

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

WILLIAM PINHEIRO SILVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

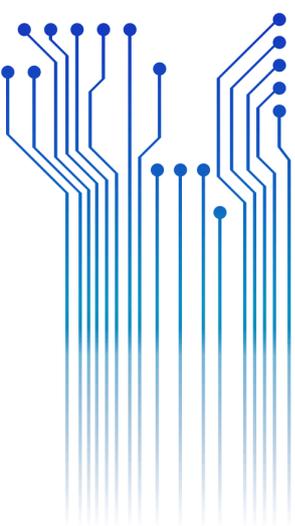


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE  
TRANSMISSÃO UTILIZANDO A TEORIA DE ONDAS  
VIAJANTES: VALIDAÇÃO EM TEMPO REAL VIA RTDS™



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande – Paraíba – Brasil  
William Pinheiro Silva, agosto de 2017

WILLIAM PINHEIRO SILVA

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
UTILIZANDO A TEORIA DE ONDAS VIAJANTES: VALIDAÇÃO  
EM TEMPO REAL VIA RTDS™

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Engenheiro  
Eletricista.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Orientador:

Professor Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba, agosto de 2017

WILLIAM PINHEIRO SILVA

LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
UTILIZANDO A TEORIA DE ONDAS VIAJANTES: VALIDAÇÃO  
EM TEMPO REAL VIA RTDS™

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Engenheiro  
Eletricista.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em     /     /

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

**Professor Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

À minha família, em especial aos meus pais Aroldo e Vanusa e aos meus irmãos Max Weber e Damy, que sempre me apoiaram e me deram suporte para a realização deste sonho, dedico.

# AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo incentivo dado na realização deste sonho. Aos meus pais, Aroldo e Vanusa, pela base sólida que me proporcionaram, pelo amor, cuidados e sacrifícios que têm feito por mim e por acreditarem e me apoiarem ao longo desta jornada.

Aos meus irmãos, Max Weber e Damy, por estarem sempre ao meu lado, por me incentivarem, pelo amor e pela amizade de sempre.

Agradeço a Deus por permitir a realização deste sonho, por me dar sabedoria e paciência para enfrentar os momentos de dificuldade e por tudo que tem feito em minha vida.

Agradeço a essa Instituição UFCG, a todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, pela atenção, apoio e colaboração enquanto graduando. Agradeço aos colegas do Laboratório de Sistemas Elétricos pelo auxílio e dedicação durante as atividades de pesquisa.

A todos do Grupo PET, pela amizade, pelo aprendizado e pelo apoio ao longo da graduação.

Ao meu professor e orientador, Damásio Fernandes, pela confiança, paciência, e pela amizade desde o início desta graduação. Agradeço pela atenção dedicada às sugestões e pelo incentivo durante todos esses anos.

Agradeço a todos os amigos, pelo carinho e companheirismo, por me incentivarem ao longo do curso e por fazerem parte da minha vida.

A todos que, de alguma forma, enriqueceram minha vida e colaboraram direta ou indiretamente na concretização deste sonho, meu muito obrigado!

*“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”*

Leonardo da Vinci.

# RESUMO

Ao possibilitarem o transporte de energia elétrica – desde sua geração até os centros consumidores – as linhas de transmissão (LT) possuem um papel de extrema importância para os sistemas elétricos de potência (SEP), viabilizando o transporte da energia elétrica até o seu destino final. Por possuírem grandes extensões, as LT são bastante susceptíveis a ocorrência de distúrbios devido a causas naturais como, por exemplo, descargas atmosféricas e curtos-circuitos, popularmente denominados de faltas e considerados como o tipo de distúrbio mais preocupante para o SEP. As concessionárias de energia buscam realizar a análise e a localização desses defeitos de forma rápida e contínua, por isso é de extrema importância a promoção de estudos de métodos eficientes para localização de faltas e voltados para o desenvolvimento e o aprimoramento dessas técnicas. Percebe-se a nítida dificuldade de localizar faltas em longas LT quando não se dispõe de uma estimativa inicial do local do defeito, assim, este trabalho tem por objetivo realizar uma avaliação e a implementação do método baseado na teoria de ondas viajantes para a localização de faltas em LT em uma ferramenta de simulação em tempo real, o RTDS™ (*Real Time Digital Simulator*), adquirido pela UFCG. Para a validação do método, foram consideradas diferentes situações, tais como ângulo de incidência, ponto de falta, tipo de falta e resistência de falta, verificando assim a eficiência do método em condições diversas. Foram apresentados os resultados das simulações da localização de faltas classificando-os como satisfatórios ou não satisfatórios, dependendo dos níveis de erro verificados. As simulações realizadas comprovaram a eficiência do método estudado, fornecendo a estimativa da localização da falta na ocorrência de distúrbios.

**Palavras-chave:** Localização de faltas; simulação de faltas em LT; distúrbios elétricos; transitórios eletromagnéticos; RTDS™.

# ABSTRACT

By enabling the transportation of electric energy - from generation to consumer centers - transmission lines (TL) have an extremely important role for the electric power systems, because they make possible the transportation of electric energy to the final destination. Due to their large extensions, the transmission lines are quite susceptible to the occurrence of disturbances provoked by natural causes such as, for example, atmospheric discharges and short circuits, popularly called faults and considered as the most disturbing type of disturbance for the electrical system. The energy companies seek to perform the analysis and location of these defects in a fast and continuous way, so it is extremely important to promote studies of efficient methods for locating faults and for the development and improvement of these techniques. It is possible to observe the clear difficulty of locating faults in long transmission lines when an initial estimate of the defect site is not available, so this project aims to carry out an evaluation and implementation of the method based on the theory of traveling waves for the location of faults in transmission lines in a real time simulation tool, RTDS<sup>TM</sup> (Real Time Digital Simulator), acquired by the UFCG. For the validation of the method, different situations were considered, such as angle of incidence, fault point, type of fault and fault resistance, thus verifying the efficiency of the method under different conditions. The results of the fault location simulations were classified as satisfactory or unsatisfactory, depending on the observed error levels. The simulations proved the efficiency of the method studied, providing an estimate of the fault location in the occurrence of disturbances.

**Keywords:** Fault location; fault simulation in TL; electrical disturbances; electromagnetic transients; RTDS<sup>TM</sup>.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Metodologia da pesquisa.....	13
Figura 2: Racks do RTDS™ disponíveis no comércio.....	22
Figura 3: Cartão GTWIF.....	23
Figura 4: Cartão GPC.....	24
Figura 5: Cartões para a entrada e a saída de sinais analógicos e digitais: (a) GTAO; (b) GTAI; (c) GTDO; (d) GTDI.....	25
Figura 6: Cartão GTFPI.....	26
Figura 7: Cartão GTNET.....	27
Figura 8: Interface do File Manager.....	28
Figura 9: Interface do <i>Draft</i> .....	28
Figura 10: Interface do <i>TLine</i> .....	29
Figura 11: Interface do <i>Runtime</i> .....	29
Figura 12: Interface do <i>C-Builder</i> .....	30
Figura 13: Esquema de funcionamento do sistema localizador de faltas.....	31
Figura 14: Diagrama de reflexões para faltas em linhas de transmissão.....	32
Figura 15: Uso da Tdq0 para detecção de transitórios: (a) Sistema de eixos; (b) Diagrama fasorial.....	33
Figura 16: Detecção de transitórios em um registro oscilográfico real via Tdq0: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Tensão de eixo direto $V_d$ ; (c) Coeficientes $c_{dif}$ ; (d) Energia $\xi_{dif}$ dos coeficientes $c_{dif}$ .....	35
Figura 17: Determinação do fator de sensibilidade $fsb$ .....	36
Figura 18: Detecção de transitórios: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Energia $\xi_{dif}$ dos coeficientes $c_{dif}$ .....	37
Figura 19: Diagrama de reflexões referente a uma falta no ponto $f$ de uma LT monitorada em dois terminais.....	38
Figura 20: Determinação do período $ t_{11} - t_{21} $ através do método proposto: (a) Tensão trifásica no terminal 1 da LT; (b) Tensão trifásica no terminal 2 da LT; (c) Energia $\xi_{dif}$ no terminal 1; (d) Energia $\xi_{dif}$ no terminal 2; (e) Canais digitais utilizados.....	39
Figura 21: Diagrama de blocos para localização em tempo real de faltas em LT via algoritmo.....	40
Figura 22: Sistema de aquisição de dados modelado no RTDS™.....	41
Figura 23: Sistema localizador de faltas implementado no RTDS™.....	42
Figura 24: Sistema elétrico simplificado.....	43
Figura 25: Implementação dos dados da LT no módulo <i>TLine</i> do RTDS™.....	44
Figura 26: Número de simulações satisfatórias para um total de 340 casos por tipo de falta: (a) Em número de casos (b) Em porcentagem.....	45
Figura 27: Médias e desvios padrão dos erros das localizações estimadas: (a) Médias $\mu_{km}$ e desvios padrão $\sigma_{km}$ dados em km (b) Médias $\mu\%$ e desvios padrão $\sigma\%$ dados em porcentagem.....	46
Figura 28: Análise dos erros das localizações estimadas: (a) Médias $\mu\%$ e desvios padrão $\sigma\%$ para variação de resistência de falta (b) Médias $\mu\%$ e desvios padrão $\sigma\%$ para variação de ângulo de incidência de falta.....	48

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1: Classificação dos métodos dos tipos A, B, C e D para localização de faltas.</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 2: Resumo da revisão bibliográfica referente aos métodos de detecção e localização de faltas.</b>	<b>19</b>
<b>Tabela 3: Resumo dos principais tipos de cartões presentes no RTDS™ e suas funções.</b>	<b>22</b>
<b>Tabela 4: Tabela verdade para uma porta lógica OU-Exclusivo.</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 5: Dados da LT do SEP simplificado.</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 6: Dados dos equivalentes de Thévenin do SEP simplificado.</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 7: Características de falta adotadas durante as simulações em tempo real via RTDS™.</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 8: Resultados gerais das simulações em tempo real via RTDS™.</b>	<b>49</b>

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1.1. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO</b> .....	11
<b>1.2. MOTIVAÇÃO</b> .....	11
<b>1.3. OBJETIVOS</b> .....	12
<b>1.4. METODOLOGIA</b> .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>3. SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL VIA RTDS™</b> .....	20
<b>3.1. HARDWARES DO RTDS™</b> .....	21
<b>3.2. SOFTWARES DO RTDS™</b> .....	27
<b>4. DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LT VIA TRANSFORMADA DE PARK</b> .....	31
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	40
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	50
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	51

# 1. INTRODUÇÃO

Nesta seção são apresentados a delimitação do estudo realizado, os objetivos da pesquisa, bem como os elementos introdutórios do trabalho abordado.

## 1.1. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso se enquadra na linha de pesquisa Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, desenvolvida pelo Grupo de Sistemas Elétricos – GSE, que faz parte do Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

O trabalho teve como objetivo avaliar e validar a localização de faltas em LT pelo método proposto por LOPES (2011b) utilizando um simulador em tempo real. Para isso, utilizaram-se diversos cenários e configurações de falta, tais como ângulo de incidência, ponto de falta, tipo de falta e resistência de falta na LT.

## 1.2. MOTIVAÇÃO

Por possibilitarem o transporte de energia elétrica – desde sua geração até os centros consumidores – as LT possuem um papel de extrema importância para os SEP. No Sistema Interligado Nacional (SIN), por exemplo, LT longas são largamente utilizadas, uma vez que a geração de energia elétrica no Brasil se baseia predominantemente no potencial hidrelétrico, o qual, por sua vez, existe de forma dispersa. Assim, é importante que os SEP garantam um alto grau de confiabilidade na continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o sistema de transmissão nacional já soma mais de 125.000 km de extensão. Só a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) possui aproximadamente 20.000 km de LT operando nas tensões de 500 kV, 230 kV, 138 kV e 69 kV. Já em outros SEP, como o de Itaipu, podem ser encontradas LT com comprimentos da ordem de 900 km interligando as subestações de Foz do Iguaçu-PR e Tijuco Preto-SP.

Quanto maior a LT, maior será a susceptibilidade destas à ocorrência de distúrbios. A geografia do território brasileiro exige que o sistema de transmissão de energia elétrica no país seja caracterizado por longas LT que, além de ligar as unidades geradoras aos grandes centros consumidores, também interligam os SEP das diferentes regiões.

Por possuírem grandes extensões, as LT são bastante susceptíveis a ocorrência de distúrbios devido a causas naturais, como por exemplo descargas atmosféricas e curtos-circuitos, popularmente denominados de faltas e considerados como o tipo de distúrbio mais preocupante para o SEP. Assim, a transmissão da energia deve ocorrer com níveis mínimos de perdas e apresente boa continuidade de serviço, tornando a realização de um diagnóstico rápido e preciso de defeitos ocorridos no sistema de transmissão imprescindível para evitar desligamentos prolongados, fato este que tem aumentado a procura por meios de localizar rapidamente o ponto da LT a ser reparado.

Normalmente, são utilizadas pelas empresas de energia vias terrestres e/ou helicópteros para identificar o local de ocorrência do defeito, porém, este procedimento pode ser em alguns casos lento, a depender do comprimento da LT. Com isso, percebe-se a nítida dificuldade de localizar faltas em longas LT quando não se dispõe de uma estimativa inicial do local do defeito, evidenciando, portanto, a relevância da utilização de métodos eficientes para localização de faltas e dos estudos voltados para o desenvolvimento e o aprimoramento dessas técnicas.

### 1.3. OBJETIVOS

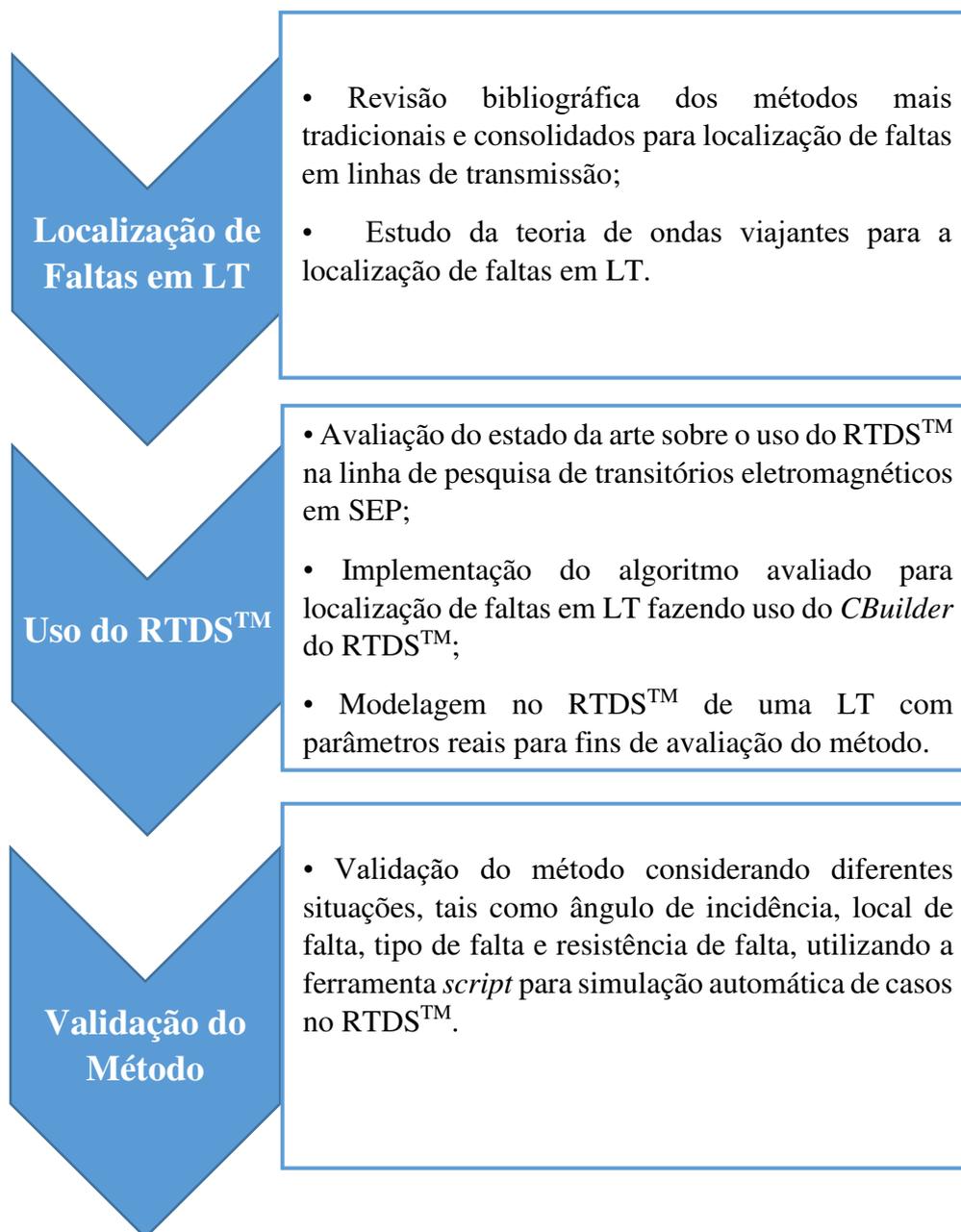
O objetivo geral deste trabalho é realizar uma avaliação e a implementação do método baseado na teoria de ondas viajantes para a localização de faltas em LT em uma ferramenta de simulação em tempo real, o RTDS<sup>TM</sup> (*Real Time Digital Simulator*).

Desta forma, espera-se promover uma avaliação mais criteriosa do algoritmo de localização de falta proposto por LOPES (2011b) no que diz respeito à sua aplicabilidade no monitoramento em tempo real de faltas em SEP.

## 1.4. METODOLOGIA

Esta seção destina-se a apresentar a metodologia utilizada no estudo, evidenciando a caracterização da pesquisa, o ambiente da pesquisa e os procedimentos metodológicos. Serão apresentados os conceitos fundamentais sobre o simulador em tempo real utilizado além da detecção de transitórios e localização das faltas na implementação do método avaliado, conforme mostrado na Figura 1.

**Figura 1: Metodologia da pesquisa**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

O estudo foi realizado no Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde se encontra o RTDS™.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por possuírem grandes extensões, a localização de faltas em LT foi classificada durante muito tempo como uma tarefa complicada, pois, normalmente, as empresas de energia elétrica fazem uso de helicópteros e/ou carros na busca do ponto de ocorrência do defeito. Porém, dependendo da extensão da LT, esse procedimento pode ser bastante lento.

Os algoritmos empregados na localização de faltas dividem-se em dois grupos: os métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental e os métodos baseados na teoria de ondas viajantes (ou simplesmente métodos TWFL). Os algoritmos deste último grupo se popularizaram e se baseiam na análise de transitórios provenientes do próprio distúrbio, os quais se propagam ao longo da LT em forma de ondas viajantes. Sendo mais antigos, os métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental baseiam-se no cálculo dos fasores de tensão e corrente medidos em pontos específicos do SEP em questão.

Utilizando os próprios distúrbios gerados pela falta, foram criadas pesquisas a fim de determinar o ponto de localização e de tornar mais precisa a localização das faltas em LT, suprimindo as limitações dos métodos baseados em componentes de frequência fundamental. Trabalhos como o de DOMMEL & MICHELS (1978) apresentaram conceitos de proteção associados à análise de ondas viajantes provenientes de faltas.

Dentre as técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes, os métodos baseados na análise de transitórios no domínio do tempo (TWFL) constituem o maior grupo. Os instantes de chegada de ondas viajantes provenientes da falta em determinados pontos do SEP monitorado são detectados por estes algoritmos.

Atualmente, várias técnicas que utilizam diferentes análises e conceitos para localizar o ponto de ocorrência do defeito podem ser encontradas na literatura. Dentre estas, se destacam os métodos baseados na medição de impedância (WISZNIEWSKI, 1983), os algoritmos baseados nos parâmetros da LT (GOPALAKRISHNAN *et al.*, 2000), os algoritmos baseados nos perfis de tensão (ZAMORA *et al.*, 1996) e os algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes (DOMMEL; MICHELS, 1978; GALE *et al.*, 1993; JAMALI; GHEZELJEH, 2004; LOPES, 2011). Estes últimos são conhecidos no meio científico como algoritmos TWFL, sigla proveniente da expressão em inglês

*Travelling Waves Fault Locators*. Algumas outras técnicas funcionam basicamente a partir do processamento de fasores fundamentais de tensão e corrente ao longo do SEP, diferindo entre si apenas no uso dos parâmetros da LT e no equacionamento utilizado (RADOJEVIC *et al.*, 2009; JOHNS; JAMALI, 1990; GIRGIS *et al.*, 1992).

De acordo com SILVA (2003), os algoritmos baseados nos componentes de frequência fundamental registrados em um único terminal geralmente fazem uso da impedância aparente calculada em relação ao ponto de falta e das correntes de pré-falta para calcular a localização da falta. Entretanto, os mesmos estão sujeitos a erros devido à contribuição de correntes provenientes dos alimentadores remotos e também devido à resistência de falta. Nesses métodos é necessário que se identifique o tipo de falta ocorrida, pois o equacionamento para cada tipo de falta é diferente dos demais.

Os métodos TWFL de localização de faltas são classificados por GALE *et al.* (1993) em quatro grupos. O número de terminais monitorados, a utilização de pulsos elétricos e a utilização de ondas refletidas em um mesmo terminal são alguns dos critérios para esta classificação. Os métodos são separados em quatro grupos, denominados A, B, C e D.

Na Tabela 1, apresenta-se como os métodos são separados, os tipos A e C monitoram apenas um terminal e utilizam ondas refletidas, porém os métodos do tipo C utilizam pulsos elétricos, enquanto os métodos do tipo A não utilizam. Por sua vez, os métodos tipo B e D utilizam dois terminais para fazer o monitoramento. Os métodos tipo B também fazem uso de pulsos elétricos e de ondas refletidas. Os tipo D não utilizam nem pulsos elétricos e nem ondas refletidas.

**Tabela 1: Classificação dos métodos dos tipos A, B, C e D para localização de faltas.**

Classificação Tipo do método	Utiliza pulsos elétricos	Número de terminais utilizados		Utiliza ondas refletidas
		1	2	
TIPO A		√		√
TIPO B	√		√	√
TIPO C	√	√		√
TIPO D			√	

Fonte: MELO (2013).

O problema da localização de faltas é tratado como um problema de estimação de parâmetros do sistema dinâmico, no qual, a resposta do sistema físico é comparada com o modelo de parâmetros concentrados. Os parâmetros do modelo são variados, até que uma combinação adequada seja obtida com a resposta física do sistema (SILVA, 2003).

Na literatura, as fontes de erro tradicionais dos métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental são consideradas mais impactantes sobre a precisão da localização da falta do que as fontes de erro dos métodos baseados na teoria de ondas viajantes (MOUTINHO *et al.*, 2010). Por isso, os métodos TWFL ganharam bastante destaque no âmbito da engenharia elétrica a partir da década de 90, principalmente por possuírem boa confiabilidade em relação às fontes de erro clássicas.

A principal motivação para elaboração destes algoritmos foi a busca por alternativas capazes de suprimir as limitações apresentadas pelos métodos baseados na análise de fasores fundamentais. Com o passar dos anos, vários trabalhos sobre os métodos TWFL foram elaborados visando a minimização das fontes de erro atreladas a tais algoritmos e os eles se consolidaram como métodos promissores. Segundo JIAN *et al.* (1998), os maiores problemas que ainda necessitam de solução são: a determinação do tempo das frentes de onda nos terminais monitorados e a determinação da velocidade de propagação destas ondas. À medida que a determinação destes valores ocorra de forma mais precisa, o método será mais eficiente, conseqüentemente, a localização será mais precisa.

De acordo com JIAN *et al.* (1998), quando ocorre uma falta, as ondas viajantes se direcionam para ambos os terminais da linha e apresentam componentes de frequência dominante diferentes, logo, têm velocidades de propagação diferentes. Eles propõem um cálculo espectral para determinação da frequência dominante de cada onda viajante antes do cálculo da localização da falta. Tal método pode melhorar a precisão da localização das faltas, já que a frequência dominante do sinal influencia na sua velocidade de propagação. Mas, uma vez que a análise espectral de um sinal em tempo real exige registros oscilográficos completos, o método é considerado inviável.

No trabalho de LOPES *et al.* (2011b) é apresentado um algoritmo baseado na teoria de ondas viajantes para localização de faltas em sistemas de transmissão e de distribuição. Trata-se de uma técnica baseada na detecção de transitórios nos sinais de tensão em dois pontos do SEP, os quais são pré-determinados pelo usuário do módulo

localizador de faltas. O algoritmo utiliza como ferramenta base a transformada de Park e permite a autocalibração do algoritmo em relação aos níveis de desbalanceamento entre as fases do SEP. No entanto, a técnica apresenta sensibilidade à presença de ruídos durante o regime permanente, fato este que dificulta a calibração do sistema e que pode ocasionar a detecção errônea de transitórios, promovendo localizações de faltas com desvios inadmissíveis.

Baseando-se nas limitações encontradas em LOPES *et al.* (2011b), propõem-se em LOPES (2011a) melhorias capazes de tornar o referido algoritmo mais robusto. Dentre estas modificações, destaca-se o uso de variáveis menos sensíveis à presença de ruídos elétricos, porém, tão eficazes quanto para a detecção de componentes de alta frequência. O sistema localizador avaliado é auto-adaptativo de forma que, durante a operação normal do SEP, calcula as principais características dos sinais da tensão, tornando possível diferenciar de forma mais confiável os períodos de regime permanente dos períodos de regime transitório.

Com o objetivo de serem menos sensíveis à presença de ruídos elétricos, várias técnicas foram desenvolvidas. JAMALI & GHEZELJEH (2004) apresentaram conceitos de correlação para localizar faltas a partir de dados de apenas um terminal. Registra-se o primeiro transitório de forma que este sinal passa a ser correlacionado com os sinais refletidos no ponto de falta. A detecção do pico da curva dos coeficientes de correlação implica na identificação do período de tempo necessário para as ondas viajantes percorrerem duas vezes a distância da falta até o ponto monitorado. Este método é pouco influenciado pela resistência de falta, ângulo de incidência de falta bem como da impedância das fontes das extremidades da LT. Mesmo assim, por se tratar de um método de um terminal, a confiabilidade é afetada, uma vez que depende da detecção de ondas refletidas.

Em LIN *et al.* (2008) é proposto a utilização dos coeficientes de correlação entre os sinais de tensão nos dois terminais monitorados da linha, devido à presença de ruídos no sistema. Assim, embora tenham sido propostos como técnicas alternativas para a localização de faltas menos sensíveis a ruídos, os algoritmos baseados na análise dos coeficientes de correlação são pouco confiáveis e apresentam complexidade computacional considerável. Portanto, estas técnicas não se tornaram populares e, por isso, os métodos TWFL ganharam ainda mais destaque na literatura.

Na Tabela 2, a seguir, verifica-se uma breve sumarização dos métodos abordados na revisão bibliográfica com suas principais características e suas referências.

**Tabela 2: Resumo da revisão bibliográfica referente aos métodos de detecção e localização de faltas.**

REFERÊNCIAS	CARACTERÍSTICAS									
	NTM			Sinais Analisados		GPS	Técnicas para a detecção da falta			
	1	2	3	Tensão	Corrente		MCFF	Wavelet	CORR	Tdq0
GALE <i>et al.</i> (1993)	√	√		√	√	√				
LIN <i>et al.</i> (2008)		√		√		√			√	
GIRGIS <i>et al.</i> (1992)	√	√		√	√		√			
JIAN <i>et al.</i> (1998)		√		√		√		√		
LOPES (2011)		√		√		√				√

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Onde:

NTM = Número de Terminais Monitorados;

GPS = Dados Sincronizados via GPS;

MCFF = Método Baseado na Análise de Componentes de Frequência Fundamental;

Wavelet = Transformada Wavelet;

CORR = Método da correlação;

Tdq0 = Transformada de Park.

### 3. SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL VIA RTDS™

Tanto as técnicas baseadas na teoria das ondas viajantes como as baseadas nas componentes de frequência fundamental contribuem para uma restauração mais rápida da LT após a ocorrência de faltas, porém o tempo utilizado para o cálculo do local do defeito, em alguns casos, pode ser bastante longo, retardando o despacho das equipes de manutenção.

Mesmo que a grande maioria destes algoritmos tenha aplicação *off-line*, este fato dificulta a localização do defeito em situações nas quais os dispositivos registradores se encontram instalados em subestações distantes dos centros de operação ou quando canais de comunicação para concentração de dados não estão disponíveis. Assim, com o surgimento do conceito de redes inteligentes (*Smart Grids*), sistemas de distribuição e de transmissão de energia elétrica dotados de recursos tecnológicos e de elevado grau de automação, a localização de faltas em tempo real é tema recente e, segundo as empresas de energia elétrica, de extrema relevância para o setor elétrico, pois podem evitar retardos desnecessários na identificação do ponto de defeito e minimizar multas provenientes de desligamentos não programados.

A análise de transitórios eletromagnéticos em SEP tem sido tradicionalmente realizada por meio de simulações computacionais com *softwares* baseados na regra de integração trapezoidal, dentre os quais se destaca o ATP (*Alternative Transients Program*). Com isso, foi possível transformar as equações integrais resultantes da análise nodal dos sistemas em equações algébricas, em que a solução é calculada em momentos discretos, usualmente denominados de passo de integração.

Diferentemente dos computadores convencionais, cujas soluções das equações do sistema podem consumir vários segundos até serem finalizadas, com o avanço da tecnologia digital, tornou-se possível a implementação de computadores capazes de solucionar rapidamente as equações algébricas dos componentes típicos dos SEP sem extrapolar o período do passo de integração adotado durante as simulações. Assim, o SEP pode ser analisado de forma mais próxima da realidade, introduzindo-se o conceito de simulações em tempo real.

O RTDS™ foi especialmente projetado para o estudo dos fenômenos de natureza eletromagnética em tempo real, composto por uma combinação de *hardware* e *software*.

Devido à atuação de diversos processadores de alta velocidade trabalhando em paralelo, as soluções do SEP simulado são obtidas em um intervalo de tempo muito menor que as constantes de tempo do sistema em estudo, fato este que tem tornado o RTDS™ um dos equipamentos mais utilizados no âmbito de simulações em tempo real em nível mundial.

O RTDS™ possui uma interface de entradas e saídas que permite o intercâmbio de informações analógicas e digitais entre o simulador e equipamentos reais como, por exemplo, relés de proteção, registradores digitais de perturbação (RDP) e equipamentos de monitoramento e controle. Com isso, torna-se possível a avaliação desses dispositivos sem que haja a necessidade de grandes laboratórios de alta tensão ou ensaios em campo. Outra potencialidade do RTDS™ é a possibilidade de incorporação às simulações em tempo real de modelos de componentes do sistema elétrico ou de algoritmos de proteção e controle criados pelo próprio usuário, permitindo a interação destes com os modelos já existentes no RTDS™.

O *hardware* do RTDS™ é composto por um processador digital de sinais (*Digital Signal Processor – DSP*) e um computador com quantidade de instruções reduzidas (*Reduced Instruction Set Computer – RISC*) baseados em técnicas avançadas de processamento paralelo, de maneira a alcançar a velocidade adequada para manter a operação contínua em tempo real. O *software* inclui modelos dos componentes do SEP necessários para representar diversos elementos complexos que formam o SEP. A técnica utilizada no RTDS™ na solução de toda a rede é a análise nodal, sendo utilizado o algoritmo desenvolvido por DOMMEL (1969), o qual é utilizado em praticamente todos os programas de modelagem de simulação digital no estudo de transitórios eletromagnéticos. Além disto, o *software* do RTDS™ também possui uma poderosa ferramenta de *Interface Gráfica* para o usuário (*Graphical User Interface - GUI*), denominada de RSCAD, através da qual o usuário é capaz de construir, compilar e analisar os casos simulados.

### 3.1. *HARDWARES* DO RTDS™

O simulador RTDS™ consiste em um *hardware* de processamento paralelo cuja arquitetura é montada em unidades modulares denominadas usualmente de *racks*. Estes

módulos possuem cartões de processamento e de comunicação e são capazes de simular SEP em tempo real com um número limitado de barras e equipamentos. Esta capacidade é comumente definida como 54 nós por *rack*, de forma que, para a simulação de SEP mais complexos, pode-se utilizar outros *racks* funcionando em conjunto. Assim, o SEP é dividido em subsistemas e cada um destes é simulado em um *rack* distinto, observados na Figura 2.

A operação em tempo real é garantida pelo RTDS™ devido à atuação de diversos processadores de alta velocidade trabalhando em paralelo. Esta operação em tempo real foi possível a partir do início da década de 90 para sistemas elétricos relativamente simples (DURIE & POTTLE, 1993).

**Figura 2: Racks do RTDS™ disponíveis no comércio.**



Fonte: <https://www.rtds.com/>.

Observa-se na Tabela 3 um resumo dos principais cartões presentes no RTDS™.

**Tabela 3: Resumo dos principais tipos de cartões presentes no RTDS™ e suas funções.**

<b>GTWIF (Giga Transceiver Workstation InterFace)</b>	Comunicação entre o simulador e a rede local
<b>GPC (Giga Processor Card)</b>	Resolução das equações dos SEP
<b>GT-I/O (Giga Transceiver - Input/Output)</b>	Possibilita a realização de testes com dispositivos de controle e proteção

Fonte: MELO (2013).

#### ***Giga Transceiver Workstation Interface Card (GTWIF)***

Em cada *rack* do RTDS™ é instalado um cartão de *interface* da estação de trabalho ou cartão GTWIF, observado na Figura 3. Este cartão possibilita a comunicação

entre a rede local (LAN) e o simulador e para cada cartão deste tipo é atribuído um endereço IP, fazendo com que qualquer computador que esteja conectado à LAN possa se comunicar com o RTDS™. O GTWIF é o responsável pelo comando de início e parada das simulações, controla ainda a sincronização dos processadores, garantindo a coordenação adequada dos cálculos realizados, garantindo que os cálculos não excedam o passo de integração e a sincronização dos demais cartões do simulador.

**Figura 3: Cartão GTWIF.**



Fonte: <https://www.rtds.com/>.

No caso de simuladores que incluem três ou mais racks é necessário um *Global Bus Hub* (GBH). O GBH é instalado na parte de trás de um dos cubículos do RTDS™ e é utilizado para facilitar a comunicação direta de certos sinais entre os *racks* do RTDS™ durante a simulação. Para o caso do RTDS™ da UFCG, em que os simuladores utilizam apenas um *rack*, não é necessário um GBH. Já na situação de dois *racks*, o cartão WIF é conectado diretamente por cabos de fibra ótica.

### ***Giga Processor Card (GPC)***

O cartão GPC é um cartão de processamento que é utilizado geralmente para solucionar mais de um modelo de componente do sistema ao mesmo tempo. Cada cartão GPC é constituído de dois processadores RISC, onde cada um opera com um *clock* de 1 GHz. Um cartão GPC por cada *rack* é destinado à resolução de equações da rede. Outro processador GPC deve ser reservado para a solução dos componentes dos modelos simulados na rede. Os dois cartões GPC se comunicam através de um barramento em anel

de alta velocidade. Na Figura 4 é mostrado o cartão de processamento do RTDS™, o GPC.

**Figura 4: Cartão GPC.**



Fonte: <https://www.rtds.com/>.

#### ***Gigabit Transceiver – Input/Output (GT-I/O)***

O RTDS™ possui *interfaces* para a entrada e saída de dados do SEP que permitem a realização de testes com dispositivos de proteção e de controle. Para a realização destas funções, o RTDS™ utiliza a uma família de cartões denominada de GT-I/O. Os cartões desta família são conectados ao GPC através de fibra ótica de 2 GHz e permitem uma isolamento ótica em relação ao simulador.

- ***Gigabit Transceiver Analog Output (GTAO)***

O GTAO é um cartão que possibilita a isolamento ótica da saída analógica da simulação de um equipamento externo. O GTAO possui 12 canais de saída, cada um com 16 bits e permitem gerar sinais analógicos com valores de pico entre  $\pm 10$  V. O cartão GTAO realiza o processo de *oversampling* quando opera com passos de simulação regulares e a saída é fornecida a cada intervalo de 1  $\mu$ s. Na Figura 5(a) pode-se observar um cartão GTAO.

- ***Gigabit Transceiver Analog Input (GTAI)***

O GTAI é um cartão utilizado para possibilitar a entrada de sinais analógicos externos ao RTDS™. O GTAI permite atualizações para o cartão GPC em intervalos de no mínimo 6  $\mu$ s. O cartão GTAI é constituído de dois canais conversores de sinais

analógicos para digitais de 16 bits, sendo cada um desses canais formado por 6 entradas. Assim como GTAIO, o GTAI pode gerar sinais analógicos com valores de pico entre  $\pm 10$  V. Na Figura 5(b) é ilustrado um cartão GTAI.

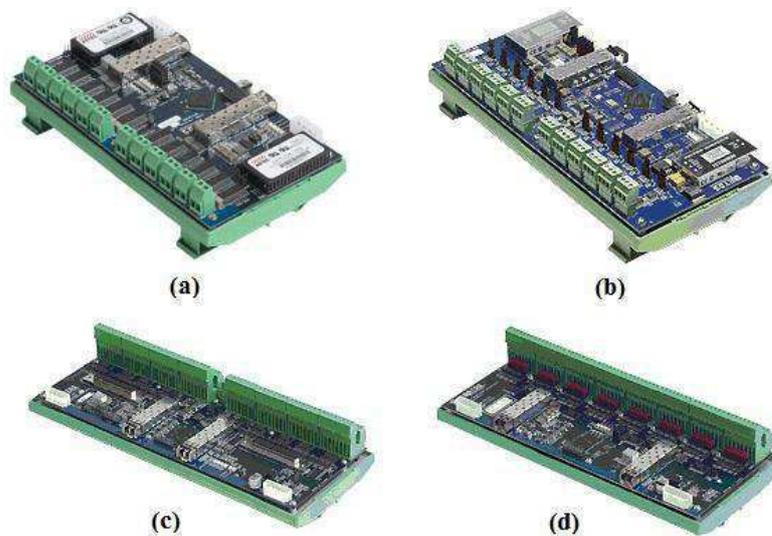
- ***Gigabit Transceiver Digital Output (GTDO)***

O GTDO é um cartão que possui um total de 64 saídas digitais, os sinais gerados variam de 7 V a 24 V e uma fonte de corrente que pode atingir até 100 mA. Este cartão é utilizado para a comunicação com os equipamentos externos e pode-se observá-lo na Figura 5(c).

- ***Gigabit Transceiver Digital Input (GTDI)***

O GTDI é um cartão que possui 64 canais de entradas digitais e estas são utilizadas como interface para os sinais digitais provenientes de equipamentos externos ao RTDS<sup>TM</sup>, onde esses sinais externos devem estar entre 0 e 5 V. Um cartão GTDI é ilustrado na Figura 5(d).

**Figura 5: Cartões para a entrada e a saída de sinais analógicos e digitais: (a) GTAIO; (b) GTAI; (c) GTDO; (d) GTDI.**



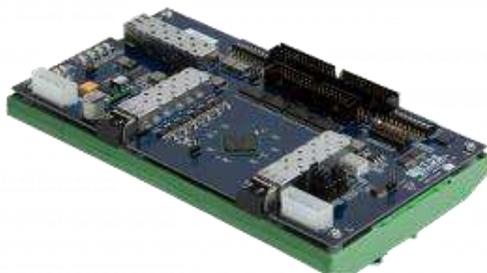
Fonte: <https://www.rtds.com/>.

- ***Gigabit Transceiver Front Panel Interface Card (GTFPI)***

O cartão GTFPI é utilizado para a *interface* de entrada ou saída de sinais digitais através do painel frontal do RTDS<sup>TM</sup> e ainda sinais de alta tensão. O GTFPI se conecta ao

GPC através de fibra ótica e é necessário pelo menos um cartão GTFPI por cubículo. Na Figura 6, pode-se observar um cartão GTFPI.

**Figura 6: Cartão GTFPI.**



**Fonte: <https://www.rtds.com/>.**

- ***Gigabit Transceiver Network Interface System Card (GTNET)***

O cartão GTNET é utilizado para garantir uma comunicação em tempo real de envio e retorno de informações para o simulador do RTDS™ via ethernet. O GTNET é o cartão destinado para a *interface* de protocolos de rede, estando pré-instalado no mesmo o protocolo IEC 61850. Logo, o GTNET permite o envio de mensagens GSSE (*Generic Substation Status Event*) ou GOOSE (*Generic Object Oriented System Events*) com até 32 saídas binárias do simulador ou ainda possibilita o recebimento deste tipo de mensagens de 5 IED (*Intelligent Electronic Devices*) externos.

O GTNET também apresenta a funcionalidade *playback*, que está presente nas caixas de teste de relés. Esta função permite que os registros oscilográficos que foram capturados pelos IED possam ser reproduzidos pelo RTDS™. A reprodução destas informações pelo simulador possibilita a análise das prováveis causas de falhas de operação do sistema de proteção quando um distúrbio for registrado. Na Figura 7 é ilustrado um cartão GTNET.

**Figura 7: Cartão GTNET.**



Fonte: <https://www.rtds.com/>.

### 3.2. *SOFTWARES* DO RTDS™

O *software* do RTDS™ é organizado em uma hierarquia que possui três níveis: a *interface* gráfica do usuário de alto nível, a comunicação e execução em nível médio, e o sistema de operação de multitarefas WIF de baixo nível. Entretanto, o usuário do RTDS™ interage apenas com o *software* de alto nível, sendo os *softwares* de níveis mais baixos acessados automaticamente pelo nível mais alto. No nível mais alto do *software* do RTDS™ encontra-se a *Graphical User Interface* (GUI), conhecida como RSCAD, parte desenvolvida para garantir uma *interface* totalmente gráfica ao usuário do RTDS™. O RSCAD é formado por diversos módulos, dentre os quais se destacam o módulo *File Manager*, o módulo *Transmission Line* (TLine), o módulo *Draft*, o módulo *Runtime* e o módulo *Component Builder* (CBuilder).

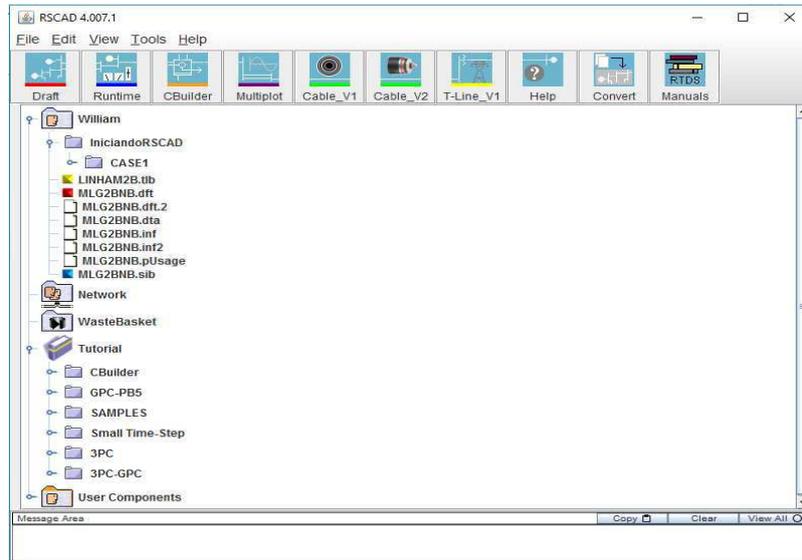
Os primeiros passos para a aprendizagem e a utilização do *software* foram ler o manual do RTDS™, o “*Real Time Digital Simulator Tutorial Manual: RSCAD Version*”, e realizar as simulações iniciais propostas, como o circuito divisor de tensão que pode ser visto na Figura 9.

#### ***File Manager***

O *File Manager*, ou simplesmente *fileman*, representa o ponto de partida para a *interface* do RSCAD. O *fileman* é utilizado para projetar, realizar o gerenciamento de casos e facilitar as trocas de informações entre os usuários. Todos os demais programas

do RSCAD estão contidos no módulo *fileman*, como observado na Figura 8. Dependendo das configurações adotadas, qualquer usuário que esteja conectado à rede LAN do RTDS™ pode acessar os projetos salvos, facilitando o intercâmbio de informações entre computadores distintos.

**Figura 8: Interface do File Manager.**

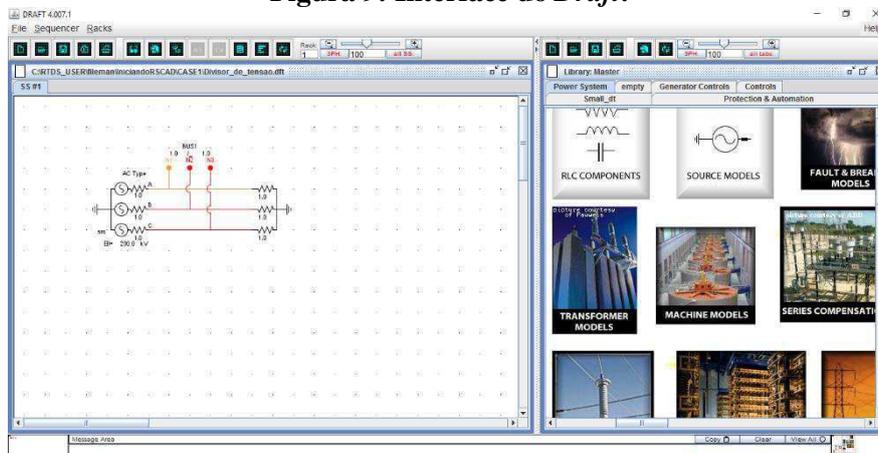


**Fonte: Elaborado pelo autor.**

### ***Draft***

O *Draft* é usado para modelar circuitos e parâmetros de entrada. A tela do *Draft* é dividida em duas partes: a parte da biblioteca e a da modelagem do sistema. Os ícones individuais de cada componente são selecionados a partir da biblioteca e colocados em seguida na parte referente à modelagem. Na Figura 9 observa-se a tela do *Draft*.

**Figura 9: Interface do *Draft*.**

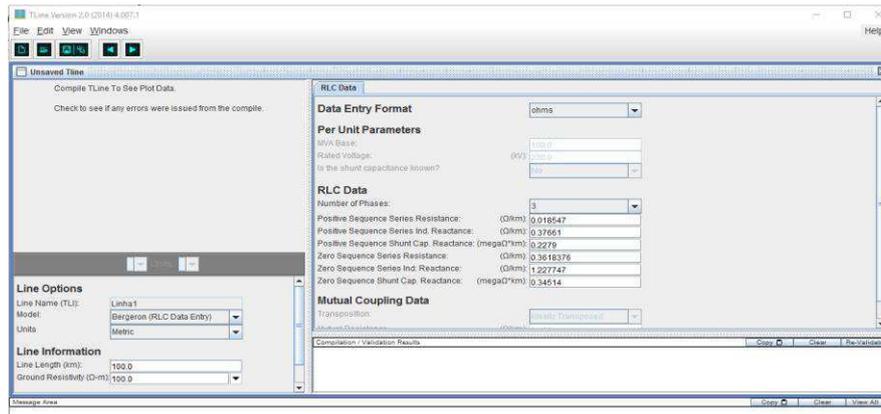


**Fonte: Elaborado pelo autor.**

## ***T-Line***

O *T-Line* é utilizado para definir as propriedades das LT aéreas e, de uma maneira geral, os dados de entrada são em termos da geometria e configuração física da linha. As constantes das LT, assim como as equações são resolvidas e permitindo o uso das mesmas no programa *Draft*. Pode-se observar na Figura 10 a tela do programa *T-Line*.

**Figura 10: Interface do *TLine*.**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

## ***Runtime***

O *Runtime* é utilizado para controlar os casos de simulação que são executados no *hardware* do RTDS™. O controle da simulação, incluindo os comandos de início e parada, a aplicação de faltas e a operação dos disjuntores são executadas através do *Runtime*. Os componentes que permitem estes comandos são os botões, as chaves e os *sliders*. Além disso, o *Runtime* também analisa as medições *online* e a aquisição de dados/distúrbios. Na Figura 11, pode-se observar a tela do *Runtime*.

**Figura 11: Interface do *Runtime*.**

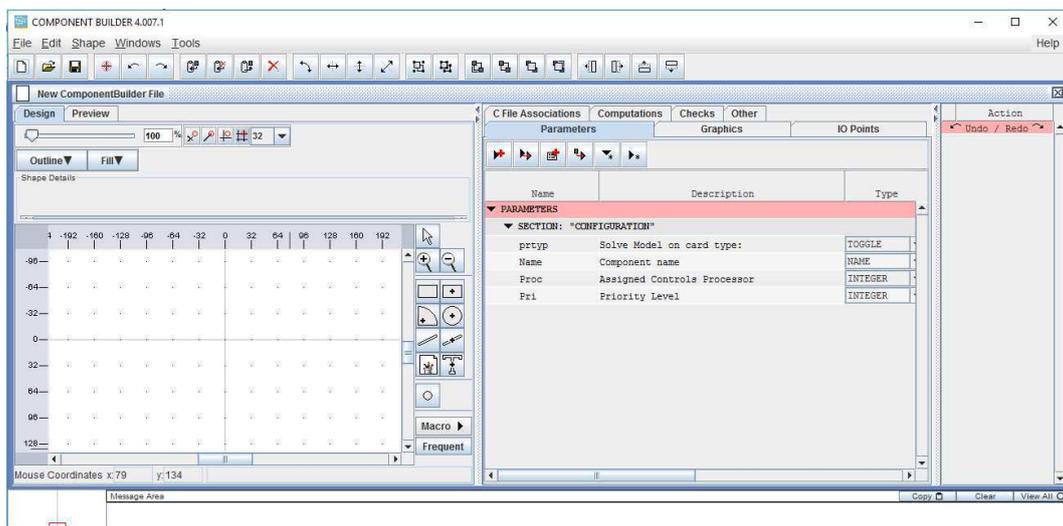


**Fonte: Elaborado pelo autor.**

## ***C-Builder***

O *C-Builder* é uma parte do *software* do RTDS™ que permite a criação de novos componentes, sejam estes componentes de controle ou do SEP. A criação dos novos componentes se dá através de algoritmos feitos pelo usuário na linguagem C de programação e de modelos para os componentes. Logo, podem-se interagir os componentes já fornecidos pelo RTDS™ com os componentes criados pelo usuário através do *C-Builder* e realizar em seguida as simulações em tempo real. Os novos modelos criados no *C-Builder* devem ser importados para a biblioteca do módulo *Draft* e em seguida, simulam-se os SEP no módulo *Runtime*. Na Figura 12 observa-se a tela do módulo *C-Builder*.

**Figura 12: Interface do *C-Builder*.**

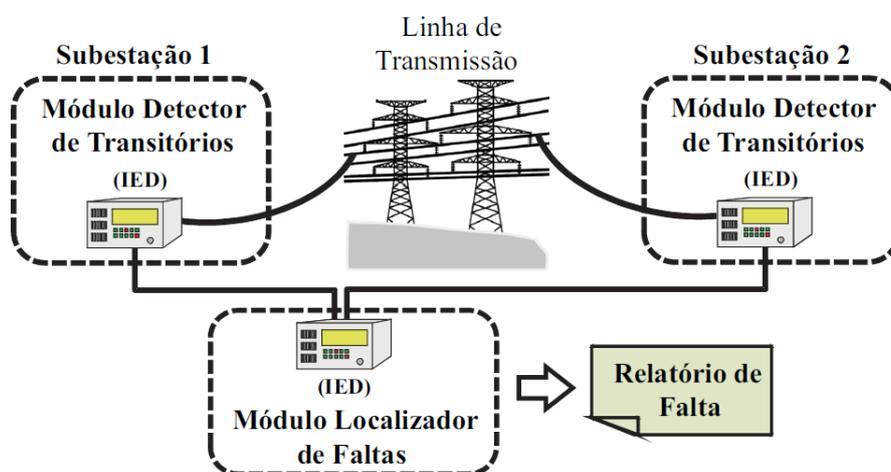


**Fonte: Elaborado pelo autor.**

## 4. DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LT VIA TRANSFORMADA DE PARK

O método proposto por LOPES (2011b) fundamenta-se na detecção de ondas viajantes nas duas extremidades da LT por meio da aplicação da Transformada de Park ( $Tdq0$ ). Os dados de entrada utilizados pelo algoritmo são amostras atuais dos sinais de tensão e pode ser implementado em *Intelligent Electronic Devices* (IED) de forma modular conforme apresentado na Figura 13.

**Figura 13: Esquema de funcionamento do sistema localizador de faltas.**

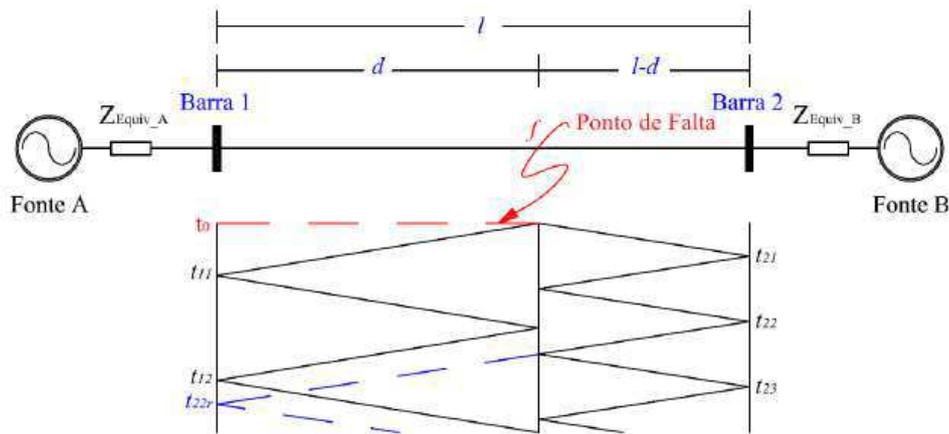


**Fonte: LOPES (2011b).**

Para execução dos procedimentos de localização de faltas são utilizados três módulos: dois módulos detectores de transitórios e um módulo localizador de faltas. As funções de cada um dos módulos utilizados são bem definidas. O módulo detector de transitórios tem a função de realizar todos os procedimentos relacionados à identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes ao terminal no qual se encontra instalado, enquanto o módulo localizador é responsável principalmente pelo cálculo das estimativas do ponto de falta.

O método baseia-se na detecção das ondas viajantes, conforme apresentado na Figura 14, provenientes de transitórios gerados a partir de faltas nos terminais das LT e fixados os instantes de detecção deste transitório para o cálculo da falta, que é feito via Transformada de Park ( $Tdq0$ ).

**Figura 14: Diagrama de reflexões para faltas em LT.**



**Fonte: MELO (2013).**

O método pode ser separado entre o módulo detector, em que devem ser detectados os instantes de tempo  $t_{21}$  e  $t_{11}$  para ser calculado o ponto de falta, e o módulo localizador, que utiliza os instantes de tempo guardados no módulo detector para localizar o ponto de falta.

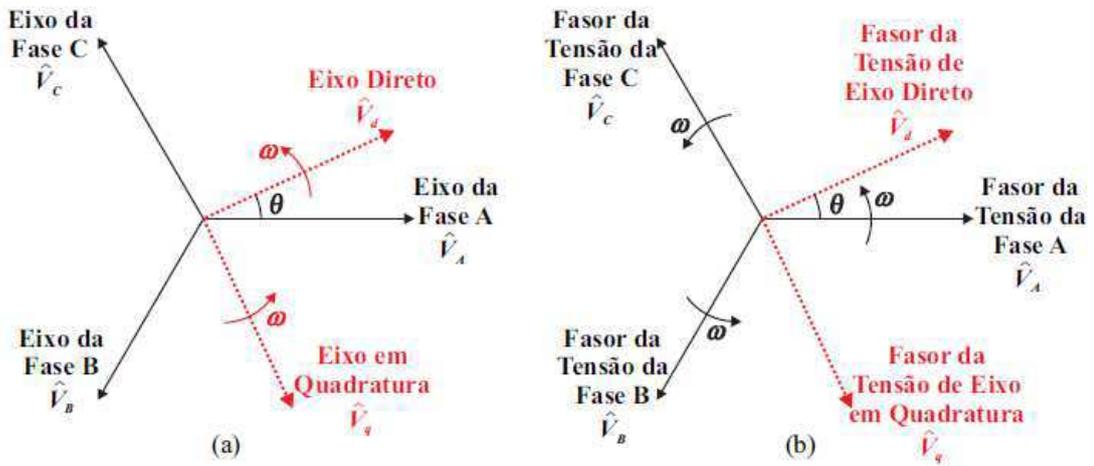
O módulo detector é executado nas seguintes etapas:

### **Etapa 1 – Calibração do sistema localizador de faltas**

Esta etapa tem como objetivo identificar as características mais relevantes dos sinais de tensão do SEP em regime permanente. As variáveis empregadas no processo de detecção de transitórios são auto-adaptativas, tornando possível diferenciar de forma mais confiável o regime de falta do regime permanente, sem que haja a necessidade de calibrações manuais, LOPES (2012a). É realizada também a normalização dos sinais de tensão, viabilizando que o método funcione independentemente do nível de tensão do SEP.

A etapa de calibração é composta por duas sub-etapas. A primeira tem como objetivo a normalização dos sinais de tensão de entrada e o alinhamento entre os fasores das tensões  $\widehat{V}_d$  e  $\widehat{V}_A$ , ver Figura 15. Já a segunda sub-etapa é responsável pelo cálculo de limiares auto-adaptativos denominados de *fatores de sensibilidade* ( $fsb$ ), os quais são utilizados no procedimento de detecção de crescimentos abruptos da energia  $\xi_{dif}$ .

**Figura 15: Uso da Tdq0 para detecção de transitórios: (a) Sistema de eixos; (b) Diagrama fasorial.**



Fonte: LOPES (2012b).

## Etapa 2 – Detecção de Transitórios nos Terminais da LT

O objetivo desta etapa é desenvolver o algoritmo que irá detectar ondas viajantes criadas a partir do distúrbio. Utilizam-se detectores de transitórios, que monitoram os sinais de tensão nos terminais da LT caso algum distúrbio ocorra são guardados os instantes de tempo de chegada das ondas provenientes deste distúrbio, e é ativado a operação do módulo localizador de faltas.

A técnica utilizada para detecção de transitórios utilizada na implementação dos métodos TWFL neste trabalho é baseada na transformada de Park, como proposto em LOPES (2011a). A detecção de transitórios é realizada a partir da taxa de crescimento da energia  $\xi_{dif}$  obtida através do processamento das amostras janeladas dos sinais  $c_{dif}$  calculados a partir das tensões  $V_d$ , que por sua vez são determinadas através da expressão (1).

$$v_d(k) = A_{Park}(k) \cdot V_A(k) + B_{Park}(k) \cdot V_B(k) + C_{Park}(k) \cdot V_C(k), \quad (1)$$

Sendo  $A_{Park}$ ,  $B_{Park}$  e  $C_{Park}$  dados por:

$$A_{Park}(k) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \cos(\omega k \Delta t + \theta), \quad (2)$$

$$B_{Park}(k) = -\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \cos(\omega k \Delta t + \theta) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \text{sen}(\omega k \Delta t + \theta), \quad (3)$$

$$C_{Park}(k) = -\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \cos(\omega k \Delta t + \theta) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \text{sen}(\omega k \Delta t + \theta), \quad (4)$$

Em que  $\omega$  é a frequência angular nominal do sistema,  $k$  é a  $k$ -ésima amostra dos sinais avaliados,  $\Delta t$  é o período de amostragem utilizado durante a conversão A/D dos sinais analógicos,  $\theta$  é o ângulo de fase da tensão  $V_d$  e  $V_A(k)$ ,  $V_B(k)$  e  $V_C(k)$  são as  $k$ -ésimas amostras das tensões de fase do SEP analisado.

Para o cálculo dos coeficientes  $c_{dif}$  e da energia  $\xi_{dif}$ , são empregadas as expressões (5) e (6), conforme apresentado a seguir.

$$C_{dif}(k) = G \cdot [V_d(k) - V_d(k-1)], \quad (5)$$

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{EN}+1}^k C_{dif}^2(n), \quad (6)$$

Lendo  $k_{EN} = N/2$ , sendo  $N$  o número de amostras por ciclo em regime permanente,  $G$  o ganho aplicado aos coeficientes  $c_{dif}$ ,  $V_d(k)$   $k$ -ésima amostra do sinal  $V_d$ ,  $c_{dif}(n)$  é a  $n$ -ésima amostra do sinal  $c_{dif}$  janelado e  $\xi_{dif}(k)$  a energia da  $k$ -ésima janela.

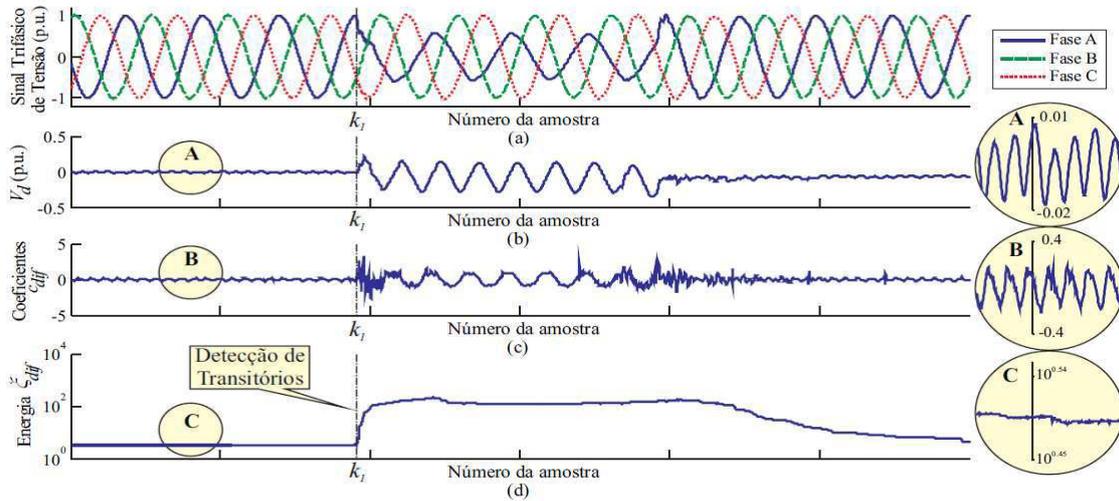
Os coeficientes  $c_{dif}$  não relacionados à ocorrência de transitórios devem ser descartados, e para isso utiliza-se, geralmente, um procedimento de filtragem denominado de *hard thresholding*, nos quais os coeficientes abaixo de determinado limiar, são considerados zero. Porém, estes métodos são bastante susceptíveis ao ruído e podem detectar erroneamente um transitório. Para tornar a detecção de componentes de alta frequência mais robusta em relação à presença de ruídos elétricos, calcula-se a energia dos coeficientes  $c_{dif}$  que são os coeficientes  $\xi_{dif}$  (LIMA *et al.*, 2016).

Na Figura 16 são apresentadas as formas de onda dos sinais  $V_d$ ,  $c_{dif}$  e  $\xi_{dif}$  durante a detecção de uma falta auto-extinta iniciada na amostra  $k_1$ . O *zoom* no período de regime permanente permite a verificação da frequência dominante de 120 Hz nos sinais  $V_d$  e  $c_{dif}$ , e a comparação dos níveis de ruído presentes nos sinais  $c_{dif}$  e  $\xi_{dif}$ .

Em LOPES (2011b), utilizam-se de fatores de sensibilidade  $fsb$ , que são limiares auto-adaptativos, os quais são calculados a fim de permitir uma detecção precisa de variações abruptas da energia  $\xi_{dif}$ . Basicamente, os fatores  $fsb$  são proporcionais à razão entre o valor máximo e o valor mínimo da energia  $\xi_{dif}$  ao longo de um período  $\Delta k_{fsb}$

programável (em número de amostras) no regime permanente. Neste trabalho, o período  $\Delta k_{fsb}$  é equivalente a dois ciclos completos de um sinal operando a 60 Hz.

**Figura 16: Detecção de transitórios em um registro oscilográfico real via Tdq0: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Tensão de eixo direto  $V_d$ ; (c) Coeficientes  $c_{dif}$ ; (d) Energia  $\xi_{dif}$  dos coeficientes  $c_{dif}$ .**



**Fonte: LOPES (2011b).**

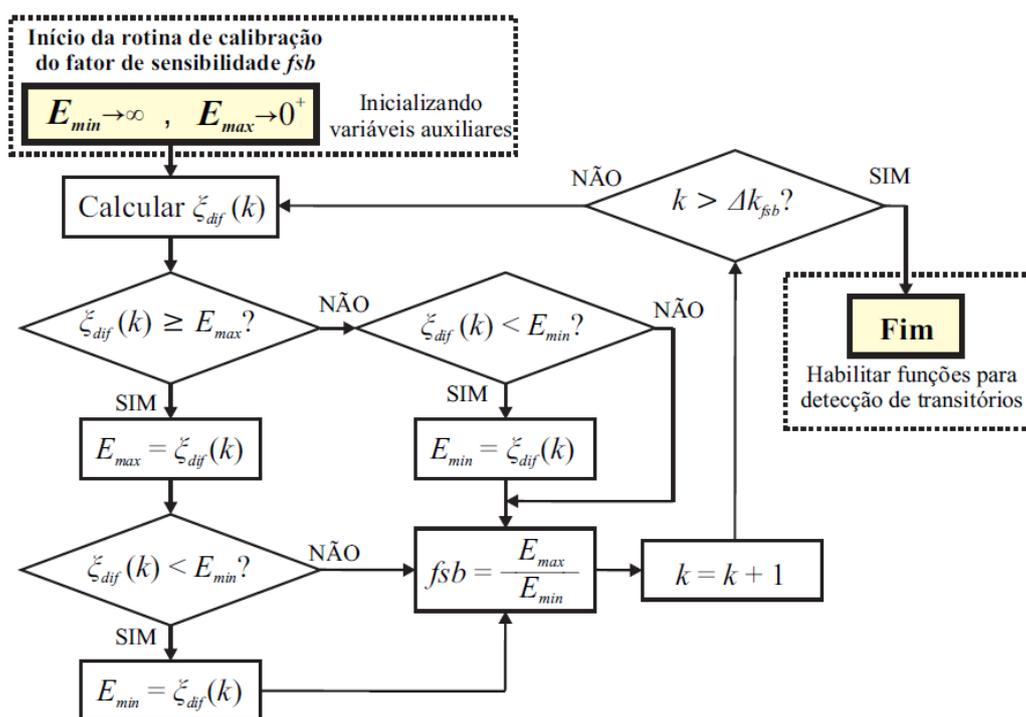
Na Figura 17, ilustra-se o fluxograma da rotina de calibração dos fatores de sensibilidade  $fsb$ . As variáveis auxiliares  $E_{máx}$  e  $E_{mín}$  são empregadas ao longo do processo de atualização dos valores máximos e mínimos assumidos pela energia  $\xi_{dif}$  ao longo de um período  $\Delta k_{fsb}$ .

Quando calibrados os fatores  $fsb$ , as funções que detectam os transitórios nas LT são habilitadas. A partir daí são analisados, em tempo real, os estados dos disjuntores e as variações da energia  $\xi_{dif}$  num período  $\Delta k_{DETEC} = N/10$  equivalente a um décimo de ciclo na frequência fundamental. O parâmetro  $N$  pode ser calculado pela expressão (7).

$$N = \text{round}\left(\frac{F_s}{f_{60Hz}}\right), \quad (7)$$

Em que  $F_s$  é a frequência de amostragem utilizada na conversão A/D (dada em Hertz),  $f_{60Hz}$  é a frequência fundamental, 60 Hz, e  $\text{round}(X)$  é uma função que arredonda  $X$  para o número inteiro mais próximo.

**Figura 17: Determinação do fator de sensibilidade  $fsb$ .**

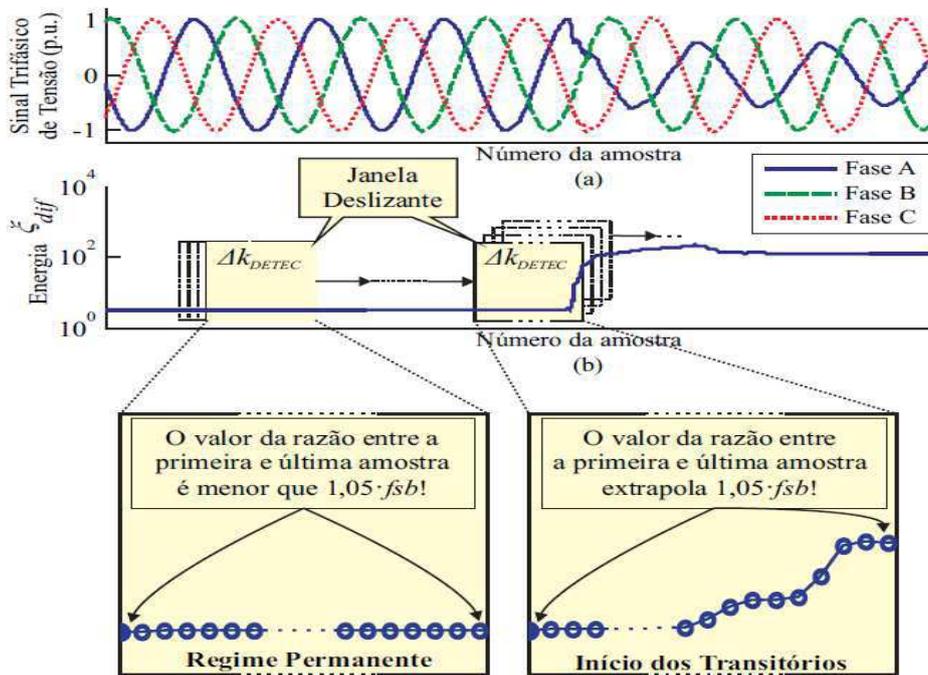


**Fonte: LOPES (2011b).**

A detecção dos transitórios é feita pela identificação dos crescimentos abruptos da energia  $\xi_{dif}$ , conforme mostrado na Figura 18. Para tanto, utiliza-se um *buffer* de tamanho igual a  $\Delta k_{DETEC}$  que consiste numa janela deslizante no tempo sobre o sinal  $\xi_{dif}$  calculado.

Para garantir uma maior robustez do sistema detector frente à presença de ruídos elétricos, desbalanceamentos entre fases ou mesmo distúrbios fora da LT monitorada, considera-se uma margem de segurança de 5% sobre o  $fsb$  calculado. Assim, apenas variações de energia maiores que 1,05 vezes  $fsb$  são caracterizadas como ocorrência de transitórios. A margem de segurança (de 5% sobre o valor de  $fsb$ ) como os períodos  $\Delta k_{fsb}$  e  $\Delta k_{DETEC}$  podem ser programáveis. Desta forma, o usuário do sistema localizador pode tornar os módulos detectores mais ou menos sensíveis à presença de ruídos ou sensibilizá-los apenas para detecção de transitórios com amplitudes mais relevantes.

Figura 18: Detecção de transitórios: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Energia  $\xi_{dif}$  dos coeficientes  $c_{dif}$ .



Fonte: LOPES (2011b).

### Etapa 3 – Localização da Falta

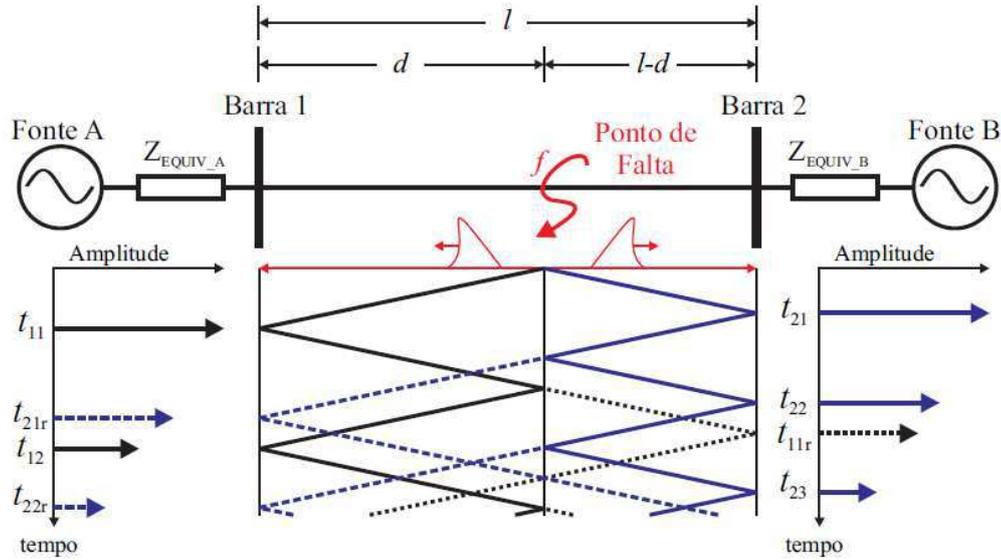
As equações utilizadas no cálculo da estimação do ponto de falta são provenientes das expressões para métodos de dois terminais apresentadas em GALE *et al.* (1993). Em LOPES (2011b), foi proposto que deve se considerar o módulo desta diferença  $|t_{11} - t_{21}|$ , permitindo a aplicação do algoritmo de localização de faltas sem a necessidade do uso do GPS, visualizado na Figura 19.

As referidas equações são apresentadas nas expressões a seguir.

$$d = \begin{cases} \frac{L - |t_{11} - t_{21}| \cdot v_{propag}}{2}, & \text{se } d \leq \frac{L}{2} \\ L - \frac{L - |t_{11} - t_{21}| \cdot v_{propag}}{2}, & \text{se } d > \frac{L}{2} \end{cases} \quad (8)$$

Lendo  $L$  o comprimento da LT monitorada (em km),  $d$  a distância entre uma das extremidades da LT (em km) e o ponto de falta e  $v$  a velocidade de propagação das ondas viajantes, a qual, é considerada como sendo igual a 98% da velocidade da luz ( $v_{propag} \approx 294.000$  km/s).

**Figura 19: Diagrama de reflexões referente a uma falta no ponto  $f$  de uma LT monitorada em dois terminais.**



**Fonte: LOPES (2011b).**

Nesta etapa é calculada a estimativa do ponto de falta a partir dos instantes iniciais  $t_{21}$  e  $t_{11}$ , estes instantes são identificados na Etapa 2.

A determinação do período  $|t_{11} - t_{21}|$  em tempo real se baseia na atuação de um relógio (denominado de *clock*) instalado no módulo localizador de faltas. O início e a parada de contagem do relógio *clock* são controlados pelo sinal de saída de uma porta lógica digital do tipo OU-Exclusivo cuja saída, denominada de *Start Clock*, assume nível alto apenas quando uma única entrada se encontra ativa. Neste caso, as entradas são os *flags* indicadores de ocorrência de transitórios gerados pelos módulos detectores, os mesmos são referidos por  $Flag_1$  e  $Flag_2$ .

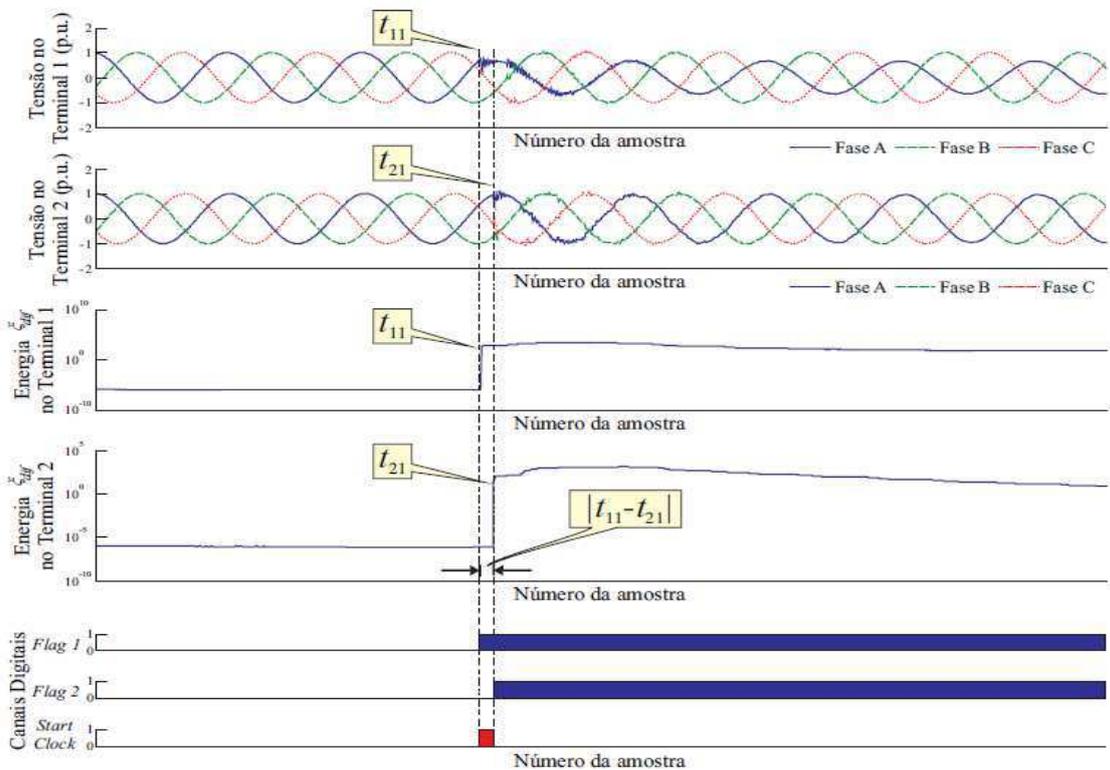
Conforme pode ser observado na Tabela 4, são apresentadas as relações lógicas entre os referidos sinais digitais, enquanto na Figura 20 é apresentado um exemplo de cálculo do período  $|t_{11} - t_{21}|$  considerando-se uma falta monofásica entre a fase A e o terra.

**Tabela 4: Tabela verdade para uma porta lógica OU-Exclusivo.**

$Flag_1$	$Flag_2$	$Start\ Clock$	Operação a realizar
0	0	0	Não incrementar o contador
0	1	1	Incrementar o contador
1	0	1	
1	1	0	Não incrementar o contador

Fonte: LOPES (2012b).

**Figura 20: Determinação do período  $|t_{11} - t_{21}|$  através do método proposto: (a) Tensão trifásica no terminal 1 da LT; (b) Tensão trifásica no terminal 2 da LT; (c) Energia  $\xi_{dif}$  no terminal 1; (d) Energia  $\xi_{dif}$  no terminal 2; (e) Canais digitais utilizados.**



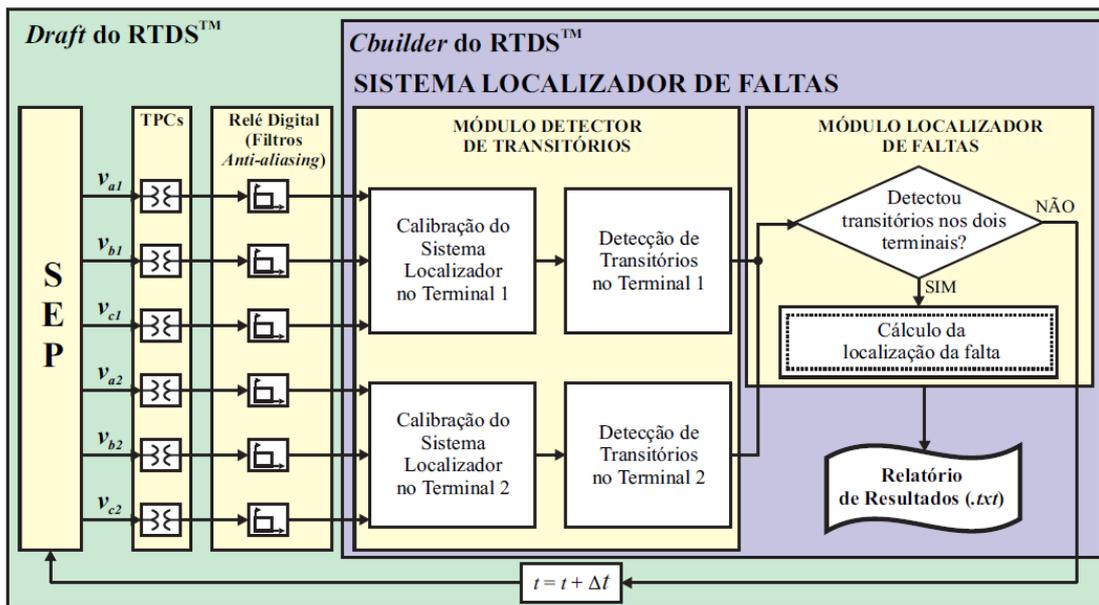
Fonte: LOPES (2012b).

Observa-se que durante o período equivalente a  $|t_{11} - t_{21}|$ , o sinal  $Start\ Clock$  permanece em nível lógico alto, permitindo, assim, o cálculo em tempo real do local de ocorrência da falta. Para isso, assume-se que o atraso da transmissão dos dados digitais referentes aos  $flags\ Flag_1$  e  $Flag_2$  é conhecido, podendo ser corrigido durante a localização do defeito.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema localizador de faltas foi implementado utilizando a linguagem C do *CBuilder* disponível no próprio RTDS™. Assim, o algoritmo proposto foi avaliado como se este estivesse incorporado em IED reais. Na Figura 21 apresenta-se o diagrama de blocos do método implementado.

**Figura 21: Diagrama de blocos para localização em tempo real de faltas em LT via algoritmo.**

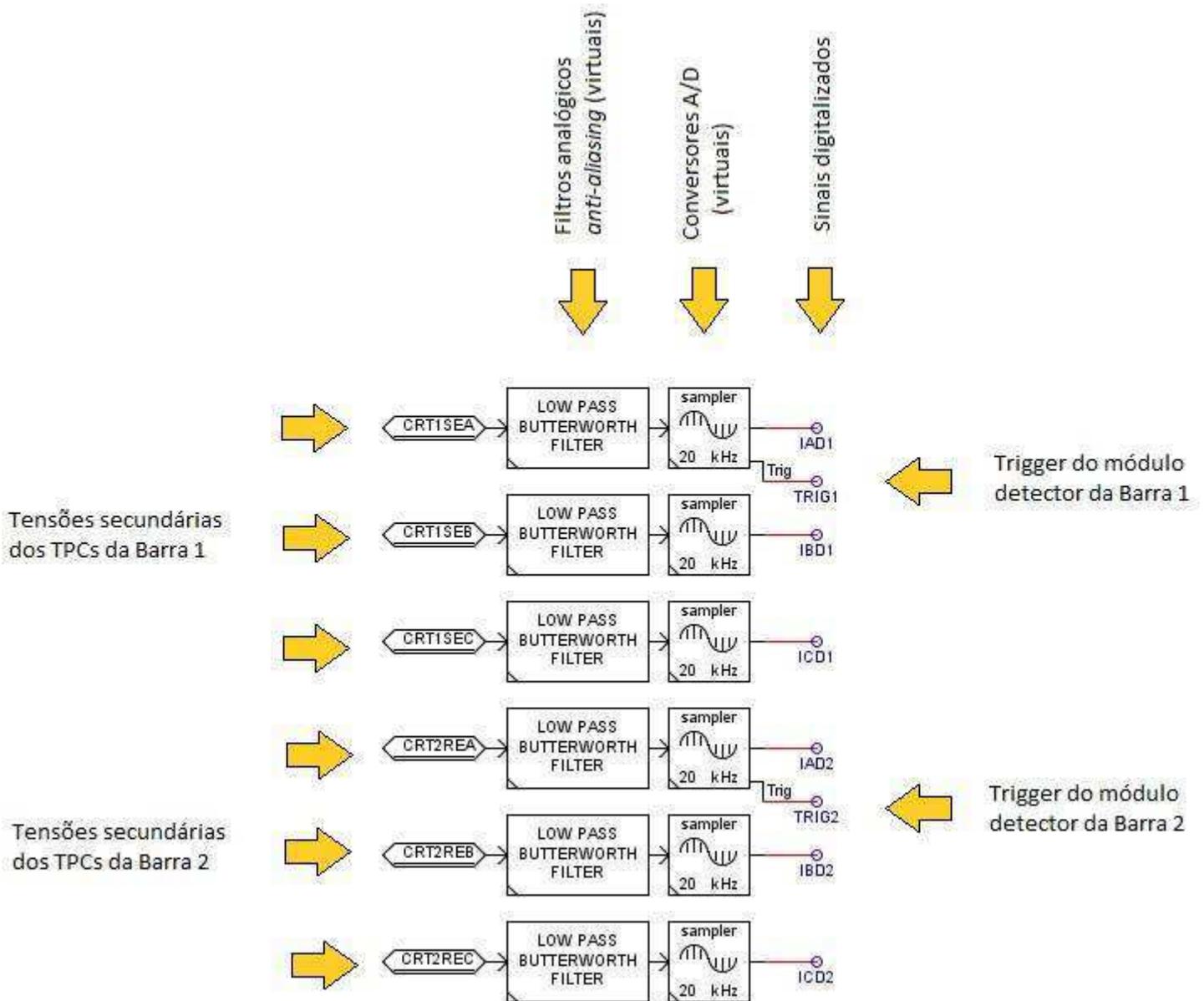


**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Observa-se que ao término dos procedimentos de localização de faltas, um relatório de resultados (com extensão ".txt") é gerado. Este relatório é disponibilizado apenas após a ocorrência de transitórios na LT, de forma que, com o sistema operando normalmente, nenhum relatório é gerado.

O sistema de aquisição de dados foi implementado no próprio *Draft* juntamente com o SEP simulado. Na Figura 22, ilustra-se o sistema de aquisição de dados implementado para a medição das tensões de entrada do sistema localizador.

Figura 22: Sistema de aquisição de dados modelado no RTDS™.

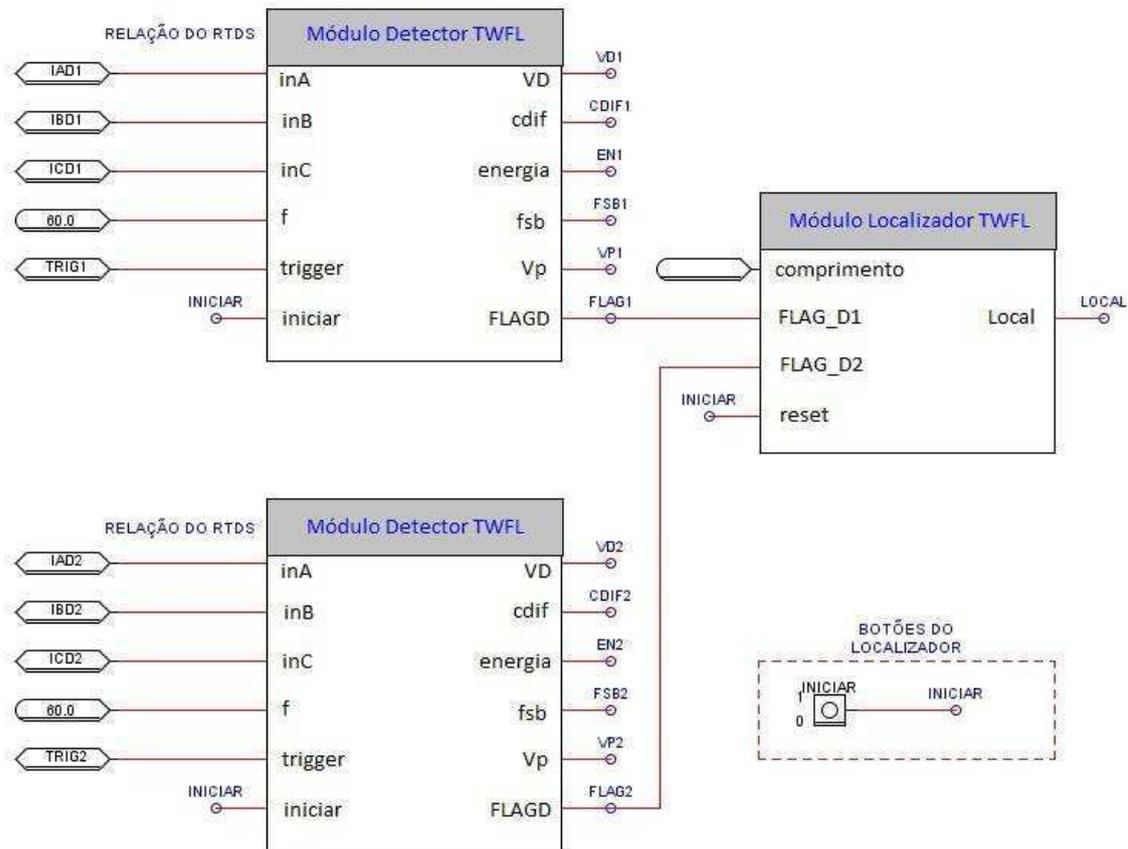


Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram implementados no *CBuilder* do RTDS™ blocos funcionais referentes ao módulo detector de transitórios e ao módulo localizador de faltas. Na Figura 23, ilustram-se os componentes criados e a interligação entre os mesmos.

Em cada terminal, os sinais  $V_d$ ,  $c_{dif}$  e  $\xi_{dif}$  são externados apenas para fins de análise do comportamento do sistema. Os *flags*  $Flag_1$  e  $Flag_2$  são utilizados no módulo localizador para o cálculo de  $|t_{11} - t_{21}|$  e, conseqüentemente, da localização  $d$  da falta.

**Figura 23: Sistema localizador de faltas implementado no RTDS™.**



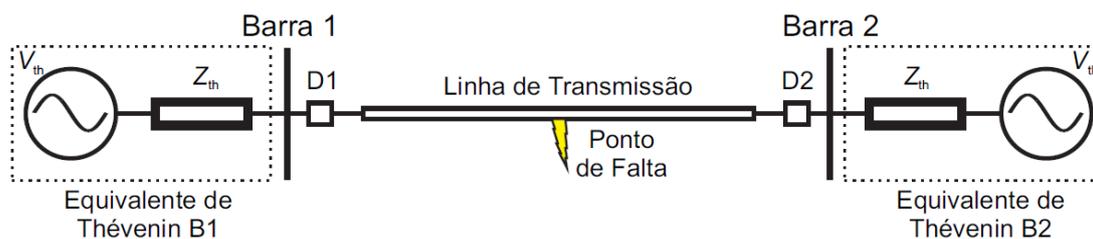
**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Utiliza-se também um botão denominado *iniciar*, que tem a função de ativar o sistema localizador quando o mesmo for ligado. Uma vez pressionado, as etapas de calibração e detecção dos transitórios dos módulos implementados é inicializada. Após o distúrbio na LT, o sistema localizador fixará sua saída na localização calculada, de modo que para habilitar o sistema localizador novamente, o botão *iniciar* deve ser pressionado para reiniciar o processo.

Para fins de avaliação do algoritmo, realizou-se no RTDS™ a simulação em tempo real de faltas em um SEP simplificado.

Basicamente, o SEP consiste em dois circuitos equivalentes interligados por uma LT com 180 km de extensão modelada a partir de parâmetros reais de uma LT de 230 kV da Chesf, cujos dados encontram-se nas Tabelas 5 e 6.

**Figura 24: Sistema elétrico simplificado.**



**Fonte: Adaptado de LOPES (2012b).**

**Tabela 5: Dados da LT do SEP simplificado.**

Linha de Transmissão	$R_1$ ( $\Omega/km$ )	$X_1$ ( $\Omega/km$ )	$Y_1$ ( $\mu mho/km$ )	$R_0$ ( $\Omega/km$ )	$X_0$ ( $\Omega/km$ )	$Y_0$ ( $\mu mho/km$ )	Comp. ( $km$ )
Barra 1 – Barra 2	0,098	0,53	0,3075	0,522	1,432	0,4361	180

**Fonte: Adaptado de LOPES (2012b).**

**Tabela 6: Dados dos equivalentes de Thévenin do SEP simplificado.**

Subestação	Impedância $Z_{th}$				Fontes $V_{th}$	
	$R_1$ ( $\Omega$ )	$X_1$ ( $\Omega$ )	$R_0$ ( $\Omega$ )	$X_0$ ( $\Omega$ )	$ V_{th} $ (p.u.) (Base 230 kV)	Fase ( $^\circ$ ) (ref. na tensão $V_A$ )
Barra 1	0,087	25,666	1,012	18,754	1,02	0
Barra 2	0,966	28,513	1,129	20,838	0,98	-10

**Fonte: Adaptado de LOPES (2012b).**

Durante as simulações, considerou-se o modelo de LT perfeitamente transpostas a parâmetros distribuídos e constantes na frequência. Para tanto, o módulo *TLine* foi utilizado para calcular os parâmetros da LT modelada, visualizado na Figura 25, gerando os dados necessários para construção do SEP no módulo *Draft*.

**Figura 25: Implementação dos dados da LT no módulo *TLine* do RTDS™.**

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

A avaliação do método em tempo real foi realizada utilizando-se um *script* para simulação automática de casos no RTDS™. Os parâmetros de falta foram variados permitindo a análise da robustez do sistema localizador para diferentes cenários, conforme pode ser observado na Tabela 7.

**Tabela 7: Características de falta adotadas durante as simulações em tempo real via RTDS™.**

<i>Variáveis Simuladas</i>	<i>Valores Escolhidos</i>	<i>Nº de Possibilidades</i>
Localização da Falta (%)	10, 15, 20, 25, ..., 85 e 90	17
Resistência de Falta (Ω)	0.01, 5, 10, 50 e 100	5
Ângulo de Incidência (°)	0, 30, 60 e 90	4
Tipo de Falta	AT-BT-CT-AB-AC-BC-ABT-ACT-BCT-ABC	10
<b>Total de Possibilidades</b>		<b>3400</b>

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Uma das limitações dos métodos TWFL é relacionada à frequência de amostragem dos conversores A/D. De acordo com dados do *RTDS Technologies*

Inc.(2008), o desvio máximo esperado, em módulo, para localizações das faltas é proporcional à metade do período de amostragem  $\Delta t$ , calculado por meio da expressão 9.

$$|E_{AD}| \approx \frac{\Delta t \cdot c}{2}, \quad (9)$$

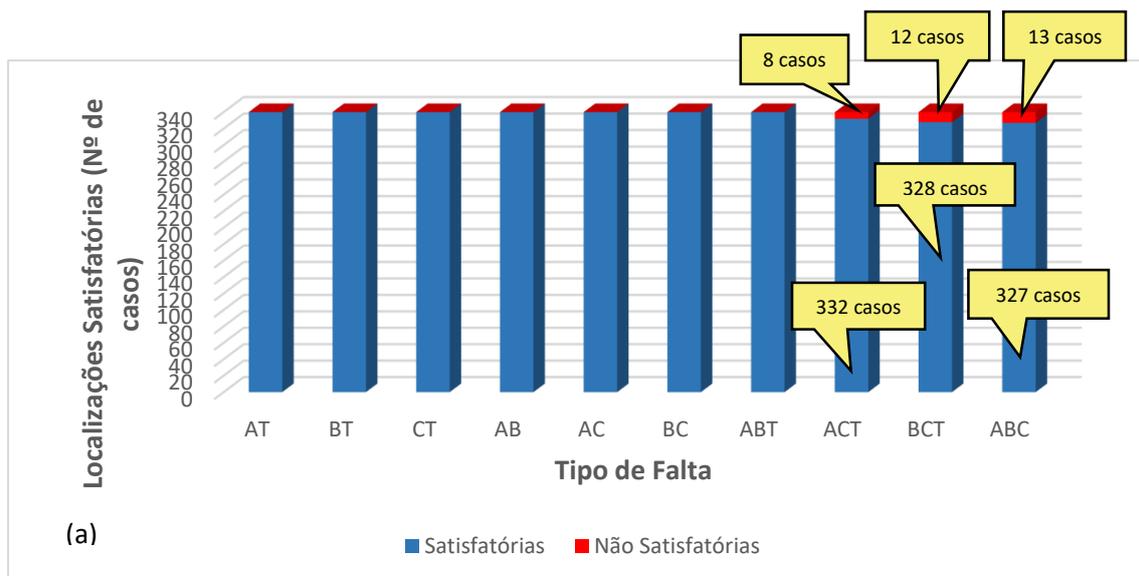
Lendo  $c$  a velocidade da luz ( $\approx 300.000$  km/s).

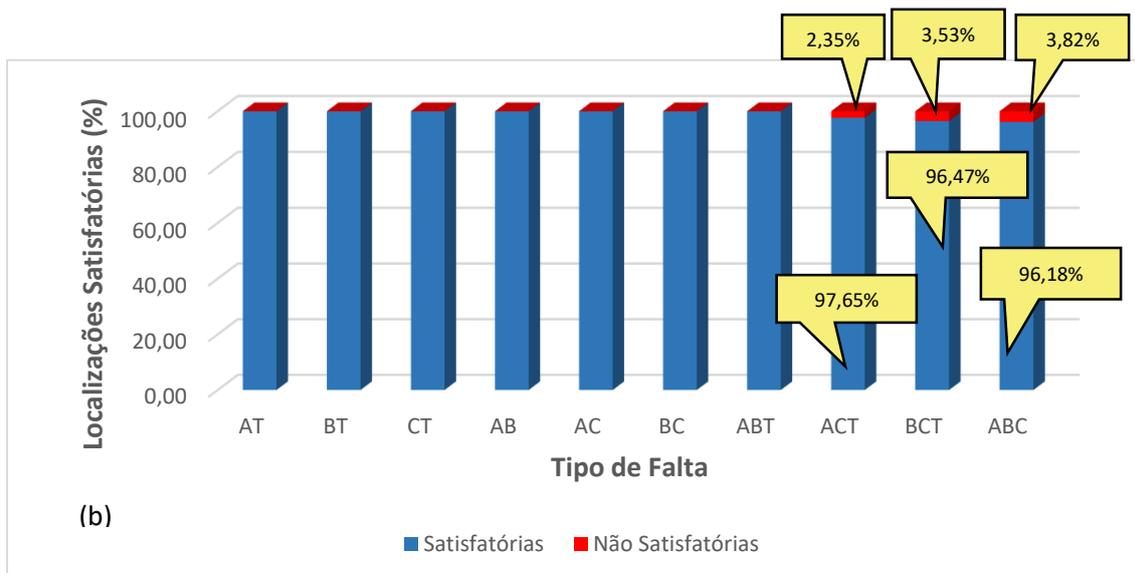
Na localização de faltas, considerou-se o erro absoluto ( $EA$ ) como sendo a diferença entre o ponto real de ocorrência do distúrbio e o local estimado pelo algoritmo localizador, em módulo. Para avaliação da precisão, considerou-se o erro relativo, em porcentagem, proporcional à razão entre o  $EA$  e o comprimento  $L$  da linha monitorada.

Os métodos TWFL implementados consideram sinais virtualmente digitalizados sob um período de amostragem igual a  $50 \mu s$ , implicando em um erro admissível de  $7,5$  km, em módulo.

De acordo com os dados da Tabela 7, para cada tipo de falta foram avaliados 340 casos, totalizando 3400 faltas simuladas no RTDS<sup>TM</sup>. Nas Figuras 26(a) e 26(b), são apresentados os resultados referentes ao número de localizações satisfatórias verificadas no conjunto de simulações realizadas, sendo estes dados expressos em termos de número de casos satisfatórios e em porcentagem do conjunto total de casos avaliados.

**Figura 26: Número de simulações satisfatórias para um total de 340 casos por tipo de falta: (a) Em número de casos (b) Em porcentagem.**



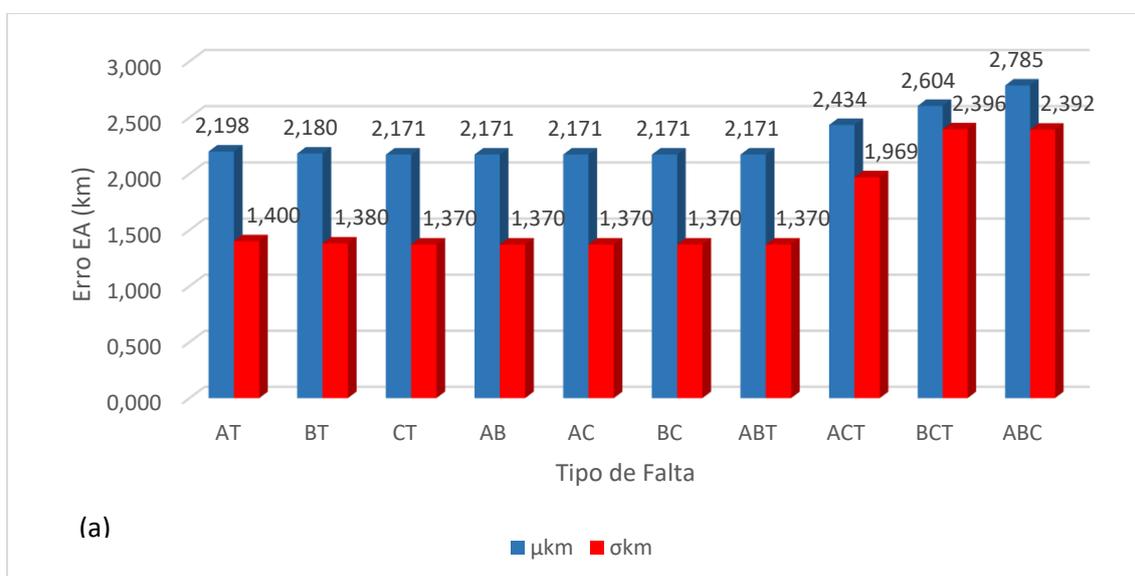


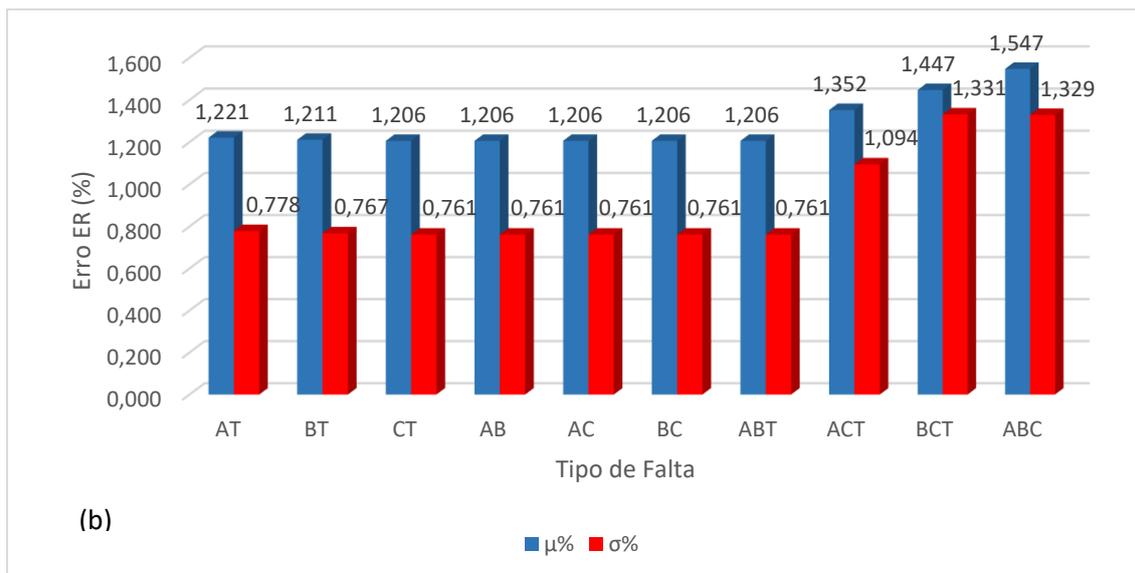
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o sistema localizador apresentou, na grande maioria dos casos, desvios abaixo de 7,5 km, extrapolando o erro admissível apenas nas faltas ACT (8 casos – 2,35%), BCT (12 casos – 3,53%) e ABC (13 casos – 3,82%). Normalmente, as localizações não satisfatórias ocorrem quando a falta está localizada mais próximas das extremidades da LT.

Nas Figuras 27(a) e 27(b), apresentam-se as médias  $\mu$  e os desvios padrão  $\sigma$  dos erros verificados para cada tipo de falta, expostos em termos dos erros absolutos  $EA$  ( $\mu_{km}$  e  $\sigma_{km}$ ) e dos erros relativos  $ER$  ( $\mu\%$  e  $\sigma\%$ ).

Figura 27: Médias e desvios padrão dos erros das localizações estimadas: (a) Médias  $\mu_{km}$  e desvios padrão  $\sigma_{km}$  dados em km (b) Médias  $\mu\%$  e desvios padrão  $\sigma\%$  dados em porcentagem.





**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Observa-se que o algoritmo apresentou um bom desempenho, uma vez que as médias  $\mu_{km}$  não ultrapassaram 3 km, com desvios padrão  $\sigma_{km}$  abaixo de 2,5 km. Em relação aos erros relativos, as médias  $\mu\%$  não ultrapassaram 1,6%, com desvios padrão  $\sigma\%$  abaixo de 1,4%.

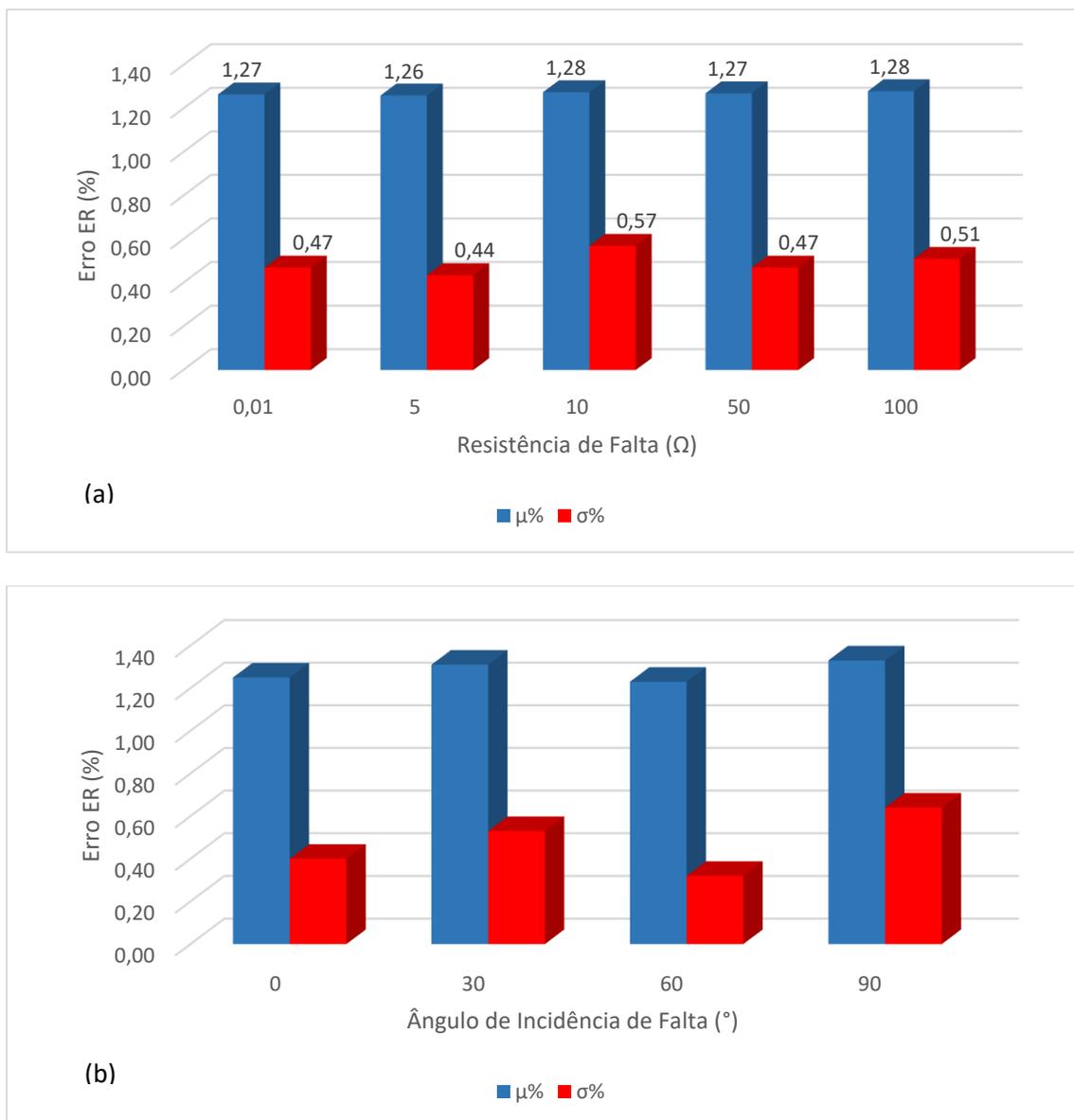
Considerando as variações das características de falta, observa-se que o desempenho do sistema localizador também é bastante satisfatório.

Para os valores de resistência de falta, as médias  $\mu\%$  dos erros ER não ultrapassam 1,4%, enquanto os desvios padrão  $\sigma\%$  não ultrapassam 0,6%, conforme pode ser observado na Figura 28(a).

Para o ângulo de incidência de falta, as médias  $\mu\%$  dos erros ER não ultrapassam 1,4%, enquanto os desvios padrão  $\sigma\%$  não ultrapassam 0,7%, conforme pode ser observado na Figura 28(b).

A partir dos bons resultados evidenciados nas Figuras 26, 27 e 28, observa-se que o método é bastante eficaz e que consegue localizar de forma satisfatória as faltas em LT, levando-se em consideração as limitações da frequência de amostragem.

**Figura 28: Análise dos erros das localizações estimadas: (a) Médias  $\mu\%$  e desvios padrão  $\sigma\%$  para variação de resistência de falta (b) Médias  $\mu\%$  e desvios padrão  $\sigma\%$  para variação de ângulo de incidência de falta.**



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

O estudo mostra a boa robustez do algoritmo TWFL para aplicações em tempo real sem conhecimento dos registros completos do distúrbio em estudo. Assim, a técnica pode ser classificada como auto-adaptativa e automática.

A Tabela 8 apresenta uma noção global do desempenho do algoritmo durante as simulações em tempo real, com os resultados mais relevantes obtidos ao longo das análises via RTDS<sup>TM</sup>.

**Tabela 8: Resultados gerais das simulações em tempo real via RTDS™.**

Tipo de Falta	Total de Casos	Localizações Satisfatórias		Erros Calculados					
		Quant.	%	Médias		Desvios		Erros Máx.	
				$\mu_{km}$	$\mu_{\%}$	$\sigma_{km}$	$\sigma_{\%}$	Km	%
AT	340	340	100	2,198	1,221	1,400	0,778	5,700	3,167
BT	340	340	100	2,180	1,211	1,380	0,767	4,800	2,667
CT	340	340	100	2,171	1,206	1,370	0,761	4,800	2,667
AB	340	340	100	2,171	1,206	1,370	0,761	4,800	2,667
AC	340	340	100	2,171	1,206	1,370	0,761	4,800	2,667
BC	340	340	100	2,171	1,206	1,370	0,761	4,800	2,667
ABT	340	340	100	2,171	1,206	1,370	0,761	4,800	2,667
ACT	340	332	97,647	2,434	1,352	1,969	1,094	17,850	9,917
BCT	340	328	96,471	2,604	1,447	2,396	1,331	20,400	11,333
ABC	340	327	96,176	2,785	1,547	2,392	1,329	11,550	6,417
Resumo	3400	3367	99,029	2,305	1,281	1,639	0,910	20,400	11,333

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Apenas 33 localizações dos 3400 casos analisados extrapolaram, em módulo, o erro admissível, sendo, portanto, 99,029% dos resultados classificados como satisfatórios. Considerando os resultados gerais, evidencia-se o bom desempenho do sistema localizador como ferramenta para localização em tempo real de faltas em LT por meio da teoria de ondas viajantes.

## 6. CONCLUSÕES

Com este trabalho, avaliou-se um algoritmo para localização de faltas em LT por meio de simulações em tempo real utilizando o RTDS™. Para a detecção de transitórios nos terminais monitorados, a técnica baseou-se na teoria de ondas viajantes, fazendo uso da Transformada de Park (Tdq0).

O método monitora os componentes de alta frequência em dois terminais da LT por meio da identificação de crescimentos abruptos na energia  $\zeta_{dif}$  dos coeficientes de diferença  $c_{dif}$  obtidos por manipulação das tensões de eixo direto calculadas via Tdq0.

Para fins de avaliação do método implementado, modelou-se no RTDS™ uma LT a partir de parâmetros reais. O desempenho para aplicações em tempo real foi estudado diante de diferentes cenários de faltas, variando-se o local de ocorrência do defeito, a resistência de falta, o ângulo de incidência da falta e o tipo de falta, totalizando 3400 casos analisados por meio da ferramenta *script*.

Os resultados evidenciaram a eficiência do método aplicado em tempo real em LT, constatando-se um bom desempenho do sistema localizador, pois dos 3400 casos simulados, 99,029% apresentaram localizações com erros dentro dos limites admissíveis, considerando a frequência de amostragem utilizada. Desta forma, comprovou-se, com este trabalho, a alta confiabilidade deste método.

## REFERÊNCIAS

- DOMMEL, H. W., *Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book*. Portland, BPA: [s.n.], 1996.
- DOMMEL, H. W., MICHELS, J. “High-speed Relaying Using Travelling Wave Transient Analysis”. *IEEE Conference*, Paper No. A78, pp. 214-219, January/February 1978.
- GALE, P. F., CROSSLEY, P. A., XU BINGYIN GE YAOZHONG CORY, B. J., BARKER, J. R. G. “Fault Location Based on Travelling Waves”. *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 54-59, New York, 1993.
- GIRGIS, A. M., HART, D. G., PETERSON, W. L. “A New Fault Location Technique for Two and Three-Terminal Lines”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 98-107, January 1992.
- GOPALAKRISHNAN, A.; KEZUNOVIC, M.; MCKENNA, S.; HAMAI, D. Fault location using the distributed parameter transmission line model. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 4, p. 1169 –1174, oct 2000. ISSN 0885-8977.
- JAMALI, S.; GHEZELJEH, A. Fault location on transmission line using high frequency travelling waves. *International Conference on Developments in Power System Protection*, v. 1, p. 220–223, April 2004.
- JIAN, Q., XIANGXUN, C., JIANCHAO, Z. “Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform”. *International Conference on Power System Technology - POWERCON'98*, Beijing, China, 18-21 August, 1998.
- JOHNS, A. T.; JAMALI, S. “Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines”. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, November 1990.
- LIMA, H. B.; SILVA, W. P.; FERNANDES Jr., D. “Localização Automática de Faltas em Sistemas de Transmissão Baseada na Teoria de Ondas Viajantes”. *V Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos - EGSE 2016*, Campina Grande-PB, Brasil, 18-19 de fevereiro, 2016.
- LIN, D., JUN P., WENXIA, S., JUN, T., JUN, Z. “Fault Location for Transmission Line Based on Traveling Waves Using Correlation Analysis Method”. *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, November 9-13, 2008.

- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março 2011a.
- LOPES, F. V. *Localização Automática de Faltas em Sistemas de Transmissão Baseada na Teoria de Ondas Viajantes*. Projeto e Pesquisa 1 Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, novembro 2011b.
- LOPES, F. V. *Análise Comparativa entre Métodos Utilizados na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão*. Projeto e Pesquisa 2 Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, abril 2012a.
- LOPES, F. V. *Avaliação da Localização de Faltas em Linhas de Transmissão em Tempo Real via RTDS<sup>TM</sup>*. Projeto e Pesquisa 3 Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, junho 2012b.
- MELO, Y. M. P. *Análise Comparativa entre Métodos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão via RTDS<sup>TM</sup>*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, outubro 2013.
- RTDS TECHNOLOGIES INC. *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual: RSCAD Version*. Winnipeg, Manitoba, Canada, 2008.
- RTDS TECHNOLOGIES. Disponível em: <<https://www.rtds.com/>> Acesso em: 20 de julho de 2017.
- SILVA, M. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.
- WISZNIEWSKI, A. *Accurate fault impedance locating algorithm*. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, v. 130, n. 6, p. 311–314, November 1983. ISSN 0143-7046.
- ZAMORA, I.; MINAMBRES, J.; MAZON, A.; ALVAREZ-ISASI, R.; LAZARO, J. *Fault location on two-terminal transmission lines based on voltages*. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 143, n. 1, p. 1–6, jan 1996. ISSN 1350-2360.