

LOCALIZAÇÃO DE RUPTURAS EM RISERS A PARTIR DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

LOCATION OF RUPTURES IN RISERS BY TIME DOMAIN REFLECTOMETRY TECHNIQUE

CAIAN FÁVERO BRUM¹
ANTONIO ANGELO MISSIAGGIA PICORONE²
MARCOS VINÍCIUS RODRIGUES³
MOISÉS VIDAL RIBEIRO⁴

DOI:

RESUMO

O presente trabalho introduz a técnica de reflectometria no domínio do tempo (RDT) para localizar anomalia estrutural nas camadas metálicas de *risers* flexíveis. Para tanto, é apresentada a modelagem elétrica de um *riser* baseada nos parâmetros distribuídos e, em seguida, é proposto um modelo elétrico equivalente de um *riser*. O modelo de *riser* proposto é submetido à simulação computacional a fim de se analisar a possibilidade de identificação da localização de falha ao longo do *riser* através da aplicação da técnica de reflectometria temporal. Os resultados preliminares sugerem que o uso da técnica RDT para localização de rupturas nas camadas metálicas de *risers* flexíveis apresenta uma oportunidade a ser explorada.

Palavras-chave: Dutos flexíveis, Localização de falhas, Reflectometria temporal.

ABSTRACT

The present work introduces the technique of time-domain reflectometry (TDR), which is used to locate structural anomalies in the metallic layers of flexible risers. Therefore, electrical modeling of a riser based on the distributed parameters is presented, and then the generated model is submitted to computer simulation to identify a fault location along the riser. The preliminary results obtained using the TDR technique to locate ruptures in the metallic layers of flexible risers present an opportunity to be explored.

Keywords: Flexible pipes, Fault location, Time domain reflectometry.

¹ Graduando em Engenharia Elétrica – Habilitação em Telecomunicações. Bolsista do Programa BIC-UFJF. caian.favero@engenharia.ufjf.br

² Orientador do Projeto de IC. Professor do Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica da UFJF. Endereço profissional: Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Sala 4263. Rua José Lourenço Kelmer, s/n, CEP: 36.036-900 – Juiz de Fora, MG – Brasil. antonio.picorone@engenharia.ufjf.br

³ Professor do Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica da UFJF. marcos.rodrigues@engenharia.ufjf.br

⁴ Professor do Departamento de Circuitos Elétricos da UFJF. mribeiro@engenharia.ufjf.br

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de *riser* é, geralmente, formado por dutos responsáveis por interligar os diversos tipos de sistemas flutuantes com os arranjos submarinos na exploração e produção de petróleo e gás (Bai, 2014). Esses dutos transportam petróleo, gás, água ou outros fluidos necessários para a produção de petróleo. Um sistema de *riser* que possui como característica o fato de apresentar um trecho suspenso sujeito a diversos tipos de carregamentos e esforços físicos quando conectado a uma unidade flutuante pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Sistema *offshore* utilizando de *risers* flexíveis para conexão com poço de petróleo.



Fonte: <https://www.4subsea.com/solutions/flexible-risers/flexible-pipeline-engineering/>

Três tipos diferentes de cargas atuam nas tubulações submarinas, são elas: as cargas funcionais, constituídas de pressão interna e externa, forças térmicas, peso dos *risers* e forças residuais e de lançamento, as cargas ambientais, ou seja, de onda, de correnteza, podendo resultar em vão livre em solos irregulares e de instabilidade no solo e, finalmente, as cargas acidentais, p. ex., impacto de âncora, impactos de queda de objetos, impactos devido à pesca de fundo, impactos de embarcações, etc. (Clarke, 2011). Pode-se dividir os *risers* em três grupos principais: os rígidos, os flexíveis e os híbridos. Os *risers* rígidos são formados basicamente por dutos de aço. Os *risers* flexíveis são compostos por camadas alternadas constituídas de material metálico ou polimérico. Já os *risers* híbridos constituem soluções que combinam dutos rígidos e flexíveis.

Os *risers* flexíveis são vistos como uma alternativa atraente e competitiva em relação aos *risers* rígidos para a exploração de petróleo *offshore*, principalmente por sua montagem no local de instalação e transporte serem relativamente mais simples (Clarke, 2011). A integridade das camadas de estanqueidade do *riser* flexível é de suma importância. Se alguma anomalia for apresentada, pode ocorrer colapso total da tubulação ou ruptura de outras camadas e, conseqüente, vazamento do produto transportado. Por esse motivo, o monitoramento da integridade do *riser* flexível é crucial para garantir a continuidade e segurança da produção.

Entretanto, a complexa estrutura multicamada dos *risers* flexíveis, responsável por garantir a alta conformidade à flexão, não é favorável para inspeção das camadas internas com a maioria das técnicas de teste não destrutivo conhecidas, o que torna a avaliação da integridade estrutural um grande desafio. Devido às suas características estruturais, um *riser* flexível, que possui camadas concêntricas e sendo algumas delas condutoras, pode ser modelado como uma linha de transmissão de energia elétrica assim como é feito em um cabo coaxial. Na Figura 2 pode-se ver exemplos dos detalhes das camadas de cabos coaxiais.

Figura 2 - Detalhes das camadas de um cabo coaxial.



Fonte: <https://www.rfsworld.com/solution/1-5-8>

Diversas técnicas podem ser empregadas para avaliar a integridade da estrutura de cabos elétricos. As características dos dielétricos, condutores e da geometria das linhas de transmissão de energia elétrica são com frequência modeladas por resistores R , indutores L e capacitores C (Pozar, 2012). Caso o modelo obtido represente, razoavelmente, a estrutura interna do cabo elétrico, pode-se estimar o estado de sua estrutura interna de forma indireta, avaliando as variáveis equivalentes elétricas R , L , e C deste cabo através de alguma estratégia de medição conhecida.

Este trabalho analisa de forma preliminar o uso de uma das técnicas de localização de falhas em cabos elétricos, especificamente, a técnica de reflectometria elétrica no domínio do tempo (RDT) para estimar a localização de uma possível falha estrutural de um *riser* flexível. Dessa forma, as principais contribuições deste trabalho são: i) propor um modelo simplificado de *riser* flexível a partir de elementos elétricos passivos R , L , e C ; ii) discutir a localização de falhas estruturais de *risers* flexíveis a partir da RDT por meio de simulações computacionais utilizando o modelo elétrico do *riser* flexível proposto.

O restante deste trabalho está assim organizado: na seção 2 é apresentada a metodologia utilizada no presente estudo. Na seção 3 uma breve revisão teórica sobre a técnica de RDT é apresentada e em seguida apresentado o desenvolvimento do modelo elétrico equivalente proposto do *riser* flexível. Por fim, na seção 4 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

O modelo elétrico de *riser* proposto foi desenvolvido levando-se em consideração a semelhança geométrica existente entre o *riser* e a estrutura presente em cabos coaxiais. Por questão de simplicidade, uma vez que este trabalho se trata de um estudo preliminar, foi utilizado como referência para o modelo proposto os dados reais de um *riser* flexível com apenas duas camadas condutoras separadas por uma camada polimérica obtido em (API, 2002). A Figura 3 detalha um modelo de *riser* flexível com suas diferentes camadas expostas. Nesse tipo de *riser* '1' representa uma camada polimérica que possui como objetivo impedir a permeabilidade de fluidos para as camadas posteriores. A camada '2' é a carcaça que tem a função de resistir à pressão externa e suportar esforços causados pela inércia do componente. As camadas '3' e '4' são as armaduras, desempenham o papel de resistência aos esforços axiais ao qual o duto está sujeito, além de fazer balanceamento à torção do duto e resistência a pressões internas e externas. Finalmente a camada '5' é a de revestimento, que garante a resistência à corrosão e cumpre o papel de vedação do sistema contra os fluidos externos.

Em seguida, o modelo de *riser* foi parametrizado para representar um duto com comprimento de 50 m em diversas condições de funcionamento. Ora em funcionamento sem qualquer falha estrutural e ora com falhas configuradas em localizações arbitrárias ao longo do comprimento da estrutura através da reconfiguração dos parâmetros do modelo. Em cada um dos cenários modelados foi aplicada a técnica de RDT através da excitação do modelo com um pulso retangular de amplitude constante e duração variável, de acordo com o cenário analisado. A análise da condição de funcionamento do duto e a estimativa da possível localização de uma anomalia estrutural do *riser* foi conduzida a partir do registro do pulso refletido ao longo do *riser*.

Figura 3 - Detalhes das camadas de um riser flexível.



Fonte: produzido pelo autor

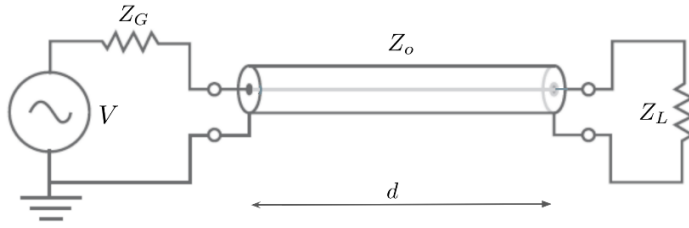
3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Reflectometria elétrica no domínio do tempo

A técnica baseada na RDT faz uso de um gerador de pulso que injeta um pulso eletromagnético no cabo elétrico avaliado. Alterações nas impedâncias ao longo da extensão do cabo causam reflexões do pulso inserido. Com o registro de tais reflexões, o conhecimento da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio propagante e de uma referência temporal é possível estimar o local de rompimento ou degradação da linha de transmissão.

A Figura 4 ilustra uma linha de transmissão arbitrária com impedância característica Z_0 , conectada a um gerador V com resistência interna Z_G . Na extremidade oposta ao gerador, há uma carga Z_L arbitrária, a uma distância do ponto de conexão entre a fonte V e a linha de transmissão.

Figura 4 - Modelo de linha de transmissão.



Fonte: Produzido pelo autor (2021).

Em uma condição ideal de funcionamento para uma linha de transmissão, $Z_L = Z_o$. Neste caso, tem-se ausência de reflexão do sinal incidente no ponto de conexão com a carga. Caso ocorra nesta linha de transmissão uma alteração na sua estrutura interna a uma distância da extremidade em que o pulso foi injetado, haverá uma descontinuidade da impedância nesse ponto, refletindo parte da energia do pulso de volta para o ponto de injeção desse sinal (Lin, 2015). Medindo-se na extremidade em que o pulso foi injetado a diferença de tempo Δt entre a injeção do pulso e o instante em que a parcela refletida foi recebida, pode-se estimar a localização da falha na linha de transmissão por:

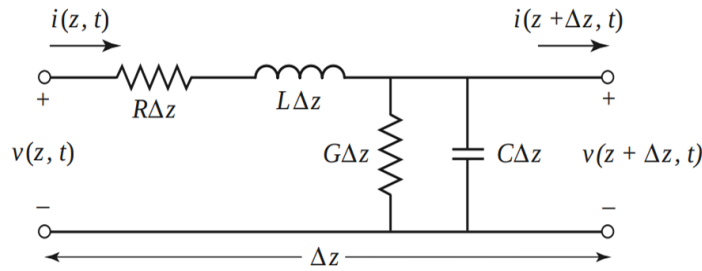
$$\hat{d} = \frac{v_p \Delta t}{2}, \quad [\text{m}], \quad (1)$$

em que v_p é a velocidade de propagação do pulso em m/s ao longo da linha de transmissão.

3.2 Modelagem do riser flexível

Considerando a semelhança entre a estrutura interna de um *riser* flexível com apenas duas camadas condutoras separadas por uma camada polimérica com a estrutura típica de um cabo coaxial, admite-se uma seção longitudinal deste *riser* flexível modelada por elementos elétricos passivos, resistores (R), indutores (L) e capacitores (C). Na Figura 5 está representado o modelo elétrico equivalente de uma seção longitudinal do *riser* flexível considerado, em que por analogia, R e L representam, respectivamente, a resistência e indutância elétrica da camada condutora do *riser*, C a capacitância elétrica formada pelas porções das placas condutoras e G a condutância elétrica da camada polimérica. O tamanho infinitesimal Δz indica a extensão axial do *riser*. Considerando o comprimento total do *riser* formado por cascadeamento de seções de $\Delta z = 1$ m, uma seção do *riser* flexível pode ser modelada como mostrado na Figura 5, considerando os parâmetros R em $[\Omega/\text{m}]$, L em $[\text{H}/\text{m}]$, G em $[\text{S}/\text{m}]$, C em $[\text{F}/\text{m}]$, v refere-se a diferença de potencial, i a corrente elétrica e z a origem da seção.

Figura 5 - Modelo elétrico equivalente de uma seção do riser



Fonte: Pozar (2012)

Os valores de R , L , C e G são funções das propriedades intrínsecas dos componentes do riser e variam com as alterações destas características. Como ocorrem para uma linha de transmissão coaxial, estes elementos podem ser obtidos por (Pozar, 2012):

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln(b/a), \quad [\text{H/m}], \quad (2)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)}, \quad [\text{H/m}], \quad (3)$$

$$R = \frac{R_s}{2\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right), \quad [\Omega/\text{m}], \quad (4)$$

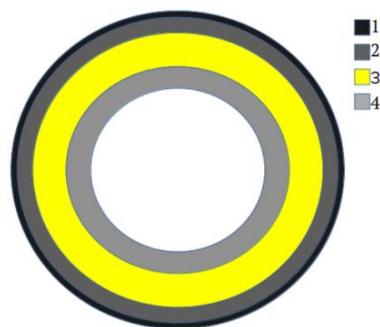
$$G = \frac{2\pi\sigma_d}{\ln(b/a)}, \quad [\text{S/m}], \quad (5)$$

em que $R_s = (\delta\sigma_c)^{-1}$, $\delta_s = (\pi f \mu_c \sigma_c)^{-1/2}$, σ_c e σ_d são, respectivamente, a condutividade das camadas metálicas e da camada polimérica, f a frequência do sinal injetado em Hz, μ_c e μ são, respectivamente, a permeabilidade magnética da camada metálica e da polimérica, ϵ é a permissividade elétrica da camada polimérica e, a e b os raios do condutor interno e do condutor externo, respectivamente.

Considerando um duto flexível do tipo riser com duas camadas metálicas separadas por uma camada polimérica, um modelo preliminar para este duto é apresentado na Figura 6, sendo '1' o revestimento, '2' a armadura, '3' a camada polimérica e '4' a carcaça. Admitindo-se que o modelo de riser esquematizado na Figura 6 possui as características indicadas na Tabela 1, obtidas de (API, 2002), pode-se obter seu modelo equivalente elétrico a partir das Equações 02-05. Os

parâmetros elétricos para cada material (aço carbono e XLPE) necessários para se calcular os parâmetros do modelo elétrico do *riser* flexível estão indicados na Tabela 2 (Pozar, 2012).

Figura 6 - Ilustração da seção transversal de um *riser* flexível.



Fonte: Produzido pelo autor

Admitindo-se que o modelo de *riser* esquematizado na Figura 6 possui as características indicadas na Tabela 1, obtidas de (API, 2002), pode-se obter seu modelo equivalente elétrico a partir das Equações 02-05. Os parâmetros elétricos para cada material (aço carbono e XLPE) necessários para se calcular os parâmetros do modelo elétrico do *riser* flexível estão indicados na Tabela 2 (Pozar, 2012).

Tabela 1 - Características físicas de um *riser* flexível.

Camada	Raio interno	Raio externo	Material
Armadura	144,4	149,4	Aço carbono
Polimérica	134,9	144,4	XLPE
Carcaça	125,9	134,9	Aço carbono

Fonte: API (2002)

Tabela 2 - Constantes elétricas para cálculo dos parâmetros elétricos do modelo de *riser*.

Constante	μ	ϵ	σ_c	σ_d
Valor	$4\pi \cdot 10^{-7} H/m$	2.25	$0.6 \cdot 10^7 S/m$	$10^{-14} S/m$

Fonte: Pozar (2012)

A partir das Tabelas 1 e 2 e das Equações 02 – 05, os parâmetros do modelo elétrico do *riser* flexível foram determinados e indicados na Tabela 3. Para o valor Z_0 , impedância característica da linha de transmissão, foi considerada que a linha de transmissão não possui perdas, o que é razoável, pois R e G possuem valores

muito baixos (Pozar, 2012), o que sugere baixas perdas de energia ativa, logo, $Z_o = \sqrt{L/C}$.

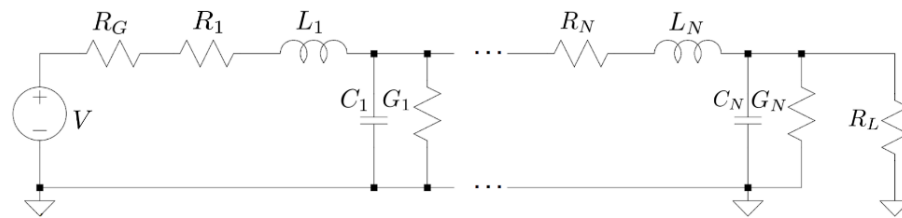
Tabela 3 - Valores para os parâmetros C , L , R , G e Z_o do modelo de *riser* flexível proposto

C	L	R	G	Z_o
1.839,30	13,61 nH/m	41,31 $\mu\Omega$ /m	0,92pS/m	2,72 Ω

Fonte: Produzido pelo autor

Na Figura 7 pode-se ver o modelo do equivalente elétrico do *riser* flexível proposto neste trabalho contendo N seções cujos valores dos equivalentes elétricos R , L , C e G são os indicados na Tabela 3.

Figura 7 - Modelo equivalente elétrico do *riser* flexível



Fonte: produzido pelo autor

4 RESULTADOS

A RDT foi aplicada ao modelo de *riser* flexível proposto considerando 50 m de comprimento com duas camadas condutoras, armadura e carcaça além de uma camada polimérica com as características físicas listadas na Tabela 1. Foram utilizadas $N = 50$ seções (Figura 7) com $\Delta z = 1$ m.

Em uma das extremidades do modelo elétrico do *riser* flexível, o sinal é injetado por um gerador de funções. Um osciloscópio é incluído em paralelo a esse gerador de funções, o que eletricamente representa sua conexão entre os resistores Z_c e R_1 (Figura 7) para que a aquisição da resposta temporal seja feita, possibilitando identificar as possíveis reflexões causadas pelas anomalias ao longo do *riser*. O modelo do pulso utilizado nas simulações computacionais foi a função porta (pulso retangular), definida por:

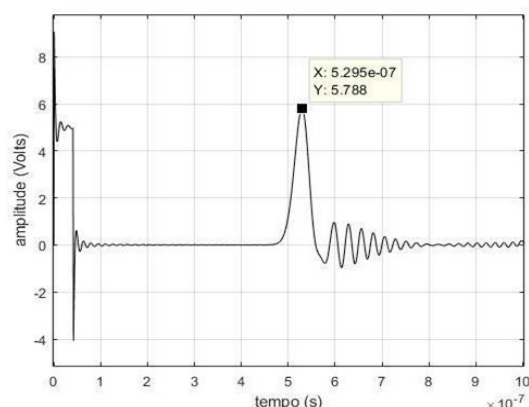
$$p(t) = \begin{cases} A, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

em $A \in \mathbb{R}_+$ que é a amplitude do pulso e T é a largura temporal do pulso. Dependendo da localização da anomalia, os parâmetros de amplitude e duração

do pulso são ajustados para que seja possível a observação das reflexões do pulso incidente de forma mais clara.

Uma vez amostrado o pulso refletido é possível determinar a localização da falha estrutural que causou a reflexão do pulso. Conhecendo as características da linha de transmissão, ou seja, as características elétricas dos condutores do *riser*, e das impedâncias terminais *a priori*, é possível determinar valores de A e T para analisar diferentes distâncias na linha de transmissão. A partir do conhecimento da velocidade de propagação pode-se calcular a distância percorrida pelo pulso e, conseqüentemente, estimar a localização da anomalia estrutural no *riser* flexível. Na Figura 8 pode-se ver o resultado da aplicação de um pulso no modelo de *riser* proposto quando os parâmetros das N seções são aqueles listados na Tabela 3.

Figura 8 – RDT aplicada ao modelo do *riser* flexível sem anomalias.



Fonte: Produzido pelo autor

Nesse cenário, a estrutura física do duto é modelada como não possuindo qualquer irregularidade, ou seja, a estrutura está íntegra. Conseqüentemente, a presença do pico da reflexão que aparece na Figura 8 é causada pela terminação do *riser* flexível que foi modelada através de um resistor de resistência muito alta, tendendo ao infinito, conectado nos terminais da seção 50 do modelo. Note que, nesse caso, o pulso injetado no *riser* não encontra discontinuidades em nenhuma das seções, exceto no final da seção 50. Assim, pode-se associar este resultado à condição do modelo de *riser* flexível sem anomalias.

Uma vez que o pico do sinal refletido é devido à descontinuidade causada a 50 m ($Z_L \rightarrow \infty$) do ponto de injeção do pulso no *riser*, pode-se determinar,

aproximadamente, a velocidade de propagação do pulso elétrico no *riser* (Equação 1). Uma vez que a descontinuidade se encontra a $\hat{d} = 50$ m de distância, e a reflexão foi observada em $\Delta t = 529,5$ ns (eixo-x da Figura 8) em relação ao instante de injeção do pulso, a velocidade estimada de propagação do sinal no *riser* é de, aproximadamente, $v_p = 1,8886 \cdot 10^8$ m/s.

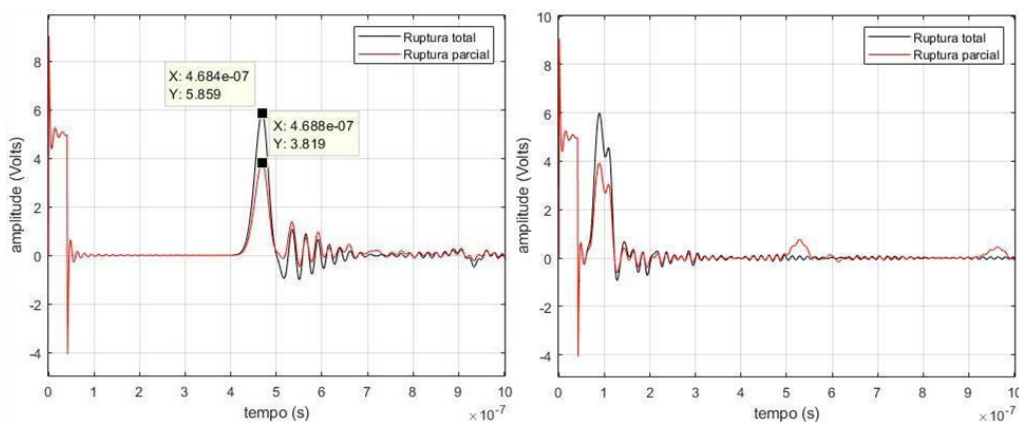
4.1 Riser flexível com ruptura

Agora, considere dois eventos que geram descontinuidades na impedância equivalente do *riser*, a ruptura total e a ruptura parcial do *riser* flexível. Para modelar estes eventos, o resistor em série referente à seção 45 (R_{45}) e 8 (R_8) teve seus valores de resistências arbitrariamente alterados de $41,31\mu\Omega/m$ para $10k\Omega/m$, representando uma ruptura total do *riser*, e de $41,31\mu\Omega/m$ para $10\Omega/m$, representando uma ruptura parcial. O restante das seções permaneceu com valores dos parâmetros listados na Tabela 3. Neste ensaio, considerou-se o pulso de injeção com $T = 40$ ns e amplitude igual a $A = 10$ V.

Na Figura 9a pode-se ver o resultado dos ensaios computacionais considerando ambas as rupturas, total e parcial, provocadas a 45 m da injeção do pulso. Este resultado indica que o pico do pulso refletido ocorre no instante $\Delta t = 468,4$ ns para ruptura total e $\Delta t = 468,8$ ns para a ruptura parcial. Mesmo com amplitudes diferentes para o sinal refletido, as descontinuidades que causam essas reflexões encontram-se na mesma seção, dessa forma, a diferença de tempo de ocorrência é desprezível entre as duas situações e, portanto, não impacta no cálculo do ponto de ocorrência dos eventos.

Sabendo-se que a velocidade de propagação do sinal é $v_p = 1,8886 \cdot 10^8$ m/s, a partir da Equação 1 obtém-se $\hat{d} = 44,2$ m. Note que este resultado apresenta um erro de apenas 1,7%, ou seja, falha simulada em 45 m e identificada em 44,2 m a partir do ponto de injeção do pulso. Pode-se notar também com clareza na Figura 9a os picos das reflexões, o que sugere que as escolhas dos parâmetros do pulso de injeção foram adequadas para realizar a tarefa.

Figura 9: RDT aplicada ao modelo do *riser* com rupturas total e parcial na seção 45 e 8 ($T = 40$ ns)



(a) Seção 45

(b) Seção 8

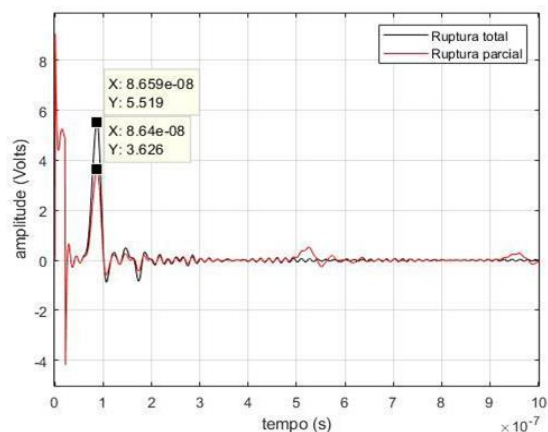
Fonte: Produzido pelo autor

Além da informação da localização da falha, ao se comparar as formas de onda obtidas (Figura 9a) com aquelas registradas na condição de sem anomalias no *riser* (Figura 8), nota-se tratar-se de um evento de circuito aberto, já que não há inversão de fase do sinal refletido em relação ao pulso de injeção. A diferença de amplitude entre os dois pulsos refletidos é devida a parcela de potência refletida resultante do descasamento de impedância no ponto de ruptura. Para a ruptura parcial, parte da potência do pulso de injeção é refletida, porém, uma parcela de potência continua a propagação. É importante ressaltar que as potências dos pulsos refletidos e transmitidos somadas é igual a potência do pulso incidente.

A Figura 9b mostra o resultado do ensaio quando se insere no modelo do *riser* as rupturas total e parcial na seção 8, mantendo-se $T = 40$ ns e $A = 10$ V. Como pode ser observada na Figura 9b, a resposta obtida é diferente da exposta na Figura 9a, nota-se a presença de dois picos distintos, posto que a escolha de T não permite obter uma resolução temporal suficiente para caracterizar a ruptura para a distância considerada. Para contornar a ambiguidade mostrada na Figura 9b, ajustes nos parâmetros do pulso incidente foram introduzidos, a saber: $T = 20$ ns e $A = 10$ V. A redução da largura do pulso para 20 ns garante que o sinal obtido com a convolução entre o pulso e a linha de transmissão modelada, até a ruptura na seção 8, resulte num intervalo de tempo que evita a sobreposição de pulsos. Os resultados dos ensaios computacionais com a largura do pulso ajustada podem ser vistos na Figura 10. Conforme pode ser observado, os picos dos pulsos refletidos na descontinuidade localizada na seção 8 da linha de transmissão podem ser melhores identificados. Considerando o instante de pico igual a $\Delta t =$

86,59 ns (Figura 10), a partir da Equação 1 tem-se $\hat{d} = 8,2$ m. Para esse resultado, um erro relativo à medição de 2,5% é observado.

Figura 10 - RDT aplicada ao modelo do *riser* com rupturas total e parcial na seção 8 ($T = 20$ ns).



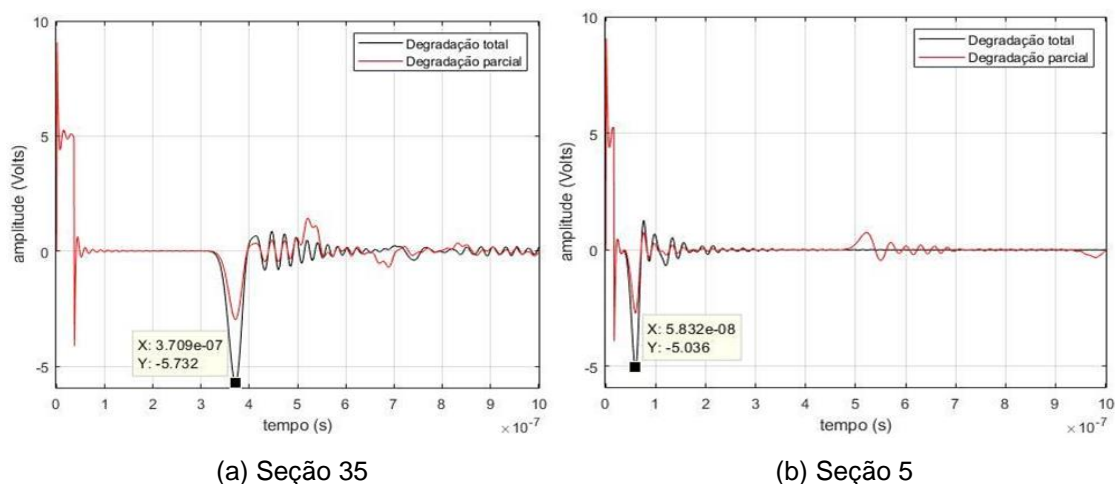
Fonte: produzido pelo autor

4.2 Degradação da camada polimérica

Para análise do modelo proposto considerando a degradação da camada polimérica foram modeladas degradações da camada polimérica na seção 5 e 35 do modelo. A degradação foi introduzida alterando de forma arbitrária o resistor em paralelo das seções de $0,92 \text{ pS/m}$ ($1,08 \text{ G}\Omega/\text{m}$) para $10 \text{ k}\Omega/\text{m}$, representando uma ruptura total do *riser*, e de $1,08 \text{ G}\Omega/\text{m}$ para $10 \Omega/\text{m}$, representando uma ruptura parcial. Os resultados dos ensaios computacionais podem ser vistos na Figura 11.

Para a seção 35 (Figura 11a), foram utilizados $T = 35$ ns e $A = 10$ V. As formas de onda dos pulsos refletidos sugerem a existência de fuga de corrente entre os condutores metálicos. Conforme pode ser observado na figura, a escolha dos valores dos parâmetros do pulso de injeção permite analisar de forma adequada esse tipo de anomalia na referida seção. O tempo de ocorrência estimado das reflexões é $\Delta t = 370,9$ ns, o que representa, $\hat{d} = 35$ m. Note que $\hat{d} = 35$ m corresponde a exata localização da descontinuidade simulada na seção 35 do modelo de *riser*.

Figura 11 - RDT aplicada ao modelo do *riser* flexível com rupturas total e parcial na seção 5 e 35.



Fonte: produzido pelo autor

Para analisar a falha na seção 5 do modelo de *riser* proposto, foi configurado $T = 15$ ns e $A = 10$ V. A alteração em T se faz necessária para garantir que haja resolução temporal para uso da técnica de RDT. Na Figura 11b pode-se ver o resultado do ensaio realizado, onde se identifica o instante de pico do pulso refletido igual a $\Delta t = 58,32$ ns, o que representa (Equação 1) $\hat{d} = 5,5$ m. O resultado das simulações computacionais apresenta um erro relativo de medição igual a 10%, ou seja, degradação simulada em 5 m e identificada em 5,5 m.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou o uso de uma das técnicas de localização de falhas em cabos elétricos, especificamente, a RDT para estimar a localização de uma falha estrutural em *riser* flexível. Foi proposto um modelo elétrico equivalente simplificado de um de *riser* flexível a partir de elementos elétricos passivos *RLC*. Em seguida a RDT foi aplicada ao modelo de *riser* proposto para avaliar o uso da RDT para monitorar o estado da estrutura interna de *risers* flexíveis.

Embora não tenham sido considerados neste trabalho modelos mais sofisticados de *risers*, nem outros desafios como, p.ex., as questões mecânicas, a segurança operacional, os ruídos provenientes do meio propagante para tornar a RDT aplicável na prática, os resultados preliminarmente obtidos sugerem que a aplicação da técnica de RDT em *risers* flexíveis pode oferecer uma oportunidade

a ser explorada para monitoramento da integridade estrutural destes dutos. Além disso, ficou evidente que as características do sinal injetado no riser flexível precisam ser mais estudadas, pois são bastante relevantes para uma boa estimativa da localização da falha na estrutura.

REFERÊNCIAS

BAI, Q. and BAI, Y.. ***Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation***. Gulf Professional Publishing, 2014

CLARKE, T., JACQUES, R., BISOGNIN, A., CAMERINI, C., DAMASCENO, S. and STROHAECKER, T.. . **Monitoring the structural integrity of a flexible riser during a full-scale fatigue test**. *Engineering Structures*, 33(4), 1181–1186. 2011.<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.039>

POZAR, D. M.. ***Microwave Engineering*** (4th ed.). Wiley. 2012

LIN, C. P., TANG, S. H., LIN, C. H. and CHUNG, C. C.. ***An Improved Modeling of TDR Signal Propagation for Measuring Complex Dielectric Permittivity***. *J. Earth Sci.* (Vol. 26), no. 6, pp. 827-834. 2015. <https://doi.org/10.1007/s12583-015-0599-7>

API, R. P. 17B **Recommended practice for flexible pipe**. *Am. Pet. Institute*, Washington, DC, 2002.