

Aplicação do Método de Simples Reatância e Takagi na Localização de Falta em uma Rede de Média Tensão de um Parque Eólico

Leandro de B. Peixoto^{*†} Rooney R. A. Coelho^{*}
Daniel R. Mamede[‡] Davi G. A. de Paula[†] Silvio G. Di Santo^{*}

^{*} Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas,
Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

[†] Echoenergia

[‡] CPE - Estudos & projetos elétricos

E-mails: leandro.brito@echoenergia.com.br, rooneycoelho@usp.br,

danielmamede@cpe-ce.com.br, davi.girao@echoenergia.com.br,

silviogiuseppe@usp.br

Abstract: The location of flaws on wind farms internal distribution networks is an important information that guarantees the fast energy generation reestablishment, facilitating the problem identification, the technical team performance in the corrective maintenance and circuit downtime reduction. Several methods have been developed to improve the fault location results accuracy, many of them are used in transmission lines. In this paper, the Takagi Method fault location application on a wind farm medium voltage network will be analyzed. Finally, the results found in the simulation will be compared with a real case, based on the oscillography generated by the relay at the occurrence time.

Resumo: A localização de faltas em redes de distribuição interna de parques eólicos é uma informação de grande importância que garante o rápido reestabelecimento da geração, facilitando a identificação do problema, atuação do time técnico na manutenção corretiva e diminuição do tempo de indisponibilidade do circuito. Vários métodos foram desenvolvidos de modo que se tenha maior precisão na localização de faltas, muitos deles são utilizados em linhas de transmissão. Neste artigo, será analisado a aplicação do Método de Takagi para a localização de falta em uma rede de média tensão de um parque eólico. Por fim, serão comparados os resultados encontrados na simulação com um caso real, com base na oscilografia gerada pelo relé no momento da ocorrência.

Keywords: Fault location; Takagi; medium voltage networks; downtime; corrective maintenance; oscillography; wind farm.

Palavras-chaves: Localização de falta; Takagi; redes de média tensão; indisponibilidade; manutenção corretiva; oscilografia; eólica.

1. INTRODUÇÃO

Quando ocorre um curto-circuito em uma linha de transmissão, a informação precisa da localização da falta é de extrema relevância para o reestabelecimento do sistema o mais rápido possível (Kang et al., 2009), diminuindo o tempo de atuação dos reparos e reestabelecimento do sistema, reduzindo a perda da receita por causa das interrupções (Zimmerman and Costello, 2005). Para tal, relés de proteção capazes de indicar a localização de faltas existem há mais de 20 anos (Gong et al., 2012).

Contudo, os dispositivos de proteção para alimentadores de circuitos de sistemas de geração eólica geralmente habilitam a proteção de sobrecorrente (50/51) como função principal. A função de distância, assim como nas linhas de transmissão, não é implementada, uma vez que inviabilizaria o projeto devido ao seu custo para a quantidade de alimentadores existentes na subestação coletora. Com isso,

a indicação da localização das faltas que ocorrem nestes alimentadores não é obtida no momento da ocorrência (Kawady et al., 2010).

A Figura 1 ilustra o diagrama unifilar em um sistema com duas fontes interligadas, S e R , com seus respectivos barramentos, V_S e V_R , e sistemas de proteção. A variável Z_L é a impedância total da linha. A figura também ilustra um curto circuito a uma distância m do terminal V_S , que resulta em contribuições de curto pelas correntes de falta I_S e I_R , provenientes de ambas as fontes.

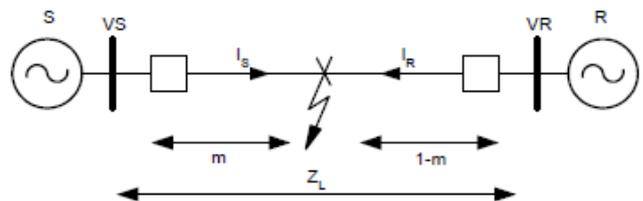


Figura 1. Diagrama unifilar de falta em um circuito.

Vários métodos de localização de faltas são usados atualmente, tais como os que são baseados em ondas viajantes, em impedância e de dois terminais.

Para os métodos baseados em impedância, temos como principais os de Simples Reatância, o de Takagi (tal como o de Takagi modificado) e o método de Sequência Negativa (Zimmerman and Costello, 2005). Este artigo fará uma análise da aplicação do Método de Simples Reatância e do Método de Takagi em uma falha real ocorrida em um circuito alimentador de um parque eólico instalado no nordeste brasileiro.

2. LOCALIZAÇÃO DE FALTA BASEADA EM IMPEDÂNCIA COM DADOS DE UM TERMINAL

O método de Localização de Faltas Baseado em Impedância com Dados de um Terminal é capaz de determinar o local onde ocorreu a falha com base nos dados de tensão e corrente de um único terminal (Takagi et al., 1982). Com estes dados, que são registrados pelos relés de proteção instalados em um dos terminais do qual se quer identificar o ponto da falha, é possível determinar a impedância aparente entre o relé e o local onde houve o curto-circuito.

Uma vez conhecida a impedância da linha de transmissão, a distância em por unidade para a falha pode ser facilmente obtida. Para Ajenikoko e Segun (2016), as vantagens de se usar o método de um terminal, além da necessidade de dados de apenas uma extremidade da linha, o que elimina a necessidade de comunicação remota, é a precisão razoável dos resultados obtidos.

Para ilustrar o método de um terminal, será considerado uma linha de transmissão homogênea, de dois terminais, com impedância de sequência positiva Z_L , conforme mostrado na Figura 2.

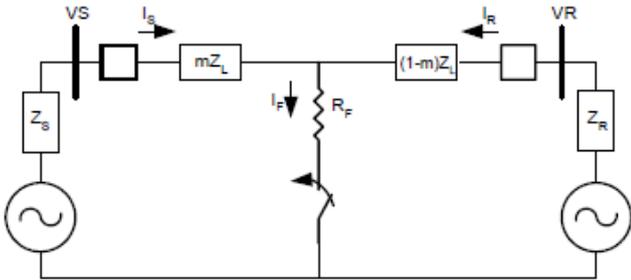


Figura 2. Circuito equivalente para a Figura 1.

Uma linha pode ser classificada homogênea quando a sua impedância é distribuída de forma uniforme por toda a sua extensão (Zimmerman and Costello, 2005). Na Figura 2, será considerado que a linha possui impedância de sequência positiva Z_L entre os terminais S e R . Na ocorrência de uma falha em uma distância m do terminal S , as duas fontes contribuem para a alimentação do curto-circuito de corrente I_F . Os valores de tensão e corrente, V_S e I_S , são registrados no terminal S durante a falha, assim como no terminal R . Através da Lei de Kirchhoff, pode-se concluir a seguinte equação:

$$V_s = mZ_L I_s + R_F I_F \quad (1)$$

Onde R_F e I_F são respectivamente a resistência e corrente de falha. Dividindo (1) por I_S , a impedância aparente, ou impedância de falha, Z_F , medida do terminal S , pode ser expressa da seguinte forma:

$$Z_F = \frac{V_S}{I_S} = mZ_L + R_F \left(\frac{I_F}{I_S} \right) \quad (2)$$

Esta equação expressa a lei fundamental para a aplicação do método de localização de faltas baseado em impedâncias de um terminal (Das et al., 2014).

Para cada tipo de falha, seja ela monofásica, bifásica, bifásica-terra ou trifásica, os valores de V_S , I_S , e I_{sup} , utilizados nos modelos apresentados neste artigo, devem ser calculados conforme Tabela 1, onde A , B e C são as fases do sistema trifásico. A corrente de superposição I_{sup} é calculada pela diferença entre uma corrente I e I_{pre} , respectivamente de falha e pré-falha.

Tabela 1. Definição de V_S , I_S e I_{sup} para diferentes tipos de faltas.

Tipo de falha	V_S	I_S	I_{sup}
A-Terra	V_a	$I_a + kI_{a0}$	$I_a - I_{a\ pre}$
B-Terra	V_b	$I_b + kI_{b0}$	$I_b - I_{b\ pre}$
C-Terra	V_c	$I_c + kI_{c0}$	$I_c - I_{c\ pre}$
AB, AB-Terra, ABC	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$	$(I_a - I_{a\ pre}) - (I_b - I_{b\ pre})$
BC, BC-Terra, ABC	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$	$(I_b - I_{b\ pre}) - (I_c - I_{c\ pre})$
CA, CA-Terra, ABC	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$	$(I_c - I_{c\ pre}) - (I_a - I_{a\ pre})$

Onde $k = \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} - 1$

3. MÉTODO DA SIMPLES REATÂNCIA

Através do método de Simples Reatância é possível calcular a impedância aparente e determinar a relação entre a reatância medida e a relação total da linha. Esta relação é diretamente proporcional à distância até o ponto onde ocorreu a falha.

Este método tem como premissa assumir que a corrente I_F , que passa pela resistência de falha, está em fase com a corrente I_S que sai do terminal S e que a resistência de falha, R_F , é igual a zero. Nesta metodologia a resistência de falha é compensada ao considerar apenas a parte imaginária da impedância aparente.

Assumindo apenas a parte imaginária de (2), o termo $R_F I_F / I_S$ deve ser desconsiderado e com isso pode-se determinar a distância de onde ocorreu a falha.

$$m = \frac{\Im\{Z_F\}}{\Im\{Z_L\}} = \frac{\Im\{V_S/I_S\}}{\Im\{Z_L\}} \quad (3)$$

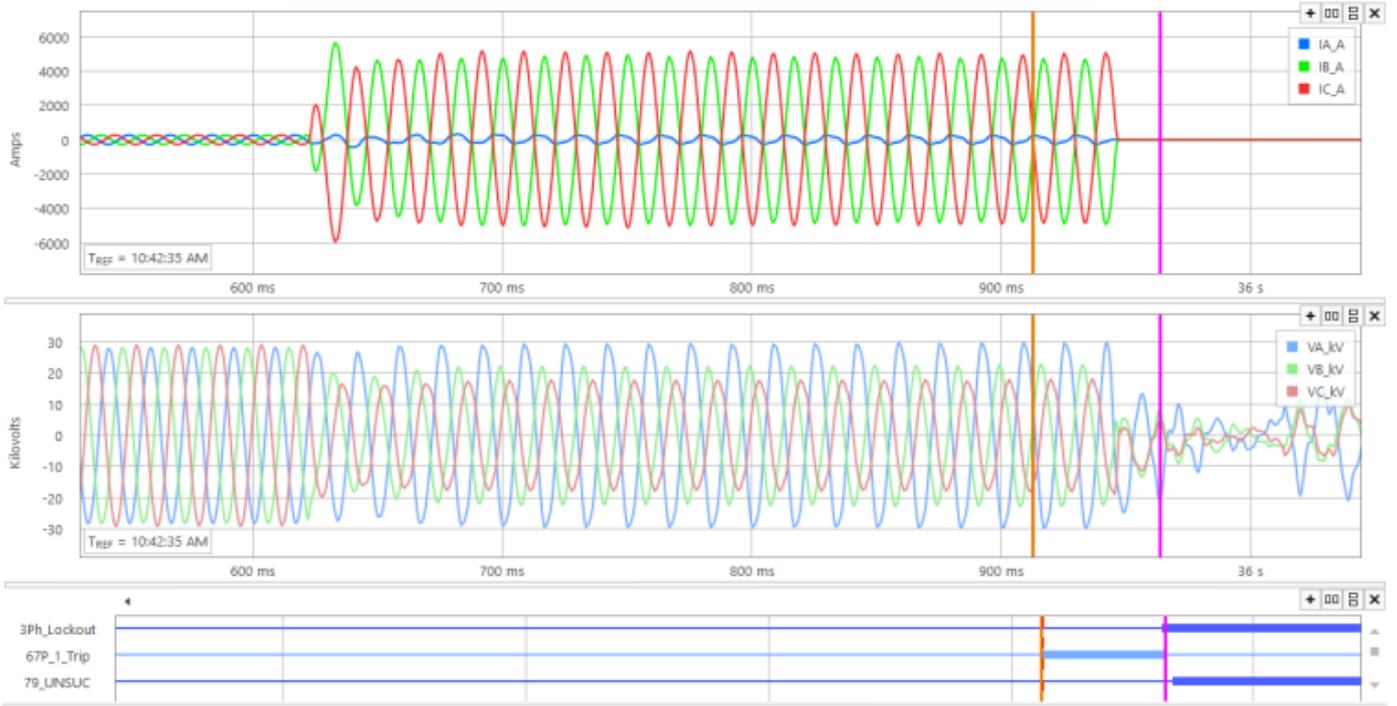


Figura 3. Oscilografia registrada pelo relé no momento da atuação da proteção de sobrecorrente direcional.

4. MÉTODO DE TAKAGI

O método de Takagi possui uma vantagem em relação ao Método de Simples Reatância, pois sua técnica consiste em subtrair as correntes de carga da corrente total usando o Teorema de Superposição para decompor a falta em uma rede pré-falta e pós-falta (IEEE Std C37.114-2014, 2015).

Para aplicação do método de Takagi é necessário que se tenha os dados de tensão e corrente do período de pré-falta e de falta de apenas um único terminal. Além do que foi mencionado no parágrafo anterior, este método possui uma vantagem com relação ao método de Simples Reatância por reduzir o efeito da resistência de falta (Takagi et al., 1982).

Usando o método da Superposição das Correntes (I_{sup}) para encontrar o termo em fase com I_F , tem-se:

$$I_{sup} = I - I_{pré} \quad (4)$$

Onde I e $I_{pré}$ são as correntes de falta e pré-falta respectivamente.

Para que seja calculado o valor de m neste método, multiplica-se (1) pelo conjugado complexo de I_{sup} (I_{sup}^*) e considera-se somente a parte imaginária. Desta forma,

$$\Im \{V_S I_{sup}^*\} = m \cdot \Im \{Z_L I_S I_{sup}^*\} + R_F \cdot \Im \{I_F I_{sup}^*\},$$

e para R_F desprezível, obtém-se:

$$m = \frac{\Im \{V_S I_{sup}^*\}}{\Im \{Z_L I_S I_{sup}^*\}} \quad (5)$$

5. METODOLOGIA

Nesta etapa, os dois métodos apresentados serão aplicados em uma situação real de uma falta bifásica ocorrida no

circuito de um parque eólico de 34,5kV pertencente ao Complexo Eólico no Ceará.

O Complexo Eólico em análise está localizado na Serra de Ibiapaba, no município cearense de Tianguá. Composto por cinco parques eólicos, 77 aerogeradores e uma capacidade instalada total de 130 MW, o empreendimento cobre uma área de 9.000 hectares.

O caso analisado neste artigo se deu devido à saída intempestiva de um circuito do parque eólico proveniente da atuação da proteção de sobrecorrente direcional (67).

Tabela 2. Impedância de sequência positiva de cada segmento do circuito analisado.

Identificação do segmento	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$
1	0,88751	2,04082
2	0,11990	0,10164
3	0,15696	0,13305
4	0,68120	0,57750
5	0,12317	0,10441
6	0,13189	0,11180
7	0,10137	0,8593
TOTAL	1,58893	2,63542

5.1 Dados do circuito analisado

O circuito analisado do parque eólico possui uma extensão de 6,438 km, saindo da subestação coletora até o aerogerador. A impedância de sequência positiva desse trecho foi calculada através de uma simulação computacional utilizando o software ATP. A Tabela 2 apresenta a impedância calculada para cada segmento do trecho analisado.

Com base na Tabela 2 tem-se que a impedância total do trecho é $Z_L = 1,58893 + j2,63542 \Omega$

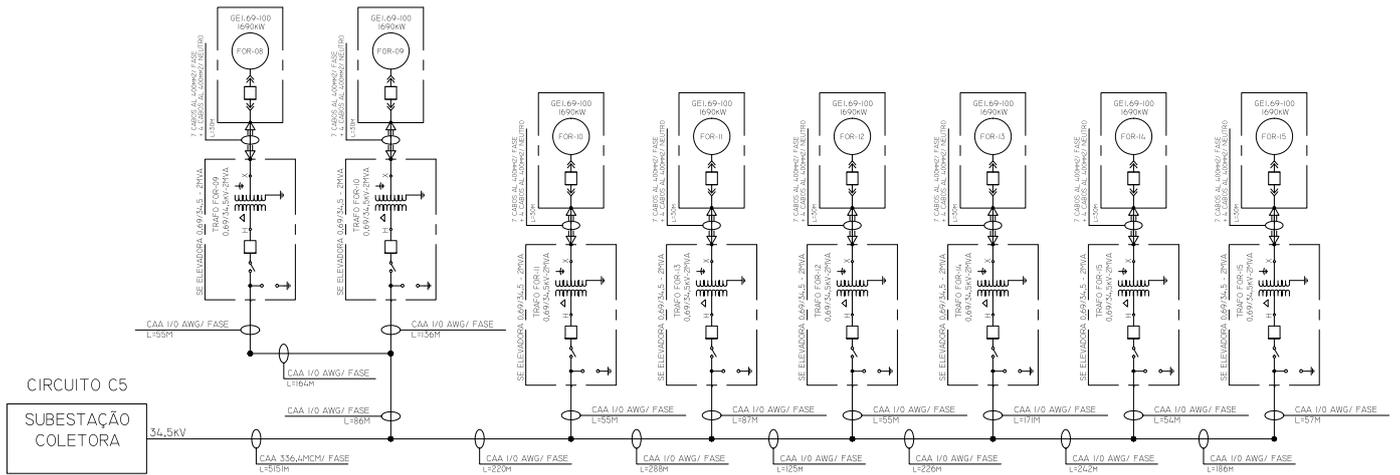


Figura 4. Diagrama unifilar circuito analisado.

5.2 Dados da oscilografia

No momento da falta, o relé de proteção do circuito analisado registrou a oscilografia, conforme mostra a Figura 3. Com base nessa figura, pode-se verificar que no momento da pré-falta os valores de tensão e corrente apresentavam valores equilibrados e sequência direta dos fasores.

No momento do início da falta, percebe-se que houve uma elevação dos valores das correntes das fases *B* e *C* e ao mesmo tempo uma queda nos valores de tensão destas mesmas fases, o que caracteriza um curto-circuito bifásico entre as fases *B* e *C*.

5.3 Valores encontrados

Com base na oscilografia tem-se os dados de tensão e corrente no momento da pré falta, falta e pós falta. A Figura 5 mostra os valores de tensão no momento da falta.

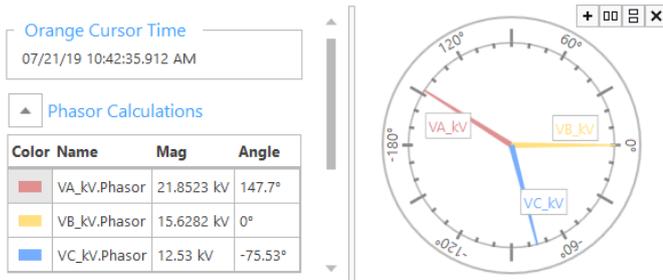


Figura 5. Valores de tensão no momento da falta.

Como se trata de um curto-circuito bifásico entre as fases *B* e *C*, de acordo com a Tabela 1, o valor da tensão de curto circuito pode ser calculado no momento da falta da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 V_B &= 15.682, 20 \angle 0^\circ V \\
 V_C &= 12.530, 00 \angle -75, 53^\circ V \\
 V_{BC} &= 17.456, 61 \angle 44, 03^\circ V
 \end{aligned}$$

A Figura 6 mostra os valores de corrente no momento da falta.

Como se trata de um curto-circuito bifásico entre as fases *B* e *C*, de acordo com a Tabela 1, o valor da corrente de curto-circuito pode ser calculado da seguinte forma:

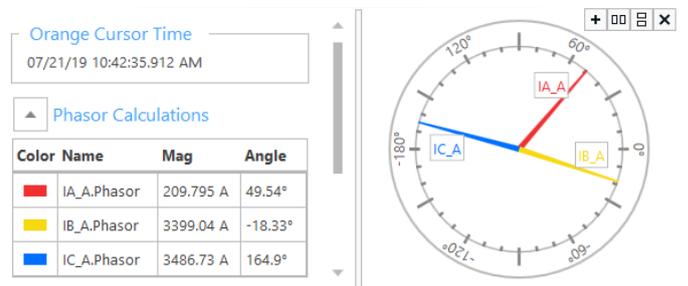


Figura 6. Valores de corrente no momento da falta.

$$\begin{aligned}
 I_B &= 3.399, 04 \angle -18, 33^\circ A \\
 I_C &= 3.486, 73 \angle 164, 90^\circ A \\
 I_{BC} &= 6.883, 03 \angle -16, 69^\circ A
 \end{aligned}$$

5.4 Aplicação do Método de Simples Reatância

Com base nos dados coletados pela oscilografia, será aplicado o Método da Simples Reatância para determinar o local onde ocorreu a falta.

De acordo com (3), tem-se:

$$m = \frac{\Im \{V_S / I_S\}}{\Im \{Z_L\}}$$

O resultado do cálculo do Z_F é:

$$Z_F = \frac{V_{BC}}{I_{BC}} = 2, 53 \angle 60, 72^\circ \Omega = 1, 24 + j2, 21 \Omega$$

Assim, o valor de m é:

$$m = \frac{\Im \{V_S / I_S\}}{\Im \{Z_L\}} = \frac{2, 21}{2, 63} = 0, 84$$

Sendo assim possível o cálculo do local da falta para um comprimento total L_{linha} da linha:

$$Local_{falta} = L_{linha} \cdot m = 6.438 \cdot 0, 84 = 5.407, 92 \text{ m}$$

Portanto, de acordo com a aplicação do Método da Simples Reatância, a falta ocorreu a uma distância de 5.407,92 metros da Subestação.

5.5 Aplicação do Método de Takagi

Para aplicação deste método, são necessários os valores de corrente no momento da pré-falta de acordo com (5).

$$m = \frac{\Im \{V_S I_{sup}^*\}}{\Im \{Z_L I_S I_{sup}^*\}}$$

A Figura 7 mostra os valores da corrente no momento da pré-falta.

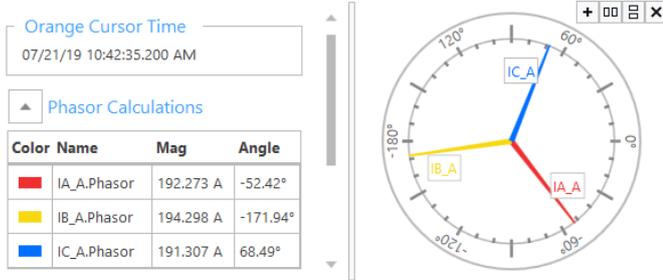


Figura 7. Oscilografia registrada pelo relé de proteção

Assim sendo, os valores das correntes de pré-falta são:

$$I_{B\text{-pré}} = 194,30 \angle -171,94^\circ A$$

$$I_{C\text{-pré}} = 191,31 \angle 68,50^\circ A$$

A corrente que é calculada pelo método da superposição, I_{sup} , é então:

$$I_{sup} = (I_B - I_{B\text{-pré}}) - (I_C - I_{C\text{-pré}})$$

$$I_{sup} = 7.080,70 \angle -14,49^\circ A$$

$$I_{sup}^* = 7.080,70 \angle 14,49^\circ A$$

Portanto, a aplicação de (5) resulta em:

$$\frac{\Im \{17.456,61 \angle 44,03^\circ \cdot 7.080,70 \angle 14,49^\circ\}}{\Im \{3,08 \angle 58,91^\circ \cdot 6.883,03 \angle -16,69^\circ \cdot 7.080,70 \angle 14,49^\circ\}}$$

Sendo o valor calculado:

$$m = 0,84.$$

Assim sendo possível o cálculo do local da falta:

$$Local_{falta} = L_{linha} \cdot m = 6.438 \cdot 0,84 = 5.407,92 \text{ m}$$

Portanto, de acordo com a aplicação do Método de Takagi, a falta ocorreu a uma distância de 5.407,92 metros da Subestação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizada a análise da oscilografia e encontrados os valores de distância para localização de falta através da aplicação dos Métodos de Simples Reatância e o Método de Takagi a equipe de Operação e Manutenção foi acionada para realizar inspeção no local indicado.

De acordo com a distância calculada, a falta ocorreu nas proximidades do aerogerador FOR-10. A Figura 8 indica a localização desta turbina em relação à Subestação.

Como pode ser observado no diagrama unifilar da Figura 4, o trecho da rede que sai da Subestação até o aerogerador FOR-10 possui uma distância de aproximadamente 5.426 km.

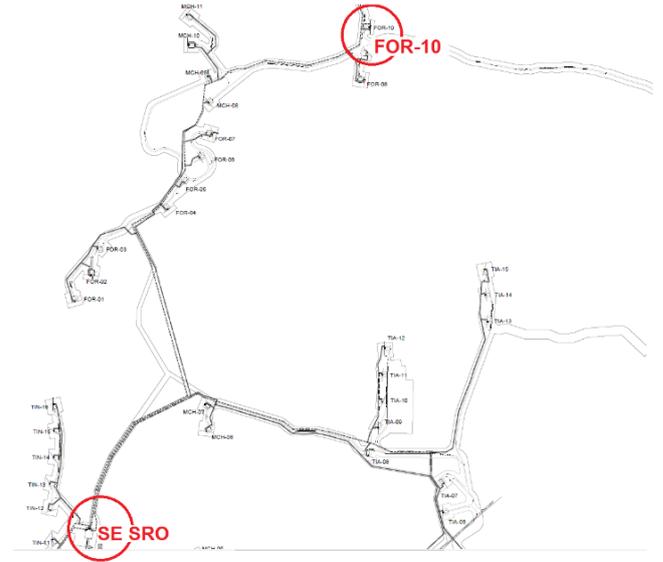


Figura 8. Planta de traçado e localização dos aerogeradores.

6.1 Resultado da inspeção em campo

Após a chegada da equipe de Operação e Manutenção ao local informado, foi possível identificar o que ocasionou o curto-circuito bifásico, gerando a saída do circuito analisado do parque eólico.

Um objeto provocou um contato elétrico entre as duas fases do circuito analisado. A equipe de manutenção indicou que esse objeto era um pedaço de borracha que foi trazido através do vento, muito provavelmente devido uma manutenção em um aerogerador próximo ou através de vandalismo de terceiros.



Figura 9. Evidência do curto circuito bifásico na rede do parque eólico.

7. CONCLUSÕES

No presente artigo foram aplicados dois dos métodos de Terminal Único baseado em impedância, Simples Reatância e de Takagi. Eles foram aplicados em uma falta bifásica ocorrida em um circuito aéreo de um parque eólico.

Portanto, para faltas bifásicas em circuitos aéreos os métodos de Simples Reatância e de Takagi apresentam resultados bastante satisfatórios e precisos, sendo que os dois métodos apresentaram resultados semelhantes.

Desta forma, pode-se concluir que estes métodos trazem inúmeras vantagens para a Operação e Manutenção de parques eólicos, dentre elas: a diminuição considerável do tempo para a identificação do defeito (uma vez que a equipe de campo não necessita realizar a inspeção por todo o trecho da rede de média tensão), a redução do tempo da manutenção corretiva e o aumento da disponibilidade do complexo eólico.

REFERÊNCIAS

- Ajenikoko, G.A. and Segun, O.S. (2016). An overview of impedance-based fault location techniques in electrical power transmission network. *International Journal of Advanced Engineering Research and Applications (IJ-ERA)*, 2(3), 2454–2377.
- Das, S., Santoso, S., Gaikwad, A., and Patel, M. (2014). Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE Access*, 2, 537–557. doi:10.1109/ACCESS.2014.2323353.
- Gong, Y., Mynam, M., Guzmán, A., Benmouyal, G., and Shulim, B. (2012). Automated fault location system for nonhomogeneous transmission networks. In *2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 374–381. doi:10.1109/CPRE.2012.6201245.
- IEEE Std C37.114-2014 (2015). Ieee guide for determining fault location on ac transmission and distribution lines. *IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004)*, 1–76. doi:10.1109/IEEESTD.2015.7024095.
- Kang, S., Ahn, Y., Kang, Y., and Nam, S. (2009). A fault location algorithm based on circuit analysis for untransposed parallel transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), 1850–1856. doi:10.1109/TPWRD.2008.2002975.
- Kawady, T.A., Mansour, N.M., and Taalab, A.M.I. (2010). Wind farm protection systems: State of the art and challenges. In D.N. Gaonkar (ed.), *Distributed Generation*, chapter 12. IntechOpen, Rijeka. doi:10.5772/8882. URL <https://doi.org/10.5772/8882>.
- Takagi, T., Yamakoshi, Y., Yamaura, M., Kondow, R., and Matsushima, T. (1982). Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(8), 2892–2898. doi:10.1109/TPAS.1982.317615.
- Zimmerman, K. and Costello, D. (2005). Impedance-based fault location experience. In *58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2005.*, 211–226. doi:10.1109/CPRE.2005.1430435.