

# Tecnologia no Domínio do Tempo – Benefícios para a Proteção, Controle e Monitoramento dos Sistemas de Potência

Ricardo Abboud e David Dolezilek  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

A edição revisada, com o título atual, foi lançada em novembro de 2017

Originalmente apresentado na  
International Conference and Exhibition – Relay Protection and  
Automation for Electric Power Systems, abril de 2017,  
sob o título “Case Study of Time-Domain Protection: Field-Proven  
Benefits to Protection, Control, and Monitoring”

Traduzido para o português em novembro de 2018

# Tecnologia no Domínio do Tempo – Benefícios para a Proteção, Controle e Monitoramento dos Sistemas de Potência

Ricardo Abboud e David Dolezilek, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Sumário**—Os engenheiros de sistemas de potência, sobrecarregados com a tarefa contínua de aumentar a confiabilidade do sistema de potência, estão constantemente trabalhando para melhorar a segurança, velocidade e a confiabilidade dos relés de proteção. Novos princípios de operação da proteção de linha no domínio do tempo propiciam abertura de ultra-alta velocidade e possibilitam a localização de faltas baseada nas ondas viajantes (TWFL: “traveling-wave fault location”), permitindo detectar faltas e dar trip nas linhas em apenas milissegundos. Este novo método de detecção de faltas fornece inúmeros benefícios para o sistema de potência e reduz consideravelmente os tempos de eliminação das faltas.

## I. INTRODUÇÃO

Na busca interminável para melhorar o desempenho e os benefícios da proteção do sistema de potência, os engenheiros estão constantemente aperfeiçoando a segurança, velocidade e a confiabilidade dos relés de proteção. Os relés modernos são principalmente baseados em fasores, significando que eles podem experimentar atrasos relacionados à janela de observação de ciclo completo que é necessária para uma estimação fasorial precisa [1]. Os transitórios resultantes de faltas que ocorrem nas linhas de transmissão aéreas trafegam na velocidade da luz e se propagam através da linha de energia como ondas viajantes [2]. Os novos princípios de operação da proteção de linha no domínio do tempo que usam grandezas incrementais e estas ondas viajantes propiciam abertura de ultra-alta velocidade, trazendo vários benefícios para o sistema de potência e permitindo a localização de faltas baseada nas ondas viajantes (TWFL: “traveling-wave fault location”). A proteção de linha de ultra-alta velocidade é agora uma realidade—ela executa a detecção da falta e o trip da linha em apenas alguns milissegundos. Este artigo ilustra os benefícios do uso dos princípios no domínio do tempo em um esquema de abertura assistido por comunicações. Esses princípios baseiam-se nos elementos direcionais baseados nas grandezas incrementais (TD32) e nas ondas viajantes (TW32) operando em um esquema de sobrealcançe permissivo, um elemento diferencial baseado nas ondas viajantes (TW87) e um elemento de distância baseado nas grandezas incrementais (TD21). Todos esses elementos são elementos de proteção de ultra-alta velocidade e contribuem para uma redução considerável nos tempos de eliminação das faltas [3]. Alguns dos benefícios de um tempo rápido de eliminação da falta incluem a redução dos danos aos equipamentos, aumento do tempo de vida útil dos equipamentos, melhoria da qualidade de energia (relacionada à redução dos afundamentos de tensão), aumento da segurança

(relacionado à redução da duração do arco) e melhoria da estabilidade durante transitórios no sistema de potência (relacionada à redução da energia cinética armazenada pelo rotor durante o período de aceleração). A proteção baseada nas ondas viajantes também pode ser aplicada para aumentar a confiabilidade dos sistemas de proteção quando fontes de energia não convencionais estão envolvidas.

A localização de faltas baseada nas impedâncias de um terminal é amplamente utilizada para fornecer diretrizes para que as equipes de manutenção possam encontrar a seção defeituosa em uma linha de transmissão o mais rápido possível. No entanto, este método é afetado por várias condições que podem causar imprecisões na localização da falta, tais como acoplamento mútuo de sequência-zero, erros na modelagem da sequência-zero, não-homogeneidade do sistema, infeeds do sistema, saturação do transformador de corrente, e assim por diante [4]. O método TWFL não é afetado por tais condições e pode fornecer informações extremamente precisas sobre a localização da falta em alguns milissegundos. TWFL baseado em duas extremidades usa os tempos de chegada das ondas viajantes nos terminais local e remoto para estimar a localização da falta. A implementação do método TWFL baseado em um terminal é um desafio, mas não é impossível. Usando as informações de apenas um terminal, é possível determinar a localização da falta com base nas diferenças de tempo entre a chegada da primeira onda viajante e a chegada das reflexões da falta [5]. TWFL é um método preciso de localização de faltas em tempo real que pode ser aplicado para controlar o esquema de religamento automático em linhas de transmissão híbridas (ou não homogêneas), conforme discutido nas seções seguintes. Os benefícios obtidos pelo sistema de potência com a utilização dos métodos TWFL e os benefícios adicionais das altas taxas de amostragem e monitoramento das ondas viajantes também são apresentados neste artigo.

## II. PROTEÇÃO DE LINHA DE ULTRA-ALTA VELOCIDADE

Novas pesquisas sobre relés de proteção de linha de alto desempenho estão contribuindo para a produção de relés que utilizam elementos baseados na grandeza incremental e onda viajante com capacidade de identificar e eliminar faltas em linhas de transmissão com velocidades ultra-altas e segurança. Estes princípios de operação da proteção baseados nas grandezas incrementais e ondas viajantes são referidos como princípios de proteção no domínio do tempo [6]. As novas tecnologias permitem o uso de hardware com altas taxas de

amostragem, amplo armazenamento de dados, processamento muito rápido e potente, e recursos de comunicação estendidos, possibilitando uma nova geração de proteção baseada no domínio do tempo com melhoria nos tempos de operação da proteção de linha e localização de faltas [1] [2] [3].

Como discutido em [2], os transitórios gerados por uma falta em uma linha de transmissão são usados nos métodos TWFL para produzir informações muito precisas sobre a localização da falta. Essas ondas viajantes são geradas por qualquer tipo de falta, exceto pelas faltas que ocorrem no cruzamento pelo zero da onda de tensão. As ondas viajantes se propagam com uma velocidade constante (próxima da velocidade da luz) na direção de ambos os terminais, conforme mostrado na Fig. 1. Os tempos de chegada das ondas viajantes nos terminais remoto (R) e local (S) dependem da localização da falta, medida como a distância  $m$  a partir do Terminal S, e podem ser usados para identificar precisamente a localização da falta.

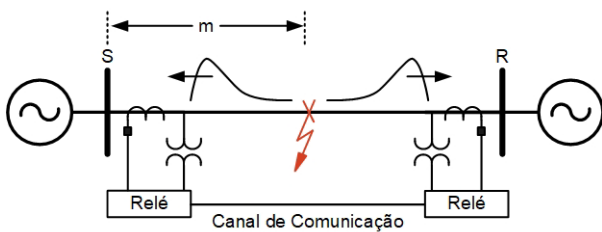


Fig. 1. Propagação das ondas viajantes para os Terminais S e R

O uso de ondas viajantes não se limita a localizar faltas nas linhas de transmissão; elas também podem ser usadas para implementar proteção de linha de ultra-alta velocidade com tempos de operação tão rápidos quanto 1 ms. O tempo de propagação das ondas viajantes através de uma linha de transmissão é o fator limitante [1]. Uma taxa de amostragem de 1 MHz e filtros especializados são usados no relé no domínio do tempo para extrair as ondas viajantes dos sinais brutos de tensão e corrente, visando fornecer as grandezas operacionais para os elementos de proteção de linha de ultra-alta velocidade [6]. O relé possui dois elementos de proteção (TW32 e TW87) que operam com base nas ondas viajantes extraídas dos sinais brutos.

O esquema do elemento TW32 usa ondas viajantes de corrente e tensão de fase para discriminar faltas internas e externas em cada terminal e troca essas informações através de um canal de comunicação, conforme mostrado na Fig. 1, para implementar um esquema de transferência de trip com sobrealcançe permissivo (POTT: “permissive overreaching transfer trip”). O elemento TW32 determina a direção da falta, à frente ou reversa, comparando as polaridades das ondas viajantes de tensão e corrente. No caso de polaridades idênticas, uma falta reversa é declarada, e no caso de polaridades opostas, uma falta à frente é declarada [6].

O esquema do elemento TW87 usa um canal de comunicação direta para comparar ondas viajantes de corrente nas duas extremidades da linha protegida, visando diferenciar entre faltas internas e externas. Para uma falta externa, os tempos de chegada das primeiras ondas viajantes medidas em ambos os terminais têm uma diferença de tempo que

corresponde exatamente ao tempo conhecido de propagação da linha e as ondas têm polaridades opostas. Para uma falta interna, as primeiras ondas viajantes em ambos os terminais têm a mesma polaridade e possuem uma diferença de tempo menor do que o tempo de propagação da onda viajante na linha [6].

### III. BENEFÍCIOS DA PROTEÇÃO DE LINHA DE ULTRA-ALTA VELOCIDADE

#### A. Melhoria da Qualidade de Energia

Há diversas definições para qualidade de energia. No entanto, sob o ponto de vista do usuário final, a má qualidade de energia é associada a qualquer problema manifestado em desvios de tensão, corrente ou frequência que possa causar falhas ou atuações incorretas de equipamentos ou processos.

Conforme explicado em [7], um dos problemas relacionados à má qualidade de energia é o afundamento de tensão. Um afundamento de tensão é uma redução de curta duração (geralmente entre 0,5 e 60 ciclos) na magnitude da tensão e é normalmente causado por um curto-circuito em algum ponto do sistema de potência. Um afundamento de tensão é o problema de qualidade de energia mais importante que afeta muitas plantas industriais, especialmente aquelas com processos contínuos. Um afundamento de tensão não é uma interrupção completa no fornecimento de energia, mas a variação de tensão resultante pode provocar o desligamento dos dispositivos implantados nas plantas industriais modernas (por exemplo, controladores lógicos programáveis, unidades de acionamento de velocidade ajustável, controladores de processos e computadores). Esses dispositivos estão se tornando mais sensíveis aos afundamentos de tensão à medida que sua complexidade aumenta. Não apenas os dispositivos eletrônicos são afetados, mas até mesmo os contadores e relés auxiliares eletromecânicos aplicados nos centros de controle de motores (CCMs) são sensíveis aos afundamentos de tensão. Os motores podem parar quando ocorrer o dropout desses dispositivos eletromecânicos devido ao afundamento da tensão, o que pode resultar no desligamento de toda uma linha de processo, causando uma interrupção na produção que resulta em graves perdas econômicas [8]. A Fig. 2 mostra um exemplo de afundamento de tensão com 23 ciclos de duração.

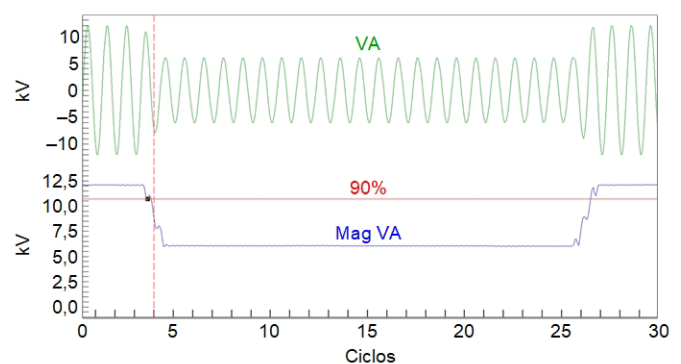


Fig. 2. Exemplo de afundamento de tensão

De acordo com o EPRI (“Electric Power Research Institute”), os afundamentos de tensão são a principal causa de problemas associados à qualidade de energia, representando

92% de todos os problemas de qualidade da energia na distribuição e transmissão nos Estados Unidos. Um afundamento de tensão com duração de alguns ciclos pode resultar em perdas de vários milhões de dólares. Os potenciais problemas e perdas causadas por afundamentos de tensão incluem custos para reparo dos equipamentos danificados, custos de manutenção de grandes estoques, má qualidade do produto percebida pelos clientes do fabricante (o que afeta a reputação da empresa), reclamações apresentadas por consumidores das concessionárias de energia que são submetidos a experiências com perdas em negócios, retrabalho e perda de materiais, perda de eficiência na mão de obra, custos adicionais com horas extras para restabelecimento após paralização da planta e custos de penalidades devidas aos atrasos na entrega de produtos das plantas industriais [8].

Uma maneira de reduzir os efeitos e perdas econômicas relacionadas aos afundamentos de tensão originados por curtos-circuitos no sistema de potência consiste em reduzir a duração do afundamento; ou seja, reduzir o tempo para eliminar o defeito (ou curto-circuito). Isso pode ser efetuado com a aplicação da proteção de linha de ultra-alta velocidade.

### B. Melhoria da Estabilidade do Sistema de Potência

Um sistema de potência consiste de geradores, linhas de transmissão, transformadores, reatores shunt, bancos de capacitores, e assim por diante. Todos os geradores precisam operar em sincronismo e precisam manter este sincronismo em todas as condições de operação para garantir a continuidade do sistema de potência [9].

Em um sistema sem perdas, a transferência da potência ativa  $P$  depende das magnitudes das tensões  $V_S$  e  $V_R$ , da reatância série  $X$  e do ângulo entre as tensões (o ângulo de potência)  $\delta$ , conforme mostrado na Fig. 3 [10].

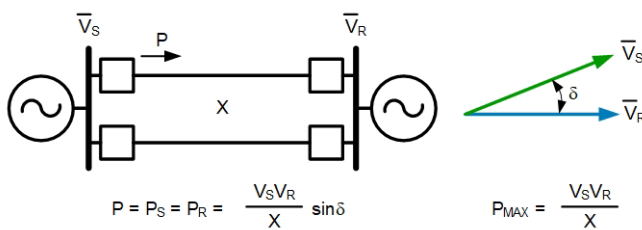


Fig. 3. Transferência de potência ativa

A potência de transferência  $P$  é uma função senoidal do ângulo de potência  $\delta$ . O sistema de potência é operado em um determinado ângulo  $\delta_0$  correspondente a uma potência de transferência  $P_0$ , conforme mostrado na Fig. 4. A carga pode ser aumentada em pequenos degraus até atingir a ponta da curva de potência. Um aumento da potência de transferência  $P$  acompanha cada elevação na potência da demanda de carga. Além do máximo da curva ( $\delta > 90^\circ$ ), um aumento de carga provoca uma redução da potência de transferência e o sistema perde o sincronismo.  $P_{MAX}$  representa o limite de estabilidade no estado de regime para um sistema ideal sem perdas. Esta é a potência máxima que o sistema de potência pode transferir em um estado de regime [10].

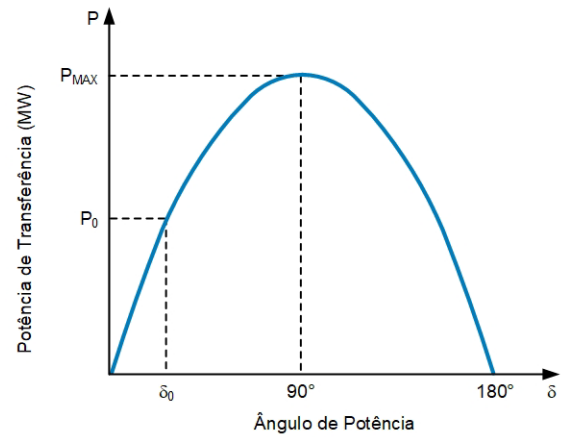


Fig. 4. Capacidade de transferência de potência

Estabilidade é definida como a capacidade de o sistema de potência retomar suas condições de operação normais e estáveis após uma perturbação [9]. Curtos-circuitos são distúrbios que podem afetar a estabilidade do sistema de potência. Imediatamente após o início da falta, a reatância série  $X$  aumenta subitamente e a curva de capacidade de transferência de potência muda da curva de pré-falta para a curva de falta, conforme mostrado na Fig. 5. A falta reduz a capacidade de transferência de potência do sistema. Quando um esquema de proteção opera e retira de serviço a linha com defeito, a capacidade de transferência do sistema de potência pós-falta é maior do que a capacidade de transferência durante a falta, mas é menor do que a capacidade de transferência na pré-falta.

A Fig. 5 detalha os critérios das áreas iguais utilizados para avaliar a estabilidade transitória em sistemas de potência com duas máquinas. A Fig. 5a exibe um sistema instável ( $A_1 > A_2$ ). A eliminação lenta da falta cria uma área ampla de aceleração  $A_1$ , que não pode ser compensada por uma área de desaceleração  $A_2$  correspondente [10].

Uma maneira de manter o sistema estável no caso da Fig. 5a consiste em reduzir a transferência da potência  $P_0$  na pré-falta. Contudo, esta abordagem limita a carga que pode ser conectada ao sistema de potência, logo esta solução não pode ser considerada uma solução válida. Outra maneira é reduzir a reatância mostrada na Fig. 3, a qual pode ser realizada através da construção de novas linhas de transmissão (que tem um alto custo) ou da implantação de compensação série. Uma terceira opção consiste em eliminar a falta mais rapidamente visando reduzir a área de aceleração  $A_1$ . Os relés no domínio do tempo fornecem um tempo rápido de eliminação de faltas, o que reduz a área de aceleração  $A_1$  e torna o sistema estável ( $A_1 = A_2$ ) para a mesma falta, conforme mostrado na Fig. 5b. Esta opção não limita a carga no sistema de potência e tem um custo menor do que a construção de novas linhas de transmissão, sendo esta uma boa razão para aplicar relés e disjuntores rápidos nos sistemas de potência.

A estabilidade do sistema de potência é um dos principais motivos para a busca por uma proteção de linha de transmissão mais rápida. Eliminar faltas mais rápido do que o tempo crítico de eliminação de faltas garante a estabilidade dos sistemas de potência e evita *blackouts* [10]. Além disso, conforme

mencionado anteriormente, a eliminação mais rápida da falta aumenta a quantidade de potência que pode ser transferida.

As faltas são normalmente eliminadas em 3 a 4 ciclos, considerando um tempo de operação típico de 1 a 1,5 ciclo (16,67 a 25 ms em um sistema de 60 Hz) para os relés de proteção e um tempo típico de 1,5 a 3 ciclos (25 a 50 ms em um sistema de 60 Hz) para que os disjuntores interrompam a corrente. A aplicação de relés no domínio do tempo permite reduzir o tempo de eliminação da falta, obtendo tempos de operação de 1 a 3 ms. Conforme já mencionado, cada milissegundo subtraído do tempo de eliminação da falta permite que o sistema transfira mais potência na pré-falta. A Referência [11] explica que em uma linha de uma aplicação específica, uma redução de 1 ciclo no tempo de eliminação da falta aumentou o montante de transferência de potência estável em 250 MW, resultando em 15 MW adicionais por milissegundo.

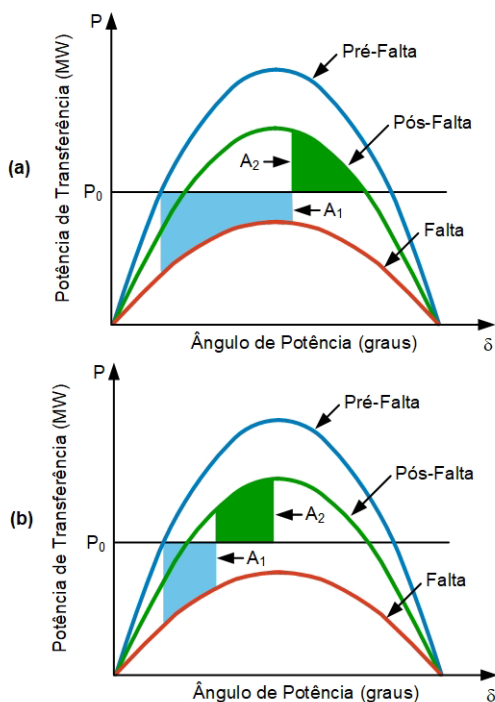


Fig. 5. Capacidade de transferência do sistema de potência e os critérios das áreas iguais em (a) um sistema instável e (b) um sistema estável

### C. Outros Benefícios

O transformador é um dos ativos mais críticos em uma subestação de transmissão. Reparar ou substituir um transformador é uma tarefa muito cara, difícil e demorada, logo é muito importante manter o transformador saudável. De acordo com [12], a magnitude e a duração das faltas passantes são as causas dominantes da aceleração do desgaste mecânico e térmico nos transformadores. A Fig. 6 mostra um diagrama unifilar de um evento típico de falta passante que pode ocorrer em um transformador devido a uma falta externa.

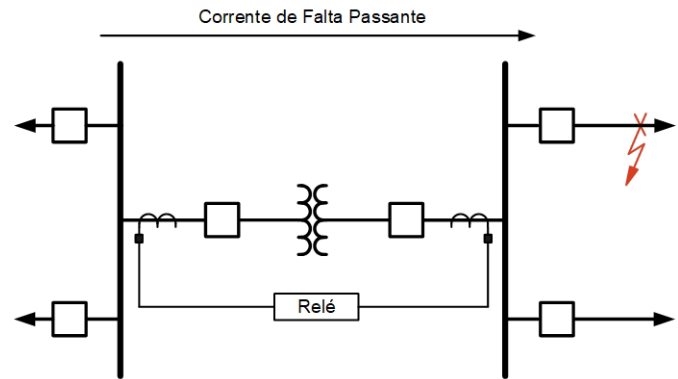


Fig. 6. Diagrama unifilar de um evento típico de falta passante

Um transformador é exposto a centenas de faltas passantes durante seu tempo de vida útil, e cada falta passante tem um impacto negativo na vida do transformador. Para uma corrente de falta com baixa magnitude próxima do nível de sobrecarga do transformador, o estresse térmico é mais significativo do que o estresse mecânico. Para uma corrente de falta com alta magnitude, o estresse mecânico é mais significativo do que o estresse térmico e transmite força mecânica para o enrolamento do transformador em ambas as direções horizontal e vertical. Uma falta passante severa pode fazer com que um enrolamento se expanda horizontal e verticalmente. Quando um enrolamento se expande horizontalmente, ele pode sofrer danos mecânicos e também causar danos aos enrolamentos adjacentes. Uma força vertical tende a afrouxar as cunhas do enrolamento. Portanto, eliminar uma falta passante o mais rápido possível é fundamental para manter o transformador saudável, reduzindo o desgaste térmico e mecânico e aumentando a vida útil do transformador. Uma proteção mais rápida também aumenta a segurança das equipes de trabalho da concessionária e do público, limita o desgaste dos equipamentos, reduz a probabilidade de faltas internas em transformadores e geradores, aumenta a vida útil total dos equipamentos e reduz os danos à propriedade.

## IV. APLICAÇÃO DE TWFL NO MUNDO REAL

Informações rápidas e precisas da localização de faltas são críticas para a operação e manutenção dos sistemas de transmissão elétrica. Conhecer a localização precisa da falta reduz os custos de operação e manutenção de linhas de transmissão evitando trabalhos longos e dispendiosos de inspeção nas linhas para localizar a seção com defeito. Isso também permite que os reparos e o restabelecimento da linha de transmissão sejam realizados rapidamente, reduzindo as perdas econômicas resultantes da indisponibilidade da linha de transmissão.

Conforme mencionado anteriormente, a localização de faltas baseada na impedância de uma extremidade é um método comum usado para ajudar as equipes de manutenção a encontrar faltas em linhas de transmissão, mas é suscetível a imprecisões [4]. TWFL, por outro lado, não está sujeito a estas imprecisões e pode, portanto, fornecer informações extremamente precisas [2]. Mesmo para linhas com compensação série, a localização

da falta é precisa independentemente do nível de compensação e do status da compensação série.

Operando de forma correta, TWFL reduz drasticamente o custo para identificação do local com necessidade de reparo em comparação com o custo dos métodos tradicionais para fazer o mesmo. Portanto, é possível que a instalação de um sistema TWFL seja menos dispendiosa do que os custos economizados durante sua primeira utilização.

O exemplo de aplicação discutido nesta seção inclui uma linha de transmissão híbrida ou não homogênea, que é uma linha com uma seção aérea e pelo menos uma outra seção que pode ser composta de cabo subaquático ou subterrâneo. Geralmente, o elemento de religamento automático não é habilitado para linhas de transmissão híbridas porque, se a falta estiver no cabo subaquático ou subterrâneo, a linha não pode ser reenergizada sem o reparo da seção com defeito do cabo. Esta é uma restrição na operação de tais linhas de transmissão. No entanto, se a falta puder ser localizada de forma muito precisa e em tempo real, o elemento de religamento automático pode ser habilitado e controlado dinamicamente pelo elemento de localização de falta. Por exemplo, se a falta estiver localizada na seção aérea, então o elemento de religamento automático é liberado, mas se a falta estiver localizada no cabo subterrâneo ou subaquático, o elemento de religamento automático é bloqueado.

As linhas de transmissão híbridas adicionaram complexidade, tornando a localização da falta uma tarefa difícil. Mesmo o método TWFL não é capaz de operar corretamente para este tipo de linha se o objetivo for obter a localização da falta em tempo real. Isso ocorre porque a onda viajante tem uma velocidade de propagação diferente em cada segmento da linha. A onda viajante se propaga muito mais rápido na seção aérea em comparação com as seções subterrânea ou subaquática. No entanto, os relés modernos no domínio do tempo incorporam um elemento TWFL avançado

com capacidade de localizar faltas em linhas de transmissão híbridas. É possível configurar o tempo de propagação para até cinco segmentos diferentes; dessa forma, o algoritmo TWFL compensa automaticamente a diferença nos tempos de propagação de cada segmento e reporta a localização da falta com muita precisão e rapidez (em alguns milissegundos).

Um exemplo de aplicação no mundo real deste método TWFL avançado é mostrado na Fig. 7. Nesta aplicação, a linha de transmissão híbrida é composta por três seções diferentes: uma seção aérea de 45 km, uma seção subaquática de 1,5 km e uma seção subterrânea de 4,5 km. No passado, era necessário instalar relés direcionais em cada ponto de transição para identificar a seção com defeito. Esta abordagem tem várias desvantagens, tais como o custo adicional para instalação dos relés direcionais nos pontos de transição (que geralmente estão localizados em locais remotos), o custo extra para manutenção dos relés direcionais e o aumento da taxa de falha sistêmica devido aos dispositivos extras. Por outro lado, o método TWFL avançado pode localizar precisamente faltas em linhas de transmissão híbridas, o que torna a tarefa de localização de faltas mais fácil, mais econômica e mais confiável.

A localização de faltas de forma precisa e em tempo real nas linhas híbridas permite que o sistema de potência cancele o religamento automático para faltas nas seções de uma linha com cabo subterrâneo ou subaquático, embora ainda permita o religamento nas seções aéreas da linha. Esta lógica adaptativa de cancelamento do religamento automático também pode ser aplicada para cancelar o religamento em outras situações, tais como para faltas localizadas onde a linha de transmissão atravessa áreas densamente povoadas ou áreas suscetíveis ao fogo, ou para faltas perto de capacitores série, derivações da linha, travessias de rodovias principais, e assim por diante. Esta é uma função exclusiva que permite o controle preciso e total do esquema de religamento automático.

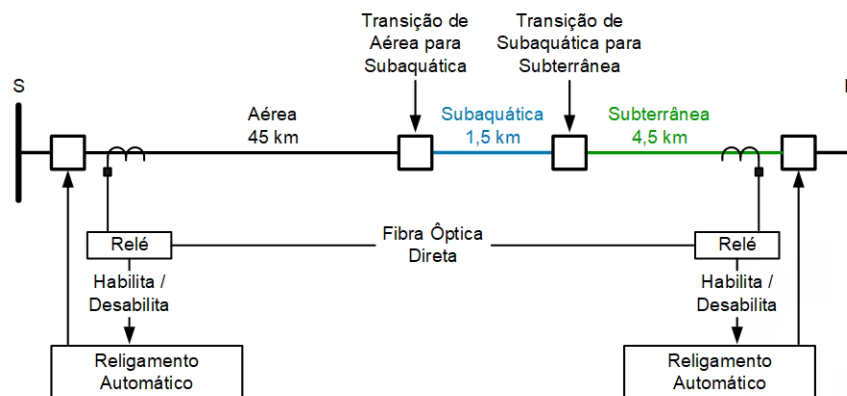


Fig. 7. TWFL em uma linha de transmissão híbrida do mundo real

## V. OSCIOGRAFIA COM ALTA RESOLUÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, um relé no domínio do tempo amostra correntes e tensões a cada microssegundo (uma taxa de amostragem de 1 MHz) para extrair ondas viajantes dos sinais brutos e para capturar tensões e correntes da linha. Ele também armazena registros de oscilografia de acordo com disparos (“triggers”) definidos pelo usuário.

O relé no domínio do tempo estabelece as estampas de tempo de seus registros da oscilografia de alta resolução com uma precisão igual ou melhor do que 100 ns em relação ao tempo absoluto se houver uma fonte de tempo IRIG-B de alta precisão conectada ao mesmo. Os registros de oscilografia recuperados de diferentes dispositivos podem então ser alinhados no tempo e vários registros podem ser analisados em conjunto. Esses registros podem ser usados para investigar e analisar componentes de alta frequência (tal como a tensão de recuperação transitória [TRV: “transient recovery voltage”] e seus efeitos) nas tensões e correntes através da subestação ou em subestações adjacentes. A TRV pode ser definida como a tensão que aparece nos terminais do polo do disjuntor após uma ação de chaveamento para interrupção da corrente [13], conforme mostrado na Fig. 8.

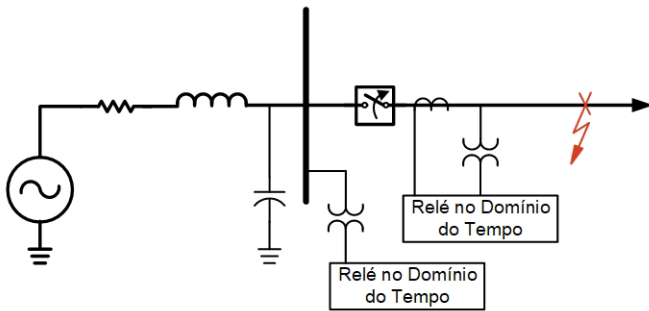


Fig. 8. Chaveamento do disjuntor

A TRV tem uma amplitude alta e frequência alta, e pode assumir valores muito elevados dentro de um curto período de tempo, conforme mostrado na Fig. 9. Esta mudança rápida na tensão pode ter efeitos prejudiciais e indesejados nos dispositivos do sistema de potência, tais como falhas na isolamento e reignições da corrente. Por exemplo, a TRV pode causar estresse na isolamento dos disjuntores, resultando em ruptura e flashover externo.

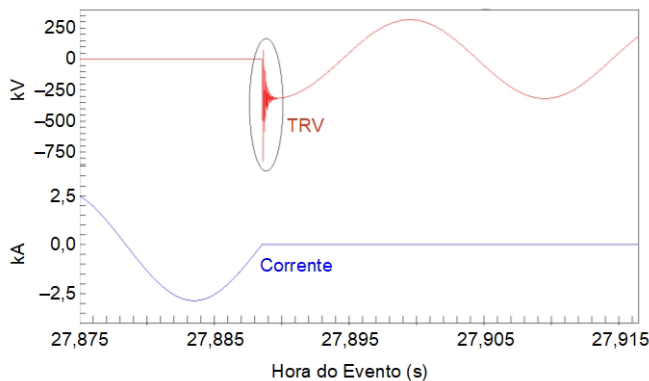


Fig. 9. TRV (sistema de 50 Hz)

Durante o processo de interrupção de uma corrente de falta, um arco é estabelecido entre os contatos do disjuntor. O arco perde condutividade rapidamente à medida que a corrente se aproxima do zero, e alguns microssegundos após o cruzamento da corrente pelo zero, ela para de fluir no circuito e o arco cessa. Durante este processo, o meio dielétrico deve recuperar sua característica de isolamento e continuar impedindo o fluxo de corrente. A interrupção é bem-sucedida se o meio de interrupção puder suportar o aumento rápido da tensão causado pela TRV. No entanto, se o meio dielétrico se deteriorar devido à TRV, ocorre um rompimento do dielétrico, fazendo com que o meio dielétrico se torne condutor e a corrente comece a fluir novamente. Este fenômeno é chamado de reignição. A Fig. 10 mostra um exemplo de reignição da corrente onde o fluxo de corrente foi restabelecido logo após o cruzamento pelo zero. Este é um fenômeno que não pode ser registrado pelos dispositivos de proteção que possuem taxas de amostragem tradicionais; sendo assim, o comportamento é considerado como sendo uma operação normal do disjuntor. Os relés no domínio do tempo fornecem capturas das formas de onda com altas taxas de amostragem, tornando tal fenômeno visível.

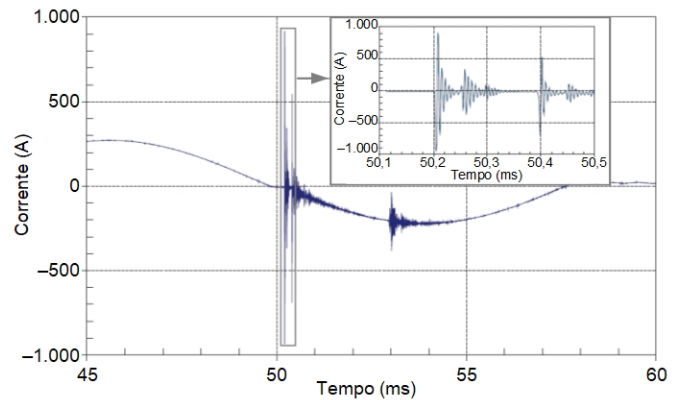


Fig. 10. Reignição da corrente (sistema de 60 Hz)

A reignição da corrente devido ao rompimento do meio dielétrico no disjuntor causa efeitos nocivos ao sistema de potência (o oposto dos benefícios explicados na Seção III) em função do tempo maior para eliminação da falta. Além disso, os disjuntores podem falhar para interromper a corrente e explodir, causando elevados danos materiais e comprometendo a confiabilidade do sistema de potência.

A capacidade de suportar TRV é um item da especificação dos disjuntores, sendo fornecido nos respectivos *data sheets*. Isto é especificado em termos do valor de pico e do tempo em microssegundos necessário para alcançar o pico. A aplicação de relés no domínio do tempo, conforme ilustrado na Fig. 8, permite capturar tensões e correntes para as operações do disjuntor com uma taxa de amostragem de 1 MHz, visando verificar se a TRV real está dentro da capacidade de suportabilidade do disjuntor ou detectar potenciais problemas com o disjuntor durante o processo de interrupção.

Os registros da oscilografia de alta resolução revelam eventos indesejados no sistema de potência que não podem ser visualizados através de outros métodos. Sem esta visibilidade, os eventos não são reconhecidos como comportamento não

intencional dos equipamentos primários, nenhuma manutenção ou reparo é programado e o sistema de potência continua a funcionar em um estado comprometido. Com esta visibilidade, a necessidade de manutenção baseada no desempenho é identificada e pode ser programada para maximizar a saúde e o desempenho do sistema elétrico de potência.

## VI. FONTES DE ENERGIA NÃO CONVENCIONAIS

As fontes de energia não convencionais, tais como usinas de energia eólica e solar, apresentam vários desafios para os engenheiros de proteção [14]. Um desses desafios refere-se ao fato de certos tipos de controles associados a essas fontes possuírem características complexas difíceis de serem representadas com precisão nos modelos usados para calcular a corrente de curto-circuito que estas fontes de energia contribuem para as faltas. Além disso, a magnitude desta contribuição de corrente pode ser muito limitada devido ao tipo de conversão que é necessária para conectar tais fontes à rede elétrica. Esta magnitude limitada pode causar problemas para ajustar corretamente os relés de proteção no ponto de interconexão (POI: “point of interconnection”) e nos alimentadores coletores [15].

A Referência [15] declara que a capacidade de prever e modelar as fontes de corrente de falta é fundamental para ajustar corretamente os relés de proteção, mas isto é muito difícil de ser feito para fontes de energia não convencionais, tais como plantas de energia renováveis. No entanto, as ondas viajantes que são lançadas a partir de uma falta não dependem das fontes de energia; portanto, a proteção baseada em ondas viajantes pode ser aplicada e ajustada para operar corretamente mesmo quando o modelo da fonte de energia não é completamente conhecido.

Normalmente, recomenda-se tratar as fontes de energia não convencionais como fracas e aplicar os princípios de proteção existentes. A Figura 3-26 da [15] mostra um exemplo de contribuição de corrente do gerador de uma turbina eólica (WTG: “wind turbine generator”) Tipo IV para uma falta trifásica no sistema de potência. A duração deste tipo de surto de corrente de falta pode ser da ordem de meio ciclo (8 ms) e é ditada pelos controles associados aos recursos não convencionais. Os princípios no domínio do tempo baseados em grandezas incrementais e ondas viajantes fornecem tempos de operação da proteção da ordem de 2–6 ms, tendo assim um tempo de atuação dentro da janela do surto de corrente e fornecendo uma opção promissora para proteção de linha nas linhas de interligação com as fontes de energia não convencionais.

## VII. CONCLUSÃO

A tecnologia no domínio do tempo é uma área emergente na proteção, monitoramento e controle de sistemas de potência. Esta tecnologia fornece vários benefícios, incluindo (mas não se limitando a) o seguinte:

- Melhora a estabilidade e segurança do sistema de potência.
- Melhora a qualidade da energia.
- Reduz o desgaste e melhora o tempo de vida útil dos ativos do sistema de potência.
- Reduz a probabilidade de faltas internas nos transformadores e geradores.
- Melhora a segurança das equipes de trabalho da concessionária e do público.
- Reduz os danos à propriedade.
- Fornece localização de faltas mais precisa em tempo real e é imune a problemas que afetam os métodos de localização de faltas baseados em impedância.
- Permite a lógica adaptativa de cancelamento do religamento automático em tempo real com base na localização da falta.
- Fornece taxas de amostragem de 1 MHz, permitindo a investigação e análise de fenômenos de alta frequência no sistema de potência.
- Melhora o desempenho do sistema de proteção no POI para fontes de energia não convencionais.

A tecnologia no domínio do tempo introduz uma era totalmente nova para a proteção do sistema de potência. Esforços anteriores, tais como relés digitais baseados em fasores, trouxeram vários benefícios para o sistema de potência, mas havia espaço para melhorias. Esta nova tecnologia no domínio do tempo fornece algumas das melhorias necessárias e aumenta a confiabilidade do sistema de potência, conforme discutido neste artigo. Com os registros da oscilografia de alta resolução possibilitados pelos relés no domínio do tempo, os engenheiros possuem uma ferramenta sem precedentes para análise dos fenômenos no sistema de potência. É possível investigar as tensões e correntes baseando-se em informações mais precisas e ver detalhes que nunca foram antes percebidos. Esta nova visibilidade do sistema de potência fornece explicações para problemas conhecidos e permite identificar e explicar problemas anteriormente desconhecidos.



## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. V. Mynam, "Speed of Line Protection – Can We Break Free of Phasor Limitations?," proceedings of the 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2015.
- [2] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, and S. Marx, "Locating Faults by the Traveling Waves They Launch," proceedings of the 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2014.
- [3] E. O. Schweitzer, III, B. Kasztenny, and M. V. Mynam, "Performance of Time-Domain Line Protection Elements on Real-World Faults," proceedings of the 69th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2016.
- [4] K. Zimmerman and D. Costello, "Impedance-Based Fault Location Experience," proceedings of the 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, April 2005.
- [5] E. O. Schweitzer, III, A. Guzmán, M. Mynam, V. Skendzic, and B. Kasztenny, "Accurate Single-End Fault Location and Line-Length Estimation Using Traveling Waves," proceedings of the 13th International Conference on Developments in Power System Protection, Edinburgh, United Kingdom, March 2016.
- [6] B. Kasztenny, A. Guzmán, N. Fischer, M. V. Mynam, and D. Taylor, "Practical Setting Considerations for Protective Relays That Use Incremental Quantities and Traveling Waves," proceedings of the 43rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2016.
- [7] Pacific Gas and Electric Company, "Short Duration Voltage Sags Can Cause Disruptions," June 2000. Available: <http://www.pge.com/includes/docs/pdfs/mybusiness/customerservice/energystatus/powerquality/voltagesags.pdf>.
- [8] V. P. Mali, R. L. Chakrasali, and K. S. Aprameya, "A Technical Investigation of Voltage Sag," American Journal of Engineering Research (AJER), Vol. 4, Issue 10, October 2015, pp. 60–68.
- [9] Circuit Globe, "Power System Stability," Available: <http://circuitglobe.com/power-system-stability.html>.
- [10] P. Kundur, Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, 1994.
- [11] R. B. Eastvedt, "The Need for Ultra-Fast Fault Clearing," proceedings of the 3rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 1976.
- [12] IEEE Standard C57.109-1993, IEEE Guide for Liquid-Immersed Transformers Through-Fault-Current Duration.
- [13] IEEE Standard C37.011-2011, IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers.
- [14] B. Chen, A. Shrestha, F. A. Ituzaro, and N. Fischer, "Addressing Protection Challenges Associated With Type 3 and Type 4 Wind Turbine Generators," proceedings of the 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, TX, March 2015.
- [15] IEEE PES Joint Working Group, "Fault Current Contributions From Wind Plants." Available: <http://www.pes-psrc.org/Reports/Fault%20Current%20Contributions%20from%20Wind%20Plants.pdf>.

## IX. BIOGRAFIAS

**Ricardo Abboud** recebeu seu B.S.E.E. em engenharia elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, em 1992. Em 1993, ele começou a trabalhar na CPFL Energia como engenheiro de proteção. Em 2000, ele ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como engenheiro de aplicação de campo no Brasil, fornecendo suporte para os clientes nas áreas de automação e proteção de subestações. Em 2005, tornou-se o gerente de engenharia de campo e, em 2014, passou a ser o gerente de serviços de engenharia. Em 2016, ele foi transferido para Pullman, Washington, Estados Unidos, e atualmente é gerente técnico internacional. Ele é um instrutor certificado na Universidade SEL, e é autor e coautor de vários artigos técnicos.

**David Dolezilek** recebeu seu B.S.E.E. da Montana State University e é o diretor técnico internacional na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Ele tem experiência em proteção, automação e integração de sistemas de potência, bem como em sistemas de comunicação, controle, SCADA e EMS. É autor de diversos artigos técnicos e continua a efetuar pesquisas em tecnologias inovadoras de interesse para o setor de energia. David é um inventor patenteado e participa de diversos grupos de trabalho e comitês técnicos. Ele é membro do IEEE, da IEEE Reliability Society, grupos de trabalho do CIGRE, e de dois comitês técnicos da International Electrotechnical Commission (IEC) criados para abordar a segurança e padronização global de sistemas e redes de comunicação de subestações.