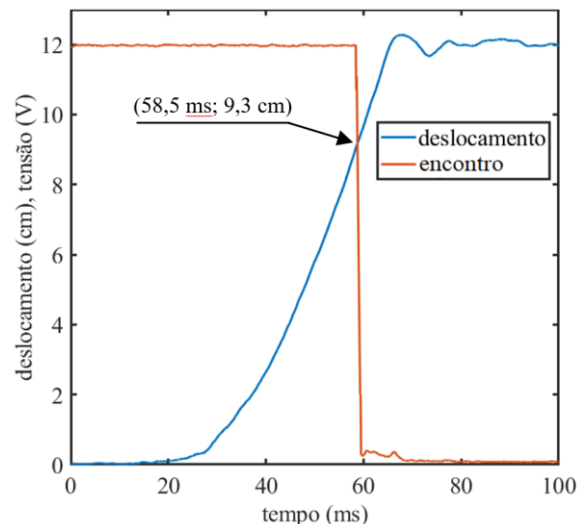


Figura 5. Curva de fechamento de contato obtida.

A partir da análise da Figura 5 é possível verificar que os contatos se tocam no instante 58,5 ms, durante o cruzamento das duas curvas. Esse instante corresponde a posição de 9,3 cm. Assim, é possível comprovar que os contatos se tocam a 9,3 cm do ponto inicial da sua trajetória. Ainda na Figura 5, é possível identificar as oscilações típicas da curva de fechamento, devido a mudança brusca de velocidade do contato ao atingir o final do seu curso.

Na Figura 6 é mostrada a segunda curva de fechamento dos contatos obtida.

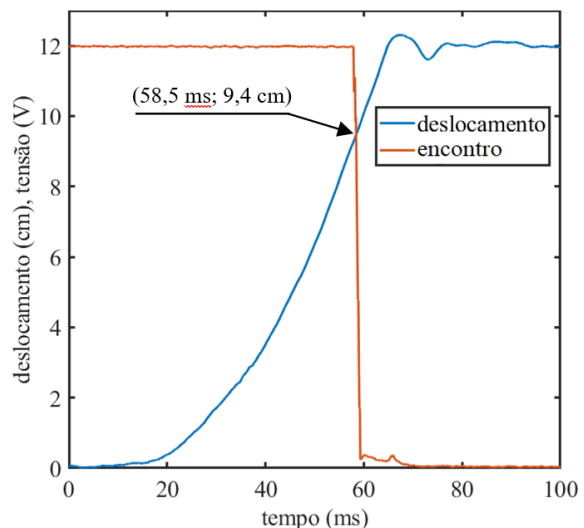


Figura 6. Curva de fechamento de contato obtida.

A partir da análise da Figura 6 é possível observar que os contatos se tocam no mesmo instante, quando comparados com a Figura 5. Esse instante

corresponde a posição de 9,4 cm. Dessa forma, constata-se uma diferença de 0,1 cm entre as duas medições de deslocamento. Essa diferença corresponde a aproximadamente 0,83% do deslocamento total.

Na Figura 7 é mostrada a primeira curva referente à operação de abertura dos contatos.

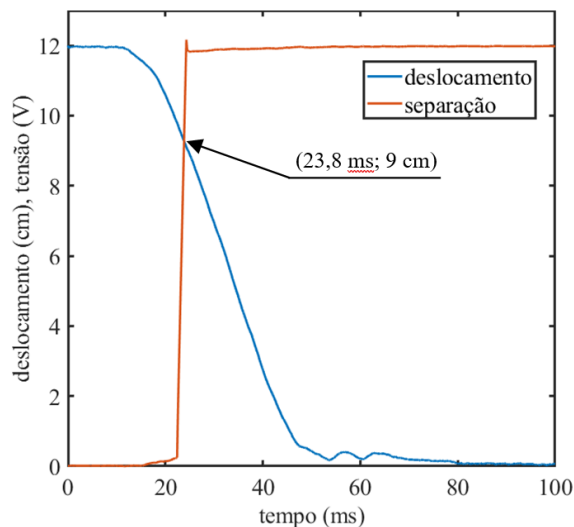


Figura 7. Curva de abertura de contato obtida.

A partir da análise da Figura 7 é possível verificar que os contatos se separam no instante 23,8 ms, durante o cruzamento das duas curvas. Esse instante corresponde a posição de 9 cm. Assim, é possível observar que os contatos se separam a 9 cm do ponto final da sua trajetória. Ainda na Figura 7, é possível identificar as oscilações típicas da curva de abertura, devido a mudança brusca de velocidade do contato ao atingir o final do seu curso.

Na Figura 8 é mostrada a segunda curva obtida, referente a abertura dos contatos.

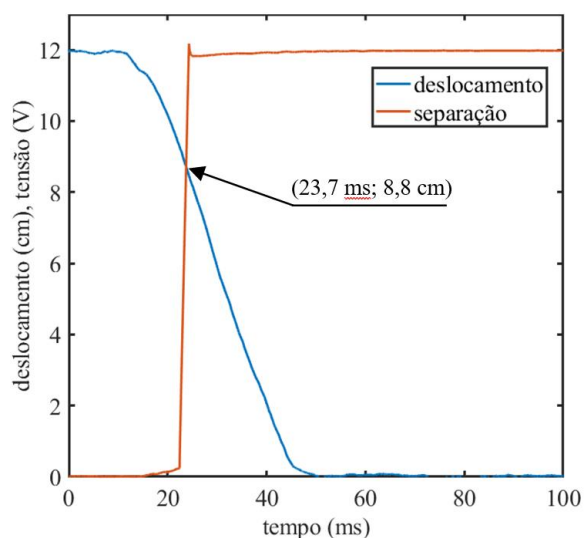


Figura 8. Curva de abertura de contato obtida.

A partir da análise da Figura 8 é possível observar que os contatos se tocam no instante 23,7 ms,

resultando em uma diferença de 0,1 ms quando comparado com a Figura 7. Essa diferença corresponde a 0,1% do tempo total medido.

Ainda na Figura 8, constata-se que os contatos se separam no instante em que a posição dos contatos corresponde a 8,8 cm do ponto final da trajetória. Dessa forma, constata-se uma diferença de 0,2 cm entre as duas medições de abertura realizadas. Essa diferença corresponde a aproximadamente 1,7% do deslocamento total.

Comparando as curvas de fechamento com as de abertura, é possível identificar que os contatos se fecham em pontos da trajetória relativamente superiores aos 9 cm, onde teoricamente deveria ocorrer a separação/encontro de contato. Isto pode estar associado a folgas tanto nos mecanismos de movimentação dos contatos quanto no potenciômetro utilizado. Contudo, a maior discrepância encontrada foi 0,6 cm. Essa diferença corresponde a 5% do deslocamento total dos contatos.

Os tempos de abertura/fechamento do disjuntor são dados pelo intervalo entre o sinal de comando e o instante efetivo de separação/contato galvânico dos contatos. Sendo assim, a metodologia apresentada tem o potencial para o monitoramento de tais parâmetros mediante a utilização de um sensor nas bobinas de comando.

5 Conclusões

Dada a importância dos disjuntores na proteção e manobra dos sistemas elétricos, se faz necessário o monitoramento do seu estado operacional com o objetivo de evitar falhas e defeitos nos seus componentes, dentre eles, os que integram o seu sistema de acionamento. Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia para a obtenção da curva de deslocamento de contatos. A metodologia proposta pode ser aplicada em disjuntores que não disponham de acesso nativo à posição dos seus contatos.

A partir da análise dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que é possível obter a curva de deslocamento de contato a partir da metodologia empregada e, conseqüentemente, avaliar parâmetros relacionados ao funcionamento dos disjuntores de alta tensão como o tempo e a velocidade de abertura/fechamento dos contatos, aceleração dos contatos, a distância de separação entre os contatos fixo e móvel e o sincronismo entre diferentes pólos de um disjuntor. Esses parâmetros são descritos na literatura atual como críticos para o diagnóstico de um disjuntor de alta tensão, conforme mencionado em (CIGRÉ, 2000).

Por fim, é possível concluir que a metodologia apresentada neste trabalho pode ser aplicada a qualquer disjuntor, no qual, a movimentação dos seus contatos seja realizada por meio de manivelas e hastes e estas sejam acessíveis para instalação do sensor de posição.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro. Também gostariam de agradecer à COPELE (Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) e ao LAT (Laboratório de Alta Tensão) da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande).

Referências

- Bhel, Handbook of Switchgears, 1ª ed., vol. I, New York: McGraw-Hill Handbooks, 2006, p. 624.
- CIGRÉ, User Guide For The Application Of Monitoring And Diagnostic Techniques For Switching Equipment For Rated Voltages Of 72.5kv And Above. Working Group 13.09. 2000.
- Frontin, S. O. Equipamentos de Alta Tensão Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas, 2013.
- Garzon, R. D. High voltage circuit breakers: design and applications. CRC Press, 2002.
- Gill, P. Electrical power equipment maintenance and testing. CRC press, 2008.
- Huang, Y. *et al.*, "Research on an intelligent operating mechanism of high voltage circuit breaker," *2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, New Orleans, LA, 2014, pp. 1-5.
- Janssen, A. Makareinis, D. e Sölver, C. E. International Surveys on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 808-814, April 2014. Data for Substation and System Studies
- Milasch, M. Manutenção de disjuntores de alta tensão. Rio de Janeiro: Cervantes Ed., 1993.
- Niu, W. *et al.* A Fault Diagnosis Method of High Voltage Circuit Breaker Based on Moving Contact Motion Trajectory and ELM. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016.
- Ryan, H. e Jones, G. SF6 Switchgear, London: Peter Perigrinus Ltd, 1989.
- Stewart, S. Distribution switchgear, The Institution of Engineering and Technology, 2004, p. 264.