

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**FERNANDO PENHA DE MEDEIROS  
MARCOS PAULO VALLE DE FREITAS**

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
UTILIZANDO O MÉTODO DAS ONDAS VIAJANTES**

**VOLTA REDONDA  
2017**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
UTILIZANDO O MÉTODO DAS ONDAS VIAJANTES**

Trabalho de Conclusão apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA  
como requisito à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Alunos:

Fernando Penha de Medeiros

Marcos Paulo Valle de Freitas

Orientador:

Prof. D. Sc. Helio de Paiva Amorim Junior

**VOLTA REDONDA**

**2017**



Fundação Oswaldo Aranha



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Curso:** Engenharia Elétrica

**Acadêmico: Matrícula:** Fernando Penha de Medeiros 201310085 Marcos Paulo Valle de Freitas 201310729

**Título do TCC:** Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando o Método das Ondas Viajantes

Apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica

Aprovada em 11 de novembro de 2017

Banca Avaliadora:

Professor Orientador  
Hélio de Paiva Amorim Júnior, Doutor, UniFOA

Professor Avaliador  
Bruno Moreira da Silva, Especialista, UniFOA

Professor Avaliador  
Péricles Guedes Alves, Doutor, UniFOA

*“A inspiração vem, mas precisa te encontrar trabalhando.” Pablo Picasso*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a Deus todo nosso amor e gratidão, porque sem Ele nada do que conquistamos até aqui seria possível. Ele é a razão de tudo e tem sido nosso sustento ao longo da vida. Nos momentos de fraqueza, Ele foi e é a nossa força para caminhar um pouco mais adiante.

Às nossas famílias, nosso porto seguro. Sem o apoio, incentivo e investimento de vocês, talvez essa conquista não fosse possível. Obrigado pelo amor e carinho com que nos criaram. Obrigado, porque nos momentos de dificuldades e incertezas, ou até mesmo quando pensamos em desistir, vocês nos abraçaram e tiveram palavras de encorajamento e incentivo, que nos fizeram dar os passos necessários para que chegássemos até aqui. Obrigado pelas muitas vezes em que colocaram seus planos e projetos de lado, para que pudéssemos viver os nossos. Amamos vocês!

Aos colegas de turma, que viveram conosco esses cinco anos de formação, e que de uma maneira ou de outra nos ajudaram a vencer os desafios da graduação.

Aos professores e professoras que, ao transmitirem seus conhecimentos e experiências, contribuíram para que construíssemos os nossos.

Ao Prof. Dr. Hélio Amorim, nosso orientador neste Trabalho, pelo apoio técnico-profissional e confiança.

## RESUMO

Com a integração a cada dia de novos ativos ao Sistema Elétrico de Potência e o constante aumento no consumo de energia elétrica no país, faz-se necessário que o sistema como um todo opere de forma a suprir, com eficiência, os patamares de carga solicitados, visando a melhor qualidade possível dos serviços de transmissão e distribuição. É importante que, em caso de perturbações, essas sejam tratadas de forma a erradicar o problema no menor tempo possível, minimizando as perdas. Então, os esquemas de proteção dos equipamentos do Sistema Elétrico precisam ser dos mais arrojados possíveis, principalmente quando se trata de linhas aéreas de transmissão, que estão expostas a todo tipo de intempéries, e representam grande parte do sistema em termos de extensão e carga transmitida, passando por diversos tipos de ambientes e lugares, inclusive os de difícil acesso e com pouca ou nenhuma permanência de pessoas. Assim, visando acelerar o retorno operacional das linhas de transmissão em caso de perturbações, a localização rápida e precisa do ponto de falta por parte de determinado relé de proteção se torna imprescindível, uma vez que é totalmente inviável percorrer toda a extensão da LT à procura de tal ponto. Nesse sentido, o presente trabalho analisa e verifica a rapidez e a precisão da técnica de localização de faltas em linhas de transmissão, através de simulações de localização de faltas em LTs, utilizando os *softwares* Matlab e ATP Draw, e a construção de diagramas de Bewley-Lattice.

**Palavras-chave:** localização de faltas; linhas de transmissão; rapidez e precisão; simulações.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Motivação .....	14
1.2	Objetivos.....	14
1.3	Contribuição.....	14
1.4	Estrutura do trabalho .....	15
2	SISTEMA DE TRANSMISSÃO .....	16
2.1	Linhas de transmissão .....	17
2.2	Transmissão de energia elétrica.....	21
2.3	Análise comportamental da tensão e corrente em uma linha de transmissão.....	21
2.4	Transferência de energia .....	28
2.4.1	Variações da resistência no terminal receptor de uma LT .....	30
2.4.1.1	Resistência terminal maior que a impedância da linha ( $R_2' > Z_0$ ).....	31
2.4.1.2	Resistência terminal menor que a impedância da linha ( $R_2'' < Z_0$ ) .....	32
3	O MÉTODO DE ONDAS VIAJANTES .....	35
3.1	Coeficiente de reflexão .....	39
3.2	Análise do comportamento das OV em um sistema real .....	41
3.2.1	Distúrbio no Tronco de Potência Ivaiporã – Itaberá (Paraná- São Paulo).....	41
4	ESTUDO DE CASO .....	56

4.1 Simulações .....	57
5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS .....	70
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Horizonte 2017 do SIN.....	17
Figura 2 - Demanda em MWh/h do SIN entre 2010 e 2016. ....	19
Figura 3 - Principais causas de perturbações em LTs da Rede Básica no ano de 2016. ....	20
Figura 4 - Esquema de uma linha de transmissão bifilar ideal. ....	22
Figura 5 - Circuito equivalente aproximado de uma LT bifilar ideal.....	22
Figura 6 - Energização de trecho de linha de comprimento unitário. ....	25
Figura 7 - Energização de trecho de linha de comprimento unitário. ....	30
Figura 8 - Variação da tensão e corrente numa linha ideal com $R2'' < Z0$ no terminal receptor.....	34
Figura 9 - Variação da tensão e corrente numa linha ideal com $R2'' < Z0$ no terminal receptor.....	34
Figura 10 - Tensão e corrente para linha com $Z2 > Z0$ : ondas direta, refletida e total. ....	36
Figura 11 - Tensão e corrente para linha com $Z2 < Z0$ : ondas direta, refletida e total. ....	36
Figura 12 - LT Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto 765 kV. ....	42
Figura 13 - Isolador de pedestal da bobina de bloqueio da fase Branca do circuito C1 na SE de Itaberá. ....	43
Figura 14 - Comportamento da onda viajante de tensão, refletida nos terminais da LT.....	47
Figura 15 - Comportamento da onda viajante de corrente, refletida nos terminais da LT.....	47
Figura 16 - Modelo da LT Ivaiporã – Itaberá para simulação de faltas.....	49
Figura 17 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo.....	50
Figura 18 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 50 km. ....	52
Figura 19 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 100 km. ....	53
Figura 20 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 150 km. ....	53
Figura 21 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 200 km. ....	54
Figura 22 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 250 km. ....	54
Figura 23 – LT Goshen Drummond representada em mapa.....	57
Figura 24 – Tronco de Potência da LT Goshen – Drummond.....	57

Figura 25 – Comportamento da onda viajante de tensão, refletida nos terminais da LT. ....	58
Figura 26 – Comportamento da onda viajante de corrente, refletida nos terminais da LT. ....	59
Figura 27 - Modelo da LT Goshen – Drummond para simulação de localização de faltas.....	60
Figura 28 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo.....	61
Figura 29 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 30 km. ....	62
Figura 30 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 60 km. ....	63
Figura 31 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 90 km. ....	63
Figura 32 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 110 km. ....	64
Figura 33 - Modelo da LT Goshen - Drummond para simulação de localização da ..	65
Figura 34 - Modelo da LT Goshen - Drummond para simulação de localização da ..	65
Figura 35 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo.....	66
Figura 36 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo.....	66
Figura 37 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta em 109,74 km.....	67
Figura 38 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta em 98,85 km.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Extensão das Linhas de Transmissão do SIN – km.....	18
Tabela 2 - Características da LT Ivaiporã – Itaberá .....	44
Tabela 3 – Tempo de chegada da onda de corrente aos terminais da .....	50
Tabela 4 – Resultado das simulações para localização de pontos de faltas na LT Ivaiporã- Itaberá .....	55
Tabela 5 - Características da LT Goshen – Drummond.....	58
Tabela 6 - Tempo de chegada da onda de corrente aos terminais da .....	61
Tabela 7 - Resultado das simulações para localização de pontos de faltas na LT Goshen-Drummond.....	64
Tabela 8 – resultados das simulações para faltas reais na LT Goshen- Drummond.....	68

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A – ampère (unidade de medida de corrente elétrica)

ATP – *Alternative Transient Program*

C – capacitância

$\Delta E_e$  – variação de energia no campo elétrico

$\Delta E_m$  – variação de energia no campo magnético

$\Delta x$  – unidade de comprimento infinitesimal

F – farad (unidade de medida de capacitância)

*fem* – força eletromotriz

H – henry (unidade de medida de indutância)

$I_0$  – corrente elétrica de entrada da linha

$I_2$  – corrente elétrica no terminal receptor da linha

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

kA – quilo-ampère

km/s – quilômetro por segundo

kV – quilo-volt

L – indutância

LT – Linha de Transmissão

MW – Mega-Watt

MWh/h – Mega-Watt-hora por hora

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

OV – Ondas Viajantes

$\Omega$  – ohm (unidade de medida de resistência elétrica)

$R_2$  – resistência terminal de linha do lado receptor

SE - Subestação

SIN – Sistema Interligado Nacional

U – tensão no terminal transmissor

v – velocidade de propagação

V – volt (unidade de medida de tensão elétrica)

$Z_0$  – impedância natural da linha

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1 – Algoritmo para análise do Blecaute de 2009.....	74
Apêndice 2 – Perfil das correntes de curto-circuito na frequência fundamental para LT Ivaiporã-Itaberá.....	76
Apêndice 3 – Algoritmo para análise de faltas simuladas na LT Goshen- Drummond.....	79
Apêndice 4 – Perfil das correntes de curto-circuito na frequência fundamental para LT Goshen-Drummond.....	81

## 1 INTRODUÇÃO

As dimensões territoriais do Brasil são continentais, e sua área superficial é estimada em mais de 8,5 milhões de km<sup>2</sup>, segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) [1]. Ainda segundo o Instituto, apesar do extenso território, a maior parcela dos habitantes está concentrada nas regiões Sul e Sudeste, que juntas correspondem a 56,13% do contingente populacional [2]. Dessa forma, a maior demanda por eletricidade também parte dessas duas regiões.

Em contrapartida, as principais fontes de produção de energia elétrica no país encontram-se afastadas dos centros de maior consumo. São as Usinas e Centrais Geradoras Hidrelétricas, cujas instalações exigem o alagamento de vastas áreas, e que em 2016, de acordo com o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), órgão que gerencia a produção e transmissão de energia elétrica do país, foram responsáveis pela geração de 101.598 MW de potência (cerca de 71,5% da matriz de energia elétrica do Brasil) [3], devido ao grande potencial hídrico existente no território nacional. Sendo assim, a maneira como a energia produzida chega até seus consumidores é através do SIN (Sistema Interligado Nacional), que é o complexo sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro, coordenado e controlado pelo ONS.

No ano de 2016, segundo informações do ONS, a rede de transmissão do SIN era composta por 134.765 km de linhas aéreas de transmissão, levando eletricidade às cinco regiões do Brasil. Por serem de grandes extensões – cruzando fronteiras estaduais – as linhas de transmissão estão sujeitas a todo tipo de intempéries naturais, principalmente às descargas atmosféricas, que causam perturbações no sistema de transmissão, interrompendo, na maioria dos casos, o serviço de fornecimento de energia elétrica.

Nesse contexto, a precisão e a rapidez na identificação dos pontos de ocorrência de faltas no sistema são de suma importância, pois agregam eficiência à manutenção corretiva, mitigando o tempo de indisponibilidade do fornecimento de energia e as perdas de potência sofridas no momento de eventual distúrbio. Afinal, segundo LEÃO (2009), o principal objetivo da gestão de um sistema elétrico de potência, desde a fase de geração da energia até a entrega da mesma aos consumidores finais, é garantir o fornecimento de eletricidade com qualidade. Para

tanto, é primordial que sejam atendidos padrões normatizados de confiabilidade, continuidade e segurança, procurando sempre minimizar custos e impactos ao meio ambiente e os riscos pessoais [4].

## 1.1 Motivação

A detecção e localização de uma perturbação são etapas fundamentais no processo de eliminação de uma falta ocasional num sistema de potência, de forma a garantir a continuidade do fornecimento de energia. Devido à grande extensão das linhas de transmissão aéreas, quanto mais precisa for essa localização, mais eficiente se torna o trabalho de manutenção dos profissionais responsáveis por corrigir os danos causados pelo distúrbio.

Dentro desse panorama, encontra-se o método de localização de faltas por ondas viajantes, que se mostra bastante eficaz quando os objetivos são reduzir o tempo de detecção dos transitórios oriundos de surtos e indicar, como o menor erro possível em relação à extensão da linha, o ponto de ocorrência da falta.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem por finalidade:

- analisar o comportamento das ondas viajantes de tensão e corrente em uma linha de transmissão ao longo do tempo;
- apresentar o método de localização de faltas em LTs a partir de transitórios de tensão e corrente oriundos de surtos;
- realizar um estudo de caso, simulando a obtenção de diversos pontos de falta em uma LT real, a partir de algoritmo construído no *software* Matlab, sendo posteriormente verificadas a eficiência e a precisão do método através de simulações no *software* ATP.

## 1.3 Contribuição

Entender o que são as ondas viajantes e compreender o seu comportamento nas linhas de transmissão é de grande importância para a Engenharia Elétrica, no que diz respeito à prática de melhorias na proteção e consequente manutenção dos

sistemas elétricos. Assim, através deste trabalho, espera-se mostrar a eficiência do método de localização de faltas em linhas de transmissão a partir da detecção e interpretação de ondas viajantes pelos equipamentos de proteção.

Tal eficiência é evidenciada no estudo de caso desenvolvido, onde se utiliza um algoritmo construído no *software* Matlab para simular a localização de quatro pontos distintos de falta em uma LT real, além de verificar a precisão e rapidez na localização de duas faltas reais ocorridas na mesma linha de transmissão.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

O capítulo 2 apresenta uma visão geral a respeito de Sistema de Transmissão e mostra a atual configuração dos sistema brasileiro. Em seguida, discorre sobre linhas de transmissão e desenvolve uma análise do comportamento de ondas de tensão e corrente em uma LT.

O capítulo 3 fala sobre o método de localização de faltas em linhas de transmissão a partir do conceito de ondas viajantes, e exemplifica o mesmo, tomando como objeto de análise um distúrbio ocorrido na LT 765 kV de Ivaiporã-Itaberá, em 2009.

O capítulo 4 traz o estudo de caso, que verifica a precisão do método de localização de faltas por OV, através de simulações feitas nos softwares Matlab e ATP para indicação de pontos de faltas fictícios e reais na LT Goshen-Drummond, nos Estados Unidos.

## 2 SISTEMA DE TRANSMISSÃO

A geração de energia elétrica se caracteriza como a primeira fase da prestação do serviço de fornecimento dessa energia ao consumidor. Ela implica na transformação de alguma outra forma energética (mecânica, química, térmica, entre outras) em eletricidade. A tensão e corrente produzidas pelos equipamentos geradores são do tipo alternada, representadas por onda de regime senoidal, com frequência fixa (no sistema elétrico brasileiro a frequência adotada é de 60 Hz, ou 60 ciclos/segundo) e de amplitude variável, em quilovolts. SANTOS (2010) afirma que, devido às grandes distâncias que separam as unidades geradoras dos centros consumidores de energia elétrica, a condução da mesma se dá através dos sistemas de transmissão, que são o meio de levar a energia produzida até os pontos de distribuição e posterior entrega aos consumidores [5].

Um sistema de transmissão de energia elétrica é composto, basicamente, de subestações que elevam ou abaixam o nível da tensão gerada, através de transformadores; linhas de transmissão, que são os condutores efetivos de eletricidade; além de isoladores e torres de sustentação para os condutores, que compõem o conjunto estrutural das LTs.

O sistema de transmissão de energia elétrica do Brasil, o SIN, é um complexo conjunto de troncos de potência interligados entre si, conectando as cinco regiões do país. Ele é administrado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico, órgão responsável por gerir toda a produção e transmissão de energia elétrica no território nacional, e que ano a ano divulga o mapa do sistema interligado instalado no país, chamado Horizonte. O Horizonte 2017, com todo o sistema de transmissão brasileiro está mostrado na figura 1.

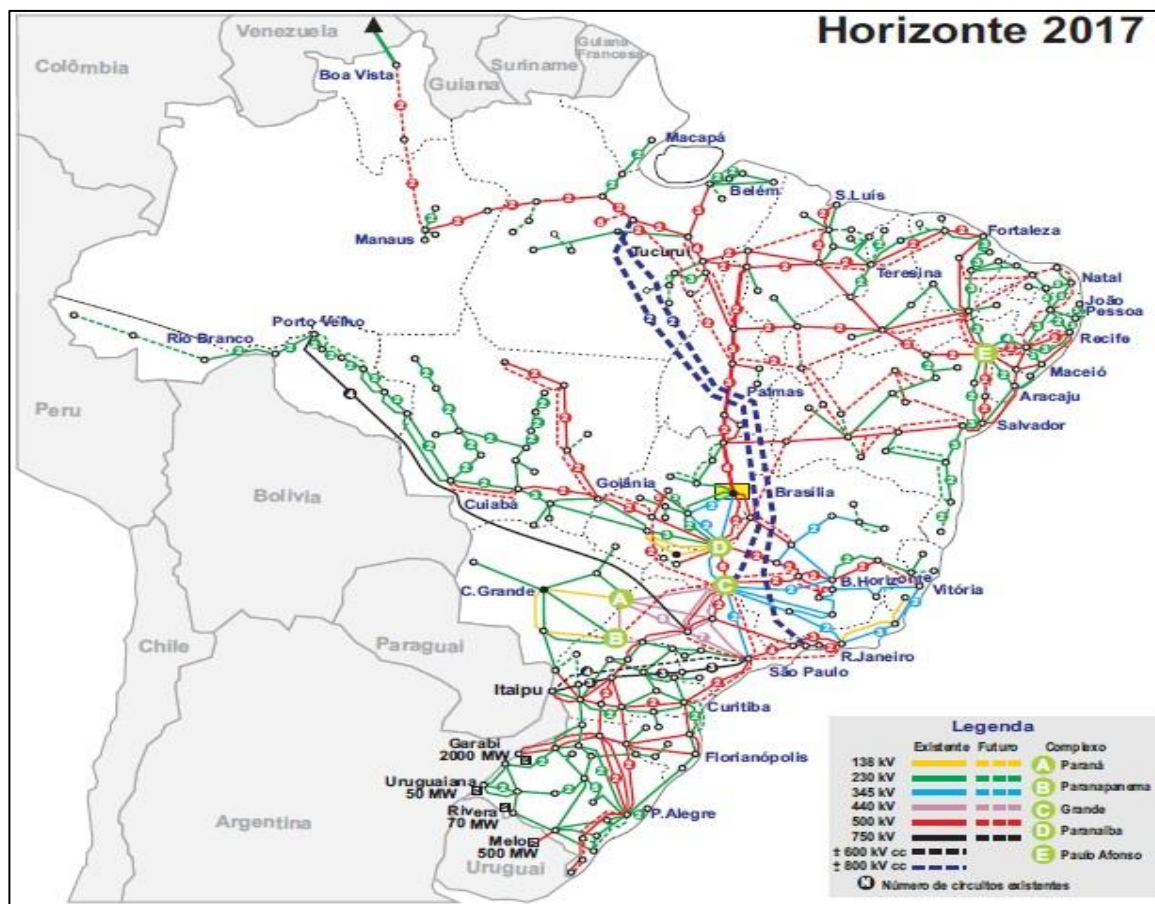


Figura 1 - Horizonte 2017 do SIN.  
Fonte: ONS [6]

## 2.1 Linhas de transmissão

São consideradas os principais elementos constituintes de um sistema de transmissão, pois, além de conduzirem a eletricidade, seja ela em corrente alternada ou contínua, interligam os diversos sistemas de transmissão, oriundos dos diversos tipos de geração de energia. Assim, garante-se uma intercambiabilidade entre os mesmos quando da ocorrência de algum distúrbio ou falta no sistema elétrico, com a finalidade de prover continuidade do fornecimento de energia (MENEZES, 2015) [7].

Ainda segundo MENEZES, linhas de transmissão podem ser classificadas em três tipos:

- aéreas, que são o tipo mais convencional. São cabos nus de cobre ou alumínio, revestidos por camadas isolantes e sustentados por

isoladores, que podem ser de vidro ou cerâmicos, fixados em torres de sustentação;

- subterrâneas, definidas pelo uso de cabos isolados e acondicionados em redes de dutos, sendo de boa utilização quando a transmissão ocorre em grandes centros. Entretanto, seu custo de projeto, materiais e instalação é elevado quando comparado ao custo de implementação de linhas aéreas, tornando seu uso inviável na maioria dos casos;
- subaquáticas, que apesar dos limites impostos pela viabilidade técnico-econômica, se constituem em excelente solução quando há a necessidade de se atravessar rios e canais aquáticos de vãos muito grandes [7].

O tipo mais habitual de linha que compõe os sistemas de transmissão é o aéreo. No Brasil, as linhas de transmissão aéreas levam eletricidade às cinco regiões do país, em diferentes níveis de tensão. A tabela 1 apresenta dados do ONS relativos às extensões das linhas de transmissão instaladas da Rede Básica do SIN, classificadas pelo tipo e nível de tensão que operam, entre os anos de 2010 e 2016.

Tabela 1 - Extensão das Linhas de Transmissão do SIN – km.

<b>Tensão</b>	<b>2010</b>	<b>2012</b>	<b>2014</b>	<b>2016</b>	<b>Var % 2016/2010</b>
<b>230 kV</b>	43.184,5	47.893,5	52.449,8	55.568,0	28,68
<b>345 kV</b>	10.060,5	10.223,9	10.303,2	10.320,0	2,58
<b>440 kV</b>	6.670,5	6.728,2	6.728,2	6.748,0	1,16
<b>500 kV</b>	34.356,2	35.726,2	40.659,4	46.630,0	35,73
<b>600 kVCC</b>	3.224,0	3.224,0	12.816,0	12.816,0	297,52
<b>750 kV</b>	2.683,0	2.683,0	2.683,0	2.683,0	0,00
<b>Total</b>	<b>100.178,7</b>	<b>106.478,8</b>	<b>125.639,6</b>	<b>134.765,0</b>	<b>34,52</b>

Fonte: ONS (adaptado pelos autores) [8]

O aumento substancial na extensão de linhas de transmissão instaladas entre os anos de 2010 e 2014 se justifica pela necessidade de atendimento a uma maior demanda por eletricidade vinda dos centros consumidores. Isso é evidenciado

quando se observa o gráfico da figura 2, onde é mostrado o aumento exponencial da demanda nesse mesmo período.

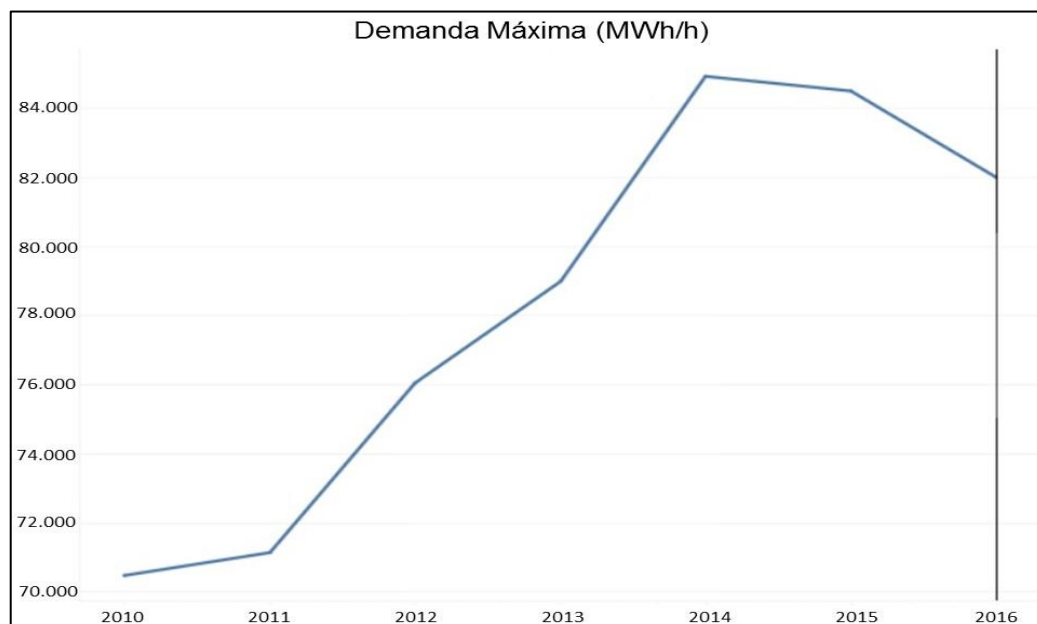


Figura 2 - Demanda em MWh/h do SIN entre 2010 e 2016.  
Fonte: ONS [9]

Sendo o principal componente dos sistemas de transmissão, as LTs exercem papel fundamental na entrega da energia aos consumidores. STEVENSON JR (1982) diz que o desempenho elétrico de uma linha aérea de transmissão depende em grande parte de suas características construtivas e físicas, já que as mesmas ditam seu comportamento, tanto em regime normal de operação como quando da ocorrência de distúrbios na rede. Uma linha de transmissão ideal seria aquela cujo material elétrico atendesse a requisitos como alta condutibilidade elétrica em seus condutores, baixo custo em sua instalação, boa resistência mecânica de suas partes estruturais e condutoras, baixo peso específico de seus materiais e alta resistência à corrosão e à oxidação química [10].

Além das condições dos materiais, fatores ambientais e humanos também interferem no desempenho das linhas de transmissão. De acordo com dados indicadores de qualidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico, até o mês de setembro de 2017 houve um total de 2238 perturbações envolvendo a Rede Básica do SIN. No ano de 2016, esse número chegou a 3201 cortes de carga no sistema, sendo as linhas de transmissão da Rede responsáveis por 2215 ocorrências, ou

69% das perturbações [11]. Ainda segundo o órgão, as descargas atmosféricas foram a principal causa das perturbações originadas em LTs no referido ano, seguidas de outros fatores, como pode ser visto no gráfico da figura 3.

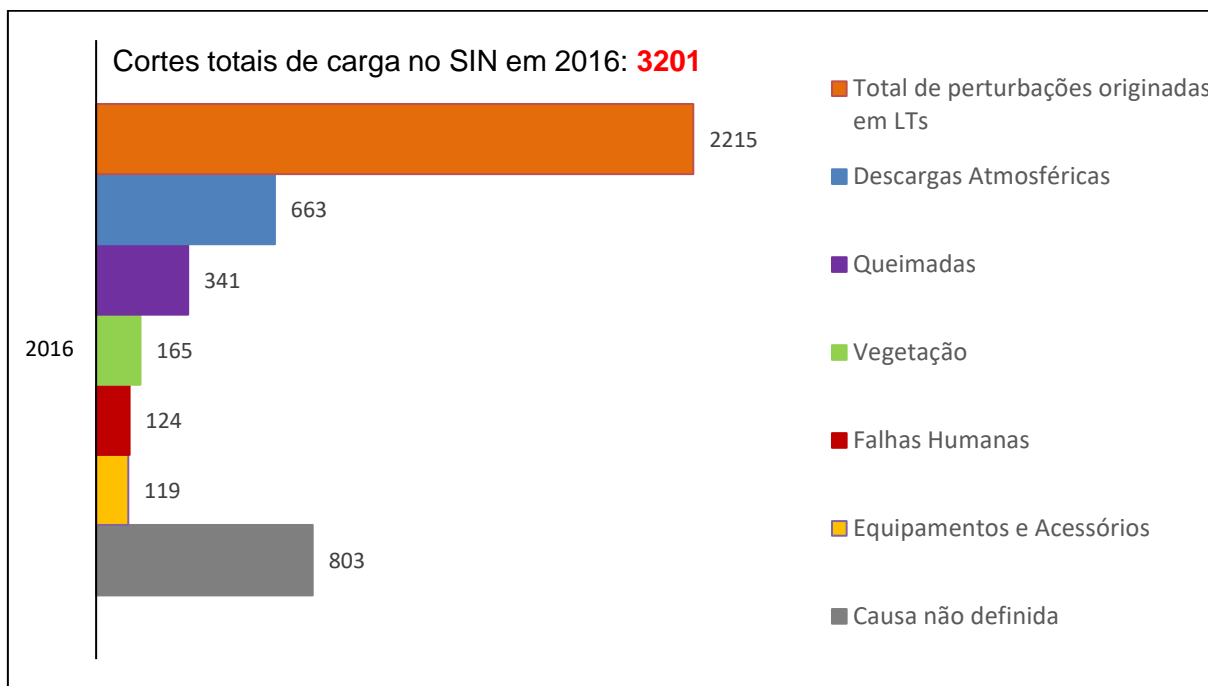


Figura 3 - Principais causas de perturbações em LTs da Rede Básica no ano de 2016.  
Fonte: ONS (adaptado pelos autores) [11]

Interrupções não programadas de cargas no sistema elétrico, originadas por faltas, são prejudiciais tanto a consumidores quanto a fornecedores do serviço de energia elétrica. Aos consumidores, porque esses deixam de usufruir de um serviço pelo qual pagam tarifas e têm, em muitos casos, equipamentos danificados e processos produtivos interrompidos pela falta de energia necessária para alimentar o maquinário fabril. Aos prestadores do serviço, pois têm de arcar com a responsabilidade de restaurar o fornecimento de eletricidade no menor tempo possível, e isso demanda custos relacionados à mão de obra e recursos materiais, que devem estar sempre disponíveis para realização de manutenção corretiva no sistema.

Dessa forma, dispor de equipamentos de proteção que possuem a capacidade de identificar e localizar o ponto de ocorrência de distúrbios de forma rápida e precisa, é crucial para que sejam garantidas a qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica.

## **2.2 Transmissão de energia elétrica**

FUCHS (1977) afirma que existem diversas formas de se analisar a transmissão das correntes, diferenças de potencial e energia ao longo de uma LT. A elaboração de um método matemático-computacional que determine essa distribuição de forma eficiente e que seja, por si só, suficiente para toda e qualquer situação encontrada na realidade se configura como um objetivo impossível de ser alcançado, quando se considera que cada sistema elétrico possui suas particularidades, e todos estão sujeitos às mais variadas interferências físicas dos ambientes onde se encontram alocados/instalados, ainda que essas sejam conhecidas e seja realizado o máximo esforço possível a fim de serem controladas [12].

Entender fenômenos físicos e eletromagnéticos que ocorrem em uma linha de transmissão é de extrema importância para que se compreenda o impacto que as interferências externas e/ou internas causam à mesma, quando essa se encontra em regime normal de operação, e para que se chegue a soluções que sejam passíveis de serem aplicadas na identificação e correção das contingências ocorridas em situações pré-estabelecidas.

## **2.3 Análise comportamental da tensão e corrente em uma linha de transmissão**

O objetivo deste tópico é mostrar de forma clara e idealizada a sequência de eventos físicos, relativos à tensão e corrente, que ocorrem em uma linha de transmissão bifilar, em um circuito fechado. São consideradas apenas linhas de transmissão clássicas, as quais realizam a transferência de energia elétrica entre um terminal gerador e outro consumidor, sem qualquer outro sistema intermediário entre eles. É importante salientar que o terminal gerador será tratado como transmissor, e o consumidor como receptor.

A figura 4 apresenta o esquema de um sistema de transmissão considerado ideal, onde a LT é formada por dois condutores metálicos ideais, de resistência nula e completamente isolados, separados entre si por um dielétrico perfeito, tornando inexistentes as perdas de energia para o ambiente. Além disso, os condutores estão suficientemente distantes do solo ou de qualquer outra estrutura ou linha que possa

gerar algum tipo de interferência, e possuem comprimento  $l$ , medido em quilômetros.

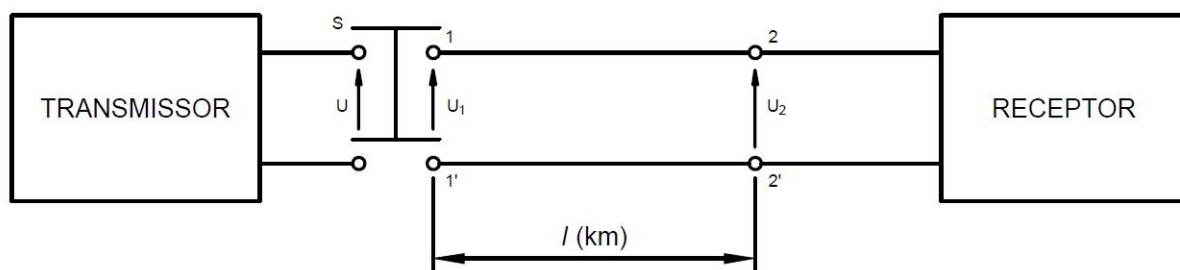


Figura 4 - Esquema de uma linha de transmissão bifilar ideal.  
Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

Depreende-se dos fundamentos da Física que, entre dois condutores elétricos, separados por um dielétrico, existe uma indutância  $L$  e uma capacitância  $C$ . O circuito da figura 5 traz, de forma genérica, a representação de uma linha de transmissão que apresenta essa configuração por unidade de comprimento infinitesimal  $\Delta x$  (km).

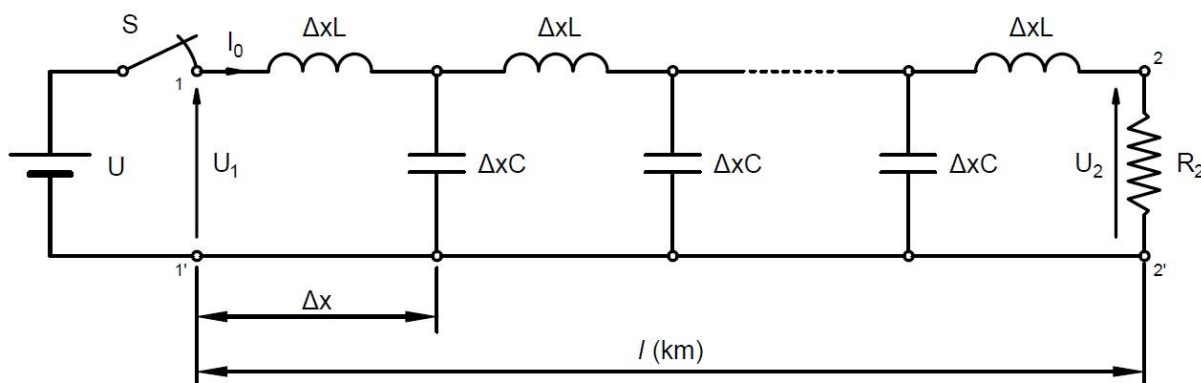


Figura 5 - Circuito equivalente aproximado de uma LT bifilar ideal.  
Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

No instante exatamente anterior ao fechamento da chave  $S$  ( $t < 0$ ), a tensão nos terminais da fonte (transmissor) é igual a  $U$  (V). Ao ser fechada a chave  $S$  no instante  $t = 0$ , uma corrente  $I_0$  começa a circular pelo circuito e, entre os pontos 1 e 1' há uma diferença de potencial de valor igual ao da fonte – isso é possível porque

ocorre transferência de cargas elétricas a partir da fonte. Considerando-se a distância do tamanho do primeiro elemento infinitesimal de comprimento  $\Delta x$ , uma variação de tempo  $\Delta t$ , em segundos, é necessária para que a capacitância  $\Delta xC$  (farad/km) nele existente apresente em seus terminais uma tensão cujo valor é o mesmo da tensão proveniente da fonte. Isso se deve ao fato de que a corrente oriunda da fonte precisa primeiro passar pela indutância  $\Delta xL$ .

De maneira análoga, um novo tempo  $\Delta t$  é necessário para que a tensão  $U$  apareça nos terminais da próxima capacitância  $\Delta xC$ . Dando prosseguimento a esse raciocínio, percebe-se que, após o somatório dos tempos  $\Delta t$ , a corrente que passa pelo terminal receptor, representado pela resistência  $R_2$ , torna-se igual à corrente  $I_0$ , que é a corrente de linha, originária da fonte e, assim, a tensão nos terminais de  $R_2$  passa a ser igual a  $U$ .

Vários cientistas, dentre os quais destacam-se Ampère, Oersted, Gauss e Maxwell, formularam e comprovaram teorias a respeito dos fenômenos resultantes do movimento de cargas elétricas em condutores metálicos, bem como o resultado da simples presença de tais cargas no interior de um condutor, as quais são utilizadas na construção de soluções para os problemas de Engenharia Elétrica encontrados pelo homem até os dias atuais. Dessa forma, convém apresentar aqui, ainda que de maneira superficial, as considerações a respeito da presença e do movimento de cargas elétricas em condutores elétricos, que são de fundamental importância para o entendimento do que vem sendo elucidado até aqui.

Dos princípios do eletromagnetismo infere-se que, cargas em movimento no interior de um condutor geram nas proximidades do mesmo um campo magnético, cuja intensidade é proporcional à corrente elétrica que percorre esse condutor. Já a presença dessas cargas no interior do condutor faz com que nele surja um campo elétrico, cujo módulo é dado em função da quantidade de cargas presentes. Aplicando esses conceitos ao circuito representativo da linha de transmissão da figura 5, pode-se afirmar que com a passagem da corrente elétrica pelo condutor apareçam, respectivamente nas indutâncias  $\Delta xL$  e nas capacitâncias  $\Delta xC$ , um campo magnético e um campo elétrico.

Portanto, ao se energizar uma linha de transmissão, campos magnéticos e elétricos, originados no transmissor, propagam-se ao longo da mesma até que cheguem ao receptor. Sabe-se, a partir da teoria da propagação ondulatória, que:

$$v = \lambda \cdot f \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

onde:

$v$  é a velocidade de propagação, em metros por segundo;

$\lambda$  é o comprimento de onda, dado em metros;

$f$  é a frequência da onda, em Hertz, e que pode ser substituída por  $1/T$ , em que  $T$  representa o período de um ciclo de onda completa.

Analogamente, pode-se formular a velocidade de propagação de um sinal de tensão ou corrente em uma linha de transmissão de comprimento  $l$  (km) por:

$$v = \frac{l}{T} \quad (\text{km/s}) \quad (2)$$

onde:

$T$  é o tempo necessário para que a tensão no terminal receptor atinja o mesmo valor  $U$  da tensão fornecida pela fonte.  $T$  pode ser entendido como o somatório de cada parcela  $\Delta t$  de tempo necessária ao carregamento de cada uma das capacitâncias existentes na linha de transmissão por unidade infinitesimal de comprimento  $\Delta x$ .

Assim:

$$T = \sum \Delta t \quad (\text{s}) \quad (3)$$

A figura 6 mostra um trecho de linha de comprimento unitário (1 km):

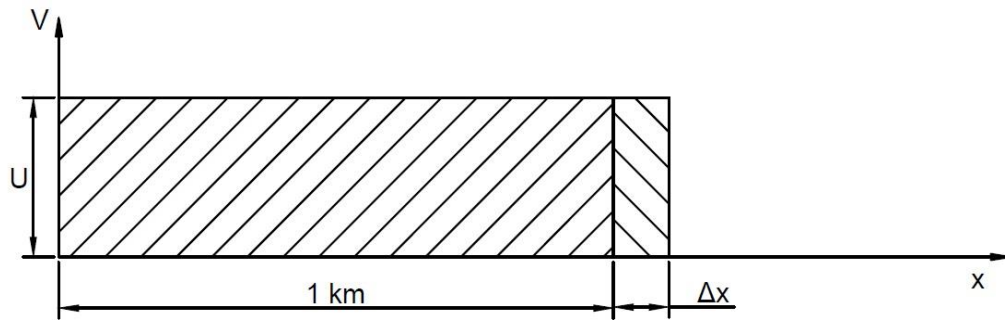


Figura 6 - Energização de trecho de linha de comprimento unitário.  
 Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

Chamando de  $t_1$  o tempo requerido para que esse trecho seja energizado, tem-se:

$$t_1 = \frac{1}{v} \quad (\text{s}) \quad (4)$$

O acúmulo de carga nesse trecho é dado por:

$$q = U \cdot C \quad (\text{C}) \quad (5)$$

e, assim, a corrente numa seção do condutor é:

$$I_0 = q \cdot v = U \cdot C \cdot v \quad (\text{A}) \quad (6)$$

Essa corrente começa a fluir na linha após uma variação de tempo  $\Delta t$ , a partir do instante em que é aplicada uma diferença de potencial entre os terminais da linha. Independente do comprimento da LT, mesmo que esse seja infinito, a intensidade da corrente é a mesma, considerando-se que a fonte aplica tensão de valor inalterado e indefinidamente, suprimindo, assim, a corrente de carga no receptor. A partir daí, é possível definir a impedância de entrada da linha,  $Z_0$ , em função de  $v$  (velocidade de propagação) associada à indutância  $L$  ou à capacitância  $C$ , das seguintes formas:

$$Z_0 = \frac{U}{I_0} = \frac{1}{C \cdot v} \quad (\Omega) \quad (7)$$

Considerando-se um elemento de linha de comprimento  $\Delta x$ , o período  $\Delta t$  é o tempo necessário para que a corrente cresça, em  $\Delta x$ , de zero até  $I_0$ . Nesse trecho, a *fem* induzida será:

$$fem = -\Delta x L \frac{dI_0}{dt} = -\frac{I_0}{\Delta t} \Delta x L \quad (8)$$

ou, lembrando que:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v} \quad (\text{s}) \quad (9)$$

tem-se:

$$fem = -\frac{I_0 \cdot v}{\Delta x} \cdot \Delta x L = -I_0 \cdot L \cdot v \quad (\text{V}) \quad (10)$$

Para que a *fem* seja neutralizada pela tensão aplicada aos terminais pela fonte, é necessário que se faça:

$$U = I_0 \cdot L \cdot v \quad (\text{V}) \quad (11)$$

e assim, a impedância  $Z_0$  pode ser expressa em função da indutância como:

$$Z_0 = \frac{U}{I_0} = L \cdot v \quad (\Omega) \quad (12)$$

Igualando-se as equações (7) e (12), e isolando-se  $v$ , obtém-se:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{km/s}) \quad (13)$$

que é a expressão para a velocidade de propagação dos campos magnético e elétrico ao longo da LT, em função da indutância e da capacitância.

Da Física, pode-se expressar a indutância e a capacitância para uma linha de transmissão a dois condutores, no ar ou no vácuo, desprezando-se os efeitos do fluxo magnético interno do condutor e da presença do solo por [12]:

$$L = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D}{r} \quad (\text{H/km}) \quad (14)$$

e

$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{D}{r}} \quad (\text{F/km}) \quad (15)$$

onde:

$D$  representa a distância entre os condutores;

$r$  é o raio da seção transversal do condutor.

Isolando-se as velocidades de propagação  $v$  das equações (7) e (12) e considerando a igualdade entre ambas, tem-se:

$$\frac{1}{Z_0 C} = \frac{Z_0}{L} \quad (i)$$

$$Z_0^2 = \frac{L}{C} \quad (ii)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega) \quad (16)$$

Substituindo-se (14) e (15) em (16), encontra-se:

$$Z_0 = 60 \ln \frac{D}{r} \quad (\Omega) \quad (17)$$

que não depende do comprimento da LT, apenas da distância entre os condutores (D) e do raio (r) dos mesmos. Ou seja, é constante para cada linha e é considerada uma grandeza característica conhecida como impedância natural da linha. Dessa forma, conclui-se que a corrente  $I_0$  também é constante, não importando o tamanho da linha, já que:

$$I_0 = \frac{U}{Z_0} \quad (\text{A}) \quad (18)$$

## 2.4 Transferência de energia

Considerando-se a LT ideal, a cada intervalo de tempo  $\Delta t$  necessário para energizar um trecho de linha de comprimento  $\Delta x$ , é fornecida à linha, pela fonte, uma energia  $\Delta E$  de módulo igual a  $UI_0\Delta t$ , que não é dissipada na linha, mas armazenada nos campos elétricos e magnéticos da seguinte forma:

a) *no campo elétrico:*

$$\Delta E_e = \frac{U^2 C \Delta x}{2} \quad (\text{J}) \quad (19)$$

b) *no campo magnético:*

$$\Delta E_m = \frac{I_0^2 L \Delta x}{2} \quad (\text{J}) \quad (20)$$

O armazenamento da energia se dá à medida que a corrente avança pelo circuito, e é simultâneo para os campos elétrico e magnético. Assim:

$$UI_0\Delta t = \frac{I_0 L \Delta x}{2} + \frac{U^2 C \Delta x}{2} \quad (\text{J}) \quad (21)$$

A equação (21) mostra claramente que a energia total fornecida pela fonte à linha no trecho  $\Delta x$  é o somatório das energias armazenadas nos campos elétrico e magnético, sem, entretanto, evidenciar a parcela de armazenamento em cada um. Sabendo que:

$$U = I_0 Z_0 = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

e introduzindo essa igualdade em (19), tem-se que:

$$\Delta E_e = \left(I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}\right)^2 \cdot \frac{C \Delta x}{2} = \frac{I_0^2 L \Delta x}{2} = \Delta E_m \quad (22)$$

ou seja, a quantidade de energia armazenada no campo elétrico é a mesma armazenada no campo magnético. Assim, cada um dos campos é responsável por armazenar metade da energia fornecida à linha pela fonte. Para o caso de uma LT de comprimento infinito, esse processo de armazenamento de energia nunca terminaria, e os campos elétrico e magnético estariam continuamente guardando em si energia. Contudo, as linhas reais possuem tamanhos finitos e, além da impedância natural, apresentam características terminais que fazem com que a energia entregue pela fonte seja dissipada, em vez de armazenada. Essas características terminais serão aqui resumidas a uma resistência  $R_2$  variável, no fim da linha, no lado do receptor, conforme figura 7, cujos valores ôhmicos considerados, em módulo, serão tratados apenas como *igual a, menor e maior que* o módulo de  $Z_0$ .

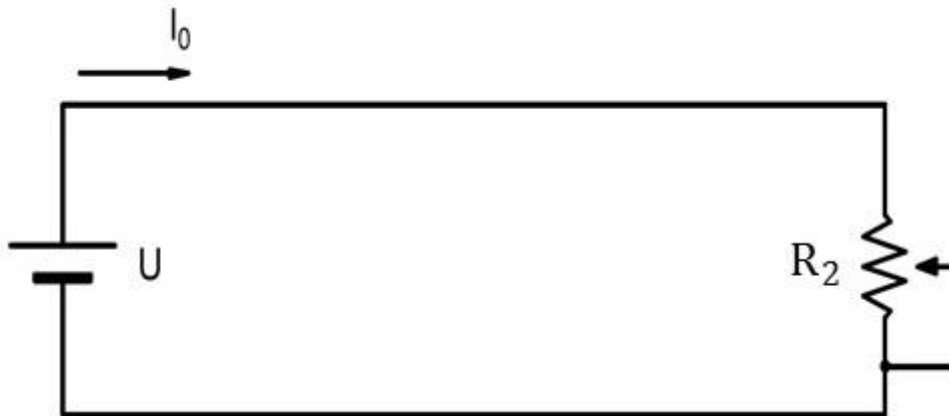


Figura 7 - Energização de trecho de linha de comprimento unitário.  
Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

Pela análise de circuitos elétricos entende-se que, para haver a máxima transferência de energia é necessário que o módulo de  $R_2$  seja igual ao módulo de  $Z_0$ . Dessa forma expressa-se:

$$U = I_0 Z_0 = I_0 R_2 \quad (23)$$

e, como no terminal receptor da linha não há campos elétricos ou magnéticos, toda a energia proveniente da fonte será dissipada no resistor  $R_2$ , como segue:

$$U I_0 \Delta t = I_0^2 R_2 \Delta t \quad (\text{J}). \quad (24)$$

No entanto, por mais eficiente que seja o projeto de um sistema de transmissão, na tentativa de se minimizarem as perdas elétricas ao longo da linha até que se chegue ao terminal receptor, sempre haverá alguma dissipação da energia ao longo da mesma, devido às características elétricas inerentes à linha e também às características resistivas de terminal, que são analisadas em seguida.

#### 2.4.1 Variações da resistência no terminal receptor de uma LT

Quando no terminal receptor existir uma resistência  $R_2$  com valor ôhmico de módulo diferente do módulo de  $Z_0$ , haverá alteração no equilíbrio estabelecido na

transferência de energia. Assim, é considerada a mudança do valor ôhmico da resistência variável  $R_2$  do circuito da figura 7, para os valores  $R_2'$  (maior que  $Z_0$ ) e  $R_2''$  (menor que  $Z_0$ ). Sejam, então, os casos:

#### 2.4.1.1 Resistência terminal maior que a impedância da linha ( $R_2' > Z_0$ )

Para uma resistência terminal  $R_2'$  maior que a impedância  $Z_0$  da linha, assume-se que circula uma corrente  $I_2'$  menor que  $I_0$ , através de  $R_2'$ . Conseqüentemente, a dissipação de energia em  $R_2'$  também é menor, ocorrendo o que se entende pelo acúmulo de energia na linha, já que a fonte, ligada ao terminal transmissor, alimenta a linha com a mesma tensão  $U$ , ininterruptamente. Sendo assim, é necessário que haja um novo estado de equilíbrio, já que esse excesso de energia não pode ser perdido [12]. Como dito anteriormente, o movimento das cargas elétricas no interior de um condutor, ou seja, a corrente elétrica que atravessa esse condutor, produz, proporcionalmente, campo magnético ao longo do mesmo. Se o fluxo de cargas diminui, logo entende-se que o campo magnético também diminui e, sendo assim, menos energia é armazenada por ele. Dessa forma, a energia excedente na linha e a que está contida pelo campo magnético são transferidas ao campo elétrico, sendo isso manifestado pelo aumento de amplitude da tensão  $U_2$  sobre  $R_2'$  que se propaga ao longo da linha, acompanhada da redução progressiva da corrente, ambas, com a mesma velocidade  $v$  (km/s).

Segundo FUCHS (1977), é conveniente, ainda, pensar num caso extremo, em que a resistência terminal  $R_2'$  tenha valor infinito, ou seja, os terminais do receptor estão abertos [12]. A corrente reduz-se progressivamente até ter valor zero, do receptor para o transmissor, enquanto o campo elétrico armazena toda a energia do sistema, isto é, aquela que é excessiva na linha e a que é cedida pelo campo magnético. Sendo assim, seja  $U_2$  o valor de tensão que é encontrado nos terminais da linha no lado do receptor. Em  $\Delta x$ , a energia armazenada no campo elétrico é

$$\frac{U_2^2 C \Delta x}{2} \quad (25)$$

A linha estava carregada com  $U^2 C \Delta x$  de energia e, em  $\Delta t$ , a fonte fornece mais  $U^2 C \Delta x$  à ela. Assim, no campo elétrico é armazenada uma energia equivalente a

$$2U^2 C \Delta x \quad (26)$$

Igualando-se o produto  $C \Delta x$  das equações (25) e (26), tem-se que:

$$U_2^2 = 4U^2$$

ou

$$U_2 = 2U \quad (\text{V}) \quad (27)$$

Dessa forma, conclui-se que em uma linha ideal com os terminais abertos no lado do receptor, a tensão cresce ao dobro do valor da tensão aplicada na linha pela fonte, propagando-se do receptor ao transmissor.

#### 2.4.1.2 Resistência terminal menor que a impedância da linha ( $R_2'' < Z_0$ )

Aqui a situação é contrária àquela tratada pelo item anterior. Como o módulo de  $R_2''$  é menor que o módulo de  $Z_0$ , a corrente  $I_2''$  que circula é maior que  $I_0$  e, portanto, a energia dissipada em  $R_2''$  será proporcionalmente maior que aquela dissipada em  $R_2$ . Esse efeito causa nos terminais do receptor uma deficiência de energia que a fonte de alimentação não pode suprir de imediato. O equilíbrio só é atingido novamente quando esse *déficit* é suprimido pela própria linha, a partir da energia por ela armazenada durante seu processo de energização. Como há um

aumento no valor da corrente, com essa passando de  $I_2 = I_0$  para  $I_2''$ , o campo magnético, responsável por armazenar a energia proveniente das cargas em movimento, além de não poder ceder energia, deve ser capaz de armazenar uma quantidade maior da mesma. A outra parcela de energia do processo está contida no campo elétrico, que a cede para o campo magnético e, com isso, observa-se, uma redução na intensidade da tensão  $U_2$ , que se propaga do receptor em direção aos terminais da linha junto ao transmissor.

Uma situação extrema para esse caso é pensar que  $R_2 = 0$ , ou seja, os terminais da linha junto ao receptor estão em curto-circuito. Assim, a tensão no receptor é nula e esse valor se propaga até o lado transmissor e, em contrapartida, a corrente tem seu valor aumentado e também se propaga do receptor ao transmissor.

O valor da corrente aumentada pode ser definido de maneira análoga ao da tensão aumentada no item anterior. Como o campo magnético, em  $\Delta x$ , armazena em si uma energia equivalente a:

$$\frac{I_2''^2 L \Delta x}{2} \quad (28)$$

nos dois campos da linha a energia armazenada possuía valor  $I_0^2 L \Delta x$ , e assumindo-se que em  $\Delta t$  a fonte fornece mais  $I_0^2 L \Delta x$  de energia à LT, o campo magnético deve agora armazenar a seguinte quantidade de energia:

$$2I_0^2 L \Delta x \quad (29)$$

que, quando igualada à equação (28) resulta em:

$$I_2'' = 2I_0 \quad (30)$$

As figuras 8 e 9 ilustram o que foi elucidado para o comportamento da tensão e corrente em face do aumento e da diminuição do valor de  $R_2$  em relação à  $Z_0$  em 2.4.1.1 e 2.4.1.2, respectivamente, sem considerar os casos extremos de linha aberta e em curto-circuito.

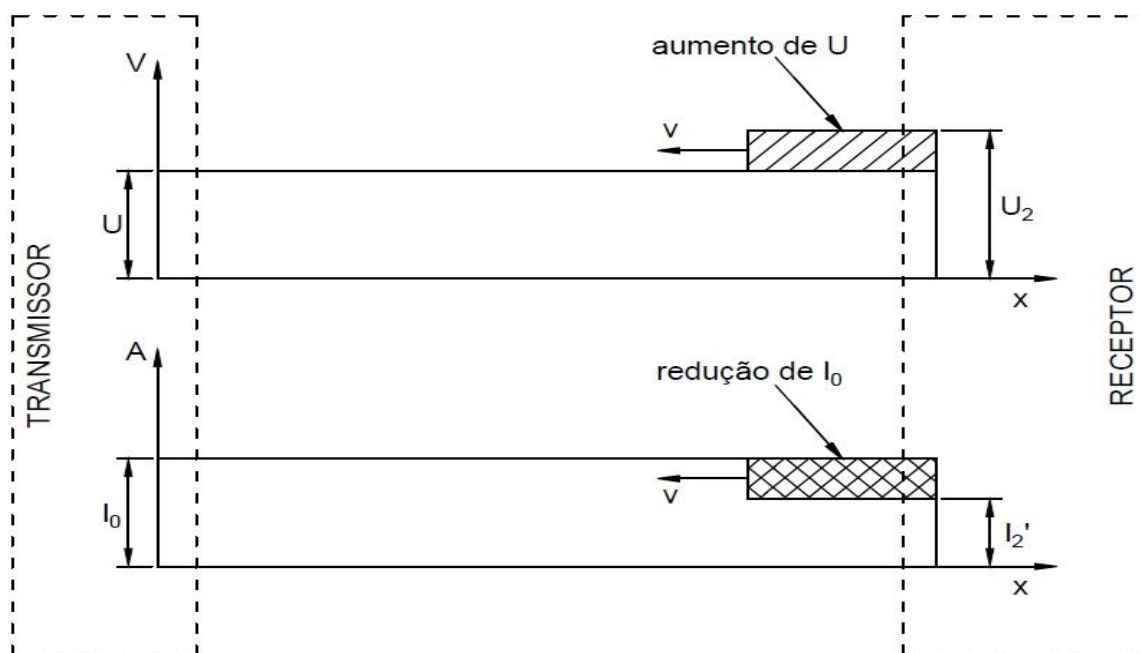


Figura 8 - Variação da tensão e corrente numa linha ideal com  $R'_2 > Z_0$  no terminal receptor.  
 Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

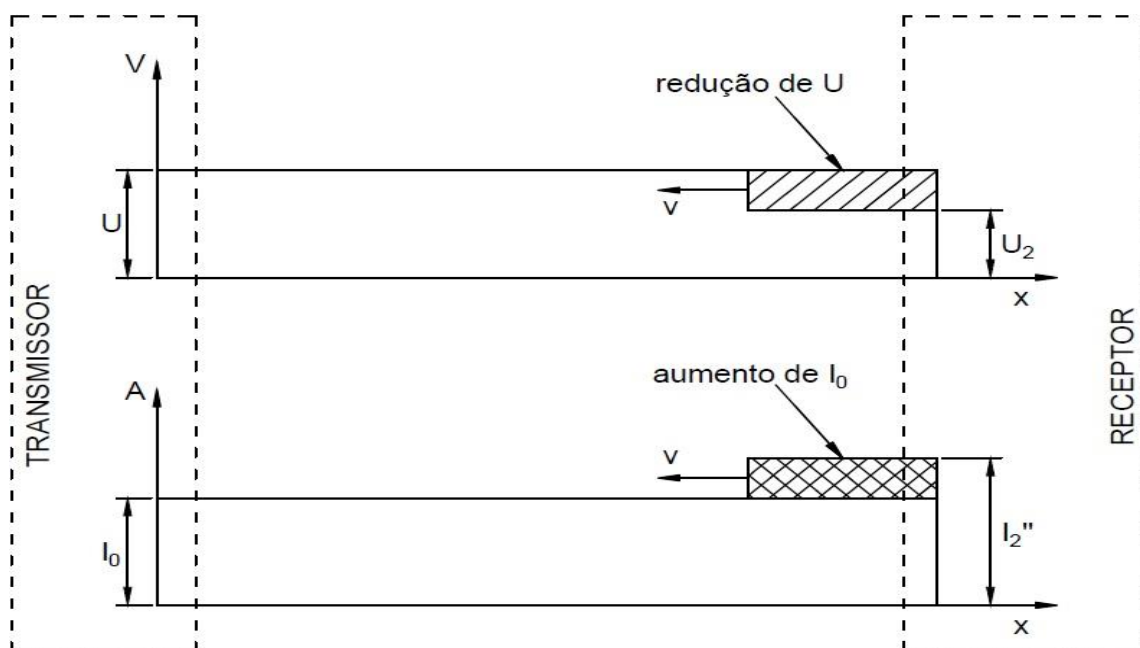


Figura 9 - Variação da tensão e corrente numa linha ideal com  $R'_2 < Z_0$  no terminal receptor.  
 Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

### 3 O MÉTODO DE ONDAS VIAJANTES

Ao se energizar uma linha, de seus terminais transmissores partem duas ondas: uma de tensão e outra de corrente, com amplitudes  $U$  e  $I_0$ , respectivamente. Ambas se deslocam ao longo da linha em direção ao receptor com velocidade de propagação  $v$ , medida em quilômetros por segundo, e recebem o nome de *ondas incidentes*. No momento em que chegam ao receptor, dependendo de como esse é terminado, as ondas incidentes podem dar origem a outros transitórios, que são chamados de *ondas refletidas*, os quais viajam de volta aos terminais da linha que se encontram do lado transmissor, e com a característica de possuírem a mesma velocidade de propagação  $v$  das ondas incidentes. Tanto as ondas incidentes como as refletidas possuem sinal, ou seja, são polarizadas, e o que determina essa polarização é a impedância resistiva da linha em seus terminais receptores. Pode-se afirmar ainda, que, em cada ponto da linha, a cada instante em que se realize uma medição, os valores de tensão e corrente serão o resultado da soma algébrica das ondas incidentes e refletidas de tensão e corrente, respectivamente, naqueles mesmos ponto e instante [12]. De forma mais clara:

$$U = U_i \pm U_r \quad (31)$$

e

$$I = I_i \pm I_r \quad (32)$$

onde:

$U$  e  $I$  são a tensão e a corrente medidas em um ponto qualquer da linha, em um determinado instante;

$U_i$  e  $I_i$  são os valores das ondas *incidentes*, ou diretas, de tensão e corrente, respectivamente;

$U_r$  e  $I_r$  são os valores das ondas refletidas de tensão e corrente, respectivamente.

Aplicando-se esses conceitos aos princípios que foram vistos anteriormente e analisando-se as figuras 10 e 11, é possível definir que:

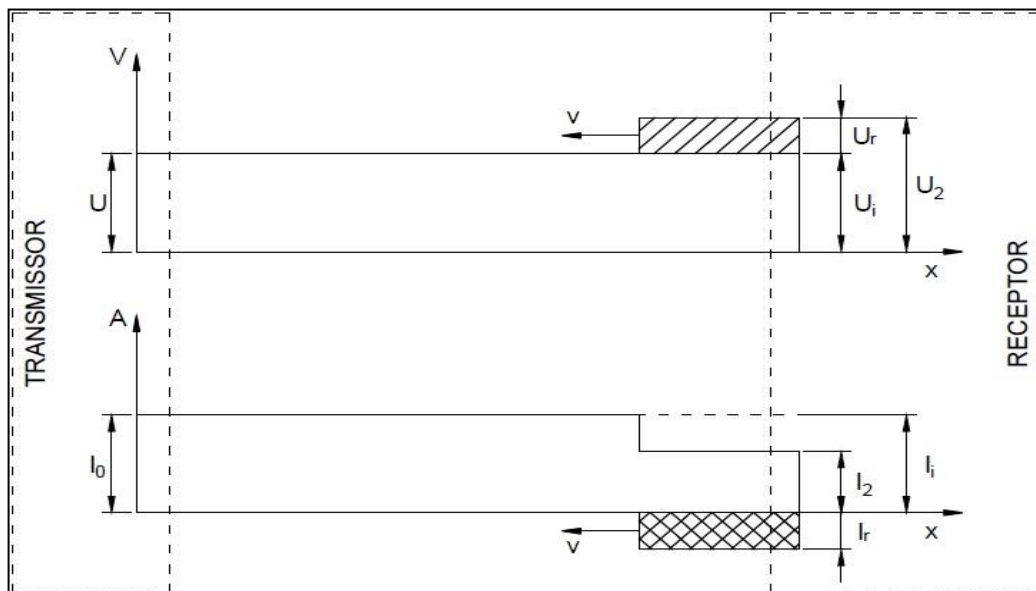


Figura 10 - Tensão e corrente para linha com  $Z_2 > Z_0$ : ondas direta, refletida e total.  
Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

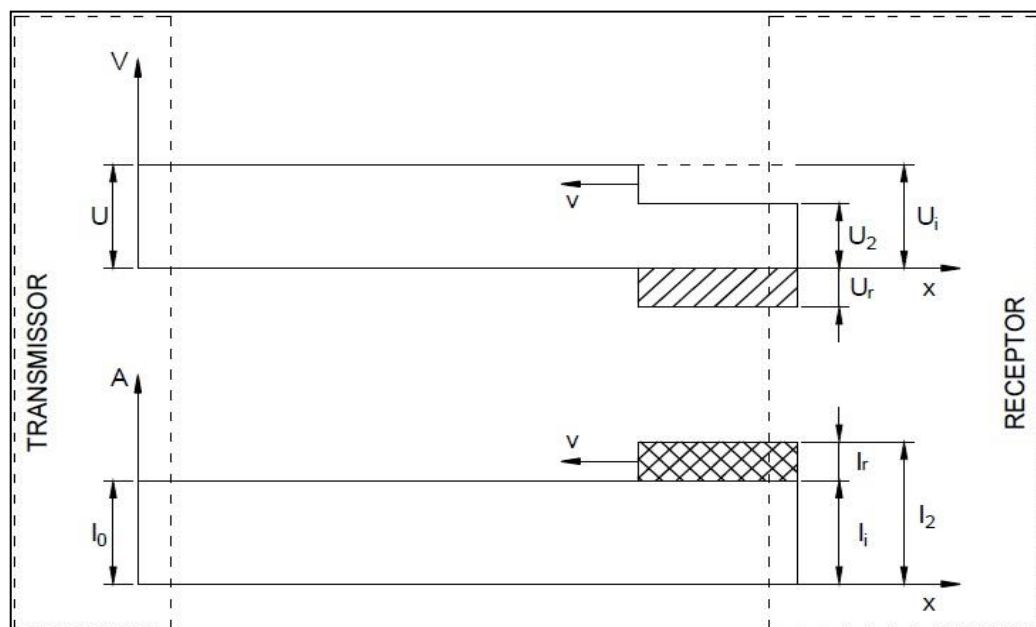


Figura 11 - Tensão e corrente para linha com  $Z_2 < Z_0$ : ondas direta, refletida e total.  
Fonte: adaptado de FUCHS (1977) [12]

a) para uma LT com impedância  $Z_2$  no terminal receptor maior que  $Z_0$ , que é a impedância natural da linha (figura 10), a tensão  $U_2$  e a corrente  $I_2$  medidas são dadas por:

$$U_2 = U_i + U_r \quad (33)$$

e

$$I_2 = I_i + (-I_r) = I_i - I_r \quad (34)$$

ou seja, a tensão refletida tem a mesma polarização da tensão incidente, resultando numa onda de tensão maior que aquela que antes havia chegado aos terminais do receptor, ao passo que a onda refletida de corrente tem polarização contrária à da corrente incidente, diminuindo a amplitude da onda resultante que segue em direção aos terminais do transmissor;

b) para a linha da figura 11, com  $Z_2 < Z_0$  os sinais de tensão e corrente medidos são definidos por:

$$U_2 = U_i + (-U_r) = U_i - U_r \quad (35)$$

e

$$I_2 = I_i + I_r \quad (36)$$

deixando claro que a onda de tensão refletida está polarizada inversamente à onda incidente, fazendo com que a onda total que segue rumo ao transmissor seja menor que aquela que chegou ao receptor, enquanto a corrente refletida está diretamente polarizada em relação à onda incidente, elevando assim a amplitude total de onda que volta aos terminais do transmissor.

Fica evidente então que, para qualquer das duas situações, as ondas refletidas de tensão e corrente têm sinais opostos uma à outra. Outro fato importante

é que, tanto ondas incidentes como refletidas possuem as mesmas propriedades, e assim:

$$\frac{U_i}{I_i} = \frac{U_r}{I_r} = Z_0 \quad (37)$$

Como mencionado, a tensão e corrente medidas em qualquer ponto da linha, a qualquer instante, é o resultado da soma das amplitudes das ondas de tensão e corrente incidentes e refletidas naquele mesmo ponto, para o mesmo instante. Dessa forma:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_i + U_r}{I_i + I_r} \neq Z_0 \quad (38)$$

FUCHS (1977) diz que, quando se conhecem os valores de impedância natural da linha de transmissão e a resistência em seus terminais no lado receptor, há a possibilidade de se determinar os valores de amplitude das ondas refletidas em função dos valores das ondas diretas [12]. Considera-se então, como resistência terminal de uma linha, a impedância  $Z_2$ , diferente de  $Z_0$ , dada por:

$$\frac{U_2}{I_2} = Z_2 = \frac{U_i + U_r}{I_i + I_r} \quad (\Omega) \quad (39)$$

e ainda, em função da característica de que, para as duas configurações de impedância terminal da linha ( $Z_2 > Z_0$  e  $Z_2 < Z_0$ ), as correntes e tensões refletidas possuem sinais opostos, sendo:

$$I_r = -\frac{U_r}{Z_0} \quad (40)$$

e

$$I_i = \frac{U_i}{Z_0} \quad (41)$$

obtendo-se, pela substituição de  $I_r$  e  $I_i$  em (39), as equações que definem a tensão e a corrente refletida em função da impedância natural da linha, da impedância de terminal e dos transitórios diretos:

$$U_r = \left( \frac{-Z_0 + Z_2}{Z_0 + Z_2} \right) \cdot U_i (\text{V}) \quad (42)$$

e

$$I_r = \left( \frac{Z_0 - Z_2}{Z_0 + Z_2} \right) \cdot I_i (\text{A}) \quad (43)$$

### 3.1 Coeficiente de reflexão

As equações (42) e (43) evidenciam a presença de dois termos essenciais no cálculo dos transitórios refletidos, os quais são formados pela razão entre as somas algébricas da impedância natural da linha e da impedância de terminal,  $Z_0$  e  $Z_2$ , respectivamente. Esses termos, chamados aqui de coeficientes de reflexão dos sinais de tensão e corrente, são dados, respectivamente, por:

$$k_{Ur} = \frac{-Z_0 + Z_2}{Z_0 + Z_2} \quad (44)$$

e

$$k_{Ir} = \frac{Z_0 - Z_2}{Z_0 + Z_2} \quad (45)$$

permitindo reescrever as equações (42) e (43) como:

$$U_r = k_{Ur} \cdot U_i \quad (46)$$

e

$$I_r = k_{Ir} \cdot I_i \quad (47)$$

Uma rápida análise dos casos que envolvem uma linha com os terminais em curto-circuito e abertos, que são as situações extremas com relação à diferença entre  $Z_0$  e  $Z_2$ , permite chegar à conclusão de que o coeficiente de reflexão varia seu valor no intervalo de -1 a +1, incluindo o 0 (zero), que ocorre quando as impedâncias são iguais.

As ondas de tensão e corrente analisadas até o momento são aquelas que partem da fonte de alimentação da LT e chegam ao receptor, dentro de um intervalo de tempo  $t$ , na qualidade de ondas diretas, ou incidentes, e que, devido à característica da impedância terminal da linha, produziram ondas refletidas. Contudo, é importante considerar que as ondas refletidas no receptor partem em direção ao transmissor, viajando na mesma velocidade de propagação  $v$  das ondas incidentes que as geraram, sobrepondo-nas, no entanto. Chegando aos terminais da fonte, convém às ondas de tensão e corrente serem chamadas de ondas diretas, já que estão incidindo no transmissor. A fonte de alimentação nos terminais de entrada da linha é considerada para fins deste estudo como ideal, possuindo impedância de valor zero, sendo, portanto, menor que a impedância  $Z_0$ , que é a impedância natural da linha. Dessa forma, a partir dos mesmos princípios que regem a reflexão dos transitórios nos terminais do receptor no tempo  $t$ , agora há a reflexão a partir dos terminais do transmissor, no tempo  $2t$ . Através de uma análise feita apenas sobre os coeficientes de reflexão para as ondas de tensão e corrente, é possível determinar a polarização dos transitórios refletidos, como segue:

a) para a tensão:

$$k_{Ur} = \frac{-Z_0 + Z_2}{Z_0 + Z_2} = \frac{-Z_0 + 0}{Z_0 + 0} = -1$$

indicando que a tensão refletida no transmissor possui polarização inversa àquela que incidiu nele, proveniente do receptor. Essa tensão possui mesmo módulo e sinal da tensão que antes partira da fonte de alimentação para o receptor no primeiro ciclo, compreendido pelo tempo  $t$ , ou seja, é a própria tensão  $U$  da fonte;

b) para a corrente:

$$k_{Ir} = \frac{Z_0 - Z_2}{Z_0 + Z_2} = \frac{Z_0 - 0}{Z_0 + 0} = 1$$

denotando para a corrente refletida no transmissor a mesma polarização da corrente que incidiu nesse, a qual teve origem no receptor no tempo  $t$ .

As situações apresentadas configuram sistemas ideais, em que não são consideradas as perdas de energia ao longo dos condutores no processo de energização da LT. Quando se trata de linhas de transmissão reais, a dissipação da energia que ocorre através de seus condutores assume a característica de um amortecimento, fazendo com que o módulo dos transitórios de tensão e corrente diminua mais rapidamente e, por conseguinte, o regime permanente seja alcançado em menos tempo.

A análise feita até então possui extensa aplicação no estudo de transitórios ocasionados por surtos em linhas de transmissão, e sua utilização é essencial na determinação dos pontos de eventuais faltas ao longo de uma LT, sejam elas de quaisquer natureza.

### **3.2 Análise do comportamento das OV em um sistema real**

#### **3.2.1 Distúrbio no Tronco de Potência Ivaiporã – Itaberá (Paraná – São Paulo)**

Segundo dados do Relatório de Análise de Perturbação do Operador Nacional do Sistema Elétrico de 2009, às 22h13min do dia 10 de novembro do mesmo ano iniciou-se uma perturbação envolvendo os três circuitos da LT 765 kV de Ivaiporã – Itaberá, C1, C2 e C3, em diferentes estágios, acarretando uma rejeição de 5.564

MW de potência gerada pela Usina de Itaipu – 60Hz [13]. Além disso, houve abertura dos sistemas remanescentes da Interligação Sul-Sudeste, nas tensões de 525 kV, 500 kV, 230 kV e 138 kV, adicionando uma rejeição de 2.950 MW de potência, e também o desligamento dos dois bipolos do sistema de alta tensão em corrente contínua, que naquele momento se encontravam abastecendo uma carga de 5.329 MW. Outros seccionamentos se deram e a carga total interrompida foi de 24.436 MW, cerca de 40% da carga total do Sistema Interligado Nacional naquele momento, sendo a região Sudeste a mais afetada, com uma rejeição de 22.468 MW.

O tempo médio de religamento e recomposição das cargas do SIN foi de 222 minutos, segundo dados do ONS. O trecho em questão da linha de transmissão é mostrado na figura 12, que segue:

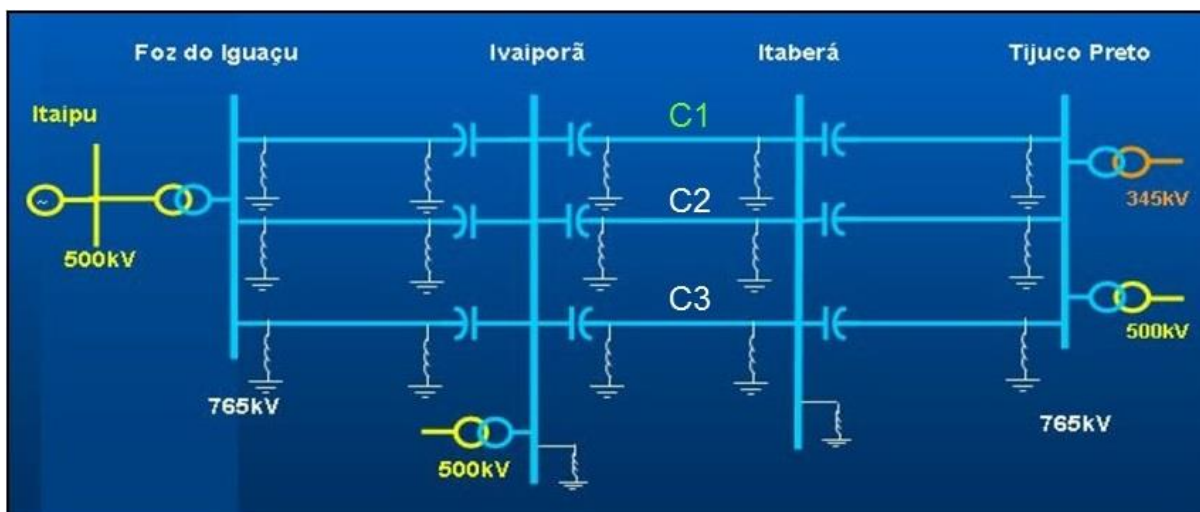


Figura 12 - LT Ivaiporã-Itaberá-Tijuco Preto 765 kV.  
Fonte: adaptado de ONS [13]

A primeira falta ocorrida, que se deu entre a fase Branca do circuito C1 do tronco de potência e a terra, resultado de um curto-circuito provocado por descarga atmosférica, é analisada aqui segundo o método de localização por OV.

A descarga atmosférica incidiu no isolador de pedestal do filtro de ondas do terminal da subestação de Itaberá, que estava sob condições climáticas adversas. A figura 13 mostra como ficou o conjunto isolador após ser atingido pela descarga:



Figura 13 - Isolador de pedestal da bobina de bloqueio da fase Branca do circuito C1 na SE de Itaberá. Fonte: ONS [13]

No momento do desligamento automático da linha, efetuado pelo sistema de proteção, a mesma encontrava-se transmitindo uma potência de 2.237 MW com fator de potência indutivo de 0,95, no sentido Sul-Sudeste. As amplitudes de tensão registradas nos barramentos das subestações de Itaberá e Ivaiporã nesse mesmo instante foram de 776 kV e 779 kV, respectivamente, enquanto a corrente de linha medida foi de 1750 A.

É possível obter o perfil dos transitórios incidentes e refletidos ao longo do tempo na linha, quando inicia-se o deslocamento das ondas de tensão e corrente do receptor para o transmissor. A respeito disso, deve-se considerar toda a extensão da linha que liga as SE de Itaberá e Ivaiporã, já que a falta ocorreu junto ao barramento receptor (Itaberá). No momento em que ocorreu a perturbação provocada pela descarga atmosférica, ondas de tensão e corrente se propagaram para os dois terminais da LT. Entretanto, a primeira incidência no barramento de Itaberá é descartada, segundo os objetivos desta análise, pois a falta ocorreu em 100% da extensão da linha. Assim, a primeira reflexão dos transitórios considerada é a que ocorre no barramento transmissor, na SE Ivaiporã.

A tabela 2 traz as características elétricas da LT Ivaiporã – Itaberá, bem como sua extensão, conforme [14]:

Tabela 2 - Características da LT Ivaiporã – Itaberá

<b><math>P</math></b>	Potência transmitida	<b>2237 (MW)</b>
<b><math>FP</math></b>	Fator de potência	<b>0,95 (indutivo)</b>
<b><math>U_1</math></b>	Tensão entre fases (Ivaiporã)	<b>779 (kV)</b>
<b><math>U_2</math></b>	Tensão entre fases (Itaberá)	<b>776 (kV)</b>
<b><math>I_L</math></b>	Corrente de linha	<b>1750 (A)</b>
<b><math>L</math></b>	Indutância da LT	<b>1,355 (mH/km)</b>
<b><math>C</math></b>	Capacitância da LT	<b>8,21 (nF/km)</b>
<b><math>R</math></b>	Resistência da LT	<b>0,0514 (<math>\Omega</math>/km)</b>
<b><math>l</math></b>	Extensão da LT	<b>266 (km)</b>

Fonte: adaptado de FADINI [14]

A partir das equações (16) e (39), e dos dados da tabela 2, pode-se calcular o valor da impedância natural  $Z_0$  da linha de transmissão e da impedância característica  $Z_2$  no terminal receptor:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1,355 \times 10^{-3}}{8,21 \times 10^{-9}}} = 406,25 \text{ } (\Omega)$$

e

$$Z_2 = \frac{U_2}{I_L} = \frac{776 \times 10^3}{1750} = 443,43 \text{ } (\Omega)$$

Sendo, portanto, a impedância de terminal da linha no lado do receptor maior que a impedância natural da mesma, tem-se que a onda de tensão refletida no transmissor, no instante  $t_1$ , possui mesma polarização da onda incidente proveniente do receptor. O contrário ocorre com a onda de corrente proveniente do

terminal receptor, que ao atingir o barramento transmissor é refletida com polarização inversa.

Em  $t = -1$ , tempo em que a linha é energizada, parte do transmissor (SE Ivaiporã) uma onda de tensão de valor  $U$  (V), que chega à SE de Itaberá em  $t_0 = \frac{l}{v}$ , na característica de primeira onda incidente nesse terminal, na forma  $U'_{i-ITA} = U$ . Nesse instante ocorre a primeira reflexão no barramento receptor e a tensão resultante passa a ser o somatório das tensões incidente e refletida, como segue:

$$U'_{ITA} = U'_{i-ITA} + U'_{r-ITA} = U'_{i-ITA} + U'_{r-ITA} \cdot k_{rU-ITA} = U \cdot (1 + k_{rU-ITA}) \quad (48)$$

onde:

$U'_{ITA}$  é a tensão refletida resultante no barramento da SE Itaberá;

$U'_{i-ITA}$  é a primeira tensão incidente no barramento da SE Itaberá, proveniente do ponto de falha;

$U'_{r-ITA}$  é a primeira tensão refletida no barramento da SE Itaberá;

$k_{rU-ITA}$  é o coeficiente de reflexão da onda de tensão no barramento da SE Itaberá, dado por:

$$k_{rU-ITA} = \frac{-Z_0 + Z_2}{Z_0 + Z_2}$$

Asumindo-se que a fonte de tensão é ideal, ou seja, tem capacidade para suprir a corrente de curto-circuito até que o mesmo seja extinto adequadamente, e que o coeficiente de reflexão do terminal transmissor (SE Ivaiporã) é  $k_{rU-IVA} = -1$ , as reflexões sucessivas da onda de tensão para o caso da falta são dadas por:

$U'_{IVA} = U \cdot (1 + k_{rU-ITA})$  - primeira reflexão no barramento da SE Ivaiporã;

$U'_{ITA} = U \cdot (1 - k_{rU-IVA}^2)$  - primeira reflexão no barramento da SE Itaberá;

$U''_{IVA} = U \cdot (1 + k_{rU-ITA}^3)$  - segunda reflexão no barramento da SE Ivaiporã;

$U''_{ITA} = U \cdot (1 - k_{rU-IVA}^4)$  - segunda reflexão no barramento da SE Itaberá;

$U'''_{IVA} = U \cdot (1 + k^5_{rU-ITA})$  - terceira reflexão no barramento da SE Ivaiporã;

$U'''_{ITA} = U \cdot (1 - k^6_{rU-IVA})$  - terceira reflexão no barramento da SE Itaberá.

De forma análoga à tensão, no instante  $t = -1$  parte do barramento transmissor uma onda de corrente de amplitude  $I$ , e que chega ao terminal receptor no instante  $t = 0$ , na qualidade de onda incidente. Imediatamente ela é refletida de volta ao barramento transmissor, alcançando seus terminais em  $t = 1$ , sendo representada por:

$$I'_{ITA} = I'_{i-ITA} - I'_{r-ITA} = I'_{i-ITA} - I'_{r-ITA} \cdot k_{rI-ITA} = I \cdot (1 - k_{rI-ITA}) \quad (49)$$

As demais reflexões, a partir da primeira ocorrida no barramento da SE Ivaiporã, são modeladas pelas equações que seguem:

$I'_{IVA} = I \cdot (1 - k_{rI-ITA})$  - primeira reflexão no barramento da SE Ivaiporã;

$I'_{ITA} = I \cdot (1 - k^2_{rI-IVA})$  - primeira reflexão no barramento da SE Itaberá;

$I''_{IVA} = I \cdot (1 - k^3_{rI-ITA})$  - segunda reflexão no barramento da SE Ivaiporã;

$I''_{ITA} = I \cdot (1 - k^4_{rI-IVA})$  - segunda reflexão no barramento da SE Itaberá;

$I'''_{IVA} = I \cdot (1 - k^5_{rI-ITA})$  - terceira reflexão no barramento da SE Ivaiporã;

$I'''_{ITA} = I \cdot (1 - k^6_{rI-IVA})$  - terceira reflexão no barramento da SE Itaberá.

A partir dessas equações, um algoritmo que consta no Apêndice 1 foi desenvolvido no *software* Matlab, a fim de que fosse simulado o comportamento das ondas viajantes de tensão e corrente ao longo da linha, a partir do instante da energização da mesma até o momento em que se estabilizam, e registrado o tempo

de tráfego das OV em todo o comprimento da linha. As figuras 14 e 15 ilustram os gráficos plotados durante a simulação.

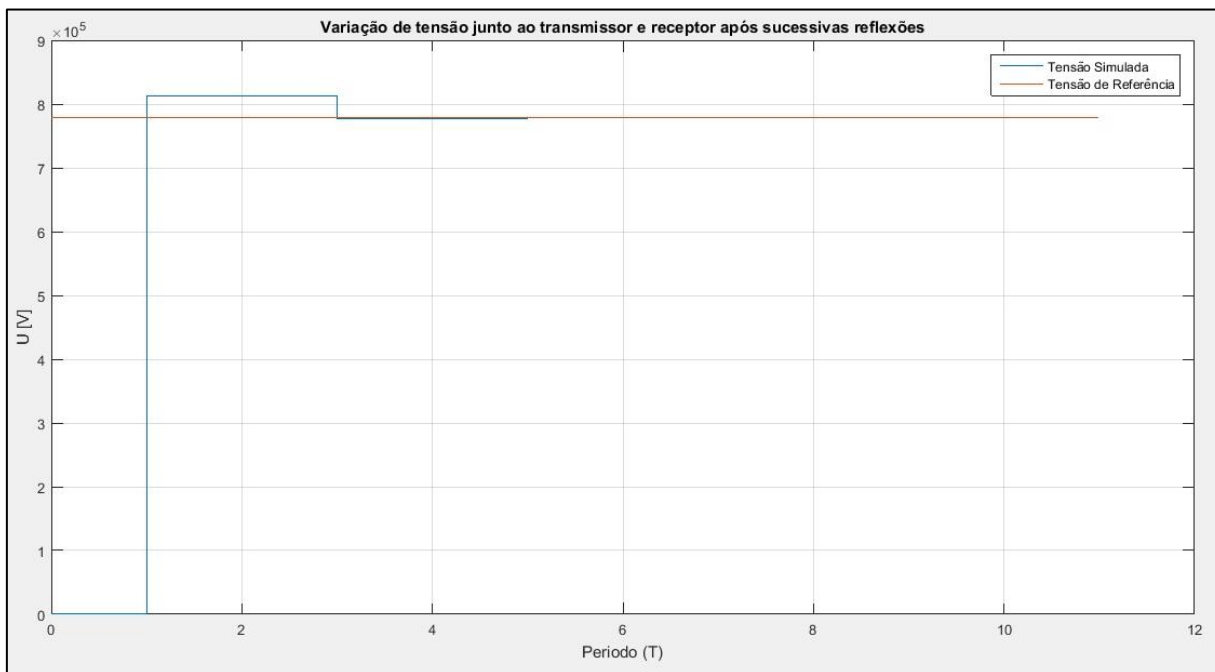


Figura 14 - Comportamento da onda viajante de tensão, refletida nos terminais da LT.  
Produzido no Matlab. Fonte: AUTORES

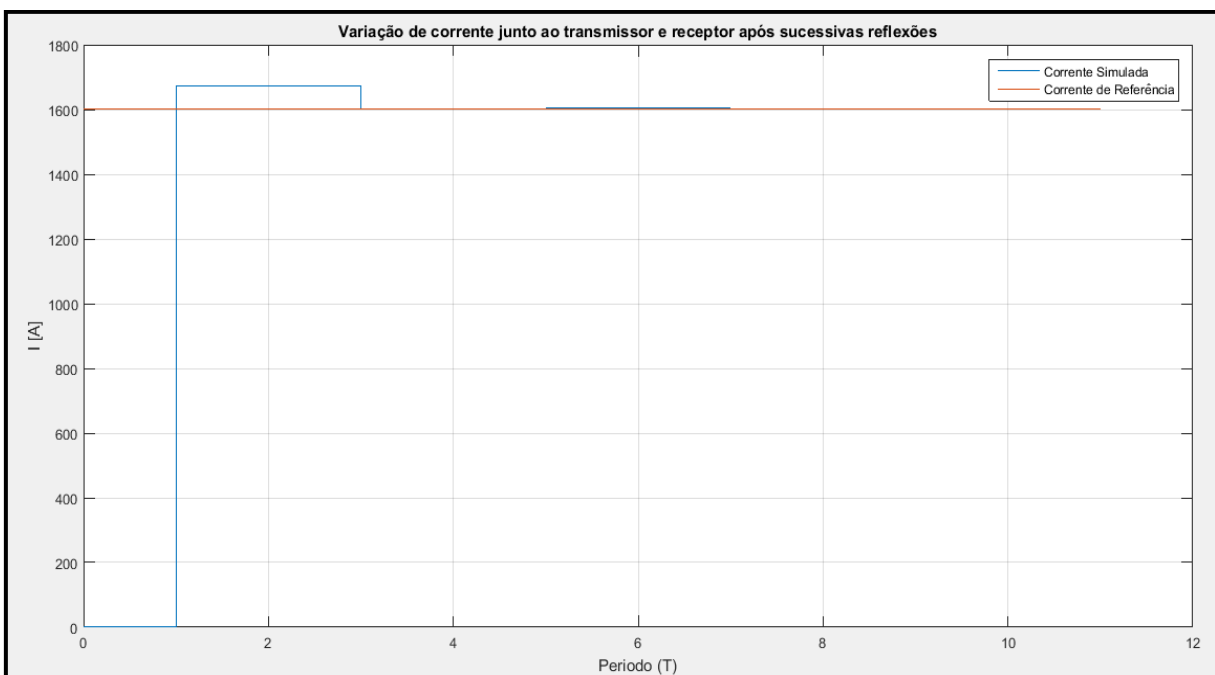


Figura 15 - Comportamento da onda viajante de corrente, refletida nos terminais da LT.  
Produzido no Matlab. Fonte: AUTORES

Através da análise dos gráficos, é possível perceber que a amplitude da primeira onda de tensão refletida no barramento transmissor, no tempo  $t = 1$ , é maior que a amplitude da tensão nominal da linha, com valor acima de 800 kV, e que a primeira reflexão da onda de corrente no referido terminal possui amplitude menor que a corrente nominal da linha, que tem valor de 1750 A. A velocidade de propagação das ondas é obtida por (13):

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{(1,355 \times 10^{-3}) \cdot (8,210 \times 10^{-9})}} = 299.819 \text{ (km/s)} \quad (50)$$

que é muito próxima da velocidade da luz no vácuo.

O tempo de propagação das OV por toda a extensão da LT pode ser calculado pela razão entre o comprimento da linha, enunciado na equação (4), que é a distância percorrida pelas ondas viajantes, e a velocidade de propagação:

$$t_{prop} = \frac{l}{v} = \frac{266}{299.819} = 0,887 \text{ (ms)} \quad (51)$$

Segundo informações obtidas do Relatório do ONS [13], a coordenação da proteção para a LT 765 kV Ivaiporã – Itaberá C1, pelas atuações das proteções Principais e Alternadas de distância, baseadas no princípio de ondas trafegantes, atuaram num intervalo de tempo de 48 milissegundos em ambos os terminais, sendo  $t_{prop}$ , que é o tempo necessário para que as OV sejam detectadas pela unidade de proteção, muito inferior (mais de 50 vezes menor) a esse intervalo.

Como a falta ocorreu em 100% da linha de transmissão, a eficiência do método não fica muito clara, pois é, de certa forma, fácil localizar a perturbação quando essa acontece num dos terminais. Assim, foi realizado um estudo, simulando faltas em diversos pontos ao longo da LT em sua carga nominal, utilizando-se o software ATP Draw, que analisa as perturbações a partir de parâmetros elétricos e construtivos da linha de transmissão. Esse estudo tem por objetivo demonstrar a precisão na localização de faltas pelo método de ondas viajantes.

Para a simulação de faltas, são tomadas as extensões de linha a partir da SE Ivaiporã, que é o terminal transmissor, à esquerda da ocorrência da falta, como ilustra o esquema da figura 16.

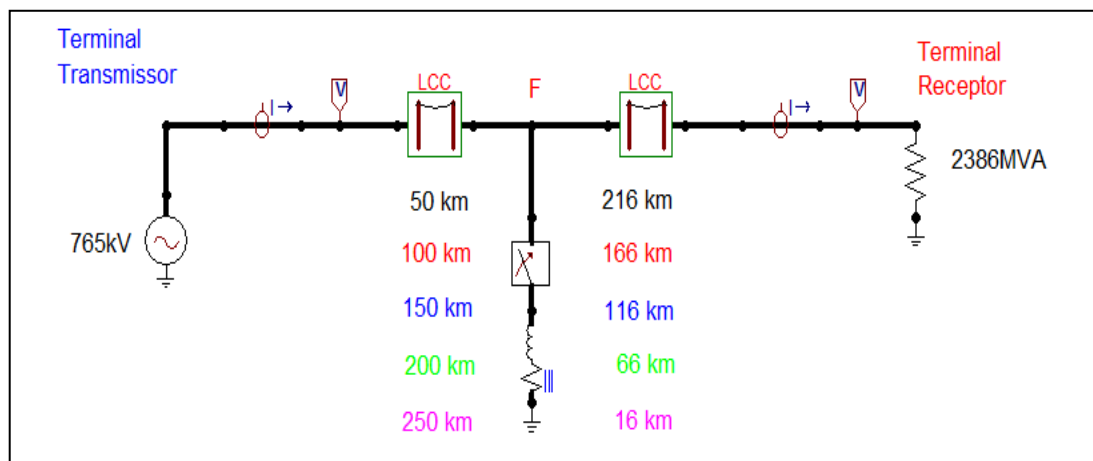


Figura 16 - Modelo da LT Ivaiporã – Itaberá para simulação de faltas.  
Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

A figura 17 mostra o perfil da onda de corrente que chega ao terminal de referência, estando essa na frequência fundamental de 60 Hz, para um curto-circuito trifásico e equilibrado, com ponto de falta de referência adotado em 50 km a partir do referido terminal. Por ela pode-se observar que o tempo de chegada da onda de corrente ao terminal transmissor é de aproximadamente 0,167 ms, e que o módulo dessa corrente é cerca de 9,22 kA. Os gráficos representativos das correntes de curto-circuito para as faltas simuladas nos pontos de 100, 150, 200 e 250 km de extensão da linha podem ser observados no Apêndice 2.

A tabela 3 apresenta esse e os demais resultados obtidos para as faltas simuladas no pontos adotados em 100 km, 150 km, 200 km e 250 km de extensão da LT a partir da SE Ivaiporã.

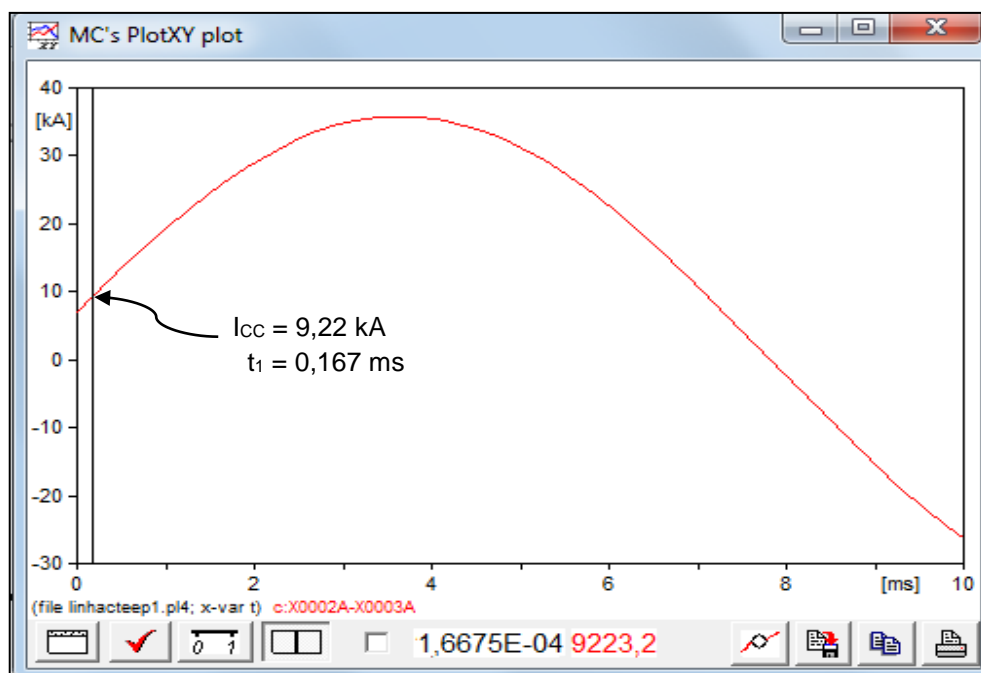


Figura 17 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 50 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

Tabela 3 – Tempo de chegada da onda de corrente aos terminais da linha a partir do ponto de falta

Ponto	Distância adotada (km)	I <sub>cc</sub> (kA)	t <sub>1</sub> (ms)	t <sub>2</sub> (ms)
1	50	9,22	0,167	0,720
2	100	5,51	0,333	0,554
3	150	4,28	0,500	0,387
4	200	3,66	0,667	0,220
5	250	3,30	0,834	0,053

Fonte: AUTORES

Na tabela 3,  $t_1$  diz respeito ao tempo de propagação dos transientes desde o ponto da falta até o terminal de referência. Observa-se que, conforme o ponto de falta simulado se distancia do terminal de referência, o tempo também aumenta. Além disso, é possível notar que o tempo de propagação da onda para a falta simulada em 250 km se encontra próximo de, porém inferior ao tempo  $t_{prop} = 0,887$ , em milissegundos, calculado na equação (51), para que as ondas viajantes percorram toda a extensão da linha.

O tempo  $t_2$  é obtido a partir de:

$$t_2 = t_{prop} - t_1 \quad (\text{ms}) \quad (52)$$

e indica o tempo de propagação da onda de corrente desde o ponto da falta simulada até o outro terminal (SE Itaberá).

Outra observação a ser feita é que, quanto mais próximo do terminal de referência ocorre a perturbação, maior é o módulo da corrente de curto-circuito. Isso se deve ao fato da diminuição da impedância série da linha com a aproximação gradual da fonte geradora do curto-circuito, ou seja, da falta em questão.

A partir das distâncias adotadas para as faltas e dos tempos de propagação  $t_1$  e  $t_2$ , é possível calcular o ponto estimado de localização das faltas e construir o diagrama de Bewley-Lattice, conhecido também por diagrama de treliças que, como afirma CARDOSO (2011), mostra o comportamento dos transientes em função da distância, indicando o tempo das diversas reflexões sofridas pelas ondas viajantes, desde o instante e ponto da falta [15].

Segundo CARDOSO (2011), o ponto de falta para construção do diagrama pode ser calculado por:

$$P = \frac{L + v \cdot (t_1 - t_2)}{2} \quad (\text{km}) \quad (53)$$

onde:

$L$  é o comprimento total da linha;

$v$  é velocidade de propagação das OV;

$t_1$  e  $t_2$  são os tempos de chegada das OV aos terminais da linha.

Os diagramas de treliça das figuras 18, 19, 20, 21 e 22 que seguem, obtidos para as simulações dos pontos de faltas na LT Ivaiporã – Itaberá mostram, no eixo “Comprimento da Linha de Transmissão”, a distância que seria indicada por um equipamento de localização de falta para as extensões propostas anteriormente. A tabela 4 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Partindo dos pontos indicados, as frentes de onda se deslocam no sentido dos terminais da linha e seu tempo de chegada é registrado e marcado no eixo “Estampa de tempo”. Em seguida as primeiras reflexões ocorrem, saindo dos terminais em sentido ao ponto de falta, ocorrendo novas reflexões que irão se propagar no sentido dos terminais da linha, novamente.

É conveniente citar que, quando as reflexões ocorrem, seja nos terminais da linha, seja no ponto de falta, parte da energia do transitório é absorvida pelo restante do sistema, pois ondas viajantes remanescentes continuam no mesmo sentido de origem sem sofrer reflexão, e transitam até mesmo pela extensão de outras linhas que vêm à montante e à jusante da LT em questão.

Devido a isso, quando a falta é eliminada, o fenômeno das reflexões é cessado após algum tempo de forma espontânea, pois o sistema vai absorvendo parte da energia em cada reflexão até que entre no ponto de equilíbrio.

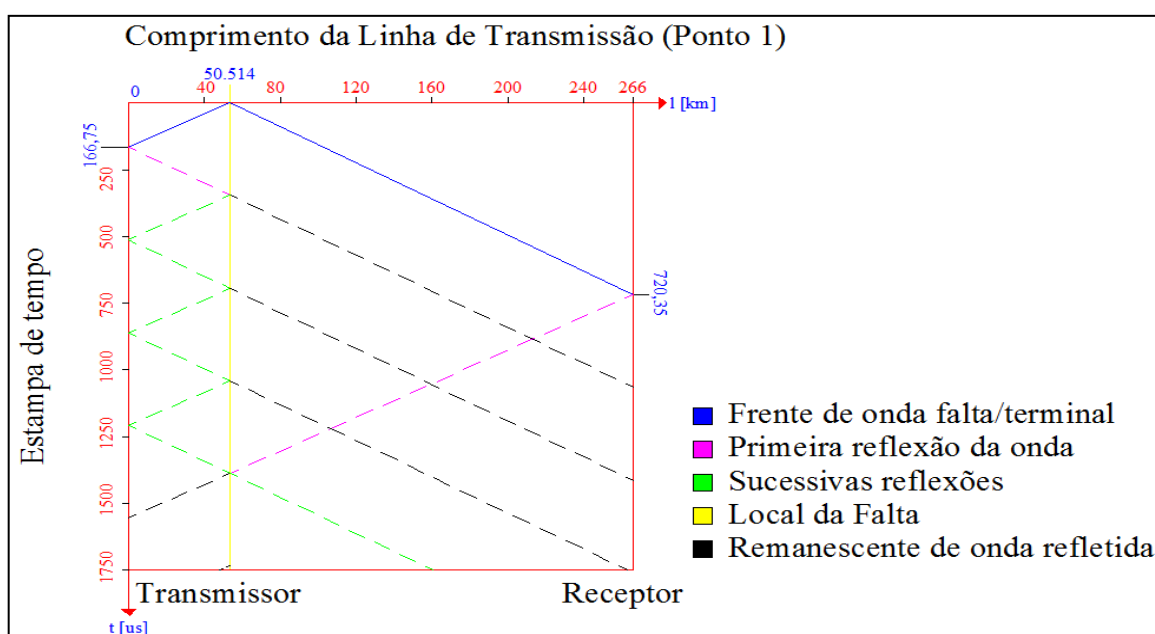


Figura 18 – Diagrama de Bewley-Lattice para falha considerada em 50 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

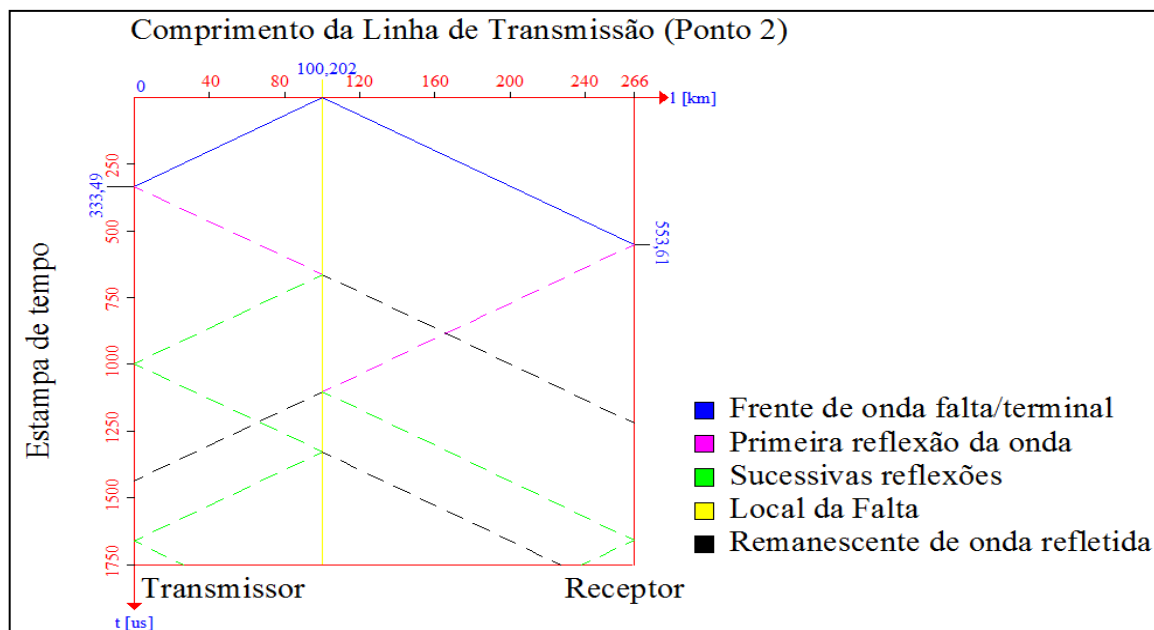


Figura 19 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 100 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

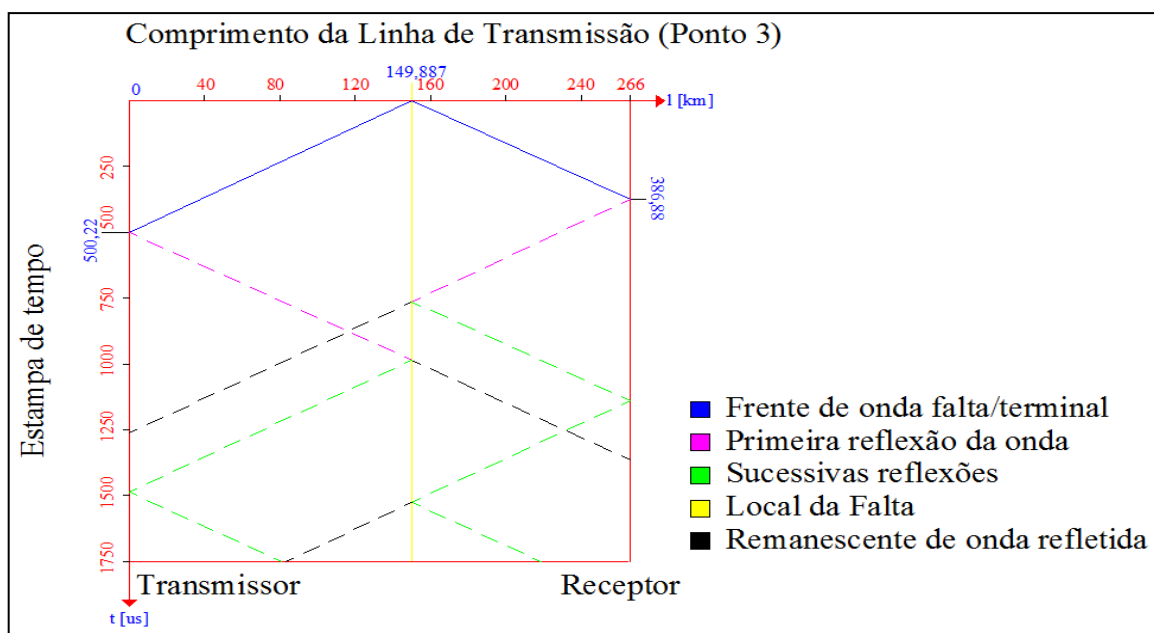


Figura 20 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 150 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

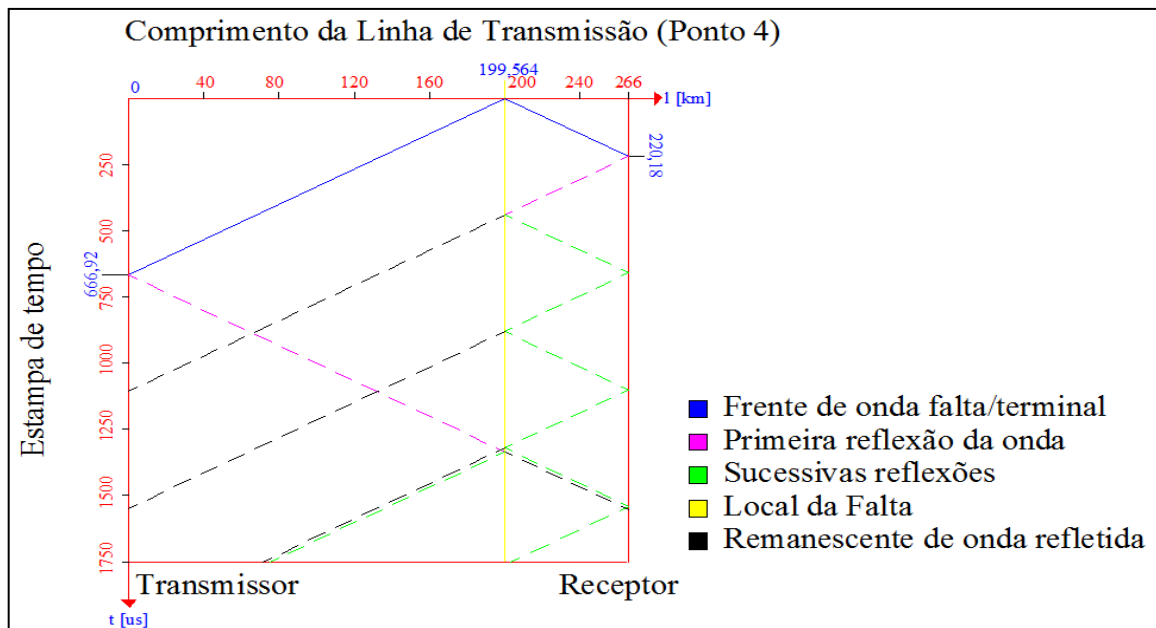


Figura 21 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 200 km. Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

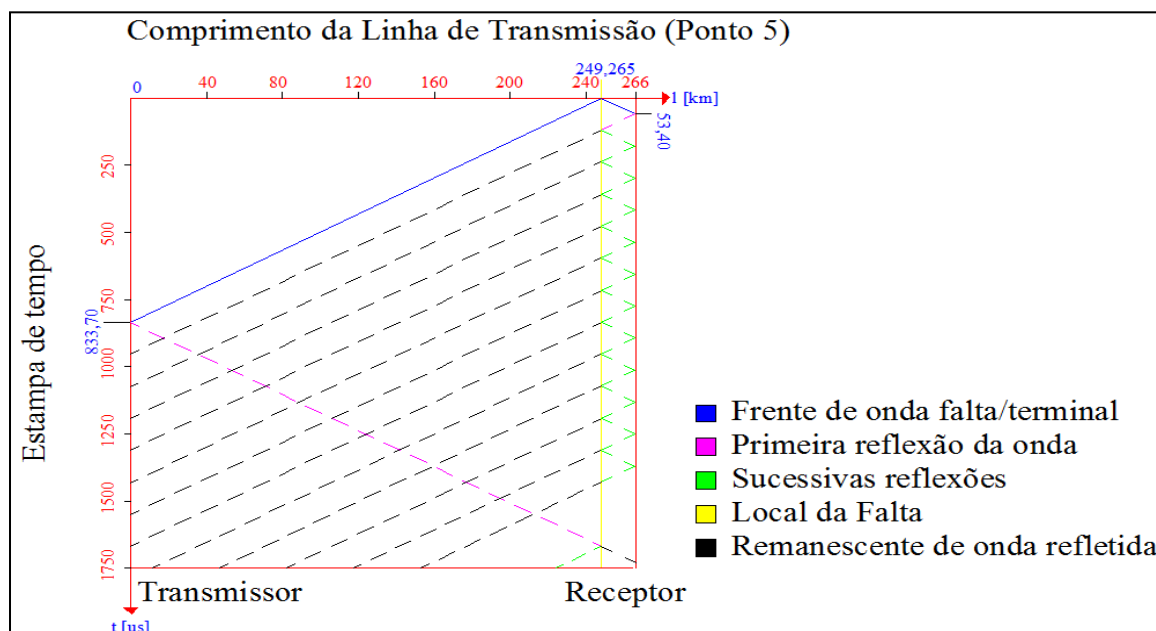


Figura 22 – Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 250 km. Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

Tabela 4 – Resultado das simulações para localização de pontos de faltas na LT Ivaiporã- Itaberá

<b>Ponto</b>	<b>Distância estimada (km)</b>	<b>Distância real (km)</b>	<b>t<sub>1</sub> (ms)</b>	<b>t<sub>2</sub> (ms)</b>	<b>Erro (m)</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>1</b>	50,514	50	0,167	0,720	<b>+ 514</b>	<b>1,02</b>
<b>2</b>	100,202	100	0,333	0,554	<b>+ 202</b>	<b>0,20</b>
<b>3</b>	149,887	150	0,500	0,387	<b>- 113</b>	<b>0,08</b>
<b>4</b>	199,564	200	0,667	0,220	<b>- 436</b>	<b>0,22</b>
<b>5</b>	249,265	250	0,834	0,053	<b>- 735</b>	<b>0,29</b>

Fonte: AUTORES

Como pode ser observado, a extensão de linha entre o terminal transmissor e o ponto de ocorrência da falta determinada pelos diagramas de treliças apresenta uma certa diferença em relação àquelas estipuladas para a realização das simulações. No entanto, os resultados são satisfatórios, considerando que a extensão total da linha é de 266 km e que o erro médio absoluto apresentado é de apenas 380 metros, ou 0,14% da extensão total da linha, permitindo a busca pelo ponto de falta no espaço entre duas torres de sustentação da LT.

## 4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta simulações de localização de faltas baseada no método por ondas viajantes, realizadas, tomando-se como objeto de estudo a linha de transmissão de Goshen – Drummond, no estado do Idaho, EUA.

Segundo MARX *et al.* (2013) desde a sua implantação, a linha, administrada pela empresa concessionária BPA – Bonneville Power Administration, operava numa classe de tensão de 115 kV. A distância entre os condutores do tipo Grosbeak e o diâmetro dos mesmos era de 4,88 metros e 25,15 milímetros, respectivamente. No ano de 2007, a administradora do tronco de potência do qual a linha faz parte realizou uma repotenciação no mesmo, elevando o nível de tensão de 115 kV para 161 kV, a partir da Subestação de Goshen. Contudo, não foram realizadas as adequações estruturais necessárias e, em 5 anos, foram registradas 40 faltas ao longo dos 119,2 km de extensão da linha de transmissão [16]

A empresa SEL - Schweitzer Engineering Laboratories, contratada pela BPA e responsável por estudar as causas das faltas, realizou aplicações de relés de proteção baseados no método de ondas viajantes em ambos os terminais da linha e concluiu que as principais causas dos desarmes da linha tiveram origem em *flashovers* nos isoladores, que não foram redimensionados durante o projeto de repotenciação. Além disso, conforme SCHWEITZER *et al.* (2014), outros fatores foram percebidos como causas das faltas ocorridas, a saber:

- o compartilhamento da faixa de passagem com duas outras LTs, uma de 115 kV e outra de 161 kV, por 7,64 km e 27,36 km, respectivamente, conforme mostram as figuras 23 e 24. Isso faz com que a linha esteja sujeita a transitórios eletromagnéticos não considerados anteriormente;
- a existência de quatro tipos diferentes de torres distribuídas em sua extensão, e a carência de transposição de fases durante o percurso, que contribuem para o desequilíbrio das indutâncias e capacitâncias naturais da linha;
- intempéries, como a contaminação dos isoladores devido à pulverização de fertilizantes nas plantações nas áreas próximas da linha, e vandalismos [17].

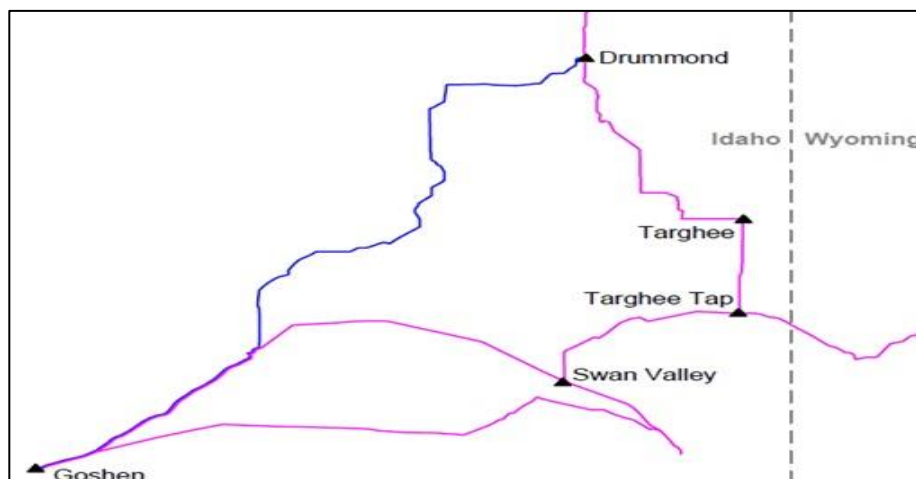


Figura 23 – LT Goshen Drummond representada em mapa.  
Fonte: MARX *et al* (2013) [16]

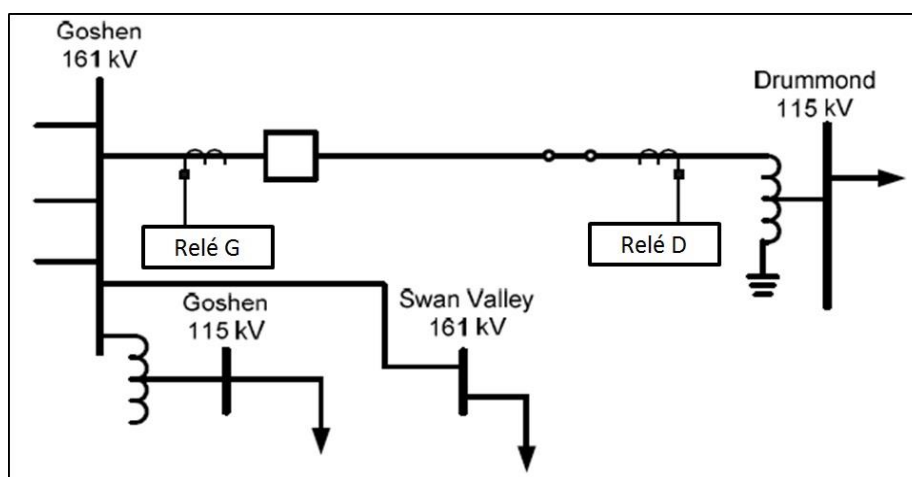


Figura 24 – Tronco de Potência da LT Goshen – Drummond.  
FONTE: adaptado de MARX *et al* (2013) [16]

#### 4.1 Simulações

A partir dos parâmetros da linha de transmissão contidos na tabela 5, foram realizadas simulações através de algoritmo elaborado no *software* Matlab, descrito no Apêndice 3, para se obter o perfil das reflexões das ondas viajantes nos 119,2 km de extensão da linha.

Tabela 5 - Características da LT Goshen – Drummond.

$P$	Potência transmitida	60 (MW)
$U_1$	Tensão de linha (Goshen)	169,05 (kV)
$U_2$	Tensão de linha (Drummond)	161 (kV)
$I_L$	Corrente de linha	215,16 (A)
$L$	Indutância da LT	1,28 (mH/km)
$C$	Capacitância da LT	8,89 (nF/km)
$R$	Resistência da LT	0,4825 ( $\Omega$ /km)
$l$	Extensão da LT	119,2 (km)

Fonte: adaptado de MARX *et al* (2013) [16]

O resultado das simulações é plotado nos gráficos das figuras 25 e 26, que mostram as sucessivas reflexões dos transitórios de tensão e corrente, respectivamente. As reflexões são atenuadas devido às impedâncias natural e de terminal da linha, e as ondas de tensão e corrente são estabilizadas novamente aos valores nominais de operação da linha, após um certo período de tempo.

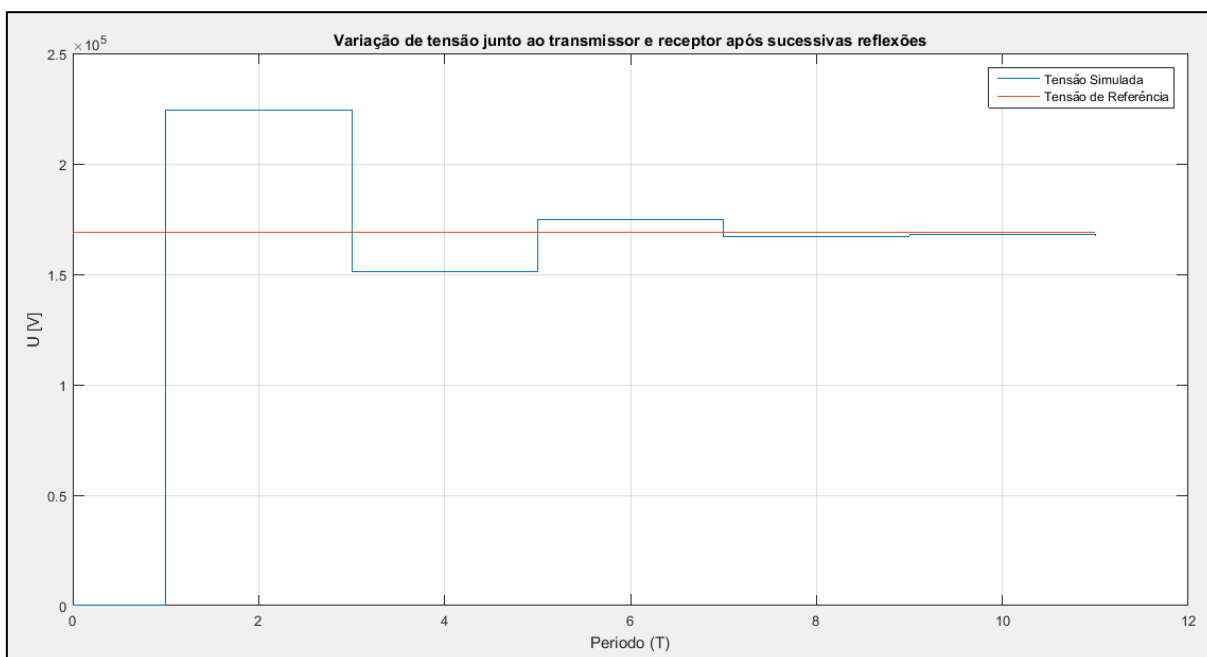


Figura 25 – Comportamento da onda viajante de tensão, refletida nos terminais da LT.  
Produzido no Matlab. Fonte: AUTORES

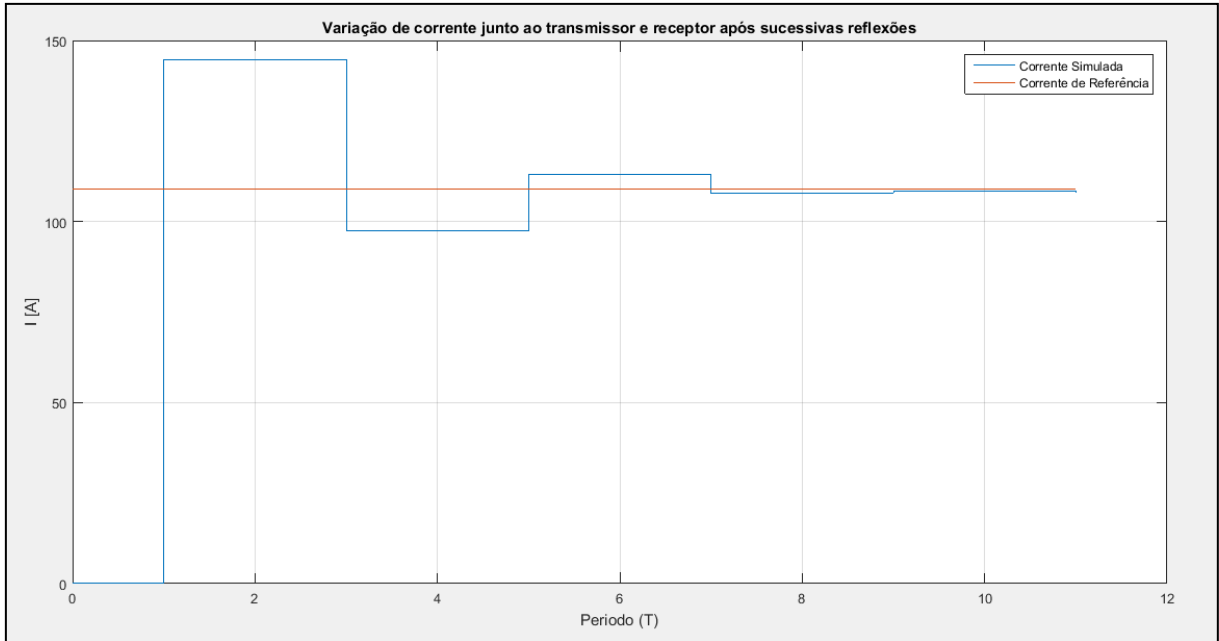


Figura 26 – Comportamento da onda viajante de corrente, refletida nos terminais da LT.  
Produzido no Matlab. Fonte: AUTORES

A velocidade de propagação dos transitórios através da linha pode ser calculada a partir dos parâmetros de indutância e capacitância da mesma, como segue:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{\sqrt{(1,28 \times 10^{-3}) \cdot (8,89 \times 10^{-9})}} = 296.463 \quad (\text{km/s}) \quad (54)$$

Esse valor se aproxima da velocidade de propagação da luz no vácuo e por ele pode-se obter o tempo necessário para as ondas viajantes percorram todo o comprimento da LT. Assim:

$$t_{prop} = \frac{l}{v} = \frac{119,2}{296.463} = 0,395 \quad (\text{ms}) \quad (55)$$

Com os perfis das ondas viajantes de tensão e corrente traçados, a próxima etapa é verificar a precisão do método na localização de faltas. Para tanto, o *software* ATP Draw é utilizado na simulação de diversos pontos de ocorrência de

faltas trifásicas e equilibradas. A figura 27 mostra um panorama geral do modelo utilizado para simular tais faltas.

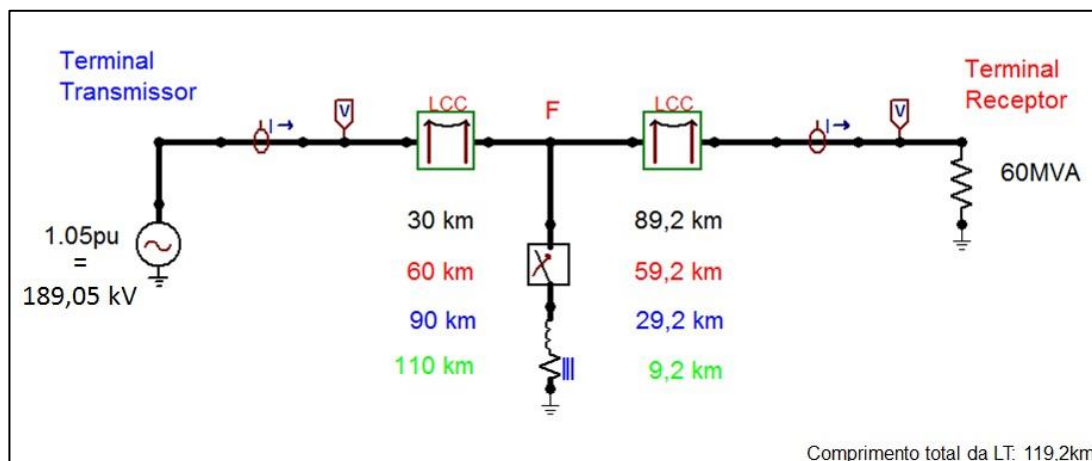


Figura 27 - Modelo da LT Goshen – Drummond para simulação de localização de faltas.  
Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

A partir disso, a figura 28 apresenta o perfil da onda de corrente para a distância de 30 km, a partir do terminal transmissor, situado na SE Goshen. Nela observa-se uma corrente de curto-circuito de amplitude 2,04 kA na frequência fundamental de 60 Hz, com tempo de chegada ao terminal de referência de 0,1 milissegundo. Os gráficos representativos das correntes de curto-circuito para as faltas simuladas nos pontos de 60 km, 90 km e 110 km de extensão da linha podem ser vistos no Apêndice 4.

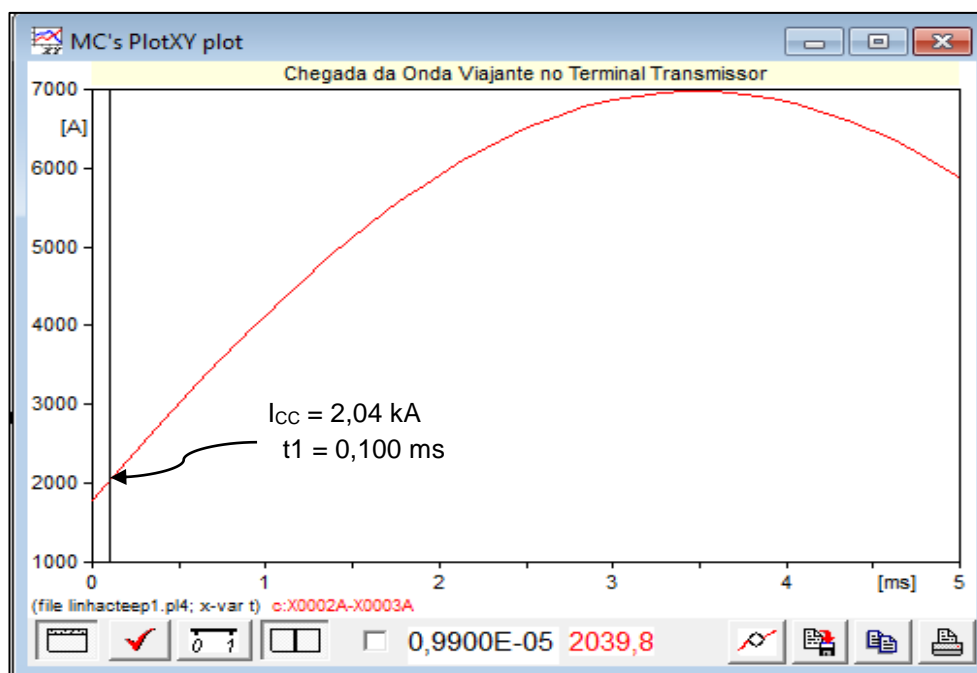


Figura 28 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 30 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

Uma comparação entre os gráficos pode ser feita analisando-se os dados da tabela 6, onde percebe-se a simultaneidade do aumento do tempo  $t_1$  e da diminuição da amplitude da corrente de curto-circuito, à medida que o ponto de falta se distancia do terminal referência, na SE Goshen.

Tabela 6 - Tempo de chegada da onda de corrente aos terminais da linha a partir do ponto de falta

Ponto	Distância adotada (km)	I <sub>cc</sub> (kA)	t <sub>1</sub> (ms)	t <sub>2</sub> (ms)
1	30	2,04	0,100	0,295
2	60	1,10	0,200	0,195
3	90	0,82	0,299	0,096
4	110	0,72	0,364	0,031

Fonte: AUTORES

O tempo  $t_2$  para cada ponto é calculado a partir da diferença entre o tempo total de propagação dos transitórios  $t_{prop}$ , obtido de (54), e o tempo  $t_1$ , retirado do perfil da corrente de curto-circuito plotada pelo software ATP. Dessa forma, os pontos estimados de ocorrência das faltas são dados por [15]:

$$P = \frac{L + v \cdot (t_1 - t_2)}{2} \quad (\text{km}) \quad (52)$$

e os resultados podem ser observados nos diagramas de Bewley-Lattice das figuras 29, 30, 31 e 32, para as distâncias de 30 km, 60 km, 90 km e 110 km, respectivamente.

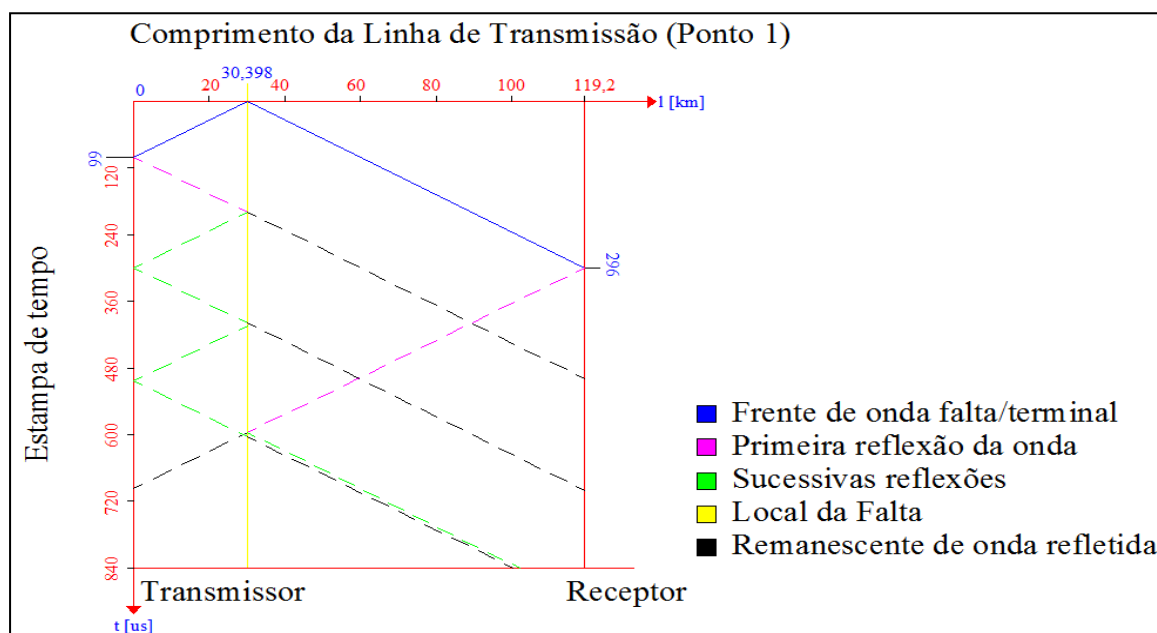


Figura 29 - Diagrama de Bewley-Lattice para falha considerada em 30 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

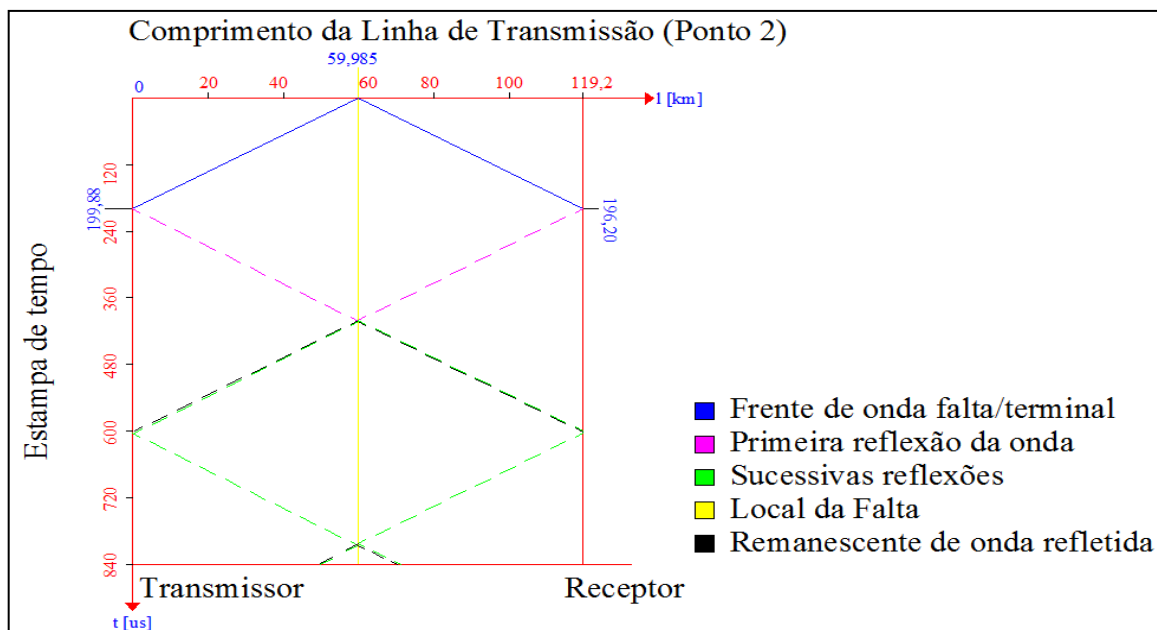


Figura 30 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 60 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

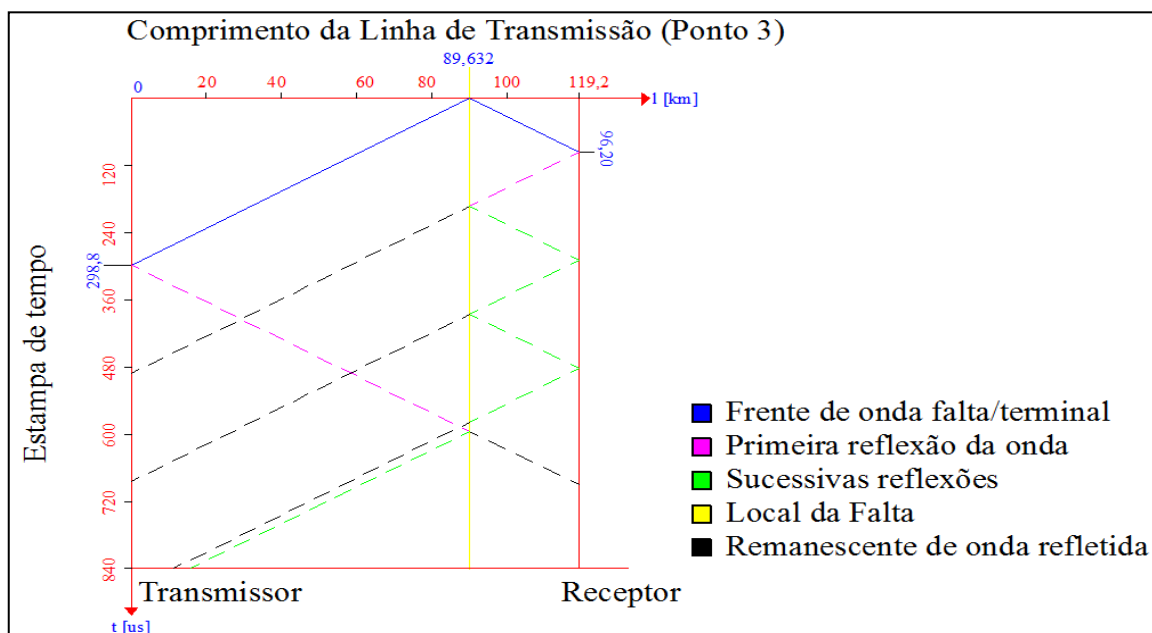


Figura 31 - Diagrama de Bewley-Lattice para falta considerada em 90 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

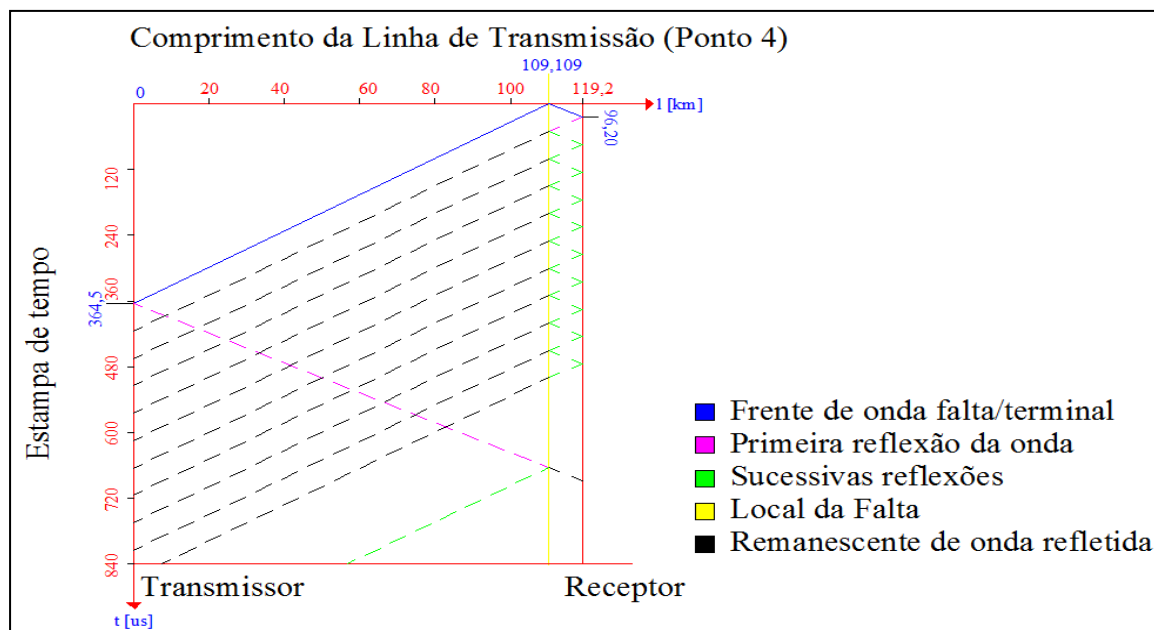


Figura 32 - Diagrama de Bewley-Lattice para falha considerada em 110 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

A tabela 7 apresenta o resumo dos resultados obtidos para os quatro pontos de falha simulados.

Tabela 7 - Resultado das simulações para localização de pontos de faltas na LT Goshen-Drummond

Ponto	Distância estimada (km)	Distância real (km)	t <sub>1</sub> (ms)	t <sub>2</sub> (ms)	Erro (m)	Erro (%)
1	30,398	30	0,099	0,296	+ 398	1,33%
2	59,985	60	0,1988	0,1962	- 15	0,03%
3	89,632	90	0,2988	0,0962	- 368	0,41%
4	109,109	110	0,3645	0,0305	- 891	0,81%

Fonte: AUTORES

Observa-se que a localização das faltas apresenta um erro médio, utilizando-se os valores absolutos, de 418 metros, ou aproximadamente 0,35% do comprimento total da LT. Esse resultado pode ser considerado satisfatório, já que a linha de transmissão é muito extensa.

Para ratificar a eficiência do método de localização de faltas por ondas viajantes, são apresentadas aqui duas simulações de casos reais de faltas que ocorreram na LT Goshen – Drummond, ocasionadas por *flashovers*. Os modelos utilizados para realização das simulações são mostrados nas figuras 33 e 34 para a

primeira e segunda falta, respectivamente. Neles estão contidas as distâncias em que ocorreram as faltas a partir do terminal transmissor, situado em Goshen.

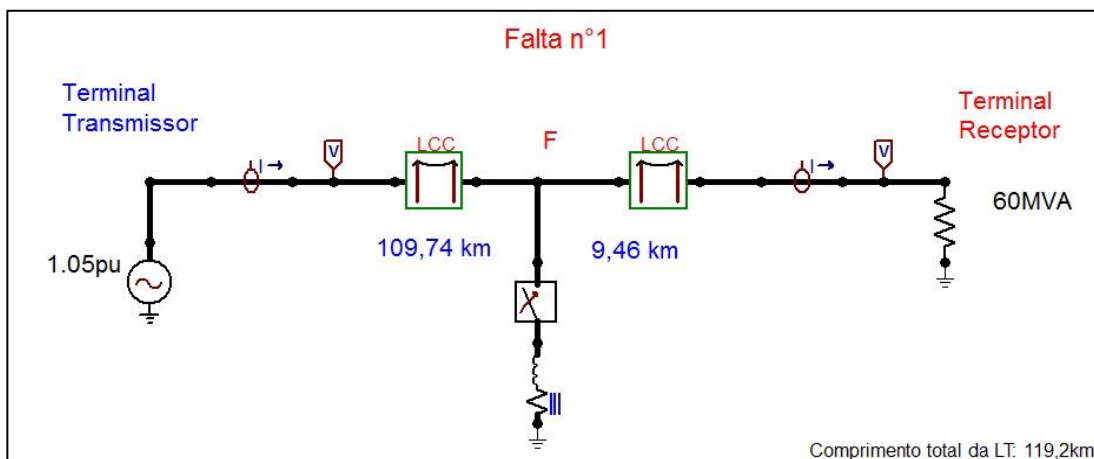


Figura 33 - Modelo da LT Goshen - Drummond para simulação de localização da falta real n° 1. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

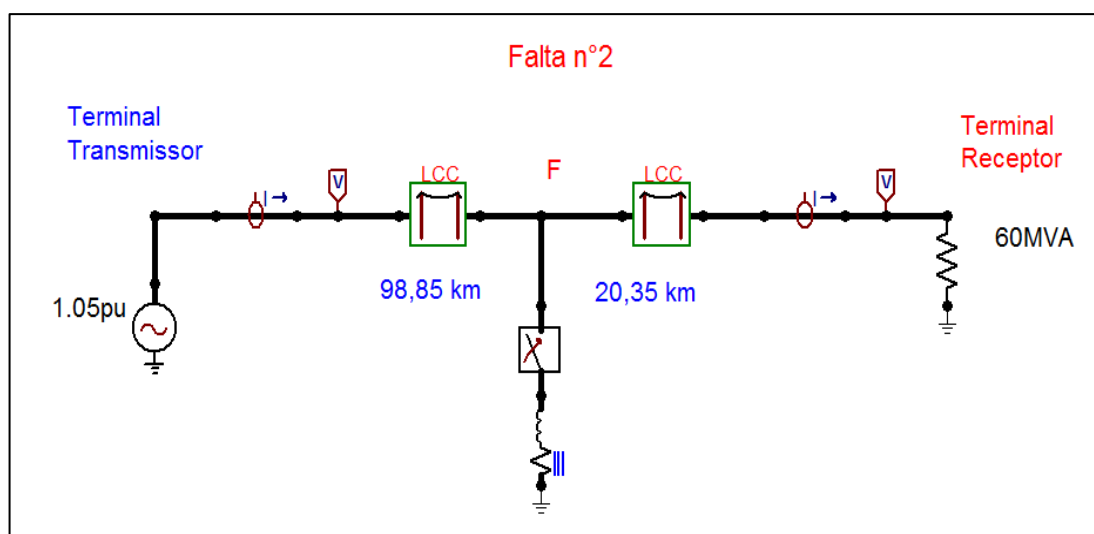


Figura 34 - Modelo da LT Goshen - Drummond para simulação de localização da falta real n° 2. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

As figuras 35 e 36 apresentam o perfil da onda de corrente na frequência fundamental para as distâncias das duas faltas acima, respectivamente.

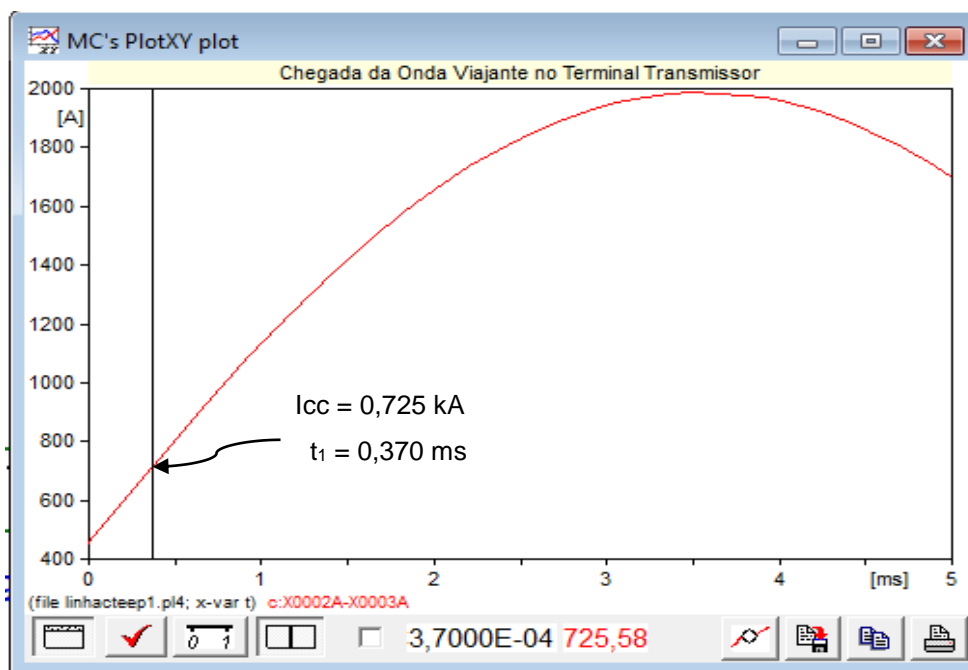


Figura 35 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 109,74 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

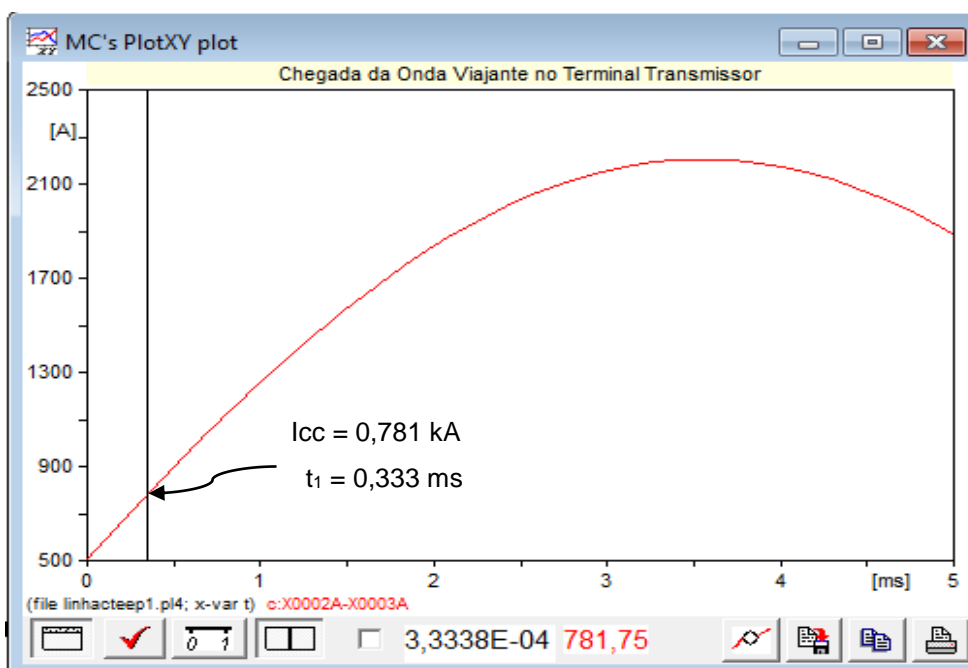


Figura 36 - Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 98,85 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

Pelos gráficos é possível observar que, devido ao curto tempo que as ondas levam para chegar ao terminal de referência, onde se encontra o elemento de proteção que as detecta, a amplitude da corrente de curto-circuito nos pontos

indicados é bem menor que seu valor de pico. Isso torna o método vantajoso no sentido de que o sistema e os equipamentos ficam expostos ao surto por menos tempo e sofrem menores impactos oriundos de correntes de curto-circuito menores.

Como analisado anteriormente, Percebe-se também a diminuição na amplitude da corrente conforme aumenta-se a distância entre o terminal de referência e o ponto de falta, em função do aumento da impedância da linha. A relação entre o tempo de propagação das ondas e a distância percorrida pelas mesmas pode ser observada através dos diagramas de treliça elaborados conforme CARDOSO (2011), indicando a estampa de tempo das reflexões, nas figuras 37 e 38 que seguem.

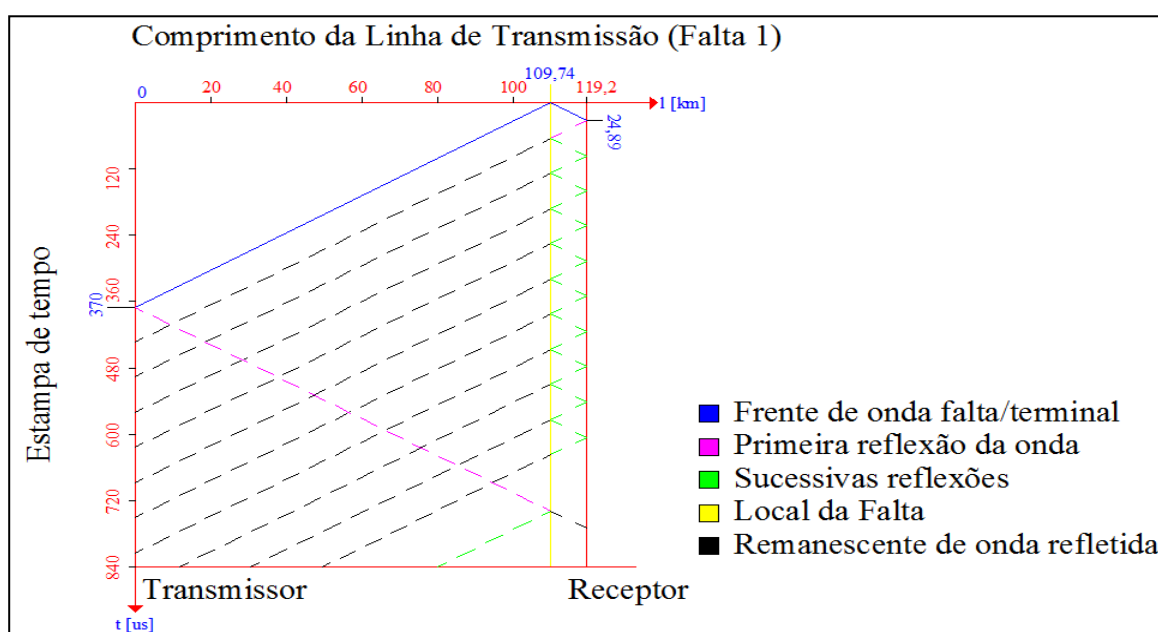


Figura 37 - Diagrama de Bewley-Lattice para falha em 109,74 km.  
Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

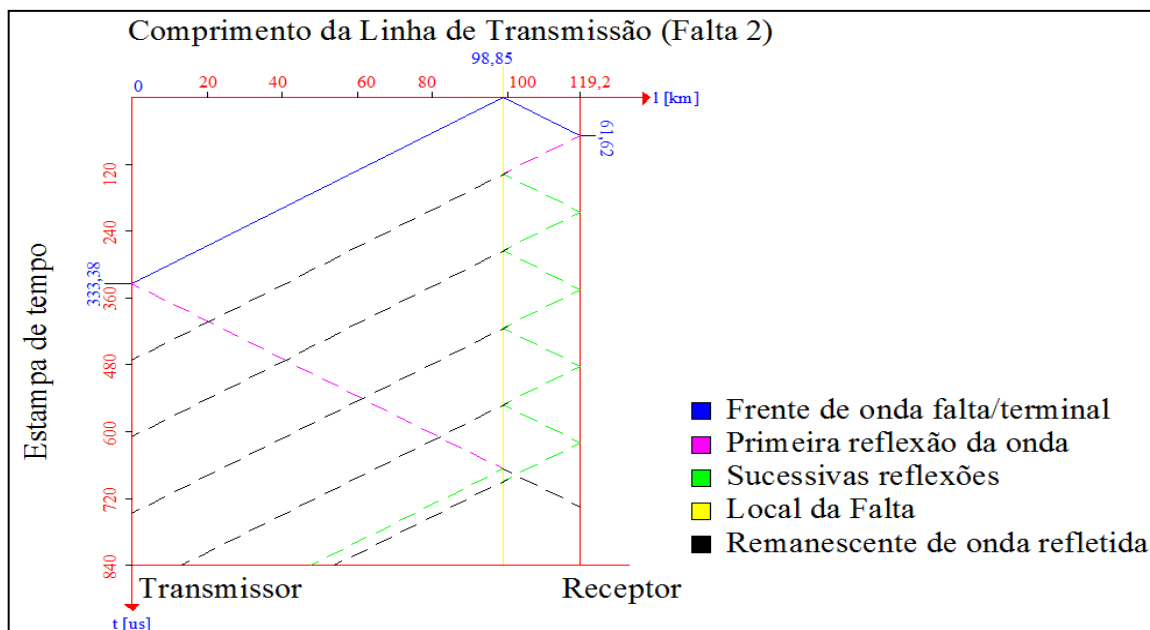


Figura 38 - Diagrama de Bewley-Lattice para falha em 98,85 km.  
 Produzido no Autocad. Fonte: AUTORES

A tabela 8 apresenta os resultados obtidos para os dois pontos de falhas reais considerados.

Tabela 8 – resultados das simulações para falhas reais na LT Goshen - Drummond

FALTA 1					
Distância estimada (km)	Distância real (km)	t1 (ms)	t2 (ms)	Erro (m)	Erro (%)
109,74	109,29	370	24,89	+ 450	0,41
FALTA 2					
Distância estimada (km)	Distância real (km)	t1 (ms)	t2 (ms)	Erro (m)	Erro (%)
98,85	98,98	333,38	61,62	- 130	0,13

Fonte: AUTORES

Os erros percentuais apresentados, em relação às reais distâncias de ocorrência das falhas, reafirmam a precisão do método de localização por ondas viajantes.

A partir das tabelas 4, 7 e 8, que apresentam os resultados das simulações feitas, pode-se interpretar que o erro médio na localização dos pontos de falhas, em relação às extensões das linhas adotadas para estudar o método por OV, varia entre

0,2 e 0,3 % do comprimento total de cada linha. Isso prova a eficiência do método quando comparado ao de localização de faltas por impedâncias, por exemplo, pois, como afirma SCHWEITZER et al. (2013), o método por impedâncias se esbarra na limitação de precisão, que inclui a não-homogeneidade das linhas de transmissão, a incerteza nos dados de impedância das linhas, os acoplamentos mútuos, as séries de compensação, a variação da resistência do arco durante a falta, transitórios, manobras, dados limitados de tensão e corrente entre o começo da falha e a atuação do disjuntor, precisão limitada de transformadores de potência e corrente e aumento do potencial de falhas próximas ao solo. Como resultado disso, a precisão do método por impedâncias gira em torno de 0,5 a 2% [18]. A título de exemplo, para uma linha de transmissão com 300 km de extensão, um erro percentual de 1% ainda faz com que seja necessário percorrer 6 km em busca de uma falha (aproximadamente 20 torres).

Ainda segundo SCHWEITZER et al. (2013), o método a partir de onda viajantes utiliza-se dos surtos e ondas que ocorrem e são naturalmente gerados pelas faltas e podem dar uma precisão aproximada de 300 m, ou de um espaço entre torres.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O método de localização de faltas em LTs analisado (Ondas Viajantes) mostrou-se muito eficiente em identificar e informar o ponto de defeito, mesmo em situações com parâmetros totalmente distintos, deixando evidente sua precisão constante, independente do comprimento da linha, quando comparado a métodos que possuem o erro vinculado à extensão dessa, por exemplo, o método de localização por impedâncias.

As faltas foram simuladas, analisando-se casos reais de linhas de transmissão também reais, onde diversos pontos de defeito ao longo de suas extensões foram adotados, com o objetivo de verificar sua precisão e analisar também o comportamento das reflexões das OV nos terminais da linha.

Outro ponto importante foi a simulação das reflexões durante o momento de energização da linha de transmissão, algo que também é analisado e armazenado por relés de proteção que operam em função da detecção de OV durante a fase de comissionamento da linha. A partir de tais dados é possível saber o perfil característico das reflexões para a linha em questão, sendo esse fundamental na hora de se distinguir um defeito de uma situação normal quando elevações/afundamentos de tensão e corrente estiverem presentes no sistema.

Deixa-se como sugestão para trabalhos futuros uma análise mais aprofundada que compare os métodos de localização por OV e de impedâncias, em situações em que se tenha linhas de transmissão entre sistemas não-homogêneos e sob efeito de acoplamentos mútuos, com o objetivo de identificar as características que conferem maior precisão ao método por ondas viajantes.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Área Territorial Brasileira**. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_territ\\_area.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm). Acesso em: 23/03/2017.
- [2] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Projeção da População do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao>. Acessado em: 23/03/2017
- [3] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Plano de Operação Energética 2017/2021**. 2017, 41 p.
- [4] LEÃO, Ruth. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2009. 38 p.
- [5] SANTOS, Milana Lima dos. **Avaliação do Desempenho de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica de Meia Onda**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010, 78 p.
- [6] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Mapas**. Disponível em: <http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acessado em 19/10/2017.
- [7] MENEZES, Victor Prangiel de. **Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: aspectos técnicos, orçamentários e construtivos**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015. 87 p.
- [8] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Extensão da Rede de Transmissão**. Disponível em: <http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acessado em: 25/09/2017.

- [9] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Histórico de Operação: Demanda Máxima**. Disponível em: [http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/demanda\\_maxima.aspx](http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/demanda_maxima.aspx). Acessado em: 25/09/2017.
- [10] STEVENSON JR, William D. **Elementos de análise de Sistemas de Potência**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982. 458 p.
- [11] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Indicadores de Desempenho do SIN: Outubro de 2017**.
- [12] FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica: linhas aéreas - teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro: LTC/EFEL, 1977. 280 p.
- [13] ONS. **Relatório de Análise de Perturbação: Análise da Perturbação do dia 10/11/2009 às 22h13min envolvendo o desligamento dos três circuitos da LT 765 kV Itaberá – Ivaiporã**. Rio de Janeiro, 2009. 135 p.
- [14] FADINI, Humberto Antônio Marmo. MOTTA, Sérgio Saldanha da Gama. **Sistema de Transmissão de Itaipu: a experiência de FURNAS**. Rio de Janeiro: FURNAS, 1995. 224 p.
- [15] CARDOSO, José Roberto. **Engenharia Eletromagnética**. Elsevier/Campos: São Paulo, 2011. 488 p.
- [16] MARX, Stephen *et al.* **Traveling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing and Results**. Artigo apresentado na “16<sup>th</sup> Annual Georgia Tech Fault and Disturbance Analysis Conference”, Georgia, Estados Unidos, 2013, 15 p.
- [17] SCHWEITZER, Edmund O. *et al.* **A New Traveling Wave Fault Locating Algorithm for Line Current Differential Relays**. Artigo apresentado na “12<sup>th</sup> International Conference on Developments in Power System Protection”, Copenhagen, Dinamarca, 2014, 7 p.

[18] SCHWEITZER, Edmund O. *et al.* **Locating Faults by the Traveling Waves they Launch**. Artigo. Bonneville Power Administration e Schweitzer Engineering Laboratories. 2013, 16 p.

## APÊNDICE 1

Algoritmo para simulação do perfil de reflexões das ondas viajantes de tensão e corrente e obtenção do tempo de tráfego das mesmas ao longo de toda a extensão da LT Ivaiporã-Itaberá de 266 km.

```
%PARÂMETROS DE CARGA E DA LINHA DE TRANSMISSÃO:
%
%
f = 60; %frequencia do sistema;
l = 266; %comprimento da LT em km;
P = 2237*10^6; %potência ativa transferida ao receptor;
fp = 0.95; %fator de potência considerado;
r = 0.0514; %resistência/km da LT;
L = 1.355*10^(-3); %indutância/km da LT;
C = 0.00821*10^(-6); %capacitância/km da LT;
U2 = 776*10^3; %tensão de linha na barra receptora em (V);
U2fase = U2/sqrt(3); %tensão de fase na barra receptora em (V);
w = 377; %frequência angular no sistema 60Hz;
U1 = 779*10^3; %tensão de linha no transmissor em (V);
I2 = 1750; %corrente de linha na linha de transmissão em
(A);
%
%
%CALCULO DA IMPEDANCIA NATURAL DA LT E IMPEDANCIA TERMINAL DA LT:
%
%
Z0 = sqrt(L/C); %impedancia natural para LT de comprimento finito;
Z2 = U2/I2; %impedancia terminal para LT de comprimento finito;
Z2modulo = abs(Z2);
fator = Z0/Z2; %relação entre Z0 e Z2;
Iref= fator*I2; %corrente de referência para o gráfico;
%
%CALCULO DOS COEFICIENTES DE REFLEXÃO NA BARRA RECEPTORA, CONSIDERANDO OS
%COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO (krul e kri1) = -1 (FONTE IDEAL):
%
%
kru2 = (Z2modulo-Z0)/(Z2modulo+Z0); %coef. reflexão da onda de tensão;
kri2 = (Z0-Z2modulo)/(Z2modulo+Z0); %coef. reflexão da onda de corrente;
%
%CALCULO DAS TENSÕES REFLETIDAS NAS BARRAS TRANSMISSORA E RECEPTORA:
%
%
U11 = U1*(1+kru2); %1ª reflexão tensão na barra transmissora;
U21 = U1*(1-(kru2)^2); %1ª reflexão tensão na barra receptora;
U12 = U1*(1+(kru2)^3); %2ª reflexão tensão na barra transmissora;
U22 = U1*(1-(kru2)^4); %2ª reflexão tensão na barra receptora;
U13 = U1*(1+(kru2)^5); %3ª reflexão tensão na barra transmissora;
U23 = U1*(1-(kru2)^6); %3ª reflexão tensão na barra receptora;
%
%CALCULO DAS CORRENTES REFLETIDAS NAS BARRAS TRANSMISSORA E RECEPTORA:
%
%
I11 = Iref*(1-kri2) %1ª reflexão corrente na barra transmissora;
I21 = Iref*(1-(kri2)^2) %1ª reflexão corrente na barra receptora;
I12 = Iref*(1-(kri2)^3) %2ª reflexão corrente na barra transmissora;
I22 = Iref*(1-(kri2)^4) %2ª reflexão corrente na barra receptora;
I13 = Iref*(1-(kri2)^5) %3ª reflexão corrente na barra transmissora;
```

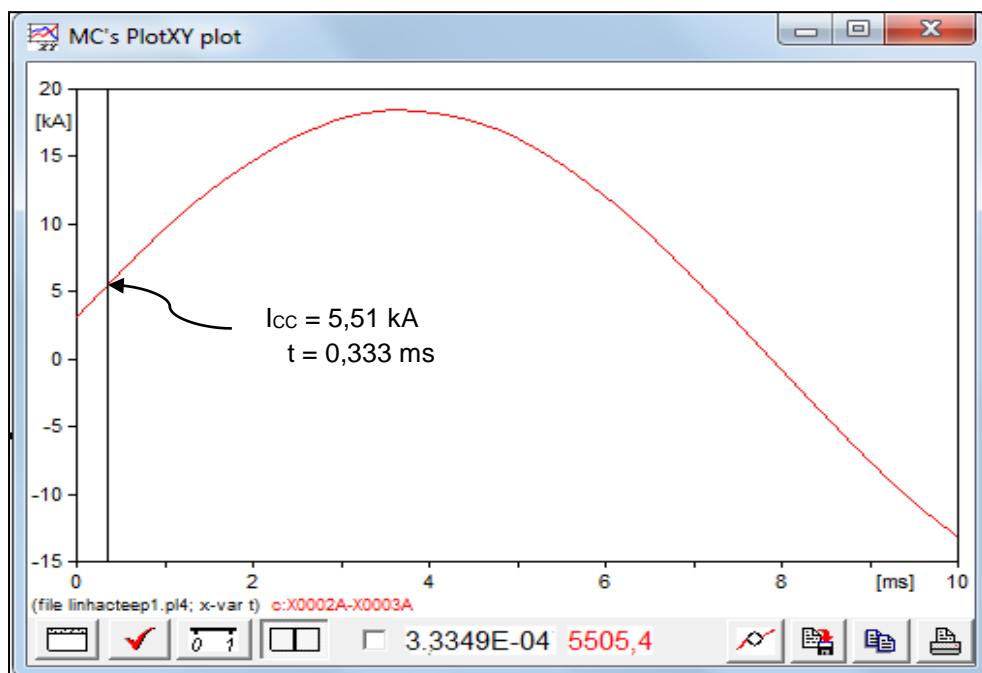
```

I23 = Iref*(1-(kri2)^6)           %3ª reflexão corrente na barra receptora;
%
%CALCULO DA VELOCIDADE E FREQUENCIA DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VIAJANTE PELA LT;
%
%
v = 1/sqrt(L*C);                 %velocidade de propagação da onda em km/s;
t1 = 1/v;                        %tempo de propagação sobre a extensão da LT;
f1 = 1/t1;                       %frequencia de propagação da onda viajante;
%*****
ireferencia=Iref;
quad1=I11;                        % PRIMEIRO
quad2=I11-I21;                   % SEGUNDO (NEGATIVO)
quad3=I12-I21;                   % TERCEIRO
quad4=I12-I22;                   % QUARTO (NEGATIVO)
quad5=I13-I23;                   % QUINTO
quad6=I13-I23;                   % SEXTO (NEGATIVO)
%*****
ureferencia=U1;
tuad1=U11;                        % PRIMEIRO
tuad2=U11-U21;                   % SEGUNDO (NEGATIVO)
tuad3=U12-U21;                   % TERCEIRO
tuad4=U12-U22;                   % QUARTO (NEGATIVO)
tuad5=U13-U23;                   % QUINTO
tuad6=U13-U23;                   % SEXTO (NEGATIVO)
%*****
global y y1 tuad1 tuad2 tuad3 tuad4 tuad5 tuad6 ureferencia quad1 quad2
quad3 quad4 quad5 quad6 ireferencia
sim('Marcos_Simulink');
cla
figure(1)
plot(y)
title('Variação de tensão junto ao transmissor e receptor após sucessivas
reflexões')
xlabel('Periodo (T)')
ylabel('U [V]')
legend('Tensão Simulada','Tensão de Referência')
grid
figure(2)
plot(y1)
title('Variação de corrente junto ao transmissor e receptor após sucessivas
reflexões')
xlabel('Periodo (T)')
ylabel('I [A]')
legend('Corrente Simulada','Corrente de Referência')
grid

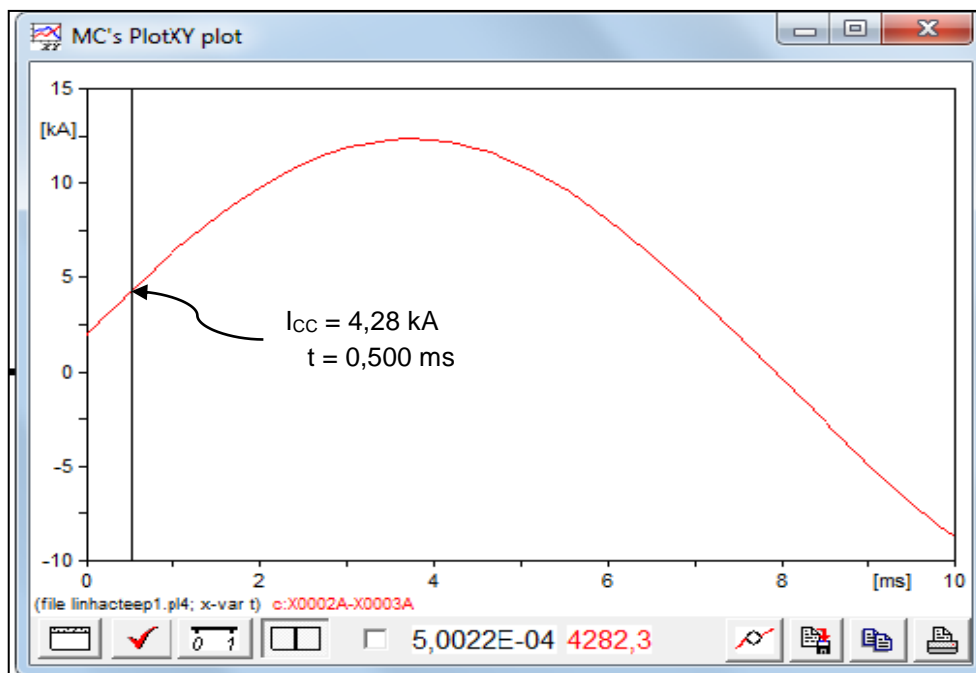
```

## APÊNDICE 2

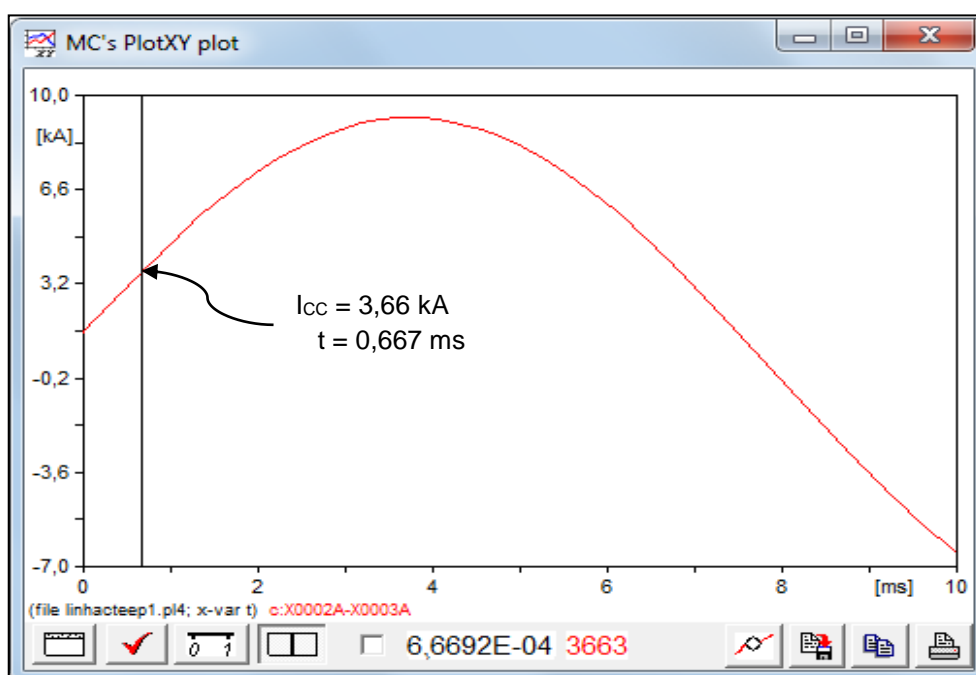
Perfil das correntes de curto-circuito na frequência fundamental (60 Hz) para localização do pontos de faltas simuladas em 100 km, 150 km, 200 km e 250 km de extensão da LT Ivaiporã-Iteberá, a partir da SE Ivaiporã.



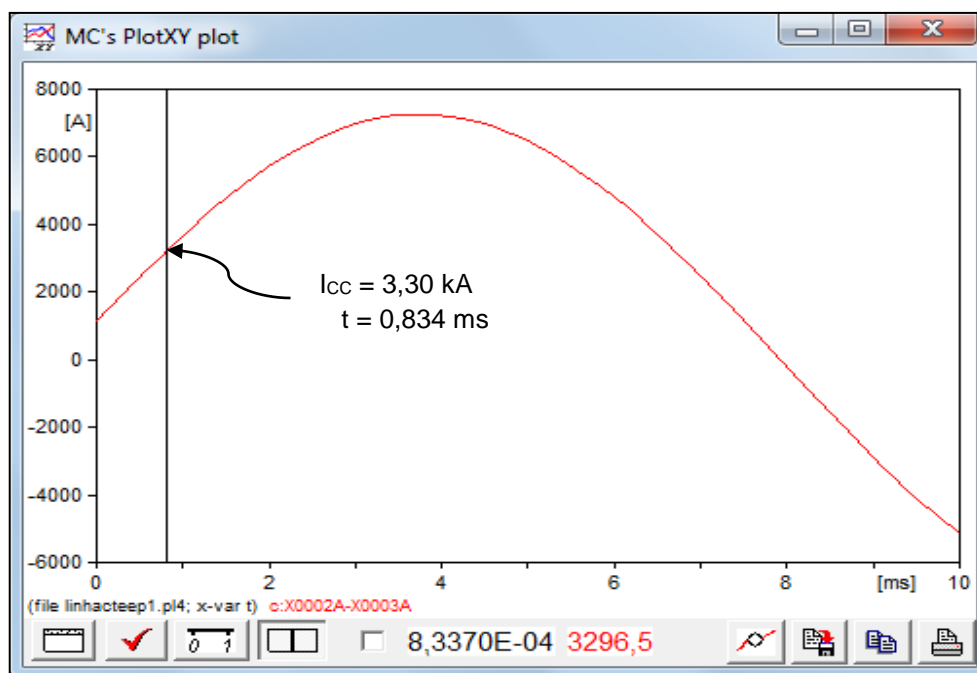
Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 100 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES



Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 150 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES



Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 200 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES



Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 250 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES

### APÊNDICE 3

Algoritmo para simulação do perfil de reflexões das ondas viajantes de tensão e corrente e obtenção do tempo de tráfego das mesmas ao longo de toda a extensão da Goshen-Drummond de 119,2 km.

```
%PARÂMETROS DE CARGA E DA LINHA DE TRANSMISSÃO:
%
%
f = 60; %frequencia do sistema;
l = 119.2; %comprimento da LT em km;
P = 60*10^6; %potência aparente transferida ao receptor;
r = 0.09; %resistência/km da LT;
L = 1.28*10^(-3); %indutância/km da LT;
C = 8.89*10^(-9); %capacitância/km da LT;
U2 = 161*10^3; %tensão de linha na barra receptora em (V);
U2fase = U2/sqrt(3); %tensão de fase na barra receptora em (V);
w = 377; %frequência angular no sistema 60Hz;
U1 = 169.05*10^3; %tensão de linha no transmissor em (V);
I2 = 215.16; %corrente de linha na linha de transmissão em
(A);
%
%
%CALCULO DA IMPEDANCIA NATURAL DA LT E IMPEDANCIA TERMINAL DA LT:
%
%
Z0 = sqrt(L/C); %impedancia natural para LT de comprimento finito;
Z2 = U2/I2; %impedancia terminal para LT de comprimento finito;
Z2modulo = abs(Z2);
fator = Z0/Z2; %relação entre Z0 e Z2;
Iref= I2*fator; %corrente de referência para o gráfico;
%
%CALCULO DOS COEFICIENTES DE REFLEXÃO NA BARRA RECEPTORA, CONSIDERANDO OS
%COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO (krul e kril) = -1 (FONTE IDEAL):
%
%
kru2 = (Z2modulo-Z0)/(Z2modulo+Z0); %coef. reflexão da onda de tensão;
kri2 = (Z0-Z2modulo)/(Z2modulo+Z0); %coef. reflexão da onda de corrente;
%
%CALCULO DAS TENSÕES REFLETIDAS NAS BARRAS TRANSMISSORA E RECEPTORA:
%
%
U11 = U1*(1+kru2); %1ª reflexão tensão na barra transmissora;
U21 = U1*(1-(kru2)^2); %1ª reflexão tensão na barra receptora;
U12 = U1*(1+(kru2)^3); %2ª reflexão tensão na barra transmissora;
U22 = U1*(1-(kru2)^4); %2ª reflexão tensão na barra receptora;
U13 = U1*(1+(kru2)^5); %3ª reflexão tensão na barra transmissora;
U23 = U1*(1-(kru2)^6); %3ª reflexão tensão na barra receptora;
%
%CALCULO DAS CORRENTES REFLETIDAS NAS BARRAS TRANSMISSORA E RECEPTORA:
%
%
I11 = Iref*(1-kri2) %1ª reflexão corrente na barra transmissora;
I21 = Iref*(1-(kri2)^2) %1ª reflexão corrente na barra receptora;
I12 = Iref*(1-(kri2)^3) %2ª reflexão corrente na barra transmissora;
I22 = Iref*(1-(kri2)^4) %2ª reflexão corrente na barra receptora;
I13 = Iref*(1-(kri2)^5) %3ª reflexão corrente na barra transmissora;
I23 = Iref*(1-(kri2)^6) %3ª reflexão corrente na barra receptora;
```

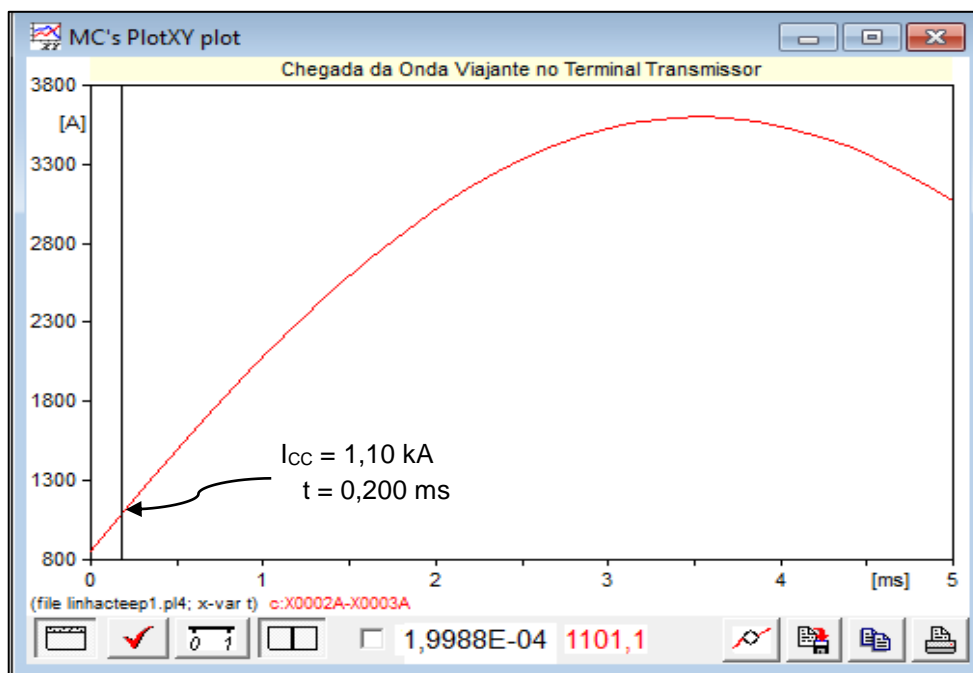
```

%
%CALCULO DA VELOCIDADE E FREQUENCIA DE PROPAGAÇÃO DA ONDA VIAJANTE PELA LT;
%
%
v = 1/sqrt(L*C);           %velocidade de propagação da onda em km/s;
t1 = 1/v;                 %tempo de progagação sobre a extensão da LT;
f1 = 1/t1;               %frequencia de propagação da onda viajante;
%*****
ireferencia=Iref;
quad1=I11;               % PRIMEIRO
quad2=I11-I21;          % SEGUNDO (NEGATIVO)
quad3=I12-I21;          % TERCEIRO
quad4=I12-I22;          % QUARTO (NEGATIVO)
quad5=I13-I23;          % QUINTO
quad6=I13-I23;          % SEXTO (NEGATIVO)
%*****
ureferencia=U1;
tuad1=U11;              % PRIMEIRO
tuad2=U11-U21;          % SEGUNDO (NEGATIVO)
tuad3=U12-U21;          % TERCEIRO
tuad4=U12-U22;          % QUARTO (NEGATIVO)
tuad5=U13-U23;          % QUINTO
tuad6=U13-U23;          % SEXTO (NEGATIVO)
%*****
global y y1 tuad1 tuad2 tuad3 tuad4 tuad5 tuad6 ureferencia quad1 quad2
quad3 quad4 quad5 quad6 ireferencia
sim('Marcos_Simulink');
cla
figure(1)
plot(y)
title('Variação de tensão junto ao transmissor e receptor após sucessivas
reflexões')
xlabel('Periodo (T)')
ylabel('U [V]')
legend('Tensão Simulada','Tensão de Referência')
grid
figure(2)
plot(y1)
title('Variação de corrente junto ao transmissor e receptor após sucessivas
reflexões')
xlabel('Periodo (T)')
ylabel('I [A]')
legend('Corrente Simulada','Corrente de Referência')
grid

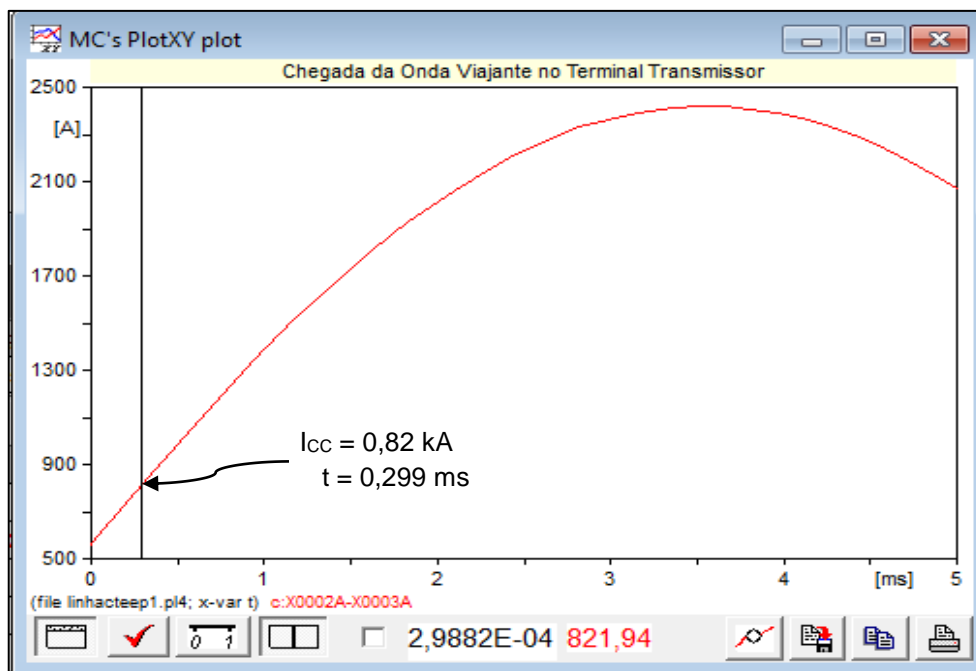
```

## APÊNDICE 4

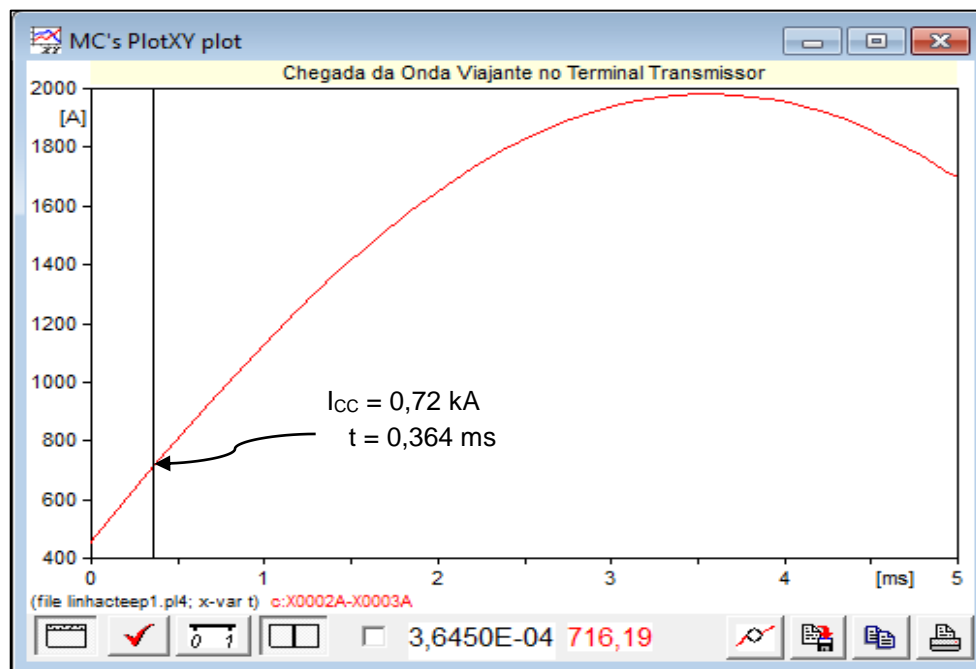
Perfil das correntes de curto-circuito na frequência fundamental (60 Hz) para localização do pontos de faltas simuladas em 30 km, 60 km, 90 km e 110 km de extensão da LT Goshen-Drummond, a partir da SE Goshen.



Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 60 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES



Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. tempo para detecção da falta em 90 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES



Onda de corrente na frequência fundamental: amplitude vs. Tempo para detecção da falta em 110 km. Produzido no ATP Draw. Fonte: AUTORES