



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

RELIGAMENTO MONOPOLAR ADAPTATIVO BASEADO NA ASSINATURA HARMÔNICA DA TENSÃO DE ARCO SECUNDÁRIO

Allan Alves Montanari*
UNICAMP

Maria Cristina Tavares
UNICAMP

Carlos Medeiros Portela
COPPE/UFRJ

RESUMO

Este trabalho apresenta um esquema de religamento monopolar adaptativo para minimizar o tempo morto de atuação do disjuntor na correção de faltas monofásicas transitórias. O método é fundamentado na análise de dados de ensaios de arco secundário gerados e monitorados numa estrutura de testes construída em campo. Analisou-se o conteúdo harmônico da tensão e da corrente de arco secundário, caracterizando sua assinatura harmônica. Desenvolveu-se um algoritmo baseado nas características harmônicas da tensão da fase sob falta. O algoritmo determina a existência do arco secundário e apresenta um mecanismo para a detecção da característica permanente ou transitória da falta.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de Transmissão Aéreas, Transitórios Eletromagnéticos, Faltas Transitórias, Análise Harmônica

1.0 - INTRODUÇÃO

A manobra de abertura e religamento monopolar é utilizada para sanar distúrbios provenientes de faltas monofásicas transitórias, as quais são as mais frequentes em sistemas de potência [1,2]. A tradicional manobra monopolar caracteriza-se por apresentar um tempo de religamento (tempo morto) fixo. Este tempo não é otimizado às condições da linha de transmissão ou ao tempo de extinção do arco secundário nem, tampouco, às condições climáticas, sujeitas a variações estocásticas. A técnica monopolar tradicional não apresenta um monitoramento para a identificação do comportamento do arco secundário. Independente da extinção do arco, o religamento sempre será acionado transcorrido o tempo de religamento previamente dimensionado.

Desta forma, a utilização de um tempo morto fixo pode resultar num tempo excessivo desnecessário para religar a fase aberta após a extinção do arco secundário. Ou, de forma adversa, pode provocar um religamento antes da extinção do arco elétrico, aumentando o risco de ocorrência de faltas subsequentes, ou, ainda, um religamento numa falta permanente, prejudicando o sistema elétrico. No caso de uma falta permanente, a fase em falta não pode ser religada, a linha deve ser desligada por completo, bloqueando o religamento automático.

É importante que o sistema possa responder rapidamente e com a menor perturbação possível aos distúrbios provocados pela falta temporária tipo fase-terra. Desta forma, a eficiência da manobra tradicional pode ser significativamente aumentada se o sistema de proteção prover-se de meios para monitorar em tempo real o arco secundário, com o objetivo de determinar o instante da sua extinção [3,4]. Esta informação a respeito da existência ou não do arco elétrico pode ser utilizada para implementar um esquema de religamento adaptativo, no qual o tempo morto ajusta-se às diversas situações possíveis. A proteção adaptativa oferece algumas vantagens em relação à técnica tradicional, dentre elas: aumenta as chances de um religamento com sucesso, melhora a estabilidade, e reduz os impactos diante de uma falta permanente.

2.0 - ASPECTOS BÁSICOS DO RELIGAMENTO MONOPOLAR

Para a eliminação de faltas monofásicas transitórias através desta técnica somente a fase em curto-circuito é aberta em seus terminais. Este instante caracteriza o término do *arco primário*. Trata-se de um arco de grande

potência, com corrente da ordem de dezenas de kA. Entretanto, após a abertura dos disjuntores, o arco continua existindo por certo período, sendo chamado de *arco secundário*. O arco secundário se mantém devido ao acoplamento eletromagnético com as outras duas fases energizadas, que permanecem ligadas transmitindo potência, e também devido ao acoplamento com outras linhas paralelas que porventura existam. Nesta transição, decorrente da abertura dos disjuntores, a corrente é reduzida para valores menores, em média inferiores a 200 A. A Figura 1 ilustra as etapas envolvidas na manobra de abertura e religamento monopolar.

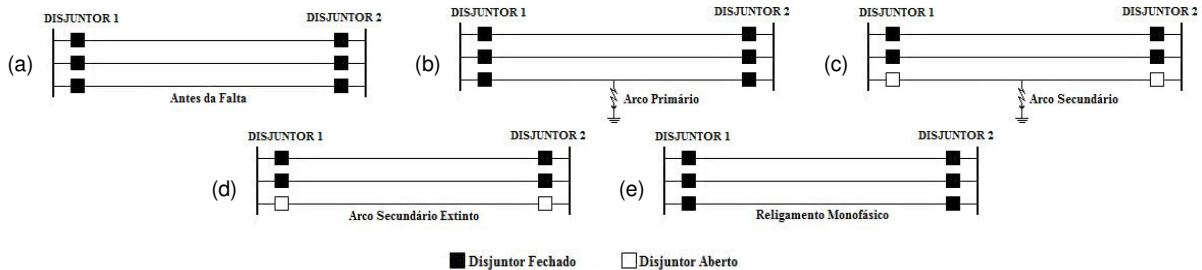


Figura 1 - Princípio da técnica de religamento monopolar: (a) linha em operação normal, (b) ocorrência da falta monofásica transitória, (c) abertura monopolar e formação do arco secundário, (d) extinção do arco secundário, (e) religamento monofásico.

O religamento da fase somente deve ser efetuado com segurança após a extinção do arco. Se, depois de determinado tempo, ocorrer o religamento da fase aberta com o arco secundário ainda existente, o arco primário se restabelecerá. O sistema voltará à condição de curto-circuito, caracterizando um religamento sem sucesso.

3.0 - ARCO SECUNDÁRIO

A extinção do arco secundário é o fenômeno mais importante nos estudos de religamento monopolar. Trata-se de um fenômeno extremamente complexo, influenciado por vários parâmetros, tais como: comprimento da linha de transmissão, ponto de ocorrência da falta ao longo da linha, níveis de compensação, tensão e isolamento, velocidade e direção do vento, temperatura, umidade e pressão atmosférica.

3.1 Testes de Arco Secundário em Campo

Instalou-se um trecho experimental de linha de transmissão da classe 500 kV na unidade de Adrianópolis do laboratório do CEPEL. A estrutura é formada a partir de três torres de transmissão, conforme ilustra a Figura 2.

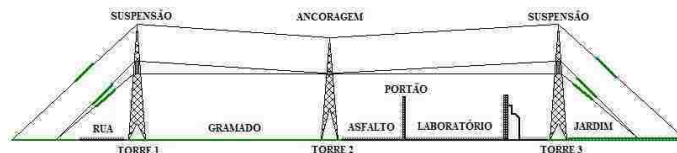


Figura 2: Esboço da disposição das estruturas de ensaio.

Os arcos foram gerados numa cadeia de isoladores de suspensão em "I" de 4 m de comprimento, localizada numa das fases externas da Torre 1, conforme indicado na Figura 2. Uma corrente sustentada senoidal imposta durante 1 s mantém o arco durante o ensaio. Foram efetuados ensaios em sete diferentes níveis de corrente, com valores eficazes entre 60 A_{ef} e 3000 A_{ef}. Antes do início de cada ensaio, fixou-se um fio fusível ao longo da cadeia de isoladores entre dois ganchos, como facilitador da ignição do arco elétrico.

3.2 Tensão e Corrente de Arco Secundário

O sistema de medição adquire, armazena e processa 10 milhões de amostras por segundo. Foi necessário implementar um pré-processamento para validação das medições, para filtrar os dados e para discriminar as informações desejadas. Os programas foram desenvolvidos no ambiente computacional *Mathematica (Wolfram Research)*. Na sequência, são apresentados na Figura 3 (a) gráficos da tensão entre os terminais do arco e da corrente do tipo sustentada para todo o ensaio e, de forma a permitir uma visualização mais pormenorizada destes sinais, na Figura 3 (b) e Figura 3 (c) detalhes para dois intervalos de 100 ms (ensaio classe de corrente de 300 A_{ef}). Efetuaram-se ainda registros óticos dos ensaios. A Figura 4 apresenta imagens do mesmo ensaio classe 300 A_{ef} anteriormente mencionado. As imagens ilustram a rápida variação do comprimento do arco.

3.3 Análise Harmônica da Tensão e Corrente de Arco Secundário

O conteúdo harmônico da tensão e da corrente de arco secundário foi analisado através da Transformada de Fourier Janelada, utilizando uma janela de tempo deslizante sobre os sinais, com tamanho de um ciclo à frequência industrial (60 Hz), calculando os coeficientes através de:

$$\hat{V}_h = \sum_{k=0}^{N-1} \frac{V_k \exp(-j\omega h k)}{N} \quad (1)$$

onde V é a tensão entre os terminais do arco, \hat{V}_h é a pseudo-harmônica da tensão (valor complexo), $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, f é a frequência do sistema (60 Hz), h é a ordem da pseudo-harmônica, k é o número sequencial da amostras no pseudo-ciclo, N é o número de amostras por pseudo-ciclo, e $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária. O termo *pseudo* enfatiza o fato que os sinais de tensão e corrente não são exatamente funções periódicas em $-\infty < tempo < +\infty$. A amplitude da h -ésima pseudo-harmônica é obtida através de:

$$V_h = |\hat{V}_h| = \sqrt{Re^2\{\hat{V}_h\} + Im^2\{\hat{V}_h\}} \quad (2)$$

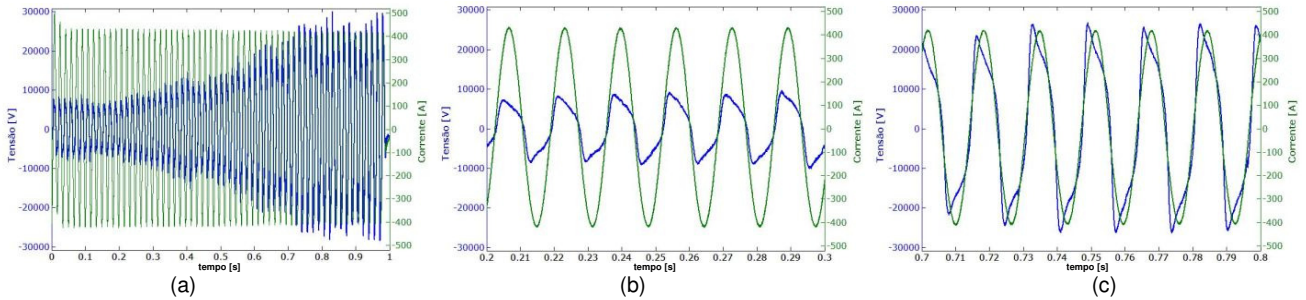


Figura 3 - Tensão entre os terminais do arco e corrente sustentada do arco de um ensaio em campo de arco secundário classe 300 A_{ef}: (a) todo o ensaio; (b) intervalo entre 200 ms e 300 ms, (c) intervalo entre 700 ms e 800 ms

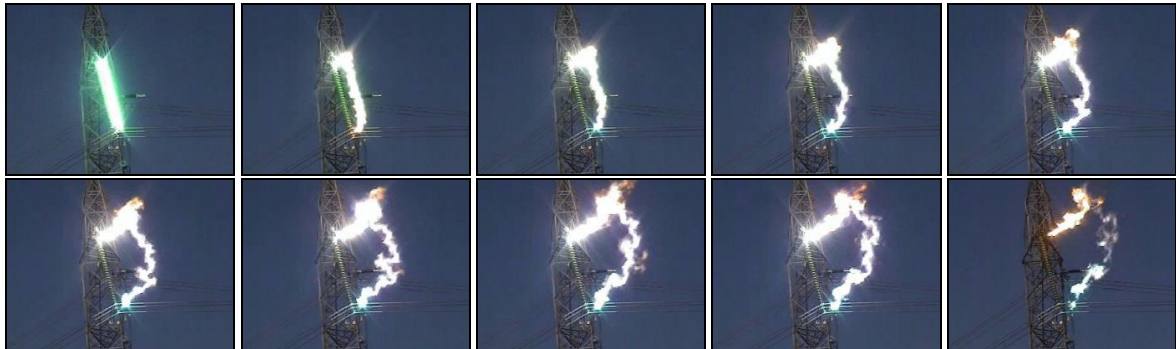


Figura 4 - Imagens obtidas através das filmagens de um ensaio em campo de arco secundário classe 300 A_{ef}.

Os dados de corrente foram calculados utilizando expressões análogas a (1) e (2). As análises fornecem informações de tempo e frequência. Analisou-se o conteúdo harmônico até a 15ª ordem. A Figura 5 e a Figura 6 apresentam alguns resultados para o mesmo ensaio classe 300 A_{ef} anteriormente apresentado.

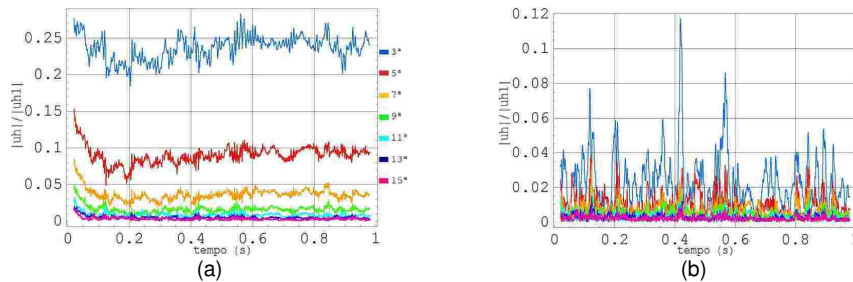


Figura 5 - Relações entre as amplitudes das pseudo-harmônicas de ordens ímpar (a) e par (b) e a pseudo-harmônica de 1ª ordem da tensão entre os terminais do arco de um ensaio em campo de arco secundário classe 300 A_{ef}.

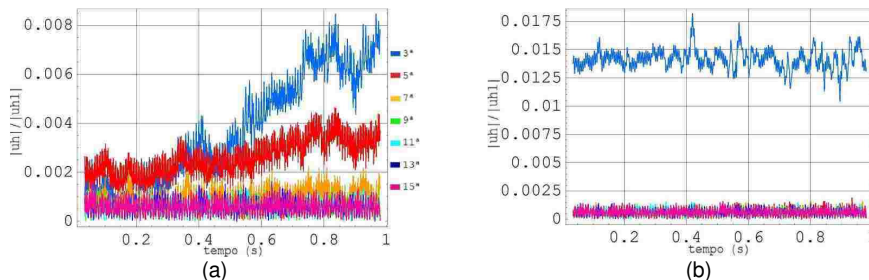


Figura 6 - Relações entre as amplitudes das pseudo-harmônicas de ordens ímpar (a) e par (b) e a pseudo-harmônica de 1ª ordem da corrente sustentada de arco de um ensaio em campo de arco secundário classe 300 A_{ef}.

Através da análise harmônica de ampla faixa de pseudo-harmônicas múltiplas da fundamental (1ª à 15ª ordens) para vários ensaios realizados em campo, pode-se identificar uma assinatura harmônica de arco secundário.

3.4 Assinatura Harmônica de Arco Secundário

Foram analisados 348 ensaios de arco secundário. Realizou-se um tratamento estatístico dos resultados obtidos após análise harmônica destes dados. O valor médio dos valores médios das relações entre as amplitudes das pseudo-harmônicas (hn) e a amplitude da pseudo-harmônica de primeira ordem ($h1$) foram calculados para cada classe de corrente, assim como o valor médio dos valores eficazes da tensão (\bar{V}_{ef}) e da corrente (\bar{I}_{ef}) de arco secundário. A dispersão estatística foi analisada através do desvio padrão (σ). Resultados das análises para diferentes níveis de corrente são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Assinatura harmônica de arco secundário

Classe de Corrente (A_{ef})		60		100		150		200		300		500		3000		
N_T (Número de testes)		80		53		51		57		52		49		6		
\bar{I}_{ef} (A_{ef})		64,907		103,132		153,766		203,153		295,092		519,731		2927,872		
\bar{V}_{ef} (kV_{ef})		16,314		12,436		10,740		9,655		8,953		7,559		6,860		
$\left(\frac{hn}{h1}\right)_{N_T}$ (%) e σ		$\left(\frac{hn}{h1}\right)_{N_T}$		σ		$\left(\frac{hn}{h1}\right)_{N_T}$		σ		$\left(\frac{hn}{h1}\right)_{N_T}$		σ		$\left(\frac{hn}{h1}\right)_{N_T}$		
Tensão	Ordem Impar	3ª	25,012	1,111	27,930	1,038	26,813	0,596	25,634	0,676	23,768	0,410	21,744	0,573	21,239	0,897
		5ª	7,279	0,740	9,605	0,772	10,260	0,525	10,099	0,585	9,159	0,387	7,832	0,371	7,588	0,834
		7ª	2,756	0,388	3,741	0,442	4,063	0,361	4,072	0,344	3,719	0,239	3,209	0,210	3,398	0,484
		9ª	1,225	0,194	1,737	0,235	1,938	0,174	1,849	0,218	1,672	0,129	1,473	0,113	1,907	0,352
		11ª	0,654	0,120	0,954	0,153	1,015	0,144	0,998	0,134	0,886	0,090	0,777	0,070	1,190	0,193
		13ª	0,421	0,080	0,590	0,138	0,609	0,099	0,595	0,104	0,524	0,049	0,493	0,049	0,854	0,158
	15ª	0,324	0,066	0,407	0,122	0,399	0,088	0,421	0,099	0,351	0,038	0,351	0,038	0,616	0,108	
	Ordem Par	2ª	2,542	0,267	2,522	0,457	2,479	0,404	2,527	0,528	2,533	0,257	2,789	0,510	4,227	0,520
		4ª	1,272	0,147	1,431	0,238	1,331	0,209	1,387	0,275	1,229	0,134	1,321	0,255	2,020	0,263
		6ª	0,778	0,091	0,915	0,204	0,893	0,171	0,962	0,183	0,834	0,088	0,868	0,136	1,241	0,188
		8ª	0,558	0,072	0,652	0,172	0,608	0,131	0,671	0,166	0,567	0,062	0,605	0,079	0,848	0,131
		10ª	0,433	0,059	0,498	0,133	0,464	0,111	0,519	0,148	0,422	0,046	0,440	0,043	0,642	0,107
		12ª	0,359	0,050	0,409	0,113	0,366	0,091	0,420	0,130	0,335	0,036	0,353	0,036	0,513	0,083
	14ª	0,312	0,046	0,344	0,102	0,313	0,076	0,345	0,125	0,281	0,032	0,294	0,031	0,431	0,072	
Corrente	Ordem Impar	3ª	1,191	0,248	0,654	0,166	0,482	0,122	0,383	0,107	0,382	0,083	1,455	0,294	1,244	0,217
		5ª	0,272	0,068	0,286	0,061	0,295	0,040	0,243	0,091	0,317	0,050	0,522	0,079	0,496	0,061
		7ª	0,098	0,025	0,093	0,051	0,084	0,048	0,090	0,042	0,126	0,016	0,154	0,020	0,212	0,021
	Ordem Par	2ª	0,883	0,503	1,024	0,237	1,108	0,173	1,264	0,427	1,420	0,105	1,157	0,112	1,889	0,422
		4ª	0,135	0,040	0,088	0,067	0,079	0,050	0,105	0,059	0,131	0,021	0,174	0,024	0,311	0,027
		6ª	0,102	0,033	0,062	0,050	0,058	0,043	0,071	0,044	0,089	0,016	0,108	0,016	0,200	0,013

A amplitude relativa das pseudo-harmônicas da tensão é significativamente maior que a amplitude relativa das pseudo-harmônicas da corrente, visto que nos testes de campo a corrente sustentada (60 Hz) é imposta. Nota-se que o conteúdo harmônico apresenta um comportamento similar para vários ensaios (desvio padrão pequeno). A assinatura harmônica pode ser utilizada para a identificação da existência do arco secundário. Esta característica não linear do arco secundário (assinatura harmônica) propaga-se na linha de transmissão permitindo sua identificação através do monitoramento da tensão nos terminais da fase aberta.

4.0 - RELIGAMENTO MONOPOLAR ADAPTATIVO RÁPIDO

4.1 Sistema Elétrico em Estudo

Utilizou-se como modelo um sistema similar à interligação Sudeste-Nordeste, alterando-se o comprimento da linha de transmissão bem como os parâmetros de compensação, mantendo-se inalterados os dados dos demais equipamentos (gerador, transformador elevador, linha de transmissão e para-raios). A Figura 7 mostra a geometria da torre da linha de transmissão de 500 kV do sistema em estudo. As flechas dos condutores a 60 °C e dos cabos para-raios a 40 °C correspondem, respectivamente, a 26,11 m e 22,42 m.

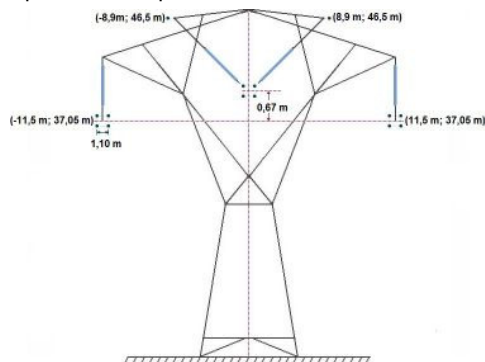


Figura 7 - Disposição dos cabos da linha de transmissão da Interligação Sudeste-Nordeste.

Apresentam-se na Tabela 2 as especificações referentes aos cabos condutores e para-raios, e, na Tabela 3, os parâmetros da linha de transmissão calculados para a frequência industrial (60 Hz). Considerou-se que as linhas são idealmente transpostas e os parâmetros longitudinais foram modelados representando a dependência com a frequência, utilizando modelo no domínio das fases, considerando a resistividade média do solo de $\rho = 4000 \Omega \cdot m$.

A Figura 8 ilustra as duas configurações implementadas. As linhas foram simuladas sem carga, ou seja, com o gerador ligado em uma extremidade e com a outra extremidade em aberto, como na Figura 8. A modelagem e simulação do sistema elétrico de 500 kV foram desenvolvidas no ambiente computacional *PSCAD/EMTDC* (*Manitoba HVDC Research Centre*).

Tabela 2 - Dados dos cabos de fase e para-raios

Condutor	Resistência	Raio externo [m]	Raio Interno [m]	μr
RAIL	0,0614	0,014795	0,0037	1
GW - EHS	3,51	0,00457	-	70

Tabela 3 - Parâmetros elétricos da linha calculados para frequência de 60 Hz.

Componente	Resistência (Ω/km)	Reatância indutiva (Ω/km)	Susceptância ($\mu S/km$)
Homopolar	0,35764019	1,42834687	3,52370352
Não homopolar	0,01597062	0,27344963	6,04576819

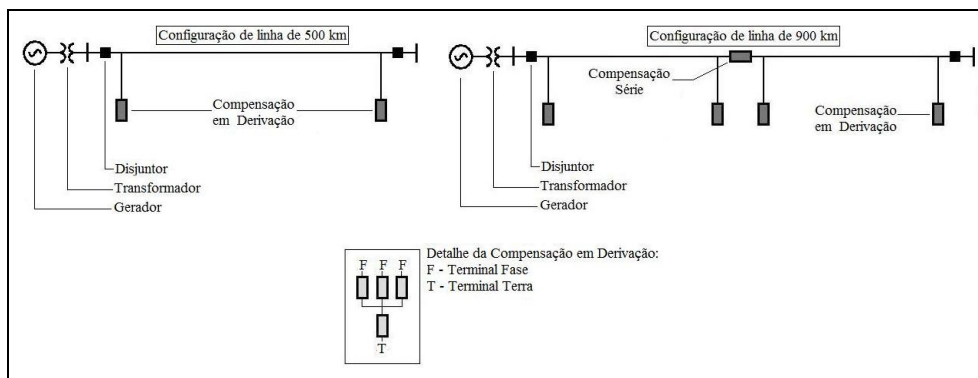


Figura 8 - Configurações dos sistemas simulados, incluindo as compensações em derivação e em série.

4.2 Implementação da Falta

Selecionou-se 8 ensaios dentre os 348 ensaios realizados em campo (2 ensaios para cada um dos seguintes níveis de corrente: $60 A_{ef}$, $100 A_{ef}$, $150 A_{ef}$ e $200 A_{ef}$), de forma a representar diferentes condições de arco secundário.

Tabela 4 - Valores eficazes da corrente sustentada e da tensão entre os terminais do arco, e valores das principais características das relações entre as amplitudes das pseudo-harmônicas de ordem ímpar (3^a , 5^a e 7^a) e a amplitude da pseudo-harmônica de 1^a ordem da tensão entre os terminais do arco dos ensaios selecionados.

Classe de Corrente	Teste	Corrente (A_{ef})	Tensão (kV_{ef})	$\frac{uh3}{uh1}$	$\frac{uh5}{uh1}$	$\frac{uh7}{uh1}$
60	1	63,80	10,03	0,2568	0,0760	0,0289
	2	66,04	19,14	0,2528	0,0744	0,0274
100	3	101,64	8,86	0,2676	0,0930	0,0361
	4	98,71	20,18	0,2610	0,0810	0,0303
150	5	151,50	8,24	0,2760	0,1079	0,0432
	6	148,77	14,99	0,2730	0,1050	0,0419
200	7	195,91	5,74	0,2592	0,1019	0,0420
	8	196,58	15,51	0,2507	0,0955	0,0375

Nas simulações realizadas, primeiramente provocou-se um curto-circuito através da conexão de uma resistência de 10Ω entre uma das fases da linha de transmissão e a terra. O arco secundário foi estabelecido através da abertura dos disjuntores da fase em falta nos terminais da linha de transmissão. Ajustou-se o valor da corrente de arco secundário destes casos simulados com as correntes dos ensaios selecionados apresentados na Tabela 4. Para tal, dimensionou-se um reator de neutro para obter determinado nível de amplitude de corrente de arco secundário. Os valores dos reatores de neutro e os valores eficazes das correntes de arco secundário de cada caso bem como os parâmetros dos equipamentos de compensação utilizados são exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Características dos 8 casos simulados de faltas monofásicas transitórias.

Testes	Configuração de linha (km)	Localização da falta (km)	Compensação				Corrente de Calibração (A_{ef})	
			Reator de fase		Reator de neutro			Capacitor em Série
			Potência (MVar)	Fator de Qualidade	Fator R_h	Fator de Qualidade	Potência (MVar)	
1 e 2	500	250	$3 \times 301,4$	400	4,27	40	-	63,64
3 e 4	500	250	$3 \times 301,4$	400	1,01	40	-	101,12
5 e 6	900	50	$3 \times 315,8$	400	3,57	40	$3 \times 2576,8$	151,46
7 e 8	900	850	$3 \times 315,8$	400	2,27	40	$3 \times 2576,8$	200,82

Salienta-se que existe uma aproximação nas simulações realizadas devido ao fato de se utilizar dados de ensaios obtidos em condições que não correspondem, exatamente, às condições de arco interagindo com a rede elétrica, ou seja, medições de um arco em linha real. A principal aproximação advém da imposição de uma corrente praticamente senoidal nos ensaios realizados. Num caso real deverá ocorrer predominância das harmônicas ímpares na tensão entre os terminais do arco, e também deverá haver um maior conteúdo de harmônicas ímpares na corrente. Nas simulações apresentadas, injetou-se um sinal local de defeito somente com harmônicas na tensão. A interação arco-rede irá produzir nas tensões nos extremos da fase aberta uma resposta ligeiramente diferente da que seria obtida se houvesse injetado harmônicas de tensão e de corrente no local do defeito. Esta aproximação acarreta um diminuto desvio nos resultados obtidos, mas não compromete os resultados.

Quando os disjuntores da fase em falta são abertos, o resistor de 10Ω é desconectado e o sinal de tensão de arco secundário, proveniente dos ensaios realizados em campo, é inserido no ponto de falta para simular o arco secundário. A falta é eliminada por volta de 2,25 s (considerando a duração de 1 s dos dados dos ensaios em campo) e a extinção do arco é caracterizada pelo término da inserção deste sinal (Figura 9).

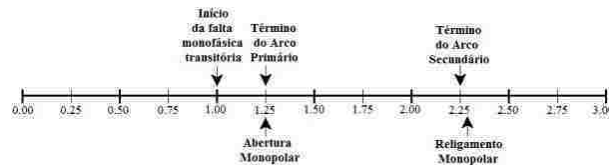


Figura 9 - Instantes dos eventos de simulação.

Um tratamento adicional foi realizado para se ajustar a fase do sinal de corrente oriundo dos ensaios com a fase da corrente sustentada do arco obtida após a abertura dos disjuntores da fase sob falta. Na Figura 10 (a) pode ser vista a corrente sustentada de arco secundário obtida como resposta do sistema, quando simulado o arco primário através do resistor de 10Ω , seguido da abertura dos disjuntores da fase em falta. Esta figura mostra, ainda, a corrente sustentada do ensaio de arco secundário correspondente ao Teste 4, descrito na Tabela 4.

Depois, a tensão entre os terminais do arco dos testes de campo foi aplicada no local do defeito como uma fonte de tensão externa, simulando o arco secundário. A Figura 10 (b) ilustra os sinais de tensão e corrente obtidos. Pode-se observar que o sinal de tensão entre os terminais do arco dos ensaios em campo foi aplicado em fase com a corrente de arco secundário resposta do sistema, conforme esperado.

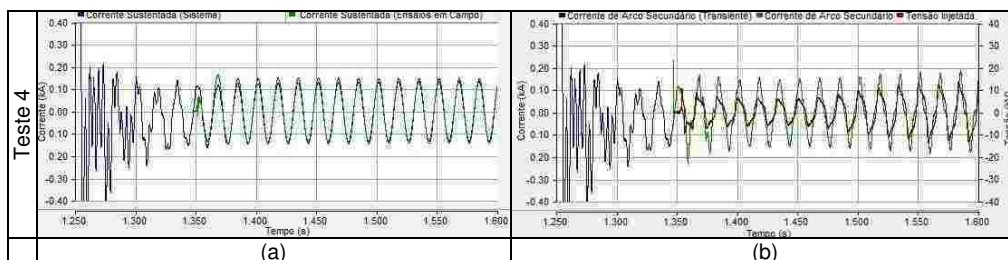


Figura 10 - (a) Corrente sustentada de arco secundário obtida com a falta representada pela resistência de 10Ω (sistema) e corrente sustentada de arco secundário dos ensaios realizados em campo (ensaios em campo) e (b) corrente de arco secundário obtida com a falta representada pela resistência de 10Ω (transiente), corrente de arco secundário obtida como resposta do sistema e tensão de arco secundário do ensaio realizado em campo injetada no sistema.

4.3 Proteção Adaptativa

Apresentam-se resultados correspondentes ao cenário do Teste 4 (Tabela 4), para o qual provocou-se uma falta localizada no meio da linha de transmissão de 500 km, conforme topologia apresentada na Figura 8. A implementação da falta seguiu os procedimentos descritos na seção 4.2. As tensões da fase em falta medidas nos disjuntores localizados nos extremos da linha de transmissão são exibidas na Figura 11.

As etapas envolvidas com a manobra de abertura e religamento monopolar, as quais foram descritas na seção 2.0, são claramente visíveis na Figura 11. A Figura 12 apresenta os mesmos resultados da Figura 11, ilustrando detalhes no tempo de duração do arco secundário.

O conteúdo harmônico dos sinais de tensão medidos nos extremos da linha foi calculado concomitantemente ao tempo de simulação, utilizando a Transformada de Fourier Janelada, através de uma janela deslizante de largura de um período (60 Hz). Os resultados desta operação para os sinais de tensão das Figuras 11 (a) e (b) são apresentados, respectivamente, nas Figura 13 (a) e (b). Objetivando avaliar o conteúdo harmônico destes sinais de tensão, definiu-se o seguinte parâmetro nomeado como Fator Harmônico (FH):

$$FH = \frac{\sqrt{uh7^2 + uh5^2 + uh3^2}}{uh1} \quad (3)$$

onde u_{hn} representa a amplitude da pseudo-harmônica de ordem n . A Figura 14 mostra o Fator Harmônico calculado para os mesmos sinais de tensão da Figura 11. Este fator pode ser utilizado para identificar a extinção do arco secundário.

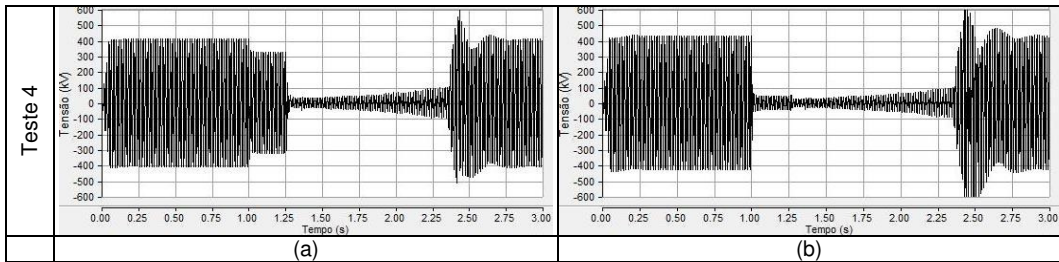


Figura 11 - Tensão da fase em falta medida nos disjuntores localizados nos extremos da linha (Teste 4): (a) disjuntor 1 e (b) disjuntor 2.

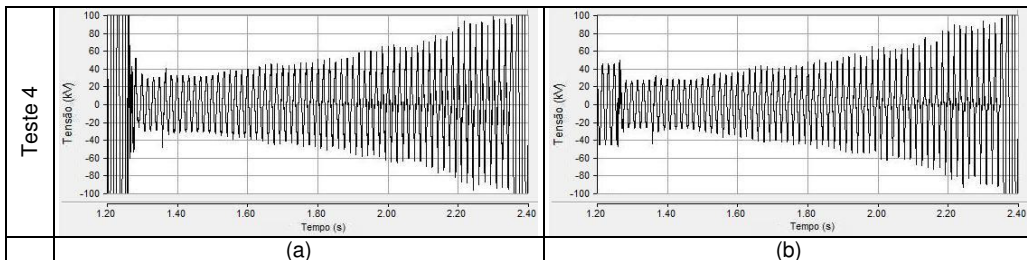


Figura 12 - Tensão da fase em falta medida nos disjuntores localizados nos extremos da linha - detalhe do arco secundário (Teste 4): (a) disjuntor 1 e (b) disjuntor 2.

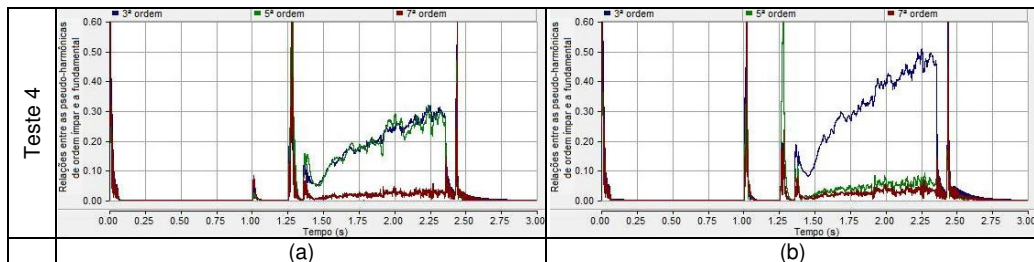


Figura 13 - Relações entre as amplitudes das pseudo-harmônicas de ordem ímpar ($3^{\text{ª}}$, $5^{\text{ª}}$ e $7^{\text{ª}}$) e a amplitude da pseudo-harmônica fundamental da tensão da fase em falta medida nos disjuntores (Teste 4): (a) disjuntor 1 e (b) disjuntor 2.

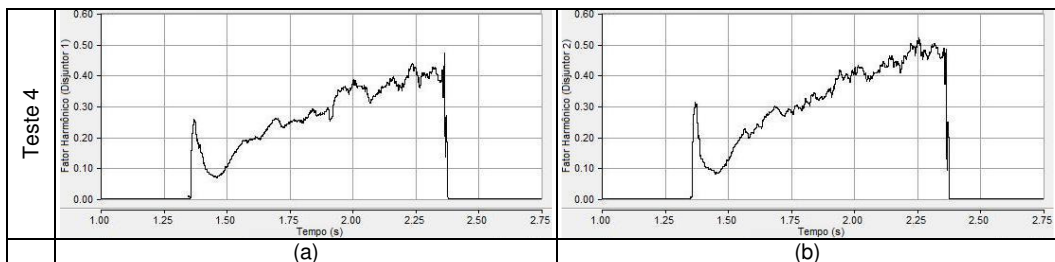


Figura 14 - Fator harmônico (Teste 4): (a) disjuntor 1 e (b) disjuntor 2.

Se a falta for identificada como sendo permanente ou se a mesma não for extinta após um tempo morto máximo pré-determinado, envia-se um sinal para bloquear o esquema de religamento monopolar e para abrir as outras duas fases conectadas (abertura tripolar). A falta transitória é distinguida da falta permanente pela análise do conteúdo harmônico. O algoritmo proposto baseia-se no cálculo do Fator Harmônico (FH) dos sinais de tensão da fase em falta, medidos nos extremos da linha. É possível concluir que o momento de extinção do arco secundário corresponde ao instante de redução do Fator Harmônico. A Figura 15 apresenta os resultados para alguns dos demais testes apresentados na Tabela 4.

5.0 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que é possível implementar estratégias para identificação da existência do arco secundário por intermédio do monitoramento em tempo real da tensão medida nos terminais da fase em aberto. A extinção do arco pode ser detectada através de tratamentos numéricos destes sinais, baseados nas harmônicas de ordem ímpar da tensão, que se destacaram significativamente na caracterização do arco secundário, conforme a assinatura harmônica apresentada.

As aproximações do estudo, referentes à utilização de dados de ensaio como correspondentes a operação real em campo, não representando corretamente a interação arco-rede, não acarretam alterações significativas nos níveis de conteúdo harmônico obtidos nas simulações.

Através do apropriado dimensionamento dos parâmetros do algoritmo desenvolvido para cada cenário de linha de transmissão simulado, foi possível identificar com sucesso a extinção do arco secundário, possibilitando a eliminação do defeito monofásico transitório, assim como garantindo a continuidade da transmissão de energia elétrica. A principal característica da proteção adaptativa proposta neste trabalho consiste na utilização de um tempo de religamento variável, o qual se adapta às diversas situações prováveis de ocorrência de um curto-circuito monofásico transitório, bem como no rápido restabelecimento das condições de operação da linha de transmissão.

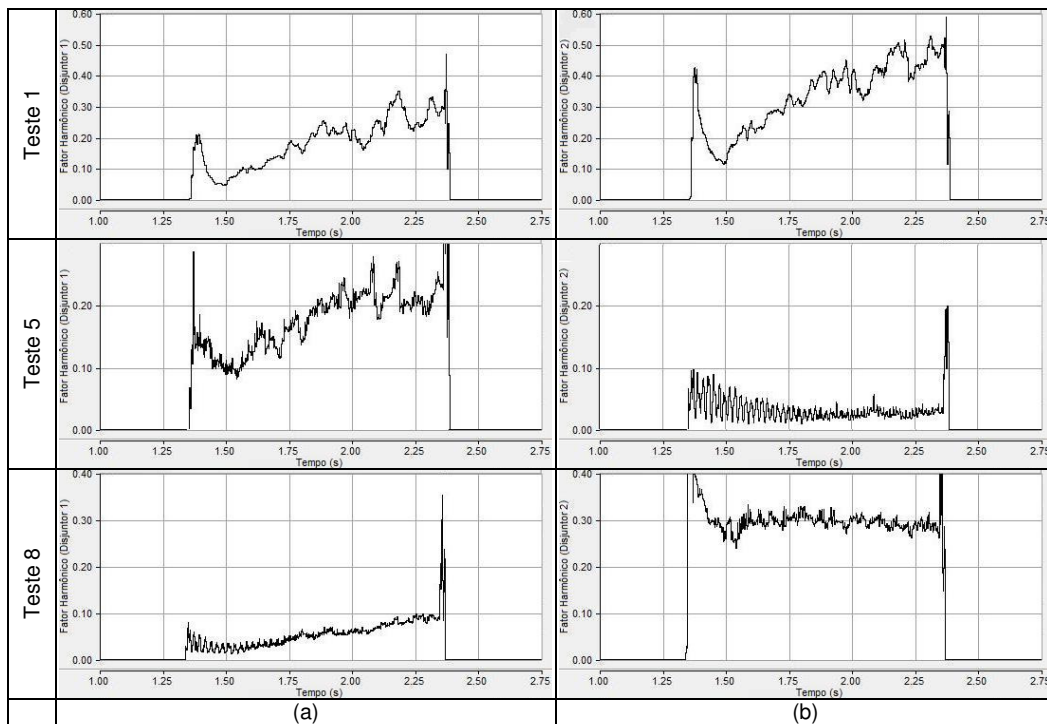


Figura 15 - Fator harmônico (Teste 1, 5 e 8): (a) disjuntor 1 e (b) disjuntor 2.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) R. Luxenburger, P. Schegner - Determination of secondary arc extinction time and characterization of fault conditions of single-phase autoreclosures, IEEE International Conference on Future Power Systems, pp. 1-5, 2005.
- (2) G. Bán, L. Prikler, G. Bánfai - Testing EHV secondary arcs, IEEE Porto Power Tech Proceedings, v. 4, p. 6, Porto, Portugal, 2001.
- (3) M. Jannati, B. Vahidi, S. Hosseinian, H. Baghaee - A new adaptative single phase auto-reclosure scheme for EHV transmission lines, IEEE Power System Conference, p. 203-207, 2008.
- (4) Z. Radojevic, J. Shin - New digital algorithm for adaptative reclosing based on the calculation of the faulted phase voltage total harmonic distortion factor, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, p. 37-41, 2007.
- (5) A. A. Montanari, M. C. Tavares, C. M. Portela - Secondary arc voltage and current harmonic content for field tests results, International Conference on Power Systems Transients, Kyoto, Japão, 2009.
- (6) A. A. Montanari, M. C. Tavares, C. M. Portela - Adaptative single-phase autoreclosing based on secondary arc voltage harmonic signature, International Conference on Power Systems Transients, Kyoto, Japão, 2009.
- (7) C. M. Portela, M. C. Tavares - Transmission system parameters optimization - Sensitivity analysis of secondary arc current and recovery voltage, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 3, 2004.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido das agências de fomento à pesquisa CAPES, CNPq e FAPESP. Os dados utilizados no presente trabalho são oriundos de Projeto P&D ANEEL financiado por FURNAS Centrais Elétricas S.A., sendo os ensaios realizados no CEPEL e a metodologia desenvolvida pela COPPE/UFRRJ e pela UNICAMP.