

Pedro Henrique Coeli Carl

**UM ESTUDO SOBRE INDICADORES DE FALTA E SUA  
REPRESENTAÇÃO NA ANÁLISE DE CONFIBILIDADE DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Departamento de  
Engenharia Elétrica e Eletrônica da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Diego Issicaba, PhD.

Florianópolis  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Carl, Pedro Henrique Coeli

Um estudo sobre indicadores de falta e sua representação na análise de confiabilidade de redes de distribuição / Pedro Henrique Coeli Carl ; orientador, Diego Issicaba, 2019.  
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

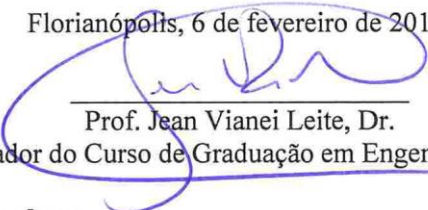
1. Engenharia Elétrica. 2. Indicadores de Falta. 3. Análise SWOT. 4. Confiabilidade. I. Issicaba, Diego. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Pedro Henrique Coeli Carl

**UM ESTUDO SOBRE INDICADORES DE FALTA E SUA  
REPRESENTAÇÃO NA ANÁLISE DE CONFIBILIDADE DE  
REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequada para  
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em  
sua forma final pela Banca Examinadora

Florianópolis, 6 de fevereiro de 2019.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**



Prof. Diego Issicaba, PhD.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Mauro Augusto da Rosa, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Lucas Fritzen Veturini, Me.

Universidade Federal de Santa Catarina



Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.



## **AGRADECIMENTOS**

A esta universidade e todo o corpo docente que ajudou a me tornar um profissional na área de engenharia elétrica e entender conceitos difíceis com clareza.

Ao meu orientador Diego Issicaba, por todo o suporte dado e compreensão da situação para realizar esse trabalho, e também ao Lucas Fritzen Veturini, por me auxiliar na busca de conteúdo.

A minha família por todo amor, carinho e incentivo.

A minha mãe Zuleica Aparecida Carl, que me deu apoio nas horas difíceis de desânimo e cansaço.

Ao meu pai Kelique Roberto Carl por ser um exemplo de profissional e pessoa.

Aos meus amigos, companheiros e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.





Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto de P&D 00405-1804/2018 em parceria com a Energisa – Desenvolvimento de um sistema para localização de faltas transitórias ou permanente, que possa ser facilmente instalado, sem necessidade de interrupção da rede elétrica, próprio para instalação em redes de 15kv e 34 kV, de baixo custo e integrado às tecnologias de IoT mais atuais.



## RESUMO

Os indicadores de falta em rede de distribuição são alocados de forma a diminuir o tempo de manutenção da rede caso haja algum problema que evite o fornecimento de energia elétrica. Para isso, os indicadores de falta devem possuir sensores de corrente e um mínimo de “inteligência” para diferenciar correntes de falta de uma corrente nominal. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a realização de um estudo acerca do funcionamento de indicadores de falta, desde seu princípio sensorial de correntes de falta até o levantamento de aspectos construtivos de interesse. Também visa-se a realização de uma busca por indicadores de falta no mercado, para compreender as diferentes formas de atuação disponíveis e suas funções auxiliares. Ademais, busca-se a realização de um estudo sobre índices de confiabilidade brasileiros DIC, FIC, DEC e FEC e, através de um exemplo, destacar os efeitos que os indicadores de falta podem causar nos índices de confiabilidade. Finalmente, apresenta-se brevemente o conceito de análise SWOT e realiza-se uma aplicação dessa análise para indicadores de falta selecionados no trabalho.

**Palavras-chave:** Indicadores de Falta. Confiabilidade. Análise SWOT.



## ABSTRACT

The fault indicators in the distribution network are allocated in order to reduce the maintenance time of the network if there is a problem that prevents the supply of electricity. For this, fault indicators must have current sensors and a minimum of "intelligence" to differentiate fault currents from a rated current. In this context, this work has the objective of conducting a study about the functioning of the fault indicators, from its sensorial principle of fault currents to the survey of constructive aspects of interest. It also aims to perform a search for fault indicators in the market, to understand the different forms of available actions and their auxiliary functions. In addition, a study on Brazilian reliability indexes DIC, FIC, DEC and FEC is sought and, by way of example, to highlight the effects that fault indicators can cause on reliability indices. Finally, the concept of SWOT analysis is briefly presented and an application of this analysis is performed for selected fault indicators in the work.

**Keywords:** Fault indicators, Reliability, SWOT Analysis.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transformador de corrente (Mamede, 2005).....	26
Figura 2 - Transformador de corrente com núcleo dividido (Mamede, 2005).....	27
Figura 3 - Onda eletromagnética se propagando no eixo z (Brígida, 2017).....	28
Figura 4 - Tipos de polarização linear (Brígida, 2017).....	29
Figura 5 - Polarização circular a direita (a) e esquerda (b) (Brígida, 2017).....	30
Figura 6 - Polarização elíptica (Brígida, 2017) .....	30
Figura 7 - Luz polarizada no angulo $\theta$ incidindo em um meio birrefringente. Raio extraordinário (E) e ordinário (O) (Brígida, 2017)	31
Figura 8 - Esquema de detecção polimérica (Brígida, 2017) .....	32
Figura 9 - Prisma sensor com dupla reflexão (a). Prisma sensor com formato triangular (b) (Brígida, 2017).....	33
Figura 10 - Sensor de fibra óptica .....	34
Figura 11 – Detector de corrente de curto-circuito por <i>trip</i> de valor máximo .....	35
Figura 12 - Detector de corrente de curto-circuito por taxa de variação (Santos, et al., 20--)-.....	36
Figura 13 - Sistema do exemplo (Bacalini, 2011) .....	44
Figura 14 - Gráfico de comparação dos indicadores de falta .....	55
Figura 15 - SEL WSO-11 .....	56





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do sistema.....	44
Tabela 2 - Parâmetros de confiabilidade .....	44
Tabela 3 - Tempo médio de deslocamento sem indicadores de falta.....	46
Tabela 4 - Resultados caso 1 .....	47
Tabela 5 - Tempo médio de deslocamento com indicadores de falta.....	47
Tabela 6 - Resultados caso 2 .....	48
Tabela 7 - Resultados caso 3 .....	49
Tabela 8 - Resultados caso 4 .....	51
Tabela 9 - Indicadores de falta e suas características .....	54
Tabela 10 - Tabela completa de indicadores de falta.....	63



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS .....	22
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	22
<b>2</b>	<b>INDICADORES DE FALTA</b> .....	<b>25</b>
2.1	SENSORES DE CORRENTE .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Transformadores de corrente</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Sensores ópticos</b> .....	<b>27</b>
2.1.2.1	Polarização .....	28
2.1.2.2	Birrefringência .....	30
2.1.2.3	Efeito Faraday .....	31
2.1.2.4	Detecção polarimétrica.....	32
2.1.2.5	Sensor de prisma .....	32
2.1.2.6	Sensor de fibra óptica.....	33
2.2	DETECÇÃO DA CORRENTE DE FALTA .....	34
<b>2.2.1</b>	<b>Valor máximo de a corrente</b> .....	<b>35</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Taxa de variação da corrente</b> .....	<b>36</b>
2.3	ESTILOS DE <i>RESETS</i> .....	36
2.4	OUTRAS CARACTERÍSTICAS.....	37
2.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	38
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	<b>39</b>
3.1	ABORDAGEM UTILIZADA PARA A ANÁLISE DE CONFIABILIDADE .....	39
<b>3.1.1</b>	<b>DIC (Duração de Interrupção Individual)</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1.2</b>	<b>FIC (Frequência de Interrupção Individual)</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1.3</b>	<b>DEC (Duração Equivalente de Interrupção)</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1.4</b>	<b>FEC (Frequência Equivalente de Interrupção)</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1.5</b>	<b>SAIFI (System Average Interruption Frequency Index)</b> . 41	
<b>3.1.6</b>	<b>SAIDI (System Average Interruption Duration Index)</b> ... 41	

<b>3.1.7</b>	<b>CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index)</b>	
	<b>42</b>	
<b>3.1.8</b>	<b>CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)</b>	
	<b>42</b>	
3.2	ESTUDO DE CASO.....	43
3.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	51
<b>4</b>	<b>ANÁLISE SWOT.....</b>	<b>53</b>
4.1	INDICADORES DE FALTA PRESENTES NO MERCADO	
	53	
4.2	ANALISE E COMPARAÇÃO DE INDICADORES DE	
FALTA	55	
4.3	ANALISE SWOT DO INDICADOR DE FALTA WSO.....	56
4.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE A – Tabela de Indicadores de Falta.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é caracterizado por possuir um Sistema Elétrico de Potência (SEP) interligado em quase toda a sua extensão territorial, entregando energia elétrica tanto para pequenos consumidores, quanto para os grandes consumidores. O SEP pode ser dividido ao longo do seu percurso construtivo nos estágios de geração, transmissão e distribuição.

No estágio da geração, a energia elétrica pode ser produzida através de forças da natureza como usinas hidroelétricas ou usinas eólicas, dois tipos de usinas muito utilizadas no Brasil. A geração também pode ser proveniente de usinas a combustível, como as usinas termoelétricas, que utilizam carvão ou derivados de petróleo.

As usinas entregam a energia elétrica através de condutores para uma primeira subestação, que por sua vez eleva a tensão para o nível de transmissão. Alguns valores convencionais de tensão nominal em sistemas de transmissão no Brasil são 500 kV, 230 kV, 138 kV e 69 kV (ANEEL, 2011). Altas tensões fazem com que baixas correntes circulem nas linhas de transmissão, diminuindo as perdas por efeito joule nos cabos condutores.

Após o estágio de transmissão, a energia passa por outras subestações, que dessa vez abaixam a tensão para ser distribuída aos consumidores. A energia pode chegar ao consumidor final por cabos subterrâneos ou linhas aéreas, através de postes.

Em caso de linhas aéreas, como geralmente se localizam próximos de rodovias, estradas e ruas, os cabos se encontram muito vulneráveis a acidentes. O fato de estarem sempre expostos a intempéries acelera o desgaste dos equipamentos nas linhas, e como os postes não são muito altos, ainda há a possibilidade de toque de galhos, vandalismo e toque acidental por algum animal ou pessoa.

Esses problemas podem vir a gerar uma interrupção de fornecimento de energia para os consumidores. Neste âmbito, existem dois tipos primários de falta: momentânea ou permanente. Para o caso de faltas momentâneas, o sistema de distribuição deve possuir religadores, que ao detectar uma anomalia na corrente da rede, abre uma chave disjuntora isolando a parte com defeito para, alguns momentos depois, fechar a chave. Caso a corrente de falta não seja identificada, o religador não atua novamente, porém se for detectado anomalia ele entra em atuação de novo. Este processo se repete por um número finito de vezes, geralmente de 2 a 3 vezes, período após o qual a falta é considerada permanente.

O não fornecimento de energia por uma falta permanente ocorrida na linha de distribuição pode acarretar prejuízos ao consumidor e também ao fornecedor do serviço. É a distribuidora a responsável por reestabelecer o fornecimento de energia elétrica o quanto antes para evitar sanções por órgãos governamentais. Torna-se então necessário avaliar as causas da falta e reestabelecer o serviço de maneira ágil e eficiente.

Muitas vezes a distribuidora precisa enviar uma equipe de manutenção para encontrar a falta e resolver o problema, com isso o tempo de restabelecer o fornecimento de energia ao sistema fica não só dependente do tempo de manutenção da falta, como também do tempo de deslocamento da equipe e de encontro do problema.

Para auxílio da equipe de manutenção, a distribuidora pode instalar indicadores de falta que indicam quando uma corrente de falta passa pelo equipamento, e se posicionados em pontos estratégicos diminuem o tempo de busca pelo local de ocorrência da falta.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo teórico acerca do funcionamento de indicadores de falta, desde seu princípio sensorial da correntes de falta até o levantamento de aspectos construtivos de interesse. Também visa-se a realização de uma busca por indicadores de falta no mercado, para compreender as diferentes formas de atuação disponíveis e suas funções auxiliares.

Ademais, busca-se a realização de um estudo sobre índices de confiabilidade brasileiros DIC, FIC, DEC e FEC, determinados pelo órgão regulamentador e, através de um exemplo, destacar os efeitos que os indicadores de falta podem causar nos índices de confiabilidade.

Finalmente, apresenta-se brevemente o conceito de análise SWOT e realiza-se uma aplicação dessa análise para indicadores de falta selecionados no trabalho.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento possui a seguinte estrutura:

- Capítulo 1 – Neste capítulo apresenta-se o tema e os objetivos do trabalho.

- Capítulo 2 – Este capítulo contempla um resumo histórico sobre os indicadores de falta; os tipos de sensores que podem estar presentes no equipamento; formas de percepção da corrente de falta; estilos de *resets*; meios de indicação da falta e comunicação com a equipe; e por fim, aspectos de construção e normas.
- Capítulo 3 – Este capítulo provê uma revisão sobre análise de confiabilidade de redes de distribuição e um exemplo de estimação de melhorias em índices de confiabilidade advindos da instalação de indicadores de falta.
- Capítulo 4 – Neste capítulo explica-se o que é uma análise SWOT, apresenta-se alguns indicadores de falta presentes no mercado; e aplica-se a análise para um indicador de falta escolhido.
- Capítulo 5 – Neste capítulo, apresenta-se considerações finais e sugestão de trabalhos futuros.





## 2 INDICADORES DE FALTA

O principal objetivo dos indicadores de falta é detectar faltas na rede de distribuição de energia elétrica. As faltas permanentes são caracterizadas quando há um problema na rede de distribuição que não se resolve com a atuação dos religadores e é necessário a atuação do disjuntor.

Em muitos países, o sistema de distribuição de energia elétrica é de natureza subterrânea, o que dificulta encontrar do local e motivo da falta. Para o auxílio da localização, foi durante a década de 1940 (Angerer, 2008) que surgiram os primeiros indicadores de falta. Eles acionavam uma bandeirola caso a corrente de curto-circuito passasse pelo local onde se encontrava, assim a equipe percorria a rede de distribuição e ao notar uma bandeirola acionada sabia-se que a falta estava próxima.

Após a manutenção do sistema, a equipe precisava realizar o *reset* manualmente do indicador de falta para que caso venha ocorrer outra falta, o indicador de falta seja novamente acionado. Em 1960, na Alemanha, surgiu o primeiro indicador datado com *reset* automático. Esse indicador possuía um recipiente de vidro com um líquido claro e um pigmento vermelho ao fundo. Quando estimulado por uma corrente de curto-circuito, o recipiente era chacoalhado misturando o pigmento e transformando o líquido claro em vermelho. Depois de algum tempo o pigmento se depositava ao fundo e o líquido ficava claro de novo. Pode-se considerar esse um *reset* por tempo, que depende da velocidade de deposição do pigmento ao fundo do recipiente.

O toque momentâneo de um galho na linha pode ocasionar uma falta que desliga a rede, e após um momento de interrupção, o religador atua e a rede entra em operação normal novamente. Se nada mais causar uma falta na linha, o serviço de distribuição de energia é completamente normalizado. Essa situação é característica de uma falta temporária.

### 2.1 SENSORES DE CORRENTE

Os indicadores de falta possuem sensores de corrente para detectar a corrente de curto-circuito proveniente de uma falta. Existem alguns modos diferentes de se detectar a corrente que circula por um condutor, conforme descrito nas seções a seguir.

### 2.1.1 Transformadores de corrente

São dispositivos com a finalidade de transformar os valores de corrente para mais ou para menos que os valores reais. Também isolam um circuito de outro, o que para um indicador de falta é muito importante pois evita que a corrente de curto-circuito passe pelo circuito.

Um transformador de corrente genérico consiste de duas bobinas enroladas em um núcleo ferromagnético como mostra a Figura 1, sendo  $P_1$  e  $P_2$  os terminais primários do transformador e  $S_1$  e  $S_2$  os terminais secundários. A corrente que circula pelo primário cria um fluxo magnético alternado que induz forças eletromotrizes nos enrolamentos.

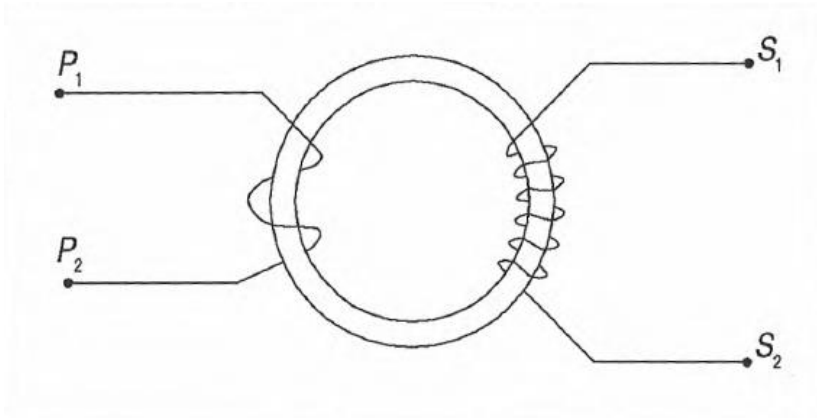


Figura 1 - Transformador de corrente (Mamede, 2005)

Do ponto de vista teórico, em um transformador sem perdas, a potência elétrica presente no secundário é igual a potência elétrica no primário do transformador. A relação de transformação é:

$$a = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{u_1}{u_2} \quad (1)$$

sendo  $i_1$  e  $i_2$  correntes do primário e secundário,  $N_1$  e  $N_2$  o número de voltas das espiras no primário e secundário e  $u_1$  e  $u_2$  as tensões no primário e secundário, respectivamente.

No caso de um transformador genérico, para realizar a manutenção ou instalação do equipamento, é necessário desligar a rede momentaneamente e enrolar condutor no núcleo como uma bobina. Esse procedimento torna o transformador inconveniente para a aplicação em redes em que não se pretende realizar o desligamento de energia elétrica. Com a finalidade de não interromper o fornecimento, utiliza-se transformadores de corrente do tipo núcleo dividido (Mamede, 2005) os quais possuem uma abertura no núcleo de ferro magnético para envolver o condutor como mostra a Figura 2. Nesse tipo de transformador, o condutor envolvido pelo núcleo funciona como o primário. Um exemplo de transformador de corrente do tipo núcleo dividido é o alicate amperimétrico, muito utilizado em laboratórios.

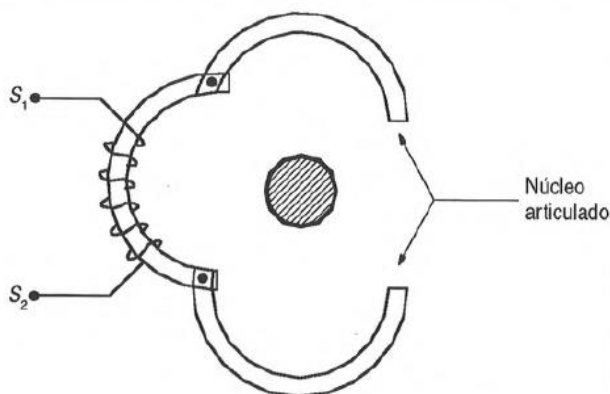


Figura 2 - Transformador de corrente com núcleo dividido (Mamede, 2005)

A junção entre as duas partes divididas pode afetar a permeabilidade do núcleo magnético. Felizmente esse problema pode ser resolvido utilizando um circuito com amplificadores. Os erros associados ao contato das duas partes do núcleo são menores do que 0,003% e mudança de fase menor que 5  $\mu$ rad (Eddy So, et al., 1993).

Comumente os valores de corrente no secundário são padronizados para 5A ou 1A, dependendo apenas do equipamento a ser utilizado.

### 2.1.2 Sensores ópticos

Alternativamente aos transformadores de corrente, existem os sensores ópticos de corrente elétrica, os quais se baseiam no movimento de rotação do vetor de polarização da luz se propagando no interior de um material transparente quando submetido a um campo eletromagnético (Brígida 2017), conhecido como efeito Faraday.

As próximas seções apresentam uma breve descrição de conceitos fundamentais correspondentes a esses sensores.

### 2.1.2.1 Polarização

A luz é uma onda eletromagnética transversal que se propaga em um eixo, como ilustrado na Figura 3, nesse caso, o eixo de propagação é  $z$  e sua direção é na do vetor,  $k$ .

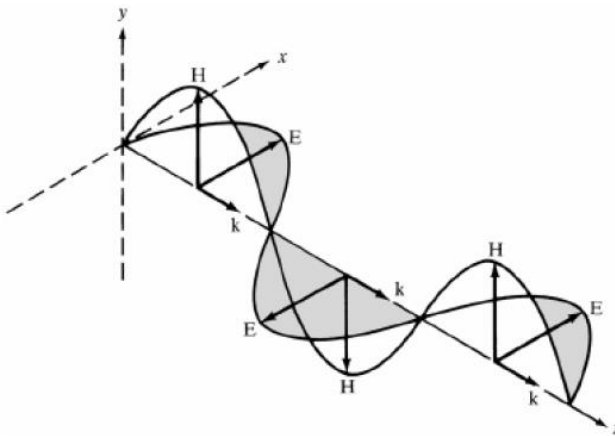


Figura 3 - Onda eletromagnética se propagando no eixo  $z$  (Brígida, 2017)

Notam-se duas componentes distintas perpendiculares entre si, o campo elétrico que oscila somente no eixo  $x$ , e o campo magnético oscilando apenas no eixo  $y$ .

O desenho traçado pelo vetor campo elétrico  $E$  em um plano transversal à direção de propagação é chamado de polarização da onda eletromagnética (Brígida, 2017). Uma onda eletromagnética plana que se propaga na direção positiva do eixo  $z$  é matematicamente escrita como:

$$\mathbf{E} = E_{x0} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) \hat{a}_x + E_{y0} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \hat{a}_y \quad (2)$$

onde  $\hat{a}_x$  e  $\hat{a}_y$  são vetores unitários que correspondem aos eixos  $x$  e  $y$ ,  $\varphi_x$  e  $\varphi_y$  são termos de fase das componentes  $x$  e  $y$ ,  $\omega$  é a frequência angular da onda e  $E_{x0}$  e  $E_{y0}$  as amplitudes das componentes nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

As classificações de polarização de onda podem ser feitas de acordo com os valores de amplitude e fases relativas.

**1- Polarização linear:** Uma das componentes  $E_{x0}$  e  $E_{y0}$  é nula ou quando a fase relativa for igual à zero. Uma representação pode ser vista na Figura 4.

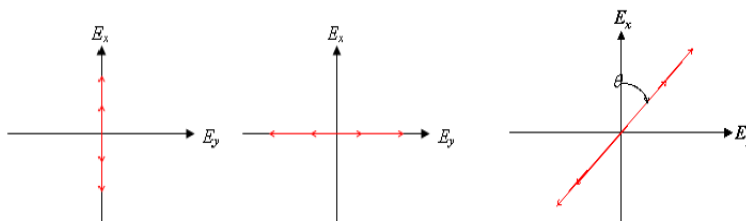


Figura 4 - Tipos de polarização linear (Brígida, 2017)

**2- Polarização circular:** As duas componentes  $E_{x0}$  e  $E_{y0}$  são iguais e há uma diferença de  $+\frac{\pi}{2}$  (direita) ou  $-\frac{\pi}{2}$  (esquerda) entre as fases, como ilustra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

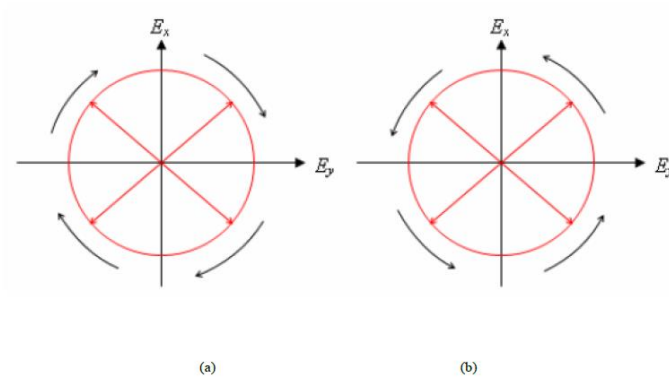


Figura 5 - Polarização circular a direita (a) e esquerda (b) (Brígida, 2017)

**3- Polarização elíptica:** São os casos em que as amplitudes  $E_{x0}$  e  $E_{y0}$  e fases relativas não foram abrangidos pelas polarizações lineares ou circulares. Representado pela Figura 6.

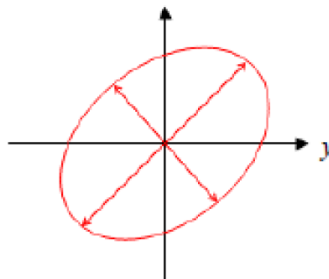


Figura 6 - Polarização elíptica (Brígida, 2017)

#### 2.1.2.2 Birrefringência

Quando um raio de luz se propaga por um meio birrefringente, o campo elétrico é dividido em duas componentes, independente do seu estado de polarização inicial, raio extraordinário que é paralelo à direção do eixo óptico do meio, e raio ordinário, perpendicular ao eixo óptico do meio. Os dois raios se propagam com velocidades diferentes durante seu trajeto no meio, portanto o meio possui dois índices de refração distintos:  $n_e$  e  $n_o$ .

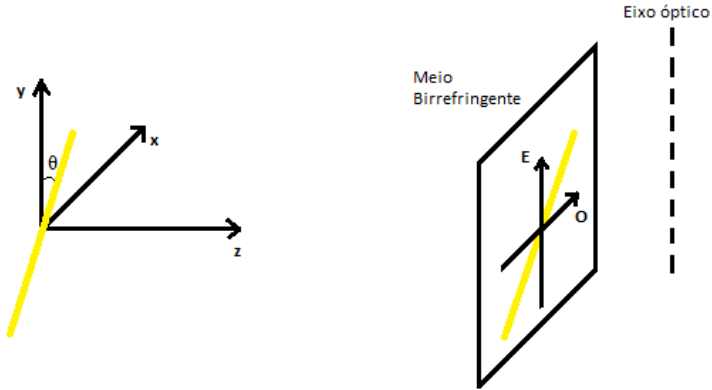


Figura 7 - Luz polarizada no ângulo  $\theta$  incidindo em um meio birrefringente. Raio extraordinário (E) e ordinário (O) (Brígida, 2017)

### 2.1.2.3 Efeito Faraday

Observado por Michael Faraday em 1845 é também conhecido como efeito magneto-óptico. Este efeito é caracterizado pela mudança de polarização de um feixe de luz polarizada ao passar por um meio transparente sob a influência de um campo magnético.

O ângulo de rotação de Faraday  $\theta_f$  resultante da propagação na influência de um campo magnético  $B$  ao longo de um meio transparente com comprimento  $L$ , é escrito como:

$$\theta_f = \int_L^0 VB. dL \quad (3)$$

onde  $V$  é a constante de Verdet para o material expresso em rad/m.T.

A constante de Verdet descreve a força do Efeito Faraday em um material. Para o caso de sensores, quanto maior a constante de Verdet maior será a rotação do ângulo de polarização da onda sob o efeito de um campo magnético, logo, materiais com uma constante de Verdet alta, possuem mais precisão em relação a outros materiais.

#### 2.1.2.4 Detecção polarimétrica

Uma forma simples de detectar a mudança de polarização de um feixe de luz polarizado na presença de um campo magnético é utilizar um fotodetector, sensor que gera um sinal elétrico de acordo com a luz ou outra onda eletromagnética incidente.

Na configuração ilustrada pela Figura 8, a luz inicialmente passa por um polarizador na entrada do sensor que define o estado de polarização inicial (Pol.  $0^\circ$ ), a luz polarizada percorre o meio birrefringente onde sua polarização é rotacionada devido a presença de um campo magnético  $B$ . Um segundo polarizador (Pol.  $45^\circ$ ) é posicionado na saída do sinal óptico, transformando a rotação de polarização numa modulação de intensidade de luz que é medida por um fotodetector.

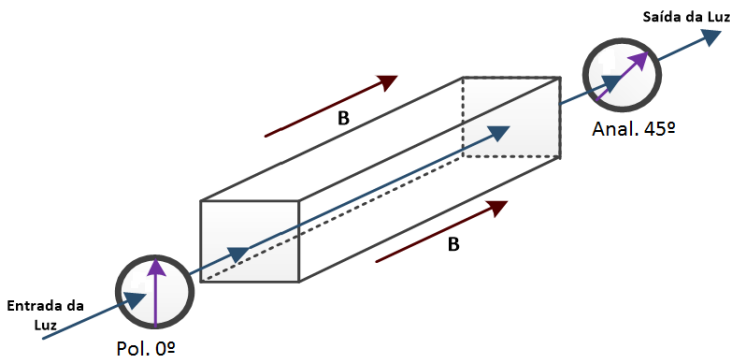


Figura 8 - Esquema de detecção polarimétrica (Brígida, 2017)

#### 2.1.2.5 Sensor de prisma

Os sensores de prisma consistem de um meio, geralmente vidro ou cristal, que envolve o condutor como na Figura 9.



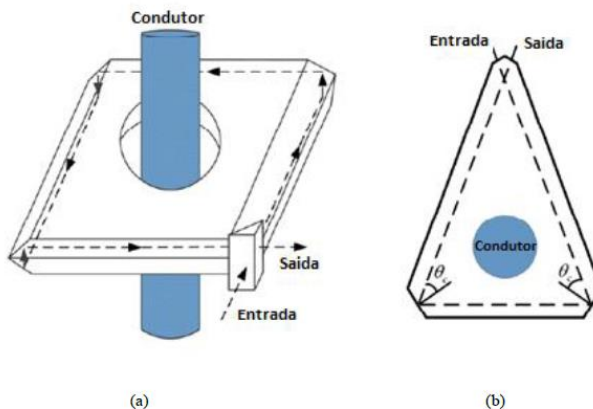


Figura 9 - Prisma sensor com dupla reflexão (a). Prisma sensor com formato triangular (b) (Brígida, 2017)

Os prismas são dispositivos pequenos e com uma grande rigidez mecânica, ou seja, os resultados são poucos alterados por variação de temperaturas, instabilidade mecânica ou vibrações.

Para que o feixe de luz percorra o caminho ao redor do condutor., torna-se necessário o uso de reflexões internas, que, de acordo com a equação de Fresnel (Zilio, 2009), quando a luz linearmente polarizada é refletida em um ângulo maior que o ângulo crítica, o estado de polarização da luz é alterado. Esse problema pode ser resolvido com a utilização de reflexões duplas, como ilustra a Figura 9 (a).

#### 2.1.2.6 Sensor de fibra óptica

Os sensores de fibra óptica também utilizam do Efeito Faraday para induzir o ângulo de polarização da luz que se propaga na fibra. A sensibilidade do sensor depende do número de voltas que a fibra óptica dá no condutor.

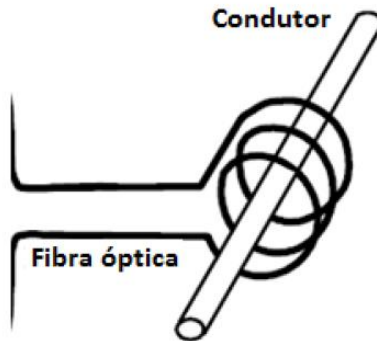


Figura 10 - Sensor de fibra óptica

A constante de Verdet para o material da fibra óptica é muito baixo comparado com o dos materiais de sensores de prisma. Dessa forma, muitos materiais vêm sendo estudados com a finalidade de aumentar a constante de Verdet. Outro problema é a dobra da fibra, que pode gerar fissuras e reflexões internas. A solução é aquecer a fibra a ponto de deixá-la maleável antes de dobrar. Além do mais, as fibras são mais suscetíveis à variação de pressão e temperatura, vibrações mecânicas e ruídos ambientais.

Uma das vantagens de se utilizar a fibra óptica como transdutor é obter imunidade a campos magnéticos externos.

## 2.2 DETECÇÃO DA CORRENTE DE FALTA

Os indicadores de falta costumam possuir uma detecção de falta através de um valor de *trip*. No caso, assim que a corrente atingir um certo valor, definido pelo fabricante ou pela concessionária, o indicador de falta dispara emitindo uma indicação para as equipes. Alguns indicadores de falta antigos que utilizavam esse método continuam instalados nos condutores, porém sua indicação muitas vezes não é levada em conta, já que a corrente ultrapassou o valor de *trip* selecionado não pela ocorrência de uma corrente de falta, mas sim porque a potência de carga aumentou ao longo dos anos, consequentemente aumentando a corrente que circula pelo condutor.

As formas mais comuns de se identificar uma corrente de falta são pelo:

- a) Valor máximo de corrente; e
- b) Taxa de variação de corrente;

### 2.2.1 Valor máximo de a corrente

O *trip* de valor máximo é acionado quando a corrente que percorre o condutor ultrapassa um determinado valor. Esse valor pode ser definido pelo fabricante, usuário ou possuir um ajuste automático.

A Figura 11 ilustra um gráfico em que o *trip* de um indicador de falta instalado em uma fase da rede de distribuição está ajustado para 1000 A; a corrente que circula é em média 200 A, e em um determinado momento ocorre uma falta elevando a corrente para 1800 A. Como a corrente ultrapassou o valor selecionado de *trip*, o indicador de falta sinaliza a falta.

Normalmente os indicadores de falta possuem também sensores de tensão para confirmar a ocorrência da falta, que é caracterizada por uma alta corrente seguida de ausência de tensão.

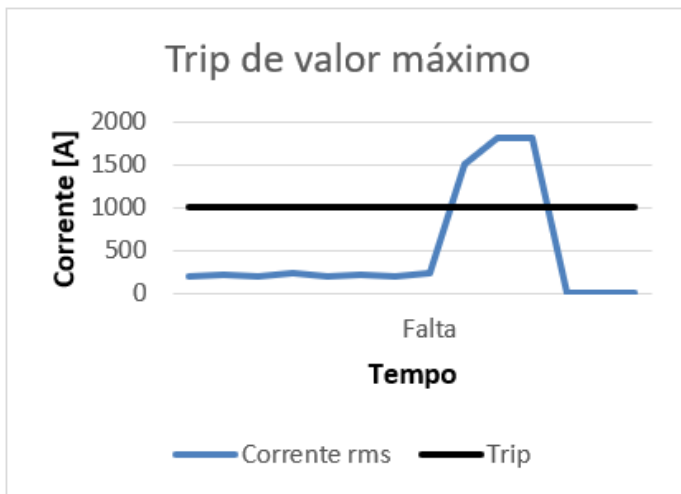


Figura 11 – Detector de corrente de curto-circuito por *trip* de valor máximo

## 2.2.2 Taxa de variação da corrente

Outro modo de se detectar a corrente de curto-circuito é através da alta taxa de variação da corrente ( $di/dt$ ) que ocorre no momento da falta. Ou seja, é detectada uma variação muito brusca de corrente durante um curto período de tempo.

Na Figura 12 a tensão instantânea proveniente do sensor de corrente do indicador de falta é escalada para baixo e comparada com um valor de tensão de referência por um comparador baseado em amplificadores operacionais. Essa tensão de referência é proporcional ao valor médio de meia-onda da tensão instantânea obtida por um circuito RC com uma constante de tempo adequada.

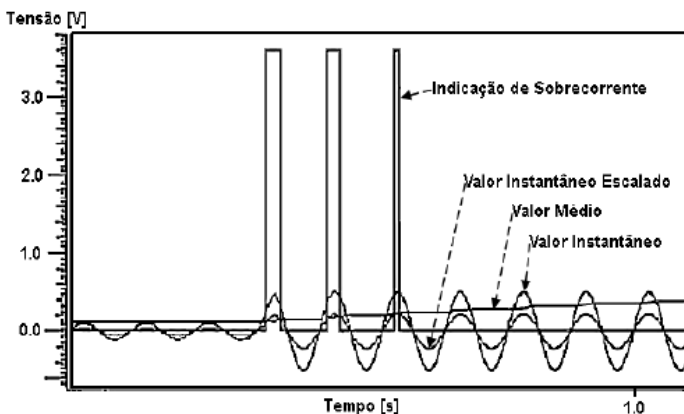


Figura 12 - Detector de corrente de curto-circuito por taxa de variação (Santos, et al., 20--)

Como a tensão comparada é sempre o valor médio da tensão instantânea provinda do sensor de corrente, esse modelo de detecção é dito como *trip* auto ajustável.

## 2.3 ESTILOS DE *RESETS*

O *reset* é uma das etapas mais importantes dos indicadores de falta. Se não realizar essa etapa o indicador de falta não é capaz de detectar e sinalizar outra falta para a equipe ou central. Os primeiros indicadores de falta possuíam *reset* manual feito pela equipe de da manutenção da rede. Hoje, com a evolução da tecnologia, é possível realizar o *reset* automaticamente com diferentes métodos.

- a) **Reset manual:** realizado pela equipe de manutenção após a execução do serviço. Esse tipo de *reset* está presente em grande parte os indicadores de falta do mercado em conjunto com outro método automático.
- b) **Reset por tempo:** o *reset* acontece depois de um tempo definido pelo fabricante, alguns indicadores de falta podem ter o valor alterado pelo usuário.
- c) **Reset por corrente de carga:** o indicador de falta armazena o valor da corrente anterior à falta, também chamada de corrente de carga, e no momento em que a linha reestabelecer essa corrente, o indicador de falta é resetado.
- d) **Reset por tensão na linha:** como a maioria dos indicadores de falta possuem sensores de tensão para identificar se a rede está ou não energizada após uma falta, esse recurso é aproveitado para identificar a reenergização da linha e realizar o *reset* do equipamento em seguida.

Os indicadores de falta podem possuir mais de um *reset* por equipamento para diminuir o tempo em que há sinalização sem necessidade e poupar a bateria do dispositivo.

## 2.4 OUTRAS CARACTERÍSTICAS

Os indicadores de falta devem ser de fácil instalação na rede de distribuição, suportar intempéries as quais estão sujeitos, serem a prova d'água, resistentes a vibrações e impactos mecânicos. Os indicadores de falta devem passar pelos testes conforme a IEEE *standart* 495 – 2007 (*IEEE Guide for Testing Faulted Circuit Indicators*).

Alguns indicadores de falta possuem um banco de armazenamento para guardar informações relevantes como a corrente de carga, utilizada para o *reset*, a tensão e corrente anterior a falta e horário do evento. O indicador de falta deve ignorar sobrecorrentes causadas pelo efeito de magnetização de transformadores (*inrush*) no momento da energização da linha. Para isso alguns indicadores de falta quando detectam que a linha entrou em operação esperam alguns segundos para começar a detectar a corrente de curto-circuito.

Uma característica que aprimora muito os resultados de um indicador de falta para a concessionária é a comunicação com um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Com essa característica, a equipe tem a capacidade de conhecer qual indicador de

falta atuou e também a localização do setor em falta antes mesmo de se deslocar para a manutenção, reduzindo muito o tempo de resposta. Caso a rede possua algumas chaves seccionadoras por controle remoto, é possível fazer uma reconfiguração para isolar a falta e re-energizar parte da rede remotamente antes da equipe realizar a manutenção. Um exemplo de cálculo do impacto desse tipo de manobra é mostrado no capítulo 3.

A comunicação pode ser feita por *wireless*, *bluetooth*, rádio frequência, redes móveis, DNP3, entre outras. Para não ocorrer sinalização indevida de falta devido a corrente transitórias de alta frequência, muitos modelos de indicadores de falta possuem um filtro passa baixa associado ao detector de corrente.

Os indicadores de falta não devem ser removidos com frequência de onde se encontra instalado, por isso possuem alta vida útil, sendo que alguns tem a capacidade de 20 anos sem troca ou recarga de bateria. É possível encontrar indicadores de falta que possuem placas solares para carregar a bateria e alguns modelos utilizam a tensão do condutor onde se encontram instalados para se manterem carregados.

## 2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Os indicadores de falta precisam possuir alguns recursos para poder ter atuação adequada nas redes de distribuição. É fundamental um transdutor de corrente para monitorar a corrente e identificar correntes de falta. A identificação de corrente pode ser realizada utilizando um valor de *trip* máximo ou a partir de uma variação brusca de corrente em curto período de tempo ( $di/dt$ ).

É necessário algum tipo de *reset* após a atuação do indicador de falta para que o dispositivo tenha a capacidade de identificar outra corrente de falta que possa ocorrer. Com a evolução da tecnologia, principalmente a eletrônica digital, os indicadores de falta tiveram grande avanço em suas principais características de funcionamento, como também a inserção de várias funções auxiliares que possibilitam um indicador de falta se destacar de outro.

## **3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Neste capítulo é apresentada uma análise do impacto de indicadores de falta na confiabilidade de rede de distribuição bem como a metodologia para obtenção desses parâmetros. Na seção 3.1, caracteriza-se os indicadores utilizados na análise. Já na seção 3.2, exibe-se um estudo de caso considerando a ausência e presença de indicadores de falta instalados em uma rede de distribuição. Na seção 3.3 são apresentados os resultados e as considerações finais.

### **3.1 ABORDAGEM UTILIZADA PARA A ANÁLISE DE CONFIABILIDADE**

A energia elétrica atualmente é um produto essencial para a vida humana. Por conta disso, tornam-se necessários métodos que avaliam a qualidade da energia entregue e também do serviço de cada concessionária de energia elétrica.

No Brasil, é dever da distribuidora reportar os indicadores de continuidade e qualidade à ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, que avalia se os critérios de continuidade e qualidade estabelecidos previamente foram atendidos. Caso contrário, o órgão aplica multas à concessionária que podem ser de grande prejuízo a empresa distribuidora.

Os indicadores analisados seguem os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). O Módulo 8, nomeado Qualidade da Energia Elétrica do PRODIST, apresenta os indicadores denominados Duração de Interrupção Individual por unidade consumidora (DIC), Frequência de Interrupção Individual por unidade consumidora (FIC), Duração Equivalente de Interrupção por unidade consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por unidade consumidora (FEC) (ANEEL, 2018). Esses indicadores são descritos a seguir.

#### **3.1.1 DIC (Duração de Interrupção Individual)**

Mostra o tempo em que cada cliente ficou sem receber energia da concessionária. Esse índice deve ter apuração mensal, trimestral e anual.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \text{ [horas]} \quad (4)$$

onde  $i$  é o índice de interrupções por unidade consumidora,  $n$  é o número de interrupções no período da apuração, e  $t(i)$  é o tempo de duração da interrupção.

### 3.1.2 FIC (Frequência de Interrupção Individual)

Índice que apura a quantas vezes o cliente sofreu interrupção. Como o DIC, o FIC deve ser apurado durante um período mensal, trimestral e anual.

$$FIC = n \text{ [int.]} \quad (5)$$

### 3.1.3 DEC (Duração Equivalente de Interrupção)

Esse índice mede a duração média, em horas, de interrupção mensal, trimestral e anual de um conjunto de consumidores.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c} \text{ [horas]} \quad (6)$$

onde  $C_c$  é o número total de unidades consumidoras consideradas no conjunto.

### 3.1.4 FEC (Frequência Equivalente de Interrupção)

Determina a frequência média de interrupções mensal, trimestral e anual de um conjunto de consumidores.

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} FIC(i)}{C_c} \quad (7)$$



Desde que o período utilizado para encontrar os parâmetros seja de um ano e o conjunto consumidor envolva todos os consumidores da rede, pode-se relacionar as variáveis SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) e SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*) com os indicadores brasileiros FEC e DEC. Para se quantificar os indicadores SAIFI e SAIDI são usados os conceitos de taxa de falha  $\lambda$  [int./ano], duração da interrupção  $U$  [h/ano] e tempo médio de interrupção  $r = \frac{U}{\lambda}$  [h/int.] (BILLINTON; ALLAN, 1984).

### 3.1.5 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index).

Indica a frequência de interrupções durante o período de um ano de um consumidor médio na rede.

$$SAIFI = \frac{\sum N^o \text{ interrupções consumidoras}}{N^o \text{ total de consumidores atendidos}} \left[ \frac{\text{int.}}{\text{ano}} \right] \quad (8)$$

$$SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i} \left[ \frac{\text{int.}}{\text{ano}} \right] \quad (9)$$

onde  $\lambda_i$  é a taxa de falha de  $N_i$  é o número de consumidores do ponto de carga  $i$ .

### 3.1.6 SAIDI (System Average Interruption Duration Index)

Este índice mostra o tempo de duração de interrupção em que o consumidor médio é sujeito pelo período de um ano.

$$SAIDI = \frac{\sum \text{duração das interrupções consumidoras}}{N^o \text{ total de consumidores atendidos}} \left[ \frac{\text{h}}{\text{ano}} \right] \quad (10)$$

$$SAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{\sum_i N_i} \left[ \frac{\text{h}}{\text{ano}} \right] \quad (11)$$

onde  $\lambda_i$  é a taxa de falha,  $N_i$  é o número de consumidores do ponto de carga  $i$  e  $U_i$  é o tempo de indisponibilidade do ponto de carga  $i$ .

### 3.1.7 CAIFI (Customer Average Interruption Frequency Index)

Este índice mede a frequência média de interrupções sustentadas para consumidores que experimentaram ao menos uma interrupção.

$$CAIFI = \frac{\sum \text{interrupções consumidoras}}{\text{Nº de consumidores com ao menos uma int.}} \left[ \frac{\text{int.}}{\text{ano}} \right] \quad (12)$$

$$CAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{CN} \left[ \frac{\text{int.}}{\text{ano}} \right] \quad (13)$$

onde  $CN$  é a quantidade de consumidores que sofreram ao menos uma interrupção durante um ano.

### 3.1.8 CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index)

Índice que mede o tempo médio para reestabelecer o serviço para o consumidor.

$$CAIDI = \frac{\sum \text{duração das interrupções consumidoras}}{\text{Nº de interrupções consumidoras}} \left[ \frac{\text{h}}{\text{ano}} \right] \quad (14)$$

$$CAIDI = \frac{\sum_i U_i N_i}{\sum_i \lambda_i N_i} \left[ \frac{\text{h}}{\text{ano}} \right] \quad (15)$$

Para obtenção dos índices SAIFI, SAIDI e CAIDI será utilizado uma abordagem analítica, que requer o emprego de técnicas de análise distintas dependendo da topologia do sistema estudado. Porém, três parâmetros básicos precisam ser estabelecidos: a taxa de falha  $\lambda$  de um componente [int./ano], indisponibilidade anual do serviço  $U$  [h/ano] e duração da interrupção  $r$  [horas].

Uma rede de distribuição pode ser definida de acordo com o arranjo de seus componentes no sistema, podendo ser desde uma associação série, paralelo, malha ou uma combinação desses. Uma rede que possui seus componentes associados em série está sujeita a interrupções caso qualquer um dos equipamentos falhe, já que o funcionamento do sistema depende da operação de todos os componentes. Caso o sistema precise que apenas um de seus componentes esteja em operação, o sistema é definido como paralelo.

Considerando um sistema série, define-se a taxa de falha em cada ponto do sistema como o somatório das taxas de falhas dos equipamentos.

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (16)$$

onde  $\lambda_s$  equivale a taxa de falha do ponto e  $\lambda_i$  representa a taxa de falha de cada componente.

A indisponibilidade do ponto de carga é definida como,

$$U_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times (r_i + r_{ei}) \quad (17)$$

onde  $r_i$  é o tempo de manutenção médio de cada componente e  $r_{ei}$  é o tempo médio que a equipe de manutenção demora para chegar ao local da falha.

O tempo médio de interrupção em cada ponto é tido através da equação (11).

$$r_s = \frac{U_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i (r_i + r_{ei})}{\sum_i \lambda_i} \quad (18)$$

Com os conceitos estabelecidos, agora é possível calcular os índices de confiabilidade de um sistema.

### 3.2 ESTUDO DE CASO

O indicador de falta utilizado é o WSO-11 que possui características importantes como: auto-ajuste de *trip*, sinalização de faltas permanentes ou momentâneas e conectividade com a central de comando. O sistema estudado possui nove nós, com quatro linhas de distribuição representando o tronco do alimentador e quatro distribuidores laterais (Bacalini, 2011) com dados mostrados na Tabela 1. O sistema também é composto por quatro chaves seccionadoras e oito indicadores de faltas espalhados pelo tronco e os distribuidores laterais, além de um disjuntor na saída da fonte como mostra a Figura 13.

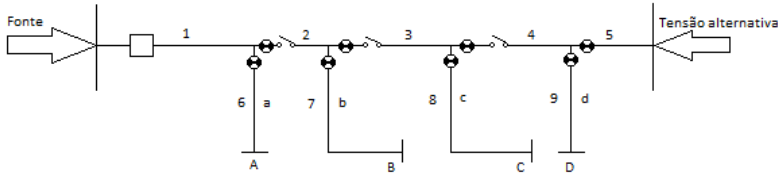


Figura 13 - Sistema do exemplo (Bacalini, 2011)

Dados do sistema são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 1 - Dados do sistema

Ponto de Carga	Número de Consumidores	Carga Média (kW)
A	1000	5000
B	800	4000
C	700	3000
D	500	2000

Os parâmetros de confiabilidade para o sistema são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de confiabilidade

$i$	Componente	Comprimento (km)	$\lambda$ (falhas/ano)	$r$ (horas)
1	Seção 1	2	0,2	4
2	Seção 2	1	0,1	4
3	Seção 3	3	0,3	4
4	Seção 4	2	0,2	4
5	Seção 5	2	0,2	4
6	Distribuidor a	1	0,2	2
7	Distribuidor b	3	0,6	2
8	Distribuidor c	2	0,4	2
9	Distribuidor d	1	0,2	2

São considerados quatro casos para estudo. Para todos os casos a alimentação é feita pela fonte principal e também pela fonte de tensão alternativa, e para proteção é utilizado apenas o disjuntor principal. O primeiro caso possui apenas o disjuntor em operação. No segundo caso são adicionados indicadores de falta para sinalização à equipe de

manutenção. No terceiro as chaves seccionadoras entram para auxiliar o reestabelecimento do serviço, porém os indicadores de falta são removidos. E por fim, no último caso o sistema está com todos os dispositivos instalados, as duas fontes de tensão, as chaves seccionadoras e também os indicadores de falta.

Para o caso 1 nota-se que uma falha em qualquer ponto acarreta no desligamento por completo do sistema, devido à abertura do único disjuntor. Logo podemos calcular o número de interrupções por ano no ponto A como sendo:

$$\lambda_A = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,6 + 0,4 + 0,2 = 2,4 \frac{\text{int.}}{\text{ano}}$$

O valor calculado de  $\lambda$  para o ponto de carga é o mesmo que para os outros pontos de cargas, já que a ocorrência de uma falta em qualquer ponto do sistema causa a atuação do disjuntor central.

Para calcular o tempo médio de deslocamento da equipe, leva-se em consideração que a equipe de manutenção percorre a rede de distribuição em uma velocidade média de 40 km/h. Como a equipe não possui informações sobre a falta precisa percorrer a linha até encontrá-la. Considerando que a equipe sai da fonte, ela percorrerá diferentes distâncias dependendo do local da falta. Por exemplo, se a falta ocorreu no distribuidor b, a equipe percorre a seção um, entra no distribuidor a, volta ao tronco principal passando pela seção dois e então entra no trecho da falta. Levando isso em consideração, o tempo de deslocamento calculado da equipe em cada trecho do sistema é mostrado pela Tabela 3.

Tabela 3 - Tempo médio de deslocamento sem indicadores de falta

<i>i</i>	Trecho da falta	Tempo médio de deslocamento
		da equipe <i>r<sub>ei</sub></i> (horas)
1	Seção 1	0,0250
2	Seção 2	0,1125
3	Seção 3	0,3125
4	Seção 4	0,4750
5	Seção 5	0,5750
6	Distribuidor a	0,0625
7	Distribuidor b	0,1625
8	Distribuidor c	0,3750
9	Distribuidor d	0,5125

A partir desses dados podemos calcular os valores de indisponibilidade do sistema por ano  $U_A$  e o tempo médio de interrupção como:

$$U_A = \sum_{n=1}^9 \lambda_{in} * (r_{in} + r_{en}) = 7,48 \left[ \frac{h}{ano} \right]$$

$$r_A = \frac{7,48}{2,4} = 3,12 \text{ horas}$$

Pode-se notar que os valores de indisponibilidade do sistema por ano para os demais pontos de carga são os mesmos que os calculados acima. Isso se deve ao fato de que o local da falta é indiferente para a atuação do disjuntor e o sistema só é reestabelecido após a atuação da equipe de manutenção. O tempo médio de interrupção para os outros pontos de carga do sistema também são os mesmos que para o ponto de carga A, pois não há dispositivos instalados na rede que possuam a capacidade de isolar a falta disponibilizando o serviço antes da manutenção.

Os índices de confiabilidade para o caso 1 são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados caso 1

<b>Índices do Sistema</b>	<b>Caso 1</b>
SAIFI [int./ano]	2,40
SAIDI [h/ano]	7,48
CAIDI [h/ano]	3,12

Para o caso 2, foram introduzidos os indicadores de falta, como ilustrado na Figura 13. A alocação de indicadores de falta em determinados pontos da rede de distribuição possui efeitos sobre o tempo em que a equipe demora a encontrar a falta no sistema. Por consequência, afetam também os valores finais dos índices SAIDI e CAIDI. Os novos valores de  $r_e$  são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tempo médio de deslocamento com indicadores de falta

<i>i</i>	Trecho da falta	Tempo médio de deslocamento da equipe $r_{ei}$ (horas)
1	Seção 1	0,0250
2	Seção 2	0,0625
3	Seção 3	0,1125
4	Seção 4	0,1750
5	Seção 5	0,2250
6	Distribuidor a	0,0625
7	Distribuidor b	0,1125
8	Distribuidor c	0,1750
9	Distribuidor d	0,2125

Com os novos dados calculam-se os valores de interrupções por ano  $\lambda_A$ , a indisponibilidade do sistema por ano  $U_A$  e o tempo médio de interrupção para o caso 2.

$$\lambda_A = 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,6 + 0,4 + 0,2 = 2,4 \frac{\text{int.}}{\text{ano}}$$

$$U_A = \sum_{n=1}^9 \lambda_{in} * (r_{in} + r_{en}) = 7,12 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]$$

$$r_A = \frac{7,48}{2,4} = 2,97 \text{ horas}$$

Como o disjuntor atua para falta em qualquer ponto do sistema, como no caso 1, os valores calculados para a taxa de falha no ponto de carga A são os mesmos para os demais. A Tabela 6 mostra os valores dos índices para o caso 2.

Tabela 6 - Resultados caso 2

<b>Índices do Sistema</b>	<b>Caso 2</b>
SAIFI [int./ano]	2,40
SAIDI [h/ano]	7,18
CAIDI [h/ano]	2,97

No caso 3, os indicadores de falta são removidos e inseridos chaves seccionadoras comandadas por um operador na subestação. Com isso, no momento em que a equipe de manutenção encontrar a falha, ela entra em contato com o operador na subestação que arranja aberturas no sistema de modo que não haja continuidade da interrupção para todas as áreas, diminuindo consideravelmente o valor de duração de interrupção por ano.

Considerando o tempo de deslocamento da equipe para cada trecho conforme a Tabela 3 e também um valor para decisão do arranjo de chaves  $r_r = 0,167$  horas (10 minutos), Os valores dos índices são calculados a seguir:

$$\begin{aligned}\lambda_{A,B,C,D} &= 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,6 + 0,4 + 0,2 \\ &= 2,4 \frac{\text{int.}}{\text{ano}}\end{aligned}$$

$$U_A = \lambda_6(r_{i6} + r_{e6}) + \lambda_1(r_{i1} + r_{e1}) + \sum_n \lambda_n(r_{en} + r_r) = 2,22 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]$$

$$n = 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9$$

$$r_A = \frac{2,22}{2,4} = 0,92 \text{ horas}$$

$$U_B = \lambda_7(r_{i7} + r_{e7}) + \lambda_2(r_{i2} + r_{e2}) + \sum_n \lambda_n(r_{en} + r_r) = 2,57 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]$$



$$n = 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9$$

$$r_B = \frac{2,57}{2,4} = 1,07 \text{ horas}$$

$$U_C = \lambda_8(r_{i8} + r_{e8}) + \lambda_3(r_{i3} + r_{e3}) + \sum_n \lambda_n(r_{en} + r_r) = 2,97 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]$$

$$n = 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9$$

$$r_C = \frac{2,97}{2,4} = 1,24 \text{ horas}$$

$$U_D = \lambda_9(r_{i9} + r_{e9}) + \lambda_4(r_{i4} + r_{e4}) + \lambda_5(r_{i5} + r_{e5}) \sum_n \lambda_n(r_{en} + r_r) \\ = 2,98 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]$$

$$n = 1, 2, 3, 6, 7, 8$$

$$r_D = \frac{2,98}{2,4} = 1,24 \text{ horas}$$

Os valores obtidos dos índices são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados caso 3

<b>Índices do Sistema</b>	<b>Caso 3</b>
SAIFI [int./ano]	2,40
SAIDI [h/ano]	2,68
CAIDI [h/ano]	1,12

O caso 4 possui todos os componentes ilustrados na Figura 13. Como os indicadores de faltas inseridos no sistema possuem comunicação entre eles e também com a central de operação na subestação, o operador das chaves seccionadoras já pode fazer o arranjo

das chaves antes mesmo de a equipe sair da subestação e localizar a falha. O tempo para abertura e escolha de posição das chaves é de  $r_r = 0,167$  horas. Também há diminuição nos tempos de deslocamento da equipe já que é identificado a localização da falta. Esse tempo é o mesmo da Tabela 5.

$$\begin{aligned}\lambda_{A,B,C,D} &= 0,2 + 0,1 + 0,3 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,6 + 0,4 + 0,2 \\ &= 2,4 \frac{\text{int.}}{\text{ano}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_A &= \lambda_6(r_{i6} + r_{e6}) + \lambda_1(r_{i1} + r_{e1}) \\ &\quad + r_r(\lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9) \\ &= 1,55 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]\end{aligned}$$

$$r_A = \frac{1,55}{2,4} = 0,65 \text{ horas}$$

$$\begin{aligned}U_B &= \lambda_7(r_{i7} + r_{e7}) + \lambda_2(r_{i2} + r_{e2}) \\ &\quad + r_r(\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_9) \\ &= 1,96 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]\end{aligned}$$

$$r_B = \frac{1,96}{2,4} = 0,82 \text{ horas}$$

$$\begin{aligned}U_C &= \lambda_8(r_{i8} + r_{e8}) + \lambda_3(r_{i3} + r_{e3}) \\ &\quad + r_r(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_9) \\ &= 2,39 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]\end{aligned}$$

$$r_C = \frac{2,39}{2,4} = 0,99 \text{ horas}$$

$$\begin{aligned}U_D &= \lambda_9(r_{i9} + r_{e9}) + \lambda_4(r_{i4} + r_{e4}) + \lambda_5(r_{i5} + r_{e5}) \\ &\quad + r_r(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8) = 2,42 \left[ \frac{h}{\text{ano}} \right]\end{aligned}$$

$$r_D = \frac{2,42}{2,4} = 1,01 \text{ horas}$$

Os valores dos índices de confiabilidade para o caso 4 são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados caso 4

<b>Índices do Sistema</b>	<b>Caso 4</b>
SAIFI [int./ano]	2,40
SAIDI [h/ano]	2,08
CAIDI [h/ano]	0,87

### 3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Comparando os resultados entre o caso 1 e o caso 2, nota-se uma melhora de 0,3 h/ano no índice SAIDI e 0,15 h/occ. no índice CAIDI. A inserção de chaves seccionadoras controladas remotamente por uma central faz como que os índices se reduzam drasticamente, chegando a apontar uma diferença maior que 4 h/ano pontos no índice SAIDI e mais de 1 h/occ. no CAIDI.

Associar o indicador de falta com a chave seccionadoras ainda diminui o índice SAIDI em 0,6 h/ano e o CAIDI em 0,25 h/occ., mostrando um resultado melhor quando comparado ao caso 1.



## 4 ANÁLISE SWOT

Muitos dos empreendedores utilizam a análise SWOT (Nakagawa, 20--) para avaliar negócios e criar planos de ações com intuito de reduzir os riscos e aumentar as chances de sucesso da empresa. SWOT é uma abreviação das palavras em inglês *strenghts*, *weakness*, *opportunities* e *threats*, que em português significam forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Para utilizar essa ferramenta cria-se uma lista de pontos fortes e fracos no ambiente interno, que pode ser controlado pela empresa, e também pontos fortes e fracos no ambiente externo, que a empresa não possui controle. Os pontos fortes internos são alocados como *strenghts*, enquanto que os fracos são *weakness*. Já no ambiente externo surgem os pontos fortes em *opportunities* e os fracos em *threats*.

Após a criação da lista é necessário analisar os itens para tomar um rumo do que deve ser feito, aproveitando os pontos fortes e as oportunidades e tentar extinguir ou minimizar o efeito das ameaças potenciais.

### 4.1 INDICADORES DE FALTA PRESENTES NO MERCADO

Para a escolha de um indicador de falta para realizar a análise SWOT foi construída a Tabela 9, que mostra alguns indicadores com suas características e realizado uma comparação entre os indicadores de falta de acordo com sua vida útil. Uma tabela mais detalhada está presente no apêndice A.

Tabela 9 - Indicadores de falta e suas características

<b>Modelo</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>Trip</b>	<b>Reset</b>	<b>Outras Características</b>
<b>S.T.A.R Current Reset Type</b>	< 45	Duas correntes de trip: 400 A e 800 A	Reset por corrente de carga	Função anti <i>inrush</i> . Filtro passa-baixa.
<b>S.T.A.R Eletrostatic Reset Type</b>	6,9		Reset por tensão na linha	
<b>S.T.A.R Variable Trip Current Type</b>	< 45	Trip por variação brusca de corrente ( <i>di</i> )	Reset por corrente de carga	
<b>AR360</b>	4,16 a 34,5	Trip de ajuste automático de 50 A a 1200 A	Reset por tempo de 4 horas	Função anti <i>inrush</i> . Filtro passa-baixa. Sinaliza faltas permanentes e temporárias
<b>BER</b>	10,35 a 69		Reset por tensão na linha	Função anti <i>inrush</i> . Filtro passa-baixa.
<b>WSO</b>	4,16 a 34,5		Reset por corrente de carga	Função anti <i>inrush</i> . Filtro passa-baixa. Possui comunicação wireless. Armazena dados pré e pós falta
<b>JYZ-FF</b>	5 a 38	Trip ajustável pelo usuário	Reset por tempo definido pelo usuário	Comunicação com possibilidade de ajustes remotos, monitoramento e registro de eventos
<b>CL2 &amp; CL0.5</b>	6 a 110	Trip de ajuste automático entre 20 A a 500 A	Reset por tempo ou reenergização da linha	Função anti <i>inrush</i> . Comunicação por rádio frequência

## 4.2 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA

Para fazer uma comparação entre os indicadores apresentados são dadas notas para características de cada indicador conforme a lista a seguir:

- *Trip* fixo: 1 ponto
- *Trip* com auto ajuste: 2 pontos
- *Reset* por tempo: 1 ponto
- *Reset* por detecção de corrente ou de tensão: 2 pontos
- Função anti *inrush*: 2 pontos
- Filtro passa-baixa: 1 ponto
- Comunicação com central: 2 pontos
- Registro de eventos: 1 ponto

A Figura 14 mostra um gráfico com as notas de cada indicador de falta pela vida útil da bateria do equipamento. Se o indicador de falta não possuir bateria fica adotado uma manutenção de 30 em 30 anos para verificar seu funcionamento.

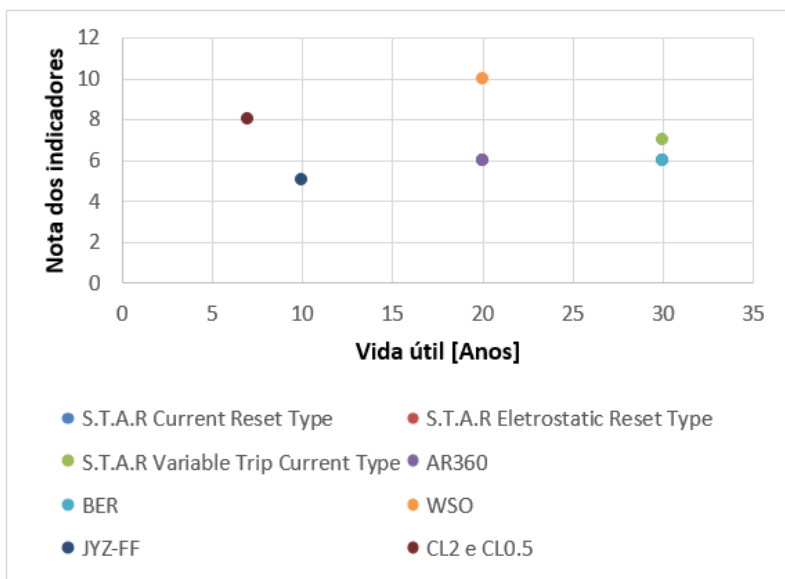


Figura 14 - Gráfico de comparação dos indicadores de falta

Chamado de WSO-11 e fabricado pela empresa SEL (*Schewitzer Engineering Laboratories*) esse indicador de falta foi o melhor avaliado pelos critérios utilizados e por isso escolhido para realizar a análise SWOT.

#### 4.3 ANALISE SWOT DO INDICADOR DE FALTA WSO

O indicador de falta WSO, mostrado pela Figura 15, possui comunicação wireless 2,4 GHz entre eles e um ponto de acesso. Do ponto de acesso, a comunicação pode ser feita por qualquer conexão disponível, incluindo redes móveis, radio ou fibra; um computador com sistema SCADA recebe esses dados e então o indicador de falta envia alertas de falta permanente, temporária e perturbações com informações da localização e registro do evento pré-falta e pós-falta. Enviam também, dados coletados da linha a cada 24 horas e reportam o nível de bateria.



Figura 15 - SEL WSO-11

#### ***STRENGTHS***

Como pontos fortes podem-se listar itens como:

- Conectividade com internet e sistema SCADA. Esse pode ser considerado o maior diferencial entre os outros concorrentes.



- Auto ajuste do valor de *trip*, não necessitando que uma equipe refaça o ajuste toda vez que a corrente de carga aumente ou diminua.
- Reporta dados de corrente de carga, tensão no intervalo de 24 horas, e também reporta mesmos dados em momento anterior e posterior há um evento.

### ***WEAKNESS***

Alguns pontos fracos internos podem ser:

- Utilizar baterias para alimentação do equipamento. Assim, a equipe precisará realizar a troca da bateria sempre que essa acabar.
- Não possuir indicação local luminosa, o que dificulta a identificação a noite do local da falta.
- Não vender o produto no Brasil, e perder um mercado em potencial.

### ***OPORTUNITIES***

- Poucos concorrentes no mercado brasileiro, podendo utilizar de sedes já instaladas no país para vender seus produtos. Possibilidade de exploração do conceito de redes inteligentes.

### ***THREATS***

- Tempo adversos como, temporais que dificultam a comunicação entre os equipamentos.
- Roubos por ser um equipamento caro e de fácil remoção.
- Imposto de importação que dificulta a compra do produto no Brasil.

### **PLANOS DE AÇÃO**

Os planos de ação são criados relacionando pontos fortes com pontos fracos para diminuir fraquezas do produto. É possível também relacionar pontos fortes para criar oportunidades de negócio.

1. Plano de ação 1: Como o produto possui auto ajuste, utilizar a corrente de carga dos condutores para carregar as baterias do equipamento já que não é necessário remover o indicador de falta quando a carga aumenta, e também criar um mecanismo que dificulta a remoção do equipamento por qualquer pessoa, diminuindo o roubo.
2. Plano de ação 2: Aproveitar da pequena concorrência e dos representantes no Brasil para trazer esse produto para o País e negociar uma diminuição de imposto para importação.
3. Plano de ação 3: Utilizar a comunicação entre os indicadores de falta para implementar uma *smartgrid* em cidades importantes.

#### 4.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Fazer uma análise SWOT de um produto não requer tempo considerável e traz muitos benefícios. Listar os pontos fortes e fracos e combina-los para resolver problemas ou intensificar pontos positivos é a principal ideia desse tipo de análise.

O indicador de falta WSO possui muitos pontos positivos fortes que podem ser aproveitados para realizar outras funções além de sua função principal; como auxiliar uma rede inteligente ou carregar a bateria utilizando a corrente de carga da rede.

## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise do funcionamento de diferentes tipos de indicadores de falta. Além disso, permitiu realizar casos exemplos de um sistema de distribuição com e sem indicadores de falta, sendo possível a apresentação e comparação de resultados obtidos. Permitiu também utilizar uma análise SWOT para elencar possíveis vantagens de um indicador de falta em relação a seus concorrentes.

Ao realizar um estudo sobre os aspectos de funcionamento de indicadores de falta, verificou-se que mesmo sendo utilizado desde 1940, suas mais importantes melhorias ocorreram com o avanço da tecnologia de eletrônicos. Hoje indicadores de falta possuem uma certa “inteligência” não só para detectar correntes de falta e sinalizá-las, como também se comunicar com um sistema SCADA e reportar sua localização.

O exemplo realizado e apresentado no capítulo 3, demonstra a melhoria dos índices que avaliam a qualidade do serviço de entrega de energia elétrica quando indicadores de falta são instalados na rede de distribuição. Com auxílio das tabelas 4, 6 7 e 8 é possível notar uma melhora significativa dos índices com a inserção dos indicadores de falta no sistema.

Dada à importância de indicadores de falta, buscou-se no mercado atual indicadores de falta com qualidades que se destacam dos demais. Essas qualidades foram elencadas, bem como os defeitos, com intuito de se criar uma análise SWOT sobre o produto escolhido (WSO). Constatou-se que possuir comunicação com um sistema SCADA é um grande diferencial por trazer a possibilidade futura de explorar o conceito de rede inteligente.

A utilização de indicadores de falta permite a equipe de manutenção dirigir-se ao ponto da falta mais precisamente. Diminui o tempo em que pontos de cargas ficam sem abastecimento de energia elétrica, melhorando os índices da concessionária a satisfação do cliente.



## REFERÊNCIAS

**Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.** Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica.

**Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.** Nota técnica nº 0075/2011-SRD/ANEEL. 2011.

**Bacalini, Marcelo.** Metodologia Experimental para Testes Padronizados de Confiabilidade em Dispositivos Indicadores de Falta. Dissertação (Dissertação em engenharia elétrica) - EESC/USP. São Carlos : 2011.

**Brígida, Angela Costa Santa.** Caracterização e desenvolvimento de sensores ópticos de corrente elétrica para aplicações em linhas de alta tensão. Tese (Doutorado em engenharia elétrica) - UFPA. Belém : s.n., 2017.

**Companhia Paranaense de Energia.** NTC 810101: Indicador de Falta. 2013.

**E. O. SCHWEITZER MANUFACTURING A DIVISION OF SEL.** Fault Indicators for the Safe, Reliable, and Economical Operation of Modern Power Systems. Lake Zurich : s.n., 2010. LM00060-01.

**Eddy So, Fellow, Ren, Shyan e Bennett, David A.** High-Current High-Precision Openable-Core AC and AC/DC Current Transformer. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1993, Vol. 42, pp. 571-576.

**Ferreira, Anapaula N., et al. 2011.** Sistema de Localização de Falta na Rede de Distribuição da CELPE. Anais do VI CITENEL. 2011.

**IEEE Std 1366-2012.** IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices. 2012.

**IEEE Std. 1610-2016.** IEEE Guide for the Application of Faulted Circuit Indicators on Distribution Circuits. 2016.

**Krajnak, David J.** Faulted Circuit Indicators and System Reliability. Pewaukee : s.n., [20-?].

**Mamede Filho, João.** Manual de Equipamentos Elétricos. Rio de Janeiro : LTC Editora, 2005. 85-216-1436-5.

**Moreto, Miguel.** Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia: uma Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais. Dissertação (Dissertação em engenharia elétrica) - UFRGS. Porto Alegre : 2005.

**Nakagawa, Marcelo.** [20--]. Ferramenta: Análise SWOT (Classico). São Paulo : Editora Globo, [20--].

**R, Billinton e Allan, R. N.** Reliability Evaluation of Power System. New York : Plenum Press, 1984.

**Santos, Josemir Coelho, et al.** Sinalizador Luminoso Monofásico de Falhas para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica até 69 kV.

**Scheitner Engineering Laboratories, Inc.** Case Study - We Energies Reduces Outage Durations. s.l. : E. O. SCHWEITZER MANUFACTURING A DIVISION OF SEL, 2009.

**Tang, Yong.** Fault Indicator in Transmission and Distribution System. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Bath. Bath : s.n., 2000.

**Zilio, S.** Óptica moderna. Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2009.

## APÊNDICE A – Tabela de Indicadores de Falta

Tabela completa de indicadores de falta pesquisados no mercado durante o segundo semestre de 2018.

Tabela 10 - Tabela completa de indicadores de falta

	Cooper Pov		
	Current Reset Type	Delayed Reset Type	Electrostatic Reset Type
<b>Trip</b>	Low Trip (400 A) e High Trip (800 A)	Low Trip (400 A) e High Trip (900 A)	Low Trip (400 A) e High Trip (800 A)
<b>Range de tensão</b>	< 45kV (fase-fase)		6,9 kV (fase-terra)
<b>Range de corrente</b>	até 25 kA por 10 ciclos	até 10 kA por 10 ciclos	até 25 kA por 10 ciclos
<b>Diâmetro do condutor</b>	6,4 mm a 51 mm	17 mm a 51 mm	6,4 mm a 51 mm
<b>Sinalização</b>	indicação visual de 180°	LED de alto brilho	indicação visual de 180°
<b>Reset</b>	Reset quando há uma corrente superior ou maior que 2,4 A durante 5 min.	Reset por tempo (1, 2, 4 ou 6 horas). Também possui reset manual	Reset quando há uma tensão mínima de 6,9 kV no condutor por no 8 min.
<b>Vida útil</b>	30 anos	15 anos	20 anos
<b>Outras características</b>	Para evitar ativamente por correntes inrush, o dispositivo possui um tempo "morto". Possui um filtro passa baixa para evitar acionamento devido a transitórios de alta frequência		Para evitar ativamente por correntes inrush, o dispositivo possui um tempo "morto". Possui um filtro passa baixa para evitar acionamento devido a transitórios de alta frequência

ver Systems				AR360	AR-OH
Manual Reset Type	Variable Trip Current Type	Programmable Delayed Type			
Low Trip (400 A) e High Trip (900 A)	Trip por variação brusca da corrente (di)	Auto ajustável: Low Trip (175 A) e High Trip (800 A)	Auto ajustável entre 50 A e 1200 A	Auto ajustável entre 50 A e 1200 A	
	< 45kV (fase-fase)	5 kV a 69 kV (fase-fase)	4160 V a 34,5 kV	4160 V a 69 kV	
até 25 kA por 10 ciclos	até 25 kA por 10 ciclos	até 25 kA por 10 ciclos	25 kA por 10 ciclos	25 kA por 10 ciclos	
6,4 mm a 51 mm	6,4 mm a 51 mm	6,4 mm a 51 mm			
Indicação visual de 180°	Indicação visual de 180°	Dois LEDs	LEDs de alto brilho 360	3 LEDs de alto brilho	
	Reset quando há uma corrente superior ou maior que 2 A durante 5 min.	Reset por tempo configurado em campo: 2, 41 e 24 horas. Também possui reset manual	Reset por tempo de fábrica.	Reset por tempo de fábrica	
20 anos	30 anos	10 Anos	20 anos	20 anos	
	Para evitar ativamento por correntes Inrush, o dispositivo possui um tempo "morto". Possui um filtro passa baixa para evitar acionamento devido a transitórios de alta frequência	Pode identificar faltas temporárias e faltas permanentes. Possui um sistema para não detectar correntes Inrush.	Identifica e sinaliza faltas temporárias e permanentes, função anti <i>Inrush</i> , filtro passa baixa.	Identifica e sinaliza faltas temporárias e permanentes, função anti <i>Inrush</i> , filtro passa baixa	



SEL		Four-Faith Smart Power (W/E)			
BER	ERL	WSO	JYZ-FF	JYZ-FF	
Auto ajustável entre 50 A e 1200 A	Auto ajustável entre 50 A e 1200 A	Auto ajustável entre 50 A e 1200 A	Trip ajustável pelo usuário	Trip ajustável pelo usuário	
10,35 a 69 kV	10,35 kV a 36 kV	4160 V a 34,5 kV	5 a 38 kV	5 a 38 kV	
25 kA	25 kA	25 kA			
LED de alto brilho	Bandeira refletiva	Bandeira refletiva	LED 360	LED 360	
Reset por sensor de tensão na rede	Reset por sensor de tensão na rede	Reset por corrente de carga	Reset por tempo definido pelo usuário	Reset por tempo definido pelo usuário	
30 anos		20 anos	10 anos	10 anos	
Possui um indicador de carga da bateria, função anti <i>Inrush</i> .	Não possui bateria, por isso a vida útil dele é muito alta. Função anti <i>Inrush</i>	Possui função anti <i>Inrush</i> . Comunicação (wireless) com informações como local do FCL, nível de bateria, e registro de eventos. Filtro passa baixa.		Possui comunicação, com possibilidade de ajuste de trip, reset remoto, monitoramento em tempo real de corrente e registro de eventos.	

Streamer			
CL25	CL2 e CL0,5	TECSYS	CELSA
Trip ajustável (100 A, 250 A, 500 A e 1000 A)	Trip automático entre 20 A a 500 A		Trip ajustável (10 A até 1000A)
6 a 110 KV	6 a 110 KV	69 KV	9 a 69 KV
25 KA	25 KA	20 KA	25 KA
		5 a 30 mm	6 mm a 31 mm (42 mm)
LED branco	LED	não possui	LEDs de alto brilho
Reset por tempo ou reenergização da linha	Reset por tempo ou reenergização da linha	não possui	Reset automático por tempo e tensão na linha
10 anos	7 anos	10 anos	10 anos
Possui função anti <i>Inrush</i>	Possui função anti <i>Inrush</i> , comunicação por radio frequência.	Geolocalização, memória para 100 eventos, comunicação com central via DNP3 e também USB no local	Função anti <i>Inrush</i> , detecta e sinaliza falta temporária e permanente, possui módulo RF (extra), memória de eventos