

Análise da Sensibilidade de Acopladores Direcionais de Microfita na Medição de Descargas Parciais em uma Bobina de Hidrogerador

Patrese V. Quelemes*, Luiz A. M. M. Nobrega*, Pedro H. V. Rocha**,
Margareth M. G. de Lima*** e Edson G. da Costa[§]

*Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

***Graduanda no Programa de Graduação em Engenharia Elétrica

[§]Professor no Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil

patrese.quelemes@ee.ufcg.edu.br

Resumo — O objetivo deste estudo é avaliar, com base em dados experimentais, a aplicabilidade de acopladores direcionais de microfita, como sensores para medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador. Para tanto, foram confeccionados quatro acopladores direcionais de microfita. A sua aplicabilidade foi avaliada na detecção de pulsos eletromagnéticos provenientes de descargas parciais. Como forma de validar a detecção das medições de descargas parciais, utilizou-se outros dois sensores: um transformador de corrente de alta frequência (*High Frequency Current Transformer - HFCT*) e um capacitor de acoplamento de 1000 pF. A aquisição dos dados foi realizada com um osciloscópio digital de quatro canais e o processamento dos dados com o *software* Matlab®. A avaliação das medições obtidas nos experimentos foi feita por meio da relação sinal-ruído (RSR), pela contagem do número de pulsos detectados, além da verificação dos padrões representados em função da tensão aplicada, método conhecido por *PRDP* (*Phase Resolved Partial Discharge*). Os resultados obtidos demonstraram que o acoplador direcional de microfita proposto consiste em uma solução viável, de baixo custo de fabricação e com uma ótima sensibilidade.

Palavras-chave — Acoplador direcional de microfita, descargas parciais, filtragem *wavelet*, hidrogerador.

I. INTRODUÇÃO

No contexto atual dos sistemas elétricos, os ativos são remunerados pelas horas de fornecimento de energia elétrica disponibilizadas. Assim, as linhas de transmissão, equipamentos das subestações e os hidrogeradores devem permanecer em plenas condições de uso. Paradas não planejadas, devido a falhas em máquinas rotativas, fizeram com que os engenheiros de manutenção buscassem meios de monitoramento dos principais tipos de falhas, de forma a possibilitar um melhor controle do seu funcionamento e da realização de manutenções preditivas.

A adoção de manutenções preditivas, como forma de substituir as manutenções preventivas, busca migrar da condição de manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada nas condições do equipamento, otimizando assim a sua vida útil. Com base na análise de centenas de estudos, o

IEEE – Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos concluiu que as falhas em grandes máquinas rotativas estão relacionadas a [1]:

- Problemas em mancais, vibração, dentre outros (falhas mecânicas - 50% das falhas);
- Problemas nos enrolamentos estatóricos (falhas elétricas - 40% das falhas);
- Problemas no rotor ou pólos (falhas elétricas - 10% das falhas).

Na maioria das vezes, as falhas nos enrolamentos estatóricos (falhas elétricas) estão relacionadas ao aumento do nível de descargas parciais no sistema de isolamento. Portanto, a ocorrência de descargas parciais nos sistemas de isolamento dos equipamentos de alta tensão, é um sintoma de fragilidade na sua suportabilidade dielétrica, cuja evolução, pode vir a acarretar graves consequências [2].

Assim, dependendo da intensidade das descargas parciais, a vida útil do equipamento poderá ser reduzida drasticamente. Adicionalmente, experiências indicam que as descargas ocorrem anos antes da falha, oferecendo tempo suficiente para se planejar e executar as devidas manutenções preditivas [2].

Os estudos reiteram a importância da análise e avaliação dos enrolamentos estatóricos de máquinas rotativas, por meio do monitoramento dos seus níveis de descargas parciais. Os sensores que são tradicionalmente utilizados na medição de descargas parciais possuem um elevado preço. O acoplador direcional de microfita, proposto neste artigo, é um sensor de fácil confecção, baixo custo de fabricação e com pouca captação de ruídos externos.

Este artigo tem como objetivo avaliar, com base em dados experimentais, a sensibilidade de quatro acopladores direcionais de microfita, na medição de pulsos de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador. Após essa avaliação, foi escolhido o acoplador direcional de microfita que obteve a melhor sensibilidade, o qual foi comparado com as medições obtidas por um capacitor de acoplamento de 1000 pF (norma IEC 60270) e um transformador de corrente de alta frequência (*High Frequency Current Transformer - HFCT*).

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Enrolamentos Estáticos de Hidrogeradores

Um hidrogerador é composto, principalmente, por dois componentes: o estator e o rotor. O rotor tem a função de desenvolver o campo magnético girante. Já o estator, é composto por um conjunto de condutores (bobinas) fixados por um núcleo aterrado, denominado núcleo do estator. Os enrolamentos funcionam como um condutor, proporcionando um caminho à corrente elétrica. O núcleo, por outro lado, concentra o campo magnético, fixa os enrolamentos e dissipa o calor gerado pelas altas correntes. Uma vez que a diferença de potencial entre os enrolamentos e o núcleo aterrado do estator pode chegar a milhares de volts, faz-se necessário separar essas duas superfícies com um material dielétrico [3].

No estator do hidrogerador, a isolamento do enrolamento é a parte mais fraca e que envelhece mais rápido, devido à ação de diversos tipos de estresses (elétricos, mecânicos, químicos e ambientais) que estão presentes em uma máquina em condições operacionais.

Na Fig. 1 são ilustrados dois enrolamentos que estão envolvidos por um núcleo aterrado. Na figura também se observam as fontes de falhas que provocam os principais tipos de falhas no isolamento do enrolamento de um hidrogerador. Os tipos mais comuns fontes de falhas são: pequenas cavidades internas, delaminações, falhas na camada semicondutora, aterramento inadequado, descargas entre enrolamentos muito próximos e contaminação na superfície do enrolamento.

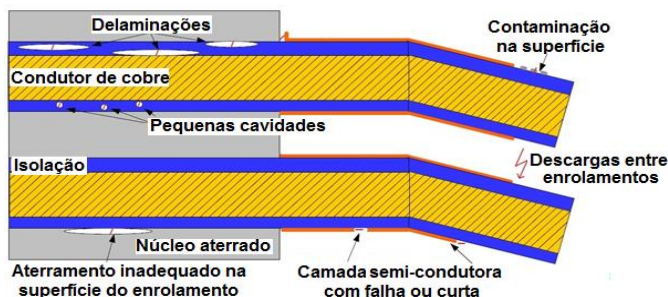


Fig. 1. Sistema de isolamento do estator e fontes de falhas mais comuns.

A presença de pulsos de descargas parciais, devido às falhas no sistema de isolamento do estator, em maiores intensidades e frequências, promovem a degradação do material dielétrico. A medição de descargas parciais é uma forma de estimar, prevenir e monitorar as condições de degradação do isolamento, evitando que as deteriorações resultem em uma falha de maior proporção a máquina [3].

B. Descargas Parciais

A descarga parcial é definida, pela norma IEC 60270 (2000), como uma descarga elétrica localizada que curto-circuita parte da isolamento entre condutores. Ainda de acordo com a IEC, um pulso de descarga parcial pode ser definido como um pulso de tensão ou corrente, resultante de uma descarga parcial que ocorreu em um determinado isolamento sob teste. As descargas parciais são expressas em picoCoulombs (pC) ou tensão (V) e os seus sinais geralmente

são de baixa amplitude e curta duração, tipicamente algumas centenas de nanossegundos (ns).

As descargas parciais são decorrentes da ionização de uma determinada região do dielétrico. A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende da forma do eletrodo, das características do dielétrico e da tensão aplicada. Devido a não uniformidade do campo elétrico, pequenas regiões do isolamento podem ser submetidas a solicitações superiores à sua rigidez dielétrica, dando origem às descargas parciais [4]. Considerando a intensidade e as características das descargas, tais como; a taxa de repetição e intensidade, a vida útil do material isolante pode ser reduzida drasticamente [5].

Na Fig. 2, apresentam-se os principais fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais, bem como os seus princípios e métodos de medição. Um pulso de descarga parcial propaga ondas eletromagnéticas, luz, som e calor. Além disso, em dielétricos líquidos, provoca reações químicas. Portanto, a identificação da descarga parcial pode ser realizada utilizando-se sensores de fibras ópticas, sensores de ultra-som, sensores térmicos ou pela análise do gás dissolvido.

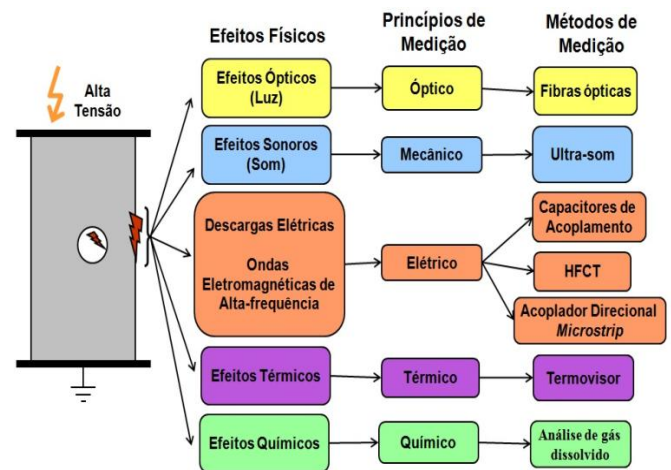


Fig. 2. Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.

Nos enrolamentos dos hidrogeradores, especificamente, a medição elétrica pode ser realizada utilizando sensores de descargas parciais que detectem as componentes dos sinais dos pulsos que se deslocam através dos enrolamentos do estator (capacitor de acoplamento) [6]. Ou por sensores que detectam as componentes do sinal irradiadas eletromagneticamente (HFCT e o acoplador direcional de microfita).

C. Acoplador Direcional de Microfita

Os acopladores direcionais de microfita são linhas de transmissão impressas que permitem a propagação guiada de energia eletromagnética. Das várias estruturas impressas possíveis, a de microfita é a mais utilizada, pois se trata de uma linha de transmissão muito versátil, amplamente utilizada em frequências da ordem de MHz a GHz. A sua popularidade se deve, essencialmente, à sua fácil construção (utiliza os mesmos processos que os circuitos impressos convencionais) e à vasta gama de aplicações, não só como acopladores eletromagnéticos, mas também como filtros e antenas [7].

A linha de transmissão de microfita consiste em uma fita condutora, impressa sobre um substrato dielétrico, cuja forma mais usual é representada na Fig. 3. Os parâmetros mais importantes da linha condutora são a largura (W), a largura efetiva (W_{ef}), a espessura micrométrica (T), a impedância característica (Z_0) e o comprimento (L). Já os parâmetros do substrato são a espessura (H) e a permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e efetiva (ϵ_{ref}).

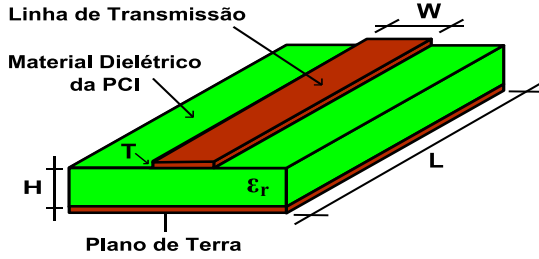


Fig. 3. Estrutura geométrica de uma linha de transmissão de microfita.

D. Filtragem Wavelet

De forma análoga à transformada de Fourier, na qual um sinal pode ser representado por infinitas funções seno e cosseno, na transformada *wavelet* é possível representar um sinal a partir de funções denominadas *wavelets*-mãe. A Eq. 1 define matematicamente a transformada *wavelet* contínua.

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

em que $f(t)$ é o sinal que se deseja analisar, $\psi_{a,b}(t)$ a *wavelet*-mãe, e os parâmetros escala e deslocamento denotados por “ a ” e “ b ”, respectivamente.

A presença de interferências em sinais faz com que exista a necessidade de eliminá-las, para que se obtenha o sinal desejado. O processo de eliminação destas interferências é denominado *denoising*, o qual pode ser realizado com o auxílio de diversas ferramentas tais como a transformada de Fourier, a transformada *wavelet*, dentre outras. O objetivo deste processo é remover o ruído dos dados medidos, preservando as informações do sinal essenciais para a aplicação [8].

O processo de *denoising* utilizando a transformada *wavelet* consiste em realizar a decomposição *wavelet* do sinal medido e submeter os coeficientes, provenientes da transformada, a valores de limiar de rejeição, com o intuito de eliminar aqueles associados ao ruído, preservando os que representam o sinal de interesse. Após a aplicação dos limiares de rejeição, o sinal é recomposto pela transformada *wavelet* inversa, em que o sinal filtrado é reconstituído [8].

III. METODOLOGIA

A. Confeção dos Acopladores Direcionais de Microfita

Para a confecção dos protótipos de acopladores direcionais de microfita, foi utilizada uma placa de circuito impresso (PCI) de dupla face, com material dielétrico de fibra de vidro (FR-4) de 0,8 cm de espessura e com permissividade elétrica relativa de 4,5. Tendo como base os parâmetros da placa de circuito impresso, calculou-se a largura da linha de microfita (W), para

que sua impedância característica fosse o mais próximo possível de 50 Ω . Assim, é estabelecido o casamento de impedância com o cabo coaxial, utilizado na transmissão dos sinais para o equipamento de medição. Dessa forma, obtém-se a máxima transferência de potência. Para isso, adotou-se W como 1,5 mm e, em seguida, utilizou-se para o cálculo da impedância real da linha de transmissão as Eq. (2, 3 e 4),

$$W_{ef} = W + T \left[1 + \ln \left(\frac{2H}{T} \right) \right], \quad \text{para } \frac{W}{H} \geq \frac{1}{2\pi}; \quad (2)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + \frac{12H}{W_{ef}}}}, \quad \text{para } \frac{W}{H} \geq 1; \quad (3)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \frac{120\pi}{\frac{W_{ef}}{H} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W_{ef}}{H} + 1.444 \right)}. \quad (4)$$

As equações acima consideram a largura efetiva da linha de transmissão (W_{ef}) e a permissividade elétrica relativa efetiva do substrato (ϵ_{ref}). Assim, o valor de “ ϵ_{ref} ” dos acopladores de microfita confeccionados foi calculado em 3,44 e a impedância da linha de transmissão em 48,6 Ω .

A linha de transmissão de microfita, quando funciona como um acoplador direcional, apresenta características de um filtro passa-altas. Com isso, o comprimento da linha de transmissão (L) está relacionado com o valor da máxima transferência de potência do sinal induzido. Dependendo assim, da faixa de frequência das ondas eletromagnéticas que se deseja captar [9]. De acordo com a Eq. 5,

$$f = \frac{4c}{L\sqrt{\epsilon_{ref}}} \quad (5)$$

em que “ c ” é a velocidade da luz no vácuo e por meio da condição de $\frac{1}{4}$ (um quarto) do comprimento de onda, pode-se encontrar o valor do comprimento físico da linha de transmissão, para que se obtenha a frequência de máxima transferência de potência (f) das ondas eletromagnéticas geradas pelas descargas parciais no isolamento da bobina. Dessa forma, o valor de (f) para máxima transferência de potência de cada acoplador de microfita, é dado pela Tabela I.

TABELA I. COMPRIMENTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO E SUA RESPECTIVA FREQUÊNCIA PARA A MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA.

Comprimento da Linha de Transmissão de Microfita	Frequência Calculada Para Máxima Transferência de Potência
10 cm	405,0 MHz
20 cm	202,0 MHz
30 cm	135,0 MHz
40 cm	101,0 MHz

Com base na Tabela I, foram confeccionadas quatro linhas de transmissão de microfita, apresentadas na Fig. 4. Com

quatro comprimentos diferentes, foi possível avaliar a sensibilidade de cada acoplador de microfita, na captação de pulsos de descargas parciais da bobina de hidrogerador.

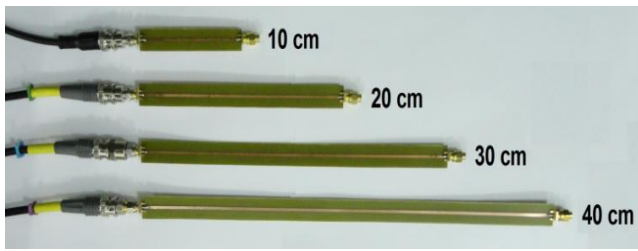


Fig. 4. Fotografia dos acopladores direcionais de microfita confeccionados.

B. Arranjo Experimental para os Ensaios em Alta Tensão

Foi utilizado como objeto de teste nos experimentos, uma amostra de bobina de múltiplas espiras de um hidrogerador, cedida pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF. O ensaio para medição de descargas parciais foi realizado em uma única bobina, seguindo a norma [1]. Conforme a norma, para o ensaio de um enrolamento estático de hidrogerador, o corpo de prova deve estar devidamente alocado em canaletas metálicas aterradas, as quais simulam uma das ranhuras da estrutura do estator, conforme é exemplificado na Fig. 5.

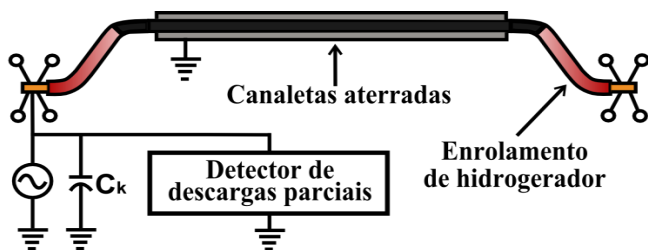


Fig. 5. Ensaio de descargas parciais realizado em uma única bobina.

Para as medições, o acoplador direcional de microfita foi posicionado na superfície isolante da extremidade da bobina, região que não possui camada semicondutiva, o que blindaria os pulsos eletromagnéticos de descargas parciais. Devido ao processo de indução elétrica, além das ondas eletromagnéticas provenientes dos pulsos de descargas parciais, o acoplador capta, também, o sinal de alta tensão aplicado no enrolamento. Com o intuito de atenuar o sinal de tensão de 60 Hz, que devido à alta tensão, sobrepõe-se aos pulsos de descargas parciais, torna-se necessário a instalação de um filtro analógico do tipo passa-altas RC (resistor e capacitor). O filtro foi instalado na entrada do instrumento de medição (osciloscópio). A foto do arranjo experimental é apresentada na Fig. 6.

C. Aquisição dos Sinais de Descargas Parciais

Para os registros dos sinais de descargas parciais no domínio do tempo, foi utilizado um osciloscópio digital fabricado pela Tektronix®, modelo 5014B, que possui quatro canais analógicos e largura de banda de 1 GHz. As medições foram realizadas com 5 MSa de memória por canal, taxa de amostragem de 250 MSa/s e representação numérica de 16 bits por ponto. Para a ligação das saídas dos sensores ao

osciloscópio, foram utilizados quatro cabos coaxiais (RG -223) de 50 Ω de impedância e 5 m de comprimento.

Os ensaios com alta tensão foram realizados com tensão aplicada de 11,1 kV (pico). Foram adotados 10 minutos como tempo de condicionamento da bobina. Após o condicionamento, foi feita a aquisição de 60 ciclos de tensão pelos quatro acopladores de microfita. As aquisições foram realizadas simultaneamente em quatro canais do osciloscópio.

Dentre os quatro acopladores testados, foi escolhido o que obtiver a melhor sensibilidade, na captação de pulsos de descargas parciais proveniente da bobina de hidrogerador. O acoplador de microfita escolhido foi utilizado para a avaliação, como sensor para medição de descargas parciais. Para tanto, novamente foram adquiridas 60 ciclos de tensão, agora com o acoplador de microfita que obteve a melhor sensibilidade, juntamente com o HFCT e o capacitor de acoplamento de 1000 pF. O processo de medição de descargas parciais com o capacitor de acoplamento está descrito em [3]. Para que ocorra a correlação dos sinais dos três sensores no domínio do tempo, as aquisições também foram feitas de forma simultânea em três canais do osciloscópio.

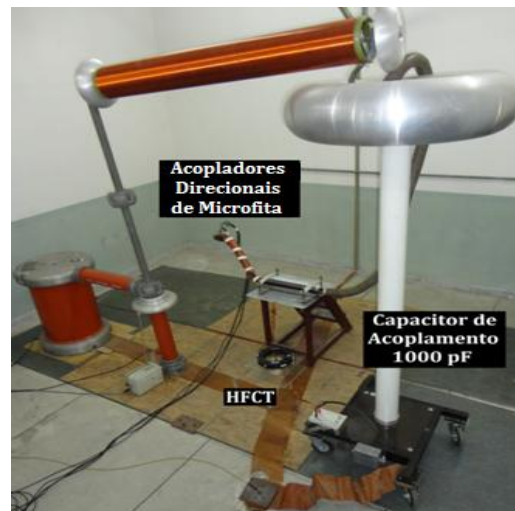


Fig. 6. Circuito de medição de descargas parciais montado em laboratório.

D. Análise dos Sinais de Descargas Parciais Obtidos

Após as aquisições, os dados obtidos foram importados para um computador. Com o auxílio do software Matlab R2012®, os sinais de descargas parciais foram tratados utilizando a filtragem *wavelet*, para atenuar as componentes de frequência indesejadas (ruídos). Os 60 ciclos de tensão, contendo os sinais de descargas parciais foram utilizados, após a filtragem, para a geração de gráficos *PRDP*, o cálculo da relação sinal-ruído (RSR) e a contagem da quantidade de pulsos de descargas parciais obtidos nos ensaios. Essa metodologia de análise de descargas parciais está descrita em [8]. Os dados foram utilizados para avaliar a sensibilidade, na detecção de pulsos de descargas parciais, dos quatro acopladores direcionais de microfita. Com o acoplador direcional de microfita de melhor sensibilidade, foram feitas as mesmas comparações, mas agora entre ele e os outros dois sensores: HFCT e capacitor de acoplamento de 1000 pF.

IV. ANÁLISE E RESULTADOS

Na Fig. 7 estão apresentados os pulsos de descargas parciais obtidas com os quatro acopladores direcionais de microfita confeccionados, após ter sido realizada a filtragem *wavelet*. Os sinais são referentes a apenas um dos sessenta ciclos de tensão senoidal que foram adquiridos. Os sinais dos quatro acopladores direcionais de microfita foram captados simultaneamente em cada canal do osciloscópio. A forma de onda senoidal que aparece nas figuras é a representação de uma amostra da tensão aplicada. Os resultados da relação sinal-ruído (RSR) e o número de pulsos detectados pelos quatro acopladores de microfita são mostrados na Tabela II.

Observa-se que o acoplador de microfita de 40 cm foi o que obteve a melhor sensibilidade à captação dos pulsos de descargas parciais. Pois ele apresentou os maiores níveis de tensão, a melhor relação sinal-ruído (8,07dB) e o maior número de pulsos de descargas parciais detectados (22.167 pulsos). O acoplador de microfita de 30 cm, com relação sinal-ruído de 3,57 dB e 11.603 pulsos de descargas parciais detectados, por sua vez, obteve a segunda melhor sensibilidade. O acoplador de microfita de 20 cm, com relação sinal-ruído de 2,59 dB e 7.429 pulsos de descargas parciais detectados, consistiu na terceira melhor sensibilidade. E finalmente, o acoplador de microfita de 10 cm, com relação sinal-ruído de -3,51 dB e apenas 3.605 pulsos de descargas parciais detectados, foi o acoplador com a pior sensibilidade dentre os quatro testados.

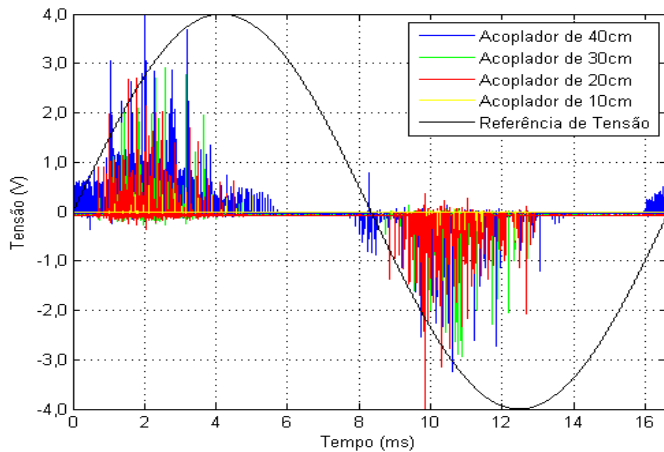


Fig. 7. Pulsos de descargas parciais obtidos com os acopladores de microfita.

TABELA II. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DOS ACOPLADORES DE MICROFITA

Acoplador de Microfita	RSR (dB)	Número de Pulsos Detectados
Acoplador de 10 cm	-3,51	3.605
Acoplador de 20 cm	2,59	7.429
Acoplador de 30 cm	3,57	11.603
Acoplador de 40 cm	8,07	22.167

Conforme as normas [1] e [6], os sinais característicos de descargas parciais em enrolamentos de hidrogeradores, situam-se em uma faixa inferior a 150 MHz. Ao analisar o nível de frequência para a máxima transferência de potência de cada acoplador, descrita na Tabela I, tem-se que o de 40 cm possui a

menor frequência (101 MHz) e que mais se aproxima da faixa de frequência característica dos sinais de descargas parciais.

Deste modo, é justificada a razão pela qual o acoplador de microfita de 40 cm obteve a melhor sensibilidade dentre os quatro acopladores testados. Para avaliar a sensibilidade do acoplador de microfita com relação ao *HFCT* e o capacitor de acoplamento, escolheu-se apenas o acoplador de microfita que obteve a melhor sensibilidade (40 cm). Procedeu-se assim, para que fosse possível captar os sinais de descargas parciais simultaneamente em cada canal do osciloscópio, como foi feito no teste dos quatro acopladores de microfita.

Na Fig. 8 estão apresentados os pulsos de descargas parciais obtidas com o acoplador de microfita de 40 cm, o *HFCT* e o capacitor de acoplamento, após ter sido realizada a filtragem *wavelet*. Os sinais são referentes a apenas um dos sessenta ciclos de tensão senoidal adquiridos e foram captados simultaneamente em cada canal do osciloscópio. Visualmente, constata-se claramente a maior sensibilidade do acoplador de 40 cm, com relação aos níveis de tensão dos pulsos de descargas parciais captados. Tais níveis foram bem maiores que os captados pelo capacitor de acoplamento e o *HFCT*.

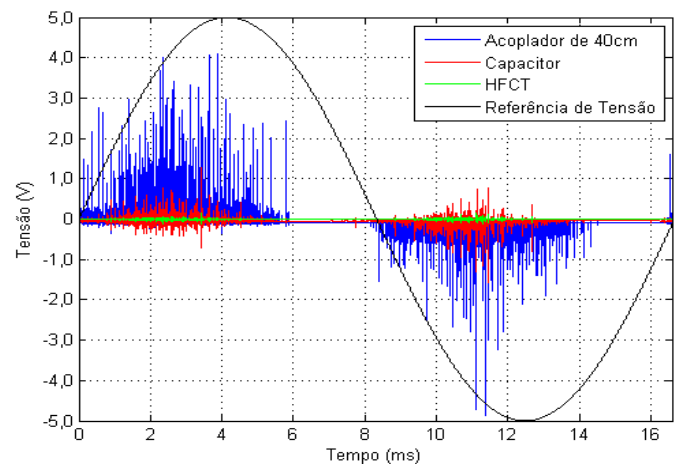


Fig. 8. Pulsos de descargas parciais obtidos com os três tipos de sensores.

Na Tabela III, encontram-se os resultados da relação sinal-ruído (RSR) e o número de pulsos detectados dos três tipos de sensores. O acoplador de microfita de 40 cm obteve o segundo maior número de pulsos de descargas parciais detectados (24.096 pulsos) e a menor relação sinal-ruído (8,88 dB), mas ainda assim é um valor satisfatório.

Nas Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11 estão apresentados os gráficos *PRDP* obtidos pelos três tipos de sensores. Os pontos no gráfico *PRDP* representam os pulsos de descargas parciais (valores de pico), que foram identificados nos 60 ciclos senoidais adquiridos. Observam-se, nos três gráficos *PRDP*, que os pulsos de descargas parciais concentram-se na mesma região de fase da senoide de referência, nos intervalos de 0° a 135°, 160° a 315° e 340° a 360°. Sendo que os pulsos de maiores intensidade concentraram-se, predominantemente, em torno do ângulo de 45° e 240°, nos três gráficos. O acoplador direcional de microfita de 40 cm captou pulsos de descargas parciais com níveis de tensão que variaram de 0 a 9 V, apresentando assim, a melhor sensibilidade dentre os sensores.

TABELA III. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DOS TRÊS SENSORES

Sensor	RSR (dB)	Número de Pulsos Detectados
Capacitor de acoplamento	14,25	22.803
HFCT	17,01	27.635
Acoplador de 40 cm	8,88	24.096

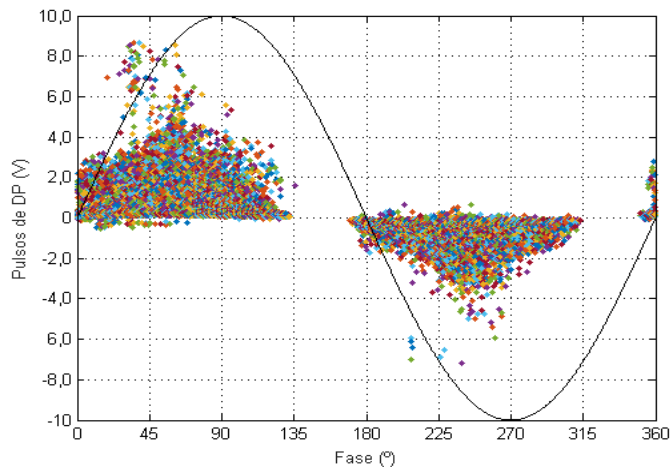


Fig. 9. Gráfico PRDP do acoplador direcional de microfita de 40 cm.

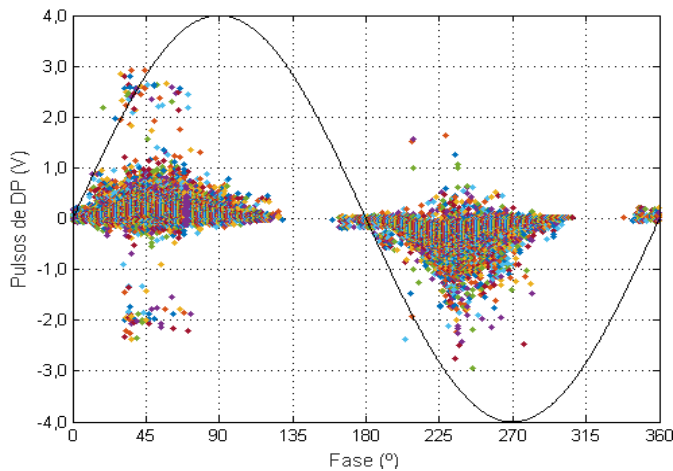


Fig. 10. Gráfico PRDP do capacitor de acoplamento de 1000 pF.

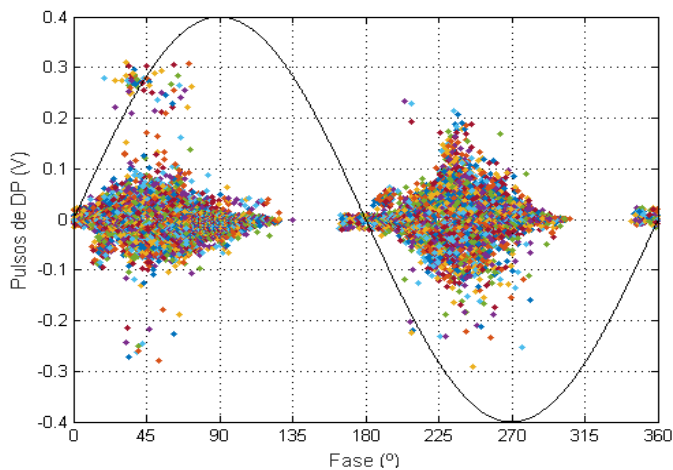


Fig. 11. Gráfico PRDP do HFCT.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a construção de quatro protótipos de acopladores direcionais de microfita e a avaliação de sua aplicabilidade, como sensor para medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador. Constatou-se que o acoplador direcional de microfita de 40 cm foi o que apresentou a melhor sensibilidade entre os quatro acopladores de microfita testados.

Para validar as medições do acoplador direcional de microfita proposto, foram utilizados dois sensores de detecção de descargas parciais para comparação: um HFCT e um capacitor de acoplamento de 1000 pF. Verificou-se que o acoplador direcional de microfita de 40 cm obteve uma relação sinal-ruído satisfatória, a segunda maior quantidade de pulsos detectados e a maior sensibilidade aos níveis de tensão dos pulsos de descargas parciais, dentre os três tipos de sensores utilizados.

Conclui-se, portanto, que o acoplador direcional de microfita proposto consiste em uma solução viável, de baixo custo de fabricação e com uma ótima sensibilidade (quando utilizado em uma amostra de bobina simples e em um ambiente controlado). Para validar a aplicação dos sensores propostos em um hidrogerador real, faz-se necessário um estudo mais aprofundado, considerando todas as implicações decorrentes de sua instalação, bem como o ambiente em que estará inserido.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ pelo apoio financeiro e a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por disponibilizar as bobinas de hidrogerador utilizadas nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std. 1434, "Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery", 2000.
- [2] Stone, Greg C., Howard G. Sedding, and Michael J. Costello. "Application of partial discharge testing to motor and generator stator winding maintenance." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 32, pp. 459-464, 1996.
- [3] IEC International Standard 60270, High-voltage test techniques: partial discharge measurements, Geneve, Switzerland, 2000.
- [4] Bartnikas, R., "Corona pulse counting and pulse height analysis techniques. *Engineering Dielectrics, Corona Measurement and Interpretations*", v. 1, 1979.
- [5] D. A. Nattrass, "Partial discharge measurement and interpretation," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 10-23, 1988.
- [6] IEC 60034-27-2, "Rotating Electrical Machines: On-line Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines", Suíça, 2012.
- [7] Keiser G. "Optical Fiber Communications.", 3ª edição, McGraw Hill Editora, 2000.
- [8] Ma, X., Chengke Zhou, and I. J. Kemp. "Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD detection." *IEEE Electrical Insulation Magazine* 2.18, pp. 37-45, 2002.
- [9] Standard IPC-2141A, "Controlled Impedance Circuit Boards and High Speed Logic Design", Bannockburn, Scotland, 2004.