



TECNIVOLT  
ENGENHARIA

ISO 9001:2015 ISO 14001:2015 ISO 45001:2018

MANUTENÇÃO PREDITIVA · CABOS ISOLADOS DE MÉDIA TENSÃO

# VLF & Tangente Delta

Diagnóstico da isolação de cabos de média tensão antes da falha

**Raphael Leite Menezes Santos**  
ENGENHEIRO ELETRICISTA · ESPECIALISTA EM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

# O que você vai ler

01	A falha que ninguém vê chegar	03
02	O que envelhece dentro de um cabo	03
03	Por que ensaiar em muito baixa frequência	04
04	Parâmetros e tensões de ensaio	05
05	A tangente delta, sem mistério	05
06	Suportar não é o mesmo que estar saudável	06
07	As três leituras que importam	07
08	Quando o número diz “aja”	09
09	Lendo um ensaio na prática	10
10	Tangente delta e descargas parciais	10
11	Decidir com o ensaio em mãos	11
12	Limites, segurança e boas práticas	11
13	Checklist, glossário e referências	12

Um cabo pode passar num ensaio de tensão e, ainda assim, estar envelhecido por dentro. Este dossiê mostra como o ensaio em muito baixa frequência, combinado à medição de tangente delta, transforma uma isolação opaca e enterrada em informação técnica para decidir antes da falha.

Poucos componentes de uma instalação de média tensão recebem tão pouca atenção quanto o cabo isolado, e poucos causam tanto estrago quando falham. Ele não tem mostrador, não faz ruído, não esquenta de forma visível. Trabalha em silêncio dentro de eletrodutos, canaletas e bandejas, muitas vezes por décadas, até o dia em que a isolação cede sem aviso. Quando isso acontece, o prejuízo raramente se limita ao trecho rompido: para o processo, derruba a subestação, expõe a equipe a risco e abre um custo de localização e reparo que quase sempre supera, em muito, o que custaria ter avaliado aquele cabo antes.

Este artigo trata de como antecipar esse momento. Mais especificamente, de como o ensaio em muito baixa frequência (VLF) combinado com a medição de tangente delta permite olhar para dentro da isolação e formar uma opinião técnica sobre sua condição enquanto o cabo ainda está em pé. A tese que percorre o texto é simples de enunciar e desconfortável de aceitar: um cabo pode passar num ensaio de tensão e, ainda assim, estar envelhecido por dentro.

## 01 A falha que ninguém vê chegar

A isolação de um cabo de média tensão envelhece da mesma forma que quase tudo em engenharia: por acú-

***Suportar um ensaio responde a uma pergunta: o cabo aguentou? A tangente delta responde a outra, mais útil: em que estado está essa isolação?***

## 02 O que envelhece dentro de um cabo

Antes de medir, vale entender o que se está medindo. A degradação da isolação não tem uma causa única; tem um conjunto de mecanismos que costumam atuar juntos e se realimentar.

O mais discutido em cabos poliméricos é a arborescência de água, o conhecido *water treeing*. Em isolações de XLPE e EPR, a presença simultânea de umidade e campo elétrico favorece o surgimento de microestruturas ramificadas, semelhantes a pequenas árvores, que cres-

cem ao longo de anos. Elas não rompem o cabo de imediato, mas degradam localmente o dielétrico e elevam as perdas. Sua existência e severidade dependem do tipo de isolação, da idade e das condições de instalação, e é por isso que cabos antigos em ambientes úmidos merecem atenção especial.

A umidade, por si só, já é um dos fatores mais associados à perda de desempenho, sobretudo em trechos subterrâneos, dutos sujeitos a alagamento e terminações mal vedadas. Some-se a isso o efeito térmico: ciclos de carga, sobrecargas e operação em temperatura elevada aceleram o envelhecimento do material isolante. E o efeito elétrico, das sobretensões e transitó-

mulos. Não é um evento, é um processo. Cada ciclo térmico, cada sobretensão de manobra, cada estação chuvosa que encontra um ponto de umidade, cada emenda montada às pressas, deixa sua marca. O material vai perdendo, devagar, as propriedades dielétricas que o tornavam confiável. Durante boa parte desse percurso, o cabo continua entregando energia normalmente, e é justamente essa normalidade aparente que engana.

A consequência prática é conhecida de qualquer equipe de manutenção: a falha chega concentrada nos piores momentos, sob maior solicitação, e quase sempre fora de hora. O cabo que rompeu numa segunda-feira de pico não decidiu falhar naquele instante; ele vinha sinalizando, em linguagem dielétrica, havia tempo. O problema é que ninguém estava medindo.

A manutenção preditiva existe para mudar essa equação. Em vez de esperar a falha e reagir, ela propõe medir periodicamente a condição da isolação e usar essa informação para decidir com antecedência. No caso dos cabos, isso significa traduzir um material opaco e enterrado em números que um engenheiro consegue interpretar. É aí que entram o VLF e a tangente delta.

rios de manobra, que solicitam a isolação além do regime para o qual ela foi pensada.

Há ainda a parcela que não vem do tempo, e sim da execução. Raio de curvatura desrespeitado, dano mecânico no lançamento, tração excessiva e manuseio descuidado introduzem fragilidades que só aparecem mais tarde. E há os acessórios. Emendas e terminações são, historicamente, os pontos mais vulneráveis de um sistema de cabos: é onde o controle de campo elétrico é mais delicado, onde a montagem depende mais da mão de obra e onde a contaminação durante a instalação cobra seu preço. Não é exagero dizer que uma parte expressiva das falhas de campo nasce no acessório, não no corpo do cabo.

Por trás de vários desses mecanismos circulam as descargas parciais: pequenas descargas internas, em vazios e interfaces, que não interrompem o serviço de imediato mas vão corroendo a isolação ao longo do tempo. Guardemos esse nome; ele volta mais adiante, quando a tangente delta encontrar seu limite.

Vale ainda lembrar que nem todo cabo envelhece do mesmo jeito, porque nem todo cabo tem a mesma isolação. Nos extrudados de XLPE, a arborescência de água é a preocupação clássica e a tangente delta tende a ser baixa quando a isolação está sã, o que faz pequenas variações já significarem algo. Nos cabos de EPR, o nível de perdas de base costuma ser naturalmente mais alto e mais disperso, o que muda a régua de leitura. Já os antigos cabos de papel impregnado em óleo, os PILC, têm comportamento dielétrico próprio e uma longevidade que impressiona, mas exigem critérios específicos. Em todos os casos, comparar um cabo com ele mesmo ao longo do tempo é mais seguro do que comparar cabos de famílias diferentes entre si.

### 03 Por que ensaiar em muito baixa frequência

A primeira coisa a entender sobre o VLF é por que ele existe. Um cabo, eletricamente, comporta-se como um capacitor: dois condutores separados por um dielétrico. Para energizá-lo a uma dada tensão, é preciso fornecer uma corrente de carga proporcional à sua capacitância e à frequência aplicada. Em 50 ou 60 Hz, um cabo longo exige uma corrente capacitiva considerável, o que obriga a usar fontes de ensaio grandes, pesadas e

caras, inviáveis de levar até um pátio de subestação ou uma galeria industrial.



Painel do equipamento de ensaio VLF (forma de onda senoidal) em operação. Imagem ilustrativa.

Reduzir a frequência resolve o problema de forma elegante. Ao ensaiar na faixa de 0,01 Hz a 0,1 Hz, a corrente necessária para energizar o mesmo cabo cai na mesma proporção, e o equipamento encolhe a ponto de caber sobre um case com rodízios. É essa portabilidade que torna o VLF o método de campo consagrado para cabos de média tensão, hoje amparado por guias como a IEEE 400.2 e por normas IEC aplicáveis a cabos.

Há um ponto histórico que merece registro, porque ainda gera confusão. Durante muito tempo, o ensaio de campo era feito em corrente contínua. Para cabos de papel impregnado, funcionava razoavelmente. Para os cabos extrudados modernos, de XLPE, mostrou-se contraproducente: a tensão contínua injeta e aprisiona cargas espaciais na isolação polimérica, podendo reduzir a vida útil do cabo justamente naquilo que se pretendia verificar. A migração para o VLF não foi modismo; foi correção de rota técnica.

Convém também separar bem duas coisas. Energizar um cabo em operação é colocá-lo sob a tensão de serviço, na frequência da rede, para que ele cumpra sua

função. Ensaiar com VLF é o oposto disso: o cabo sai de operação, é aterrado conforme o procedimento, e recebe, de uma fonte de ensaio, uma tensão controlada em frequência muito baixa, por um tempo definido, com um objetivo definido. Um é uso; o outro é avaliação sob condições controladas.

Um detalhe que costuma escapar a quem está começando, e que importa na hora de especificar o ensaio: o VLF emprega diferentes formas de onda, tipicamente a senoidal e a cossenoidal-retangular, e a relação entre valor eficaz e valor de pico muda conforme a forma de onda. As edições mais recentes da IEEE 400.2 padronizaram a referência em valor eficaz. Especificar tensão de ensaio sem dizer a forma de onda é, portanto, um pedido incompleto.

## 04 Parâmetros e tensões de ensaio

Para quem precisa dimensionar um ensaio, alguns números de ordem de grandeza ajudam a partir do ponto certo. Os valores abaixo são típicos, citados da literatura técnica sobre VLF e da própria IEEE 400.2. Os parâmetros efetivos a aplicar devem vir sempre da edição vigente da norma e do manual do equipamento, em função da classe de tensão e do tipo de cabo.

### Parâmetros típicos do ensaio VLF

Parâmetro	Faixa típica	Observação
Frequência de ensaio	0,01 a 0,1 Hz	Diagnóstico de $\tan \delta$ usualmente a 0,1 Hz
Tensão — diagnóstico de $\tan \delta$	$\approx 0,5$ a $2 U_0$	Medida em mais de um patamar
Tensão — suportabilidade	$\approx 1,5$ a $3 U_0$	Ou conforme tabelas da norma
Forma de onda	Senoidal ou cossenoidal-retangular	Edição 2024 referencia valor eficaz
Tempo de ensaio	15 a 60 min	$\geq 66$ kV: mínimo de 60 min na aceitação (ed. 2024)

Para a suportabilidade, a norma traz tensões de ensaio por classe de cabo. A título de referência, os valores a seguir são da IEEE 400.2 na edição de 2024, forma de onda senoidal, fase-terra, em kV eficazes. Servem de ordem de grandeza; a edição vigente, a forma de onda e a classe do cabo devem ser confirmadas pelo responsável técnico.

### Exemplos de tensão de suportabilidade VLF senoidal (fase-terra, kV eficazes)

Tensão do cabo (kV)	Instalação — terminação temporária	Instalação — terminação final	Manutenção — cabo antigo
11	14	16	13
22	26	28	22
33	37	42	31
66	72	80	60

## 05 A tangente delta, sem mistério

Se o VLF é o meio de aplicar tensão, a tangente delta é o que se mede para diagnosticar. A ideia parte de um modelo simples. Imagine a isolação como um capacitor com um resistor em paralelo: o capacitor representa o comportamento dielétrico ideal, e o resistor representa as perdas, tudo o que dissipa energia em vez de armazená-la.

Numa isolação perfeita, a corrente que atravessa o dielétrico estaria adiantada exatamente 90 graus em relação à tensão, puramente capacitiva, sem perdas. Como nenhuma isolação real é perfeita, sempre há uma parcela de corrente em fase com a tensão, associada às perdas. Isso faz o ângulo entre tensão e corrente total ficar um pouco menor que 90 graus. O complemento desse ângulo é o ângulo de perdas, o delta. A tangente desse ângulo é a relação entre a corrente de perdas e a corrente capacitiva.

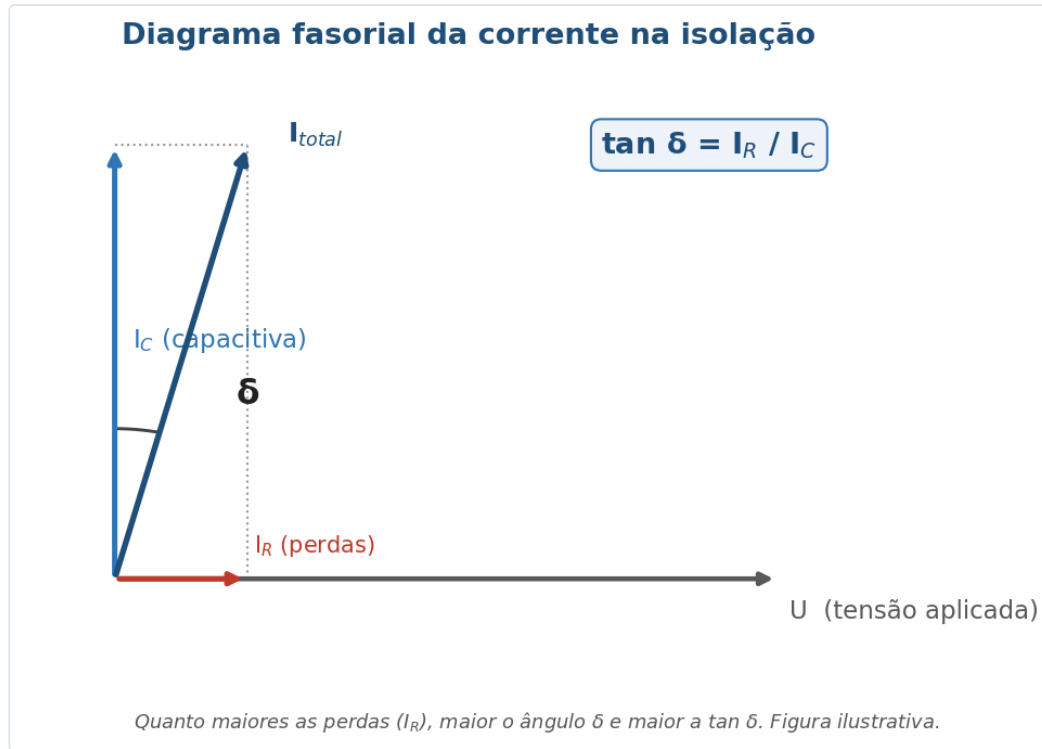


Diagrama fasorial da corrente na isolação. Quanto maior a corrente de perdas frente à capacitiva, maior o ângulo  $\delta$  e maior a  $\tan \delta$ . Figura ilustrativa.

A leitura física é direta. Quanto mais degradada a isolação, maior a parcela de perdas, maior o ângulo delta e maior a tangente delta. Uma isolação saudável dissipa pouco e apresenta  $\tan \delta$  baixa; uma isolação envelhecida dissipa mais e apresenta  $\tan \delta$  elevada. Os valores costumam ser pequenos, da ordem de milésimos, por isso são quase sempre expressos em unidades de 10 elevado a menos três.

Resta explicar por que medir a 0,1 Hz, e não em qualquer frequência. Além de reduzir a potência da fonte, a baixa frequência aumenta a resolução da componente resistiva, ou seja, da parcela de perdas que de fato interessa ao diagnóstico. Em frequência muito baixa, a contribuição capacitiva fica mais contida e o que está ligado às perdas dielétricas se destaca melhor na medição. A medição é feita off-line, com o cabo fora de serviço, o que é uma condição, não uma limitação: é o que permite variar a tensão de forma controlada.

Há um ponto conceitual que separa quem entende a técnica de quem apenas a executa. A tangente delta é uma medida global. Ela enxerga o conjunto do trecho ensaiado, somando as contribuições de toda a extensão do cabo e de seus acessórios. Isso a torna excelente para avaliar o estado geral e a tendência da isolação, e relativamente fraca para apontar onde está um defeito muito localizado. Guardar essa distinção evita a maior parte das interpretações equivocadas.

## 06 Suportar não é o mesmo que estar saudável

O mesmo equipamento de VLF presta-se a finalidades diferentes, e tratá-las como se fossem uma só é fonte recorrente de mal-entendido. Convém nomeá-las com clareza.

No ensaio de suportabilidade, aplica-se uma tensão definida por um tempo definido e observa-se uma única coisa: o cabo aguentou ou rompeu. É um resultado binário, valioso no comissionamento de cabo novo e após reparos, porque confirma a integridade naquele instante. O que ele não diz, e nunca prometeu dizer, é o quanto a isolação já envelheceu. Aprovar em suportabilidade significa que o cabo resistiu à solicitação imposta, não que esteja em ótimo estado.

Na medição de tangente delta, o objetivo muda. Em vez de só verificar se o cabo resiste, mede-se o nível de perdas, normalmente em mais de um patamar de tensão, e com isso se forma um juízo sobre a condição global. Aqui existem critérios numéricos publicados, que veremos adiante, e é por isso que essa medição é, de fato, um diagnóstico.

Existe ainda um arranjo intermediário que ganhou força nas edições recentes da IEEE 400.2: o ensaio de suportabilidade monitorado. Nele, a tangente delta, ou

a descarga parcial, é acompanhada durante o próprio ensaio de tensão. A vantagem prática é poder decidir antes de chegar ao nível final. Se o diagnóstico já se deteriora a uma tensão mais baixa, evita-se submeter um cabo claramente fragilizado a uma solicitação maior, e a equipe ganha informação sem ter de correr o risco até o fim.

Por fim, e talvez o mais importante para a gestão de ativos: o maior valor da tangente delta não está no número de hoje, e sim na sua evolução. Acompanhar o mesmo cabo ao longo de medições sucessivas revela tendência, e tendência é o que permite agir com antecedência real.

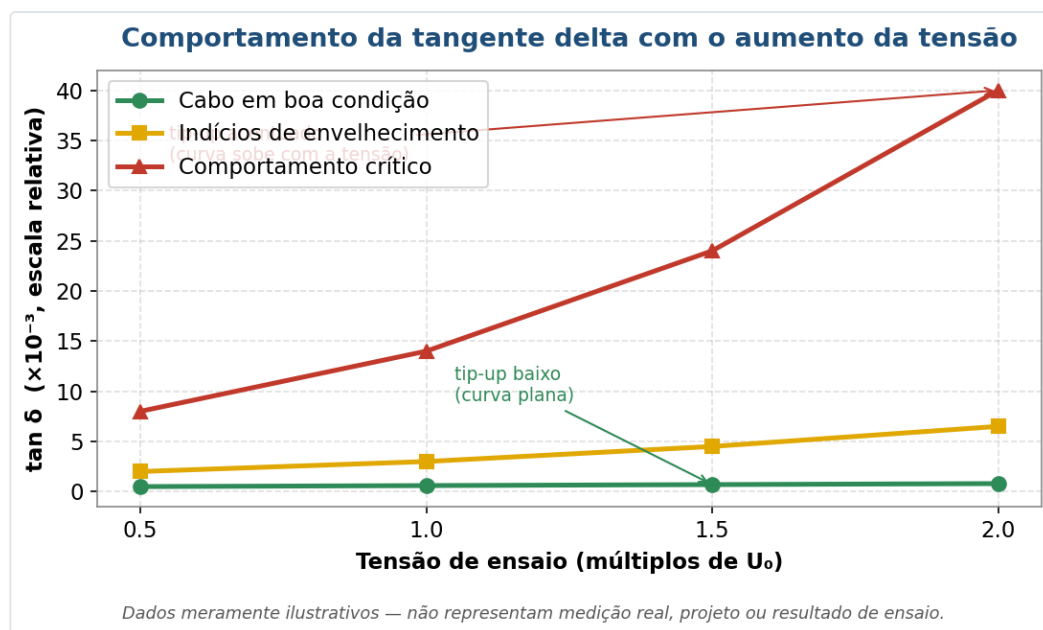
## 07 As três leituras que importam

Quando se fala em diagnóstico por tangente delta, costuma-se reduzir tudo a um único número. Na práti-

ca, são três leituras complementares, e cada uma conta uma parte da história.

A primeira é a magnitude da tangente delta, a média medida a um determinado nível de tensão. Ela dá o patamar de perdas da isolação. Sozinha, já separa cabos visivelmente bons de cabos visivelmente comprometidos, mas é a mais sensível ao tipo de cabo e ao comprimento, e por isso pede contexto.

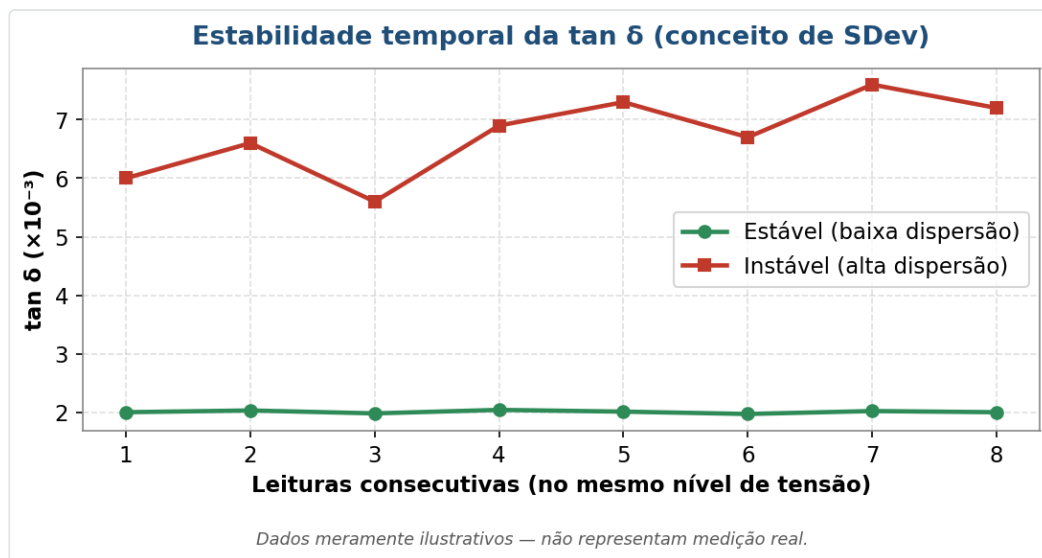
A segunda é a variação da tangente delta com a tensão, conhecida como *tip-up*, ou delta tan  $\delta$ . Mede-se a tangente delta em dois patamares, por exemplo a meia tensão nominal e a uma tensão acima da nominal, e observa-se quanto ela subiu. A lógica é física: defeitos sensíveis ao campo, como certas arborescências, fazem as perdas crescerem mais rápido quando a tensão aumenta. Uma curva que se mantém plana sugere isolação estável; uma curva que sobe acentuadamente sugere que algo dentro dela responde mal ao aumento de solicitação.



Comportamento da  $\tan \delta$  com a tensão. Curva plana indica *tip-up* baixo; curva ascendente indica *tip-up* acentuado. Dados ilustrativos.

A terceira é a estabilidade temporal, o desvio-padrão de leituras consecutivas tomadas no mesmo nível de tensão. Uma isolação íntegra entrega leituras repetíveis, com pouca dispersão. Quando os valores oscilam de medição para medição, no mesmo patamar, isso por si

só é um indicador de que algo não está estável dentro do dielétrico. As versões mais recentes da norma recomendam calcular essa dispersão também em meia tensão nominal, para captar cabos degradados antes de aplicar patamares mais altos.



Estabilidade temporal: leituras com baixa dispersão (estável) contra alta dispersão (instável). Dados ilustrativos.

Nenhuma das três decide sozinha. É a leitura conjunta, magnitude, variação com a tensão e estabilidade, que sustenta um diagnóstico defensável. Um cabo com tangente delta moderada mas estável e com tip-up baixo conta uma história diferente de um cabo com a mesma magnitude, porém instável e com tip-up acentuado.



Aquisição das medições com o equipamento de ensaio. Imagem ilustrativa.

■ verde = sem ação   ■ amarelo = estudo adicional   ■ vermelho = ação requerida

Há uma armadilha embutida nessa tabela, e é importante apontá-la em vez de escondê-la. Cada coluna se refere a um nível de tensão e a um tipo de cabo distintos, de modo que os valores não são diretamente com-

## 08 Quando o número diz “aja”

Chegamos ao ponto que mais interessa a quem assina o laudo: que valores indicam que um cabo está bem, e que valores indicam que é hora de agir. A resposta honesta é que não existe um único número universal, mas existem critérios publicados, organizados de forma consistente, e é com eles que se trabalha.

A IEEE 400.2 estrutura a avaliação em três faixas de condição. A primeira, em que nenhuma ação é requerida, indica isolamento compatível com a operação. A segunda, em que se recomenda estudo adicional, é a zona intermediária, na qual convém aprofundar a análise e acompanhar a tendência. A terceira, em que ação é requerida, sinaliza degradação relevante, que pede investigação e planejamento de intervenção. Essas três faixas são aplicadas às três leituras descritas acima, não a uma só.

Os limites numéricos, porém, mudam conforme a edição da norma e o tipo de cabo, e isso não é detalhe burocrático. A base desses critérios vem de extensos estudos estatísticos de campo, com destaque para a iniciativa conduzida pelo NEETRAC nos Estados Unidos, que analisou o comportamento de muitos circuitos reais. Ao longo das edições de 2004, 2013 e 2024, os critérios foram revistos, e a edição de 2024 chegou a remover os limites estritos de tangente delta e de tip-up que constavam de versões anteriores, reconhecendo que diferentes países desenvolveram critérios próprios.

### Faixas de média da tan δ por referência (× 10<sup>-3</sup>)

Condição	IEEE 400.2 - 2013 @ 2,0 U <sub>0</sub>	IEEE 400.2 - 2024 @ 1,0 U <sub>0</sub>	Singapura @ 1,5 U <sub>0</sub>	Coreia do Sul @ 1,5 U <sub>0</sub>
	Sem ação	< 1,2	< 4	< 2,2
Estudo adicional	1,2-2,0	5-50	2,2-12,0	10,0-27,0
Ação requerida	> 2,0	> 50	> 12,0	> 27,0

paráveis entre si. Comparar uma medição feita a uma vez a tensão nominal com um critério escrito para duas vezes a tensão nominal é um erro conceitual que leva a conclusões erradas. O que a tabela mostra de verdade é

a amplitude das abordagens, e a necessidade de adotar, para cada trabalho, uma referência coerente com a edição da norma, com o tipo de cabo e com a tensão de medição.

Há um dado dos estudos de campo que costuma surpreender quem nunca ensaiou um cabo, e que ajuda a calibrar expectativas. Em ensaios de suportabilidade de cerca de meia hora, conduzidos nos níveis de tensão recomendados, observam-se taxas de falha durante o próprio ensaio da ordem de alguns por cento. Isso não é defeito do método; é o método funcionando. A lógica é deliberada: é preferível que um defeito já instalado leve o cabo a falhar de forma controlada, no ensaio, com a equipe presente e a rede preparada, do que em serviço, num horário qualquer, arrastando consigo paradas e riscos. Um cabo que falha no ensaio era um cabo que falharia logo; o ensaio apenas escolheu a hora.

Algumas referências nacionais vão além das três faixas e propõem uma escala graduada, que combina magnitude, variação com a tensão e estabilidade num só sistema de classificação. O exemplo abaixo, oriundo de

um critério sul-coreano para cabos de extensão limitada, ilustra bem essa lógica de graduação.

#### Exemplo de escala graduada por nível de envelhecimento ( $\times 10^{-3}$ )

Nível	$\tan \delta @ 1,5 U_0$	Tip-up ( $1,5 U_0 - 0,5 U_0$ )	Estabilidade @ $1,5 U_0$
A	$\leq 1,0$	$\leq 0,5$	—
B	$\leq 2,0$	$\leq 1,2$	—
C	$\leq 6,0$	$\leq 6,0$	$\geq 0,2$
D	$\leq 10,0$	$\leq 12,0$	$\geq 0,3$
E	$\leq 27,0$	$\leq 60,0$	$\geq 1,4$
F	$> 27,0$	$> 60,0$	—

Esse mesmo critério faz uma ressalva que vale para todos: em cabos longos, a tangente delta pode aparecer baixa mesmo na presença de arborescências relevantes, porque a medição global dilui a contribuição do trecho afetado. Para extensões maiores, portanto, a análise de tendência ao longo do tempo é mais confiável do que o valor absoluto de uma única campanha.

**Os critérios são reais e estão em norma. O que não existe é um número mágico que sirva para qualquer cabo, em qualquer edição, sob qualquer tensão de medição.**

## 09 Lendo um ensaio na prática

Para sair da teoria, vale percorrer três situações típicas. Os números a seguir são ilustrativos, escolhidos apenas para mostrar como o raciocínio se monta; adoto, como referência didática, a lógica de faixas da IEEE 400.2 na edição de 2013.

Pense num primeiro alimentador, de XLPE, com poucos anos de serviço e sem histórico de falhas. Ele suporta o ensaio de tensão sem qualquer interrupção e apresenta tangente delta média da ordem de 0,8, com leituras estáveis e tip-up pequeno. Tudo aponta para isolamento em boa condição. A decisão não é complexa: mantém-se o cabo em operação e o inclui no plano regular de ensaios, para começar a construir um histórico que tornará as próximas avaliações ainda mais sólidas.

Imagine agora um segundo circuito, de idade intermediária, em que a tangente delta média se posiciona em torno de 1,6, dentro da faixa intermediária, com um tip-up já perceptível e alguma dispersão nas leituras. Não é um caso de pânico, mas também não é de ignorar. A conduta sensata é manter o cabo em serviço, encurtar o intervalo entre medições e olhar com atenção para as emendas e terminações, que são candidatas naturais a explicar uma perda que começa a subir.

Considere, por fim, um terceiro trecho, antigo, instalado em ambiente úmido, com tangente delta média em torno de 3,5, acima do limiar de ação para aquele critério, tip-up acentuado e instabilidade marcante de leitura para leitura. Aqui o ensaio já entregou seu recado. O encaminhamento técnico é investigar os acessórios, complementar o diagnóstico com medição de descargas parciais e, sobretudo, planejar a substituição

de forma programada, em janela escolhida pela operação, e não imposta por uma falha às duas da manhã.

O detalhe que faz a diferença não está em nenhum dos números, e sim na constatação de que o mesmo ensaio, com a mesma técnica, conduziu a três decisões distintas. É exatamente isso que se espera de uma ferramenta de diagnóstico: que ela ajude a decidir, e não apenas a preencher um relatório.

*Preparação e conexão do ensaio na estrutura da subestação. Imagem ilustrativa.*

## 10 Tangente delta e descargas parciais

Já ficou dito que a tangente delta é uma medida global. Essa é, ao mesmo tempo, sua força e seu limite. Quando o problema é um defeito localizado, num vazio de uma emenda, numa interface mal montada de uma terminação, a contribuição daquele ponto se dilui no conjunto e pode passar despercebida na média. É aqui que entra a medição de descargas parciais.

As descargas parciais são especialmente úteis para encontrar e caracterizar defeitos pontuais, justamente o que a tangente delta enxerga mal. Por isso, as duas técnicas não competem; complementam-se. A tangente delta dá o panorama da isolação; a descarga parcial investiga os pontos suspeitos. As edições recentes da IEEE 400.2 recomendam que a medição de descargas parciais siga a IEEE 400.3 e, de quebra, desfizeram uma confusão antiga ao registrar de forma explícita que descargas parciais não ocorrem em arborescências de água. Em outras palavras, ausência de descarga parcial não é certificado de ausência de *water treeing*, e detecção de *water treeing* não se faz por descarga parcial.

Na prática, vale escalar para descarga parcial quando a tangente delta sugere comportamento atípico, quando há suspeita concreta de defeito em acessório, quando o circuito é crítico a ponto de justificar maior profundidade de diagnóstico, ou quando o histórico do cabo registra ocorrências e intervenções anteriores. Fora desses gatilhos, a tangente delta costuma dar conta do que se precisa para gerir o ativo.

## 11 Decidir com o ensaio em mãos

Um ensaio só vale o que vale a decisão que ele sustenta. Os resultados de VLF e tangente delta apoiam, basicamente, quatro tipos de conduta. Manter o cabo em ope-

ração, quando os indicadores apontam condição compatível com o serviço. Intensificar o monitoramento, quando surgem indícios iniciais de envelhecimento que ainda não justificam intervenção. Investigar, quando o comportamento aponta para acessórios ou pede uma segunda técnica. E planejar a substituição, quando a degradação é relevante o bastante para que esperar signifique apostar contra o relógio.

Numa planta com dezenas de circuitos, o ensaio cumpre ainda um papel de priorização. Não se troca tudo ao mesmo tempo, nem se ensaia tudo com a mesma frequência. O diagnóstico permite ordenar os circuitos por criticidade e por condição, concentrando recurso e atenção onde a falha traria maior impacto operacional ou de segurança. Essa leitura de carteira, mais do que o laudo de um cabo isolado, é o que transforma o ensaio em instrumento de gestão de ativos.

E há o trabalho de fundo, menos glamoroso e mais decisivo: alimentar o histórico. Cada campanha de ensaio bem documentada, com data, condições, parâmetros e resultados, torna a próxima mais valiosa. A tendência de um circuito ao longo dos anos vale mais do que qualquer valor isolado, e só se constrói com disciplina de registro.

Por fim, convém traduzir tudo isso na linguagem que a gestão entende: risco e custo. Um ensaio de diagnóstico custa uma fração do que custa uma falha não planejada de um circuito crítico, somados o reparo, a localização do defeito, a energia não distribuída, as multas eventuais e o tempo de equipe mobilizada às pressas. Quando o diagnóstico permite trocar uma parada emergencial por uma intervenção programada, o ganho não é apenas técnico; é econômico e de segurança. É esse argumento, e não o jargão do ensaio, que costuma convencer quem aprova o orçamento de manutenção.

## 12 Limites, segurança e boas práticas

### Os limites honestos do método

Nenhuma técnica de diagnóstico é completa, e quem trabalha com ensaio sabe que reconhecer os limites é o que separa a análise séria do otimismo perigoso. A interpretação exige conhecimento específico; os números não falam por si. O comprimento do cabo influencia o resultado e pode mascarar perdas localizadas em trechos longos. Os acessórios entram na medição global,

de modo que separar a contribuição do corpo do cabo da contribuição das emendas nem sempre é trivial. O poder de conclusão de uma única medição, sem histórico, é limitado. E, como a própria norma registra, a tangente delta isolada não localiza um defeito singular em cabo de XLPE; para isso, é preciso outra técnica. Em muitos casos, o diagnóstico robusto nasce da combinação de métodos, não de um ensaio solitário.

### Segurança não é etapa, é condição

Ensaio de cabo de média tensão é trabalhar com tensão elevada e com energia armazenada. Um cabo é um capacitor, e capacitor guarda carga; mesmo desligada a fonte, o cabo pode reter tensão perigosa. Por isso, o descarregamento e o aterramento adequados, conforme procedimento, não são formalidade: são o que protege a equipe antes de qualquer manuseio. O conjunto de cuidados é conhecido de quem segue a NR-10 vigente: planejamento e análise de risco, equipe qualificada e autorizada, isolamento e sinalização da área, desenergização e bloqueio, redução lenta da tensão ao final do ensaio, EPI e EPC adequados e respeito às distâncias de segurança. Nada disso é negociável, e nenhuma pressa de cronograma justifica abrir mão.



Conjunto de ensaio em operação de campo, a partir do veículo de apoio. Imagem ilustrativa.

### Boas práticas que elevam a qualidade do diagnóstico

- Levantar os dados do cabo antes de tudo: fabricante, tipo, classe de tensão, ano, comprimento, isolamento, emendas e terminações.
- Recuperar o histórico de falhas do circuito e de circuitos semelhantes da mesma planta.
- Definir, antes do ensaio, a edição da norma e o critério de avaliação, em vez de escolher a régua depois de ver o resultado.
- Registrar tudo de forma rastreável, para que a campanha de hoje sirva de base de comparação amanhã.
- Comparar medições ao longo do tempo e integrar o diagnóstico ao plano de manutenção.
- Trabalhar com equipe qualificada e equipamento verificado, e complementar com descargas parciais quando o caso pedir.

### Erros que custam caro

Quase todos os equívocos recorrentes têm origem na pressa de transformar um número em veredito: tratar a tangente delta como valor absoluto sem contexto; comparar critérios escritos para tensões de medição ou edições diferentes como se fossem equivalentes; ignorar o histórico do cabo; confundir dado ilustrativo com dado real; esquecer os acessórios na análise; não descarregar corretamente o cabo após o ensaio; e interpretar resultado sem base normativa. Cada um deles troca uma conclusão de engenharia por um palpite com aparência de número.

## 13 Checklist, glossário e referências

### Checklist de planejamento do ensaio

- Fabricante, tipo, classe de tensão, comprimento e isolamento do cabo
- Emendas e terminações mapeadas; histórico de falhas e ensaios anteriores reunidos
- Análise de risco, procedimento formal e equipe qualificada (NR-10 vigente)
- Desenergização, bloqueio, isolamento e sinalização da área
- Redução lenta da tensão e descarregamento/ aterramento do cabo
- Edição da norma e critério de avaliação definidos previamente

- Tensões, frequência, forma de onda e tempos conforme norma e manual
- Necessidade de medição de descargas parciais avaliada
- Registro completo de parâmetros, condições e resultados
- Análise por profissional qualificado e comparação com histórico
- Recomendação documentada: manter, monitorar, investigar ou substituir

## Glossário técnico

Termo	Significado
VLF	Very Low Frequency. Ensaio com tensão alternada em frequência muito baixa, tipicamente 0,01 a 0,1 Hz.
Tangente delta (tan $\delta$ )	Fator de dissipação dielétrica; relação entre a corrente de perdas e a corrente capacitiva da isolação.
$U_0$	Tensão fase-terra nominal do cabo, usada como referência para os patamares de ensaio.
Tip-up ( $\Delta \tan \delta$ )	Varição da tan $\delta$ entre dois patamares de tensão; mede a sensibilidade das perdas ao aumento de campo.
Estabilidade (SDev)	Dispersão de leituras consecutivas de tan $\delta$ no mesmo patamar de tensão.
Suportabilidade	Ensaio de tensão com resultado binário: o cabo suportou ou rompeu.
Descargas parciais	Pequenas descargas internas em vazios e interfaces; úteis para defeitos localizados.
Water treeing	Arborescência de água: microestruturas ramificadas em isolação polimérica sob umidade e campo.
XLPE / EPR / PILC	Tipos de isolação: polietileno reticulado, borracha etileno-propileno e papel impregnado em óleo.

## Conclusão

Cabos de média tensão falham, em grande parte, por dentro e sem aviso, e essa é a razão pela qual avaliá-los antes da falha deixou de ser refinamento e passou a ser

boa engenharia de manutenção. O ensaio em muito baixa frequência, combinado à medição de tangente delta, oferece uma janela rara para a condição da isolação de um cabo em serviço, e o faz com equipamento que cabe num pátio e numa galeria. Três ideias merecem ficar: suportar um ensaio de tensão não atesta saúde dielétrica; o valor real da técnica está na tendência, mais do que em qualquer número isolado; e os critérios de aprovação e de ação existem e são fundamentados, mas variam por edição da norma e por tipo de cabo, e por isso a escolha da referência é parte do trabalho técnico. Usada com critério e com a humildade de reconhecer seus limites, essa combinação de ensaios reduz riscos, sustenta decisões de manutenção e contribui para a confiabilidade e a continuidade operacional. Não promete eliminar falhas; promete transformar incerteza em informação, e informação em decisão melhor.

## Referências

- IEEE 400 — Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above.
- IEEE 400.2 — Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF). Edições 2004, 2013 e 2024.
- IEEE 400.3 — medição de descargas parciais em campo.
- IEC 60502 (cabos até 35 kV) e IEC 60270 (descargas parciais).
- ABNT NBR 14039 — Instalações elétricas de média tensão.
- NR-10 — Segurança em instalações e serviços em eletricidade.
- Manuais técnicos dos fabricantes de equipamentos de ensaio VLF e tangente delta.
- Estudos de campo do NEETRAC (Cable Diagnostic Focused Initiative), base estatística dos critérios da IEEE 400.2.

*Números de norma, edições e critérios devem ser confirmados na versão vigente pelo responsável técnico. As figuras de curva, estabilidade e o diagrama fasorial são ilustrativas e não representam medição real. As fotografias têm caráter ilustrativo de serviços de campo e não estão associadas a resultados específicos. Material técnico de caráter educativo; não substitui projeto, laudo, inspeção ou a responsabilidade do profissional habilitado.*