SOBRETENSÕES DE ENERGIZAÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO

Edilson da Silva Sant'Ana

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima

(Orientador)

Prof. Robson Francisco da Silva Dias

Prof.ª Tatiana Mariano Lessa de Assis

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2011

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me inspirado com sabedoria e determinação para enfrentar as dificuldades, permitindo assim concluir mais uma etapa da minha vida. À minha mãe, Ester Thereza da Silva, que me educou e me apoiou durante toda minha vida e principalmente nesta jornada. Ao meu pai, Natan Manso de Sant'Ana, que incentivou-me e esteve presente sempre que precisei. Aos meus irmãos, Edilene, Jhonatan e Ana Beatriz, pelo companheirismo e a toda minha família que sempre esteve me incentivando. A todos meus amigos pelos momentos de estudo e descontração. E a todos que de alguma forma me ajudaram para que eu concluísse minha graduação.

À minha namorada, Fernanda, que desde o início se mostrou uma companheira maravilhosa, me apoiando, incentivando e sendo compreensiva.

Agradeço ao meu amigo Carlos Marcelo, pelo incentivo e apoio técnico, sem o qual não teria concluído esse trabalho.

Também agradeço a todos os professores que fizeram parte da minha formação e ao meu orientador Antonio Carlos Siqueira de Lima, pela ajuda prestada para que esse trabalho fosse concluído.

RESUMO

Neste trabalho serão analisadas sobretensões devido a manobras de energização de linhas de transmissão, com foco nos transitórios eletromagnéticos que ocorrem na ocasião destes fenômenos e na modelagem de sistemas para a sua correta análise.

Contudo, devido à complexidade das análises, será feita uma divisão em duas fases. Inicialmente será apresentada a importância de uma abordagem estatística nas manobras de energização, fazendo uma comparação entre métodos estatísticos.

Em uma segunda fase, será feita a modelagem eletromagnética de um sistema elétrico, visando apresentar modelos para os equipamentos e mostrar a influência destes nas sobretensões devido à manobra de energização.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO1	
1.1.	OBJETIVO1	
1.2.	MOTIVAÇÃO2	>
1.3.	DESCRIÇÃO DO DOCUMENTO2	>
2.	SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS4	ł
2.1.	ENERGIZAÇÃO DE LINHAS	,
3.	METODOLOGIA DO ESTUDO 10)
4.	RESULTADOS	ł
4.1.	ESTUDO DE CASO SIMPLES14	ł
4.1.1.	CASO SIMPLES SEM PERDAS NA LT14	ł
4.1.2.	CASO SIMPLES COM PERDAS NA LT	5
4.2.	ESTUDO DE CASO REAL	7
4.2.1.	VERIFICAÇÃO DO MODELO	}
4.2.2.	ENERGIZAÇÃO DA LT 230 KV PICOS - TAUÁ)
5.	CONCLUSÕES	5
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS46	3
7.	APÊNDICE	7
7.1.	EQUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO PARA LINHAS MONOFÁSICAS47	7
7.1.1.	REFLEXÕES54	ł
7.2.	MÉTODO NUMÉRICO DE CÁLCULO INTEGRAÇÃO TRAPEZOIDAL	ł
7.3.	LINHAS DE TRANSMISSÃO	3
7.4.	TRANSFORMADORES	7

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – FORMA DE ONDA TÍPICA DE SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS [4]5
FIGURA 2 – FORMA DE ONDA TÍPICA DE UM TRANSITÓRIO DE MANOBRA [7]6
FIGURA 3 – FORMA DE ONDA TÍPICA DE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS [4]7
FIGURA 4 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM ELEMENTO INFINITESIMAL DE UMA LT
FIGURA 5 - LT PICOS – TAUÁ. FONTE: ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO10
FIGURA 6 - CONFIGURAÇÃO DA TORRE PARA A LT 230 KV PICOS – TAUÁ
FIGURA 7 - MODELO DO SISTEMA SIMPLIFICADO CONECTADO COM CHAVES DETERMINÍSTICAS14
FIGURA 8 - ENERGIZAÇÃO DA LINHA SEM PERDAS COM TEMPO DE FECHAMENTO DE 10 MS15
FIGURA 9 - ENERGIZAÇÃO COM TEMPO DE FECHAMENTO DIFERENTE ENTRE OS PÓLOS15
FIGURA 10 - MODELO DO SISTEMA SIMPLIFICADO CONECTADO COM CHAVES ESTATÍSTICAS16
FIGURA 11 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA17
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DOS MÁXIMOS PICOS NO INÍCIO DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES
FIGURA 13 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES 19
FIGURA 14 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES19
FIGURA 15 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES19
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DOS MÁXIMOS PICOS NO FINAL DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES20
FIGURA 17 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES 20
FIGURA 18 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES20
FIGURA 19 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES20
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DOS ΜΑΧΙΜΟS PICOS ΝΟ ΙΝΙ΄CIO DA LINHA, PARA 200 ENERGIZAÇÕES 21

FIGURA 21 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES...... 21 FIGURA 23 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES21 FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO DOS MÁXIMOS PICOS NO FINAL DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES22 FIGURA 25 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES 22 FIGURA 26 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES......22 FIGURA 27 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES......22 FIGURA 28 - DISTRIBUIÇÃO DOS MÁXIMOS PICOS NO INÍCIO DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES23 FIGURA 29 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES......23 FIGURA 30 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES23 FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO DOS MÁXIMOS PICOS NO FINAL DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES24 FIGURA 33 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES24 FIGURA 34 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES......24 FIGURA 35 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES......24 FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO DOS MÁXIMOS PICOS NO INÍCIO DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES.........25 FIGURA 37 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES......25 FIGURA 38 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES25 FIGURA 39 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES25 FIGURA 41 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES26 FIGURA 42 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES......26 FIGURA 43 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES......26 FIGURA 45 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES...... 28

vi

FIGURA 46 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES28 FIGURA 47 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES28 FIGURA 49 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 100 ENERGIZAÇÕES 29 FIGURA 53 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES 30 FIGURA 57 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 200 ENERGIZAÇÕES 31 FIGURA 61 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES...... 32 FIGURA 65 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 400 ENERGIZAÇÕES33 FIGURA 69 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES.......34

FIGURA 71 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO INÍCIO DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES	. 34
FIGURA 72 - DISTRIBUIÇÃO DOS MÁXIMOS PICOS NO FINAL DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES	. 35
FIGURA 73 - PROBABILIDADE DAS SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES	. 35
FIGURA 74 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES	. 35
FIGURA 75 - PIOR CASO DE SOBRETENSÕES NO FINAL DA LINHA PARA 500 ENERGIZAÇÕES	. 35
FIGURA 76 – SISTEMA MODELADO	. 37
FIGURA 77 - SISTEMA MODELADO NO ATPDRAW PARA O CASO REAL	. 41
FIGURA 78 - SOBRETENSÃO NO INICIO DA LT	. 42
FIGURA 79 - SOBRETENSÃO NO MEIO DA LT	. 43
FIGURA 80 - SOBRETENSÃO NO FIM DA LT	. 43
FIGURA 81 – CAMPO ELETROMAGNÉTICO DE UMA LINHA MONOFÁSICA / SOLO IDEAL	. 47
FIGURA 82 – CAMPO ELETROMAGNÉTICO DE UMA LINHA MONOFÁSICA / CONDUTOR IMAGEM	. 48
FIGURA 83 – ELEMENTO DIFERENCIAL DE UMA LINHA MONOFÁSICA	. 49
FIGURA 84 – EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE DA CORRENTE	. 50
FIGURA 85 – INTERPRETAÇÃO DOS SINAIS DA EQUAÇÃO DE ONDA DE CORRENTE	. 54
FIGURA 86 – DESCONTINUIDADE: IMPEDÂNCIA CONCENTRADA Z(S)	. 55
FIGURA 87 – EFEITO DA CARGA RESISTIVA NOS TERMINAIS DA LINHA	. 60
FIGURA 88 – LINHA SEMI-INFINITA: TERMINAÇÃO INDUTIVA	. 61
FIGURA 89 – TERMINAÇÃO INDUTIVA	. 62
FIGURA 90 – TERMINAÇÃO CAPACITIVA	. 64
FIGURA 91 – APLICAÇÃO DO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO TRAPEZOIDAL	. 65
FIGURA 92 – CARACTERÍSTICA NÃO LINEAR DOS TRANSFORMADORES	. 68

1. INTRODUÇÃO

As manobras de energização provocam sobretensões temporárias, que embora sejam de curta duração, podem provocar danos aos equipamentos do sistema ou ainda ocasionar falhas de isolação. Essas sobretensões transitórias somente podem ser analisadas por meio de estudos de transitórios eletromagnéticos, que devido a sua complexidade são realizados com o auxilio de ferramentas computacionais tais como EMTP – ATP (Alternative Transiente Program), EMTDC – PSCAD (Power Systems Computer Aided Design), dentre outros.

Visando obter sobretensões próximas às sobretensões de um empreendimento real, nas análises foi preparado o modelo eletromagnético de um fragmento do sistema brasileiro. Isto é possível uma vez que órgãos como ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico e a EPE – Empresa de Pesquisa Energética disponibilizam arquivos contendo dados de fluxo de potência e curto-circuito do sistema elétrico brasileiro, os quais servem como base de dados para a elaboração do modelo e também possibilitam a verificação do mesmo. Deve ser ressaltado que alguns dados estruturais das linhas de transmissão foram aproximados já que estas informações não são de domínio público.

Após a modelagem serão analisadas algumas manobras de energização nas quais serão feitas análises estatísticas variando a quantidade de energizações.

1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo analisar as sobretensões temporárias devido às manobras de energização em linhas de transmissão. Neste trabalho também serão analisadas as influências das características intrínsecas da linha de transmissão e do sistema ao qual a linha será conectada.

Deve ser ressaltado que as energizações são apenas umas das causas de

1

sobretensões transitórias em linhas de transmissão e para análises mais detalhadas devem ser feitos outros estudos, dos quais se pode citar: Religamento tripolar e monopolar e rejeição de carga. Somente assim é possível quantificar a maior sobretensão a qual a linha de transmissão será submetida.

1.2. MOTIVAÇÃO

Este trabalho tem como motivação orientar e explicar os fenômenos eletromagnéticos que ocorrem na ocasião da energização de linhas de transmissão, tendo como foco servir como guia para iniciantes no estudo desse fenômeno.

Também pode-se destacar a importância deste trabalho como uma das análises elaboradas para o correto dimensionamento dos equipamentos elétricos em um empreendimento de uma linha de transmissão.

Portanto uma abordagem com relação aos tipos de sobretensões e a propagação de ondas eletromagnéticas envolvidas serão abordadas nesse trabalho.

1.3. DESCRIÇÃO DO DOCUMENTO

Neste documento são abordadas análises de sobretensões devido às manobras de energização de linhas de transmissão, neste sentido este documento é dividido em duas partes:

O capítulo 2 faz uma introdução a transitórios eletromagnéticos, e menciona conceitos de sobretensões temporárias, de manobra e atmosféricas. Inclui também um breve resumo sobre energização de linhas de transmissão e o seu equacionamento básico.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada neste trabalho e inclui a modelagem do sistema utilizado para fazer as análises de sobretensões em linhas de transmissão.

No capítulo 4 são abordados aspectos estatísticos das sobretensões de um caso

simples, visando comparar dois tipos de distribuições estatísticas (distribuição gaussiana e uniforme). Esta abordagem é necessária uma vez que as manobras de energização acontecem através de disjuntores, equipamentos que devido a características físicas talvez não fechem os três pólos simultaneamente para as três fases. Sendo assim, é necessário analisar uma amostra de manobras, ou seja, uma série de casos onde o tempo de fechamento dos pólos do disjuntor será dado por uma distribuição estatística.

2. SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS

Transitórios eletromagnéticos são distúrbios que apresentam curta duração e podendo exceder consideravelmente valores nominais do circuito. O estudo referente a transitórios eletromagnéticos é de extrema importância em sistemas elétricos, pois embora na grande parte do tempo operem em regime permanente, é necessário que sejam projetados para suportar situações piores, como é o caso de curto-circuito, abertura ou fechamento de circuitos, rejeição de carga, descargas atmosféricas, etc. Por isso, se deve conhecer a duração e amplitude das sobretensões causadas por esses fenômenos.

De acordo com a forma de onda e com o tempo de duração dos surtos transitórios, eles podem ser classificados em:

Sobretensões Temporárias:

As sobretensões temporárias acontecem entre fases ou entre fase e terra e tem como origem curtos-circuitos trifásicos, ressonâncias, Efeito Ferranti e rejeição de cargas. O tempo de duração é relativamente longo, superior a dezenas de milissegundos com amplitude inferior a 1,5 pu e fracamente amortecidas ou não amortecidas. Sendo assim, apesar desse tipo de sobretensão apresentar amplitudes menores que os outros tipos de sobretensões, elas podem ser determinantes no projeto tanto do isolamento interno dos equipamentos quanto do isolamento externo. A Figura 1 apresenta a forma de onda típica de sobretensões temporárias [4].

4



Figura 1 – Forma de onda típica de sobretensões temporárias [4]

Sobretensões de Manobra:

A ocorrência de sobretensões de manobra (SM) existe sempre que a topologia da rede sofre alteração. Essa alteração pode acontecer de forma programada, e.g. desligamento de cargas, ou de forma não programada, e.g. ocorrência ou eliminação de defeitos como curto-circuitos. Como consequências dessas manobras pode ocorrer uma elevação da tensão em regime permanente como também fenômenos transitórios em frequências mais altas.

A Figura 2 apresenta uma forma de onda típica de SM [7], onde o tempo de frente (tf), que é o intervalo de tempo em que a onda atinge valores entre 10% e 90% do valor de pico, varia de 100 a 500 µs. O tempo de cauda (tc), que é o intervalo de tempo em que a onda reduz-se até atingir 50% do valor máximo [8], varia de 2000 a 3000 µs. e as amplitudes são de até 3,5 ou 4,5 pu.



Figura 2 – Forma de onda típica de um transitório de manobra [7]

Sobretensões Atmosféricas:

São sobretensões fase-terra ou entre fases, em algum ponto do sistema, causado por descargas atmosféricas [4]. A incidência dessas descargas pode ocorrer sobre as linhas de transmissão tendo como consequência surtos de tensão. O efeito também pode acontecer por indução. A forma de onda das sobretensões atmosféricas, como mostra a Figura 3, pode ser aproximada por uma onda com um crescimento linear rápido (alguns µs), após atingir um valor máximo a onda decai mais lentamente (dezenas de µs). Como essas sobretensões dependem de descargas atmosféricas, a duração e o valor máximo dessas sobretensões são grandezas que não se podem determinar de forma precisa. Essas sobretensões podem provocar disrupção nos isolamentos de linhas de transmissão ou outros equipamentos e como consequência ocasionar perda de continuidade no atendimento aos consumidores.

6



Figura 3 – Forma de onda típica de sobretensões atmosféricas [4]

2.1. ENERGIZAÇÃO DE LINHAS

Após uma manobra, surgem ondas viajantes que proporcionam a elevação da tensão em vários pontos da linha de transmissão. Se durante a energização a linha estiver com seu terminal aberto, a elevação do nível de tensão irá dobrar de valor devido aos fenômenos de reflexão em descontinuidades [2].

Para entender melhor o efeito da energização em linhas de transmissão, serão apresentados as equações que governam o fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão. Apresenta-se, a seguir de forma sucinta, o equacionamento básico de uma linha de transmissão a partir das expressões de propagação de ondas planas. No apêndice 7.1 encontram-se de maneira mais detalhada essas equações.

A Figura 4 representa um elemento infinitesimal de uma LT representada por parâmetros distribuídos.



Figura 4 - circuito equivalente de um elemento infinitesimal de uma LT

Aplicando as leis de Kirchhoff temos:

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - G\Delta x v(x, t) - C\Delta x \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}$$
(2.1)

$$v(x + \Delta x, t) = v(x, t) - L\Delta x \frac{\partial i(x + \Delta x, t)}{\partial t} - R\Delta x i(x + \Delta x, t)$$
(2.2)

Dividindo as equações (2. 1) e (2. 2) por Δx e tomando-se o limite quando $\Delta x \rightarrow 0$, Obtemos:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = Ri(x,t) + L\frac{\partial i(x,t)}{\partial t}$$
(2.3)

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Gv(x,t) + C\frac{\partial v(x,t)}{\partial t}$$
(2.4)

Solucionando as equações (2. 3) e (2. 4) através do uso da transformada de Laplace e considerando as condições iniciais nulas obtém:

$$-\frac{dV}{dx} = (R+sL) * I(x,s)$$
(2.5)

$$-\frac{dI}{dx} = (G + sC) * V(x, s)$$
(2.6)

Derivando a equação (2. 5) em relação a x e substituindo a derivada da corrente da

equação (2. 6) resulta:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = (R + sL) * (G + sC) * V(x, s)$$
(2.7)

De forma análoga para corrente:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = (R + sL) * (G + sC) * I(x, s)$$
(2.8)

Fazendo-se $\gamma = \sqrt{(R + sL) * (G + sC)}$ obtém-se como solução:

$$V(x,s) = A(s)e^{-\gamma x} + B(s)e^{\gamma x}$$
 (2.9)

$$I(x,s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)}e^{-\gamma x} + \frac{B(s)}{Z_c(s)}e^{\gamma x}$$
(2.10)

As constantes A(s) e B(s) são determinadas a partir das condições de contorno no início e final da linha.

Que resulta:

$$V(x,\omega) = A(\omega)e^{-\gamma(\omega)x} + B(\omega)e^{\gamma(\omega)x}$$
(2.11)

$$I(x,\omega) = Y_c(\omega) * \left(A(\omega)e^{-\gamma(\omega)x} + B(\omega)e^{\gamma(\omega)x} \right)$$
(2. 12)

onde, $Y_c(\omega) = Z_c^{-1}(\omega) = \left(\sqrt{y(\omega)z(\omega)}^{-1}\right)y(\omega)$ é a admitância característica e $\gamma(\omega) = \sqrt{z(\omega)y(\omega)}$ é a constante de propagação.

3. METODOLOGIA DO ESTUDO

Este trabalho irá quantificar os níveis de sobretensões durante a energização de uma linha de transmissão. Contudo, inicialmente será apresentado um sistema simplificado em relação ao sistema real, representando nesse sistema simplificado apenas uma fonte de geração conectada com uma linha de transmissão e por sua vez, conectada à linha em estudo. Posteriormente será introduzido o sistema real.

Para iniciar o estudo deve-se escolher a LT que será utilizada para analisar as sobretensões durante a energização da mesma. Portanto, a linha escolhida foi a LT 230 kV Picos – Tauá com 180 km, que está localizada na região Nordeste do Brasil, como mostra a Figura 5.



Figura 5 - LT Picos – Tauá. Fonte: ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

Depois de escolher a linha para estudo, é necessário obter dados do sistema para fazer a modelagem. Esses dados podem ser adquiridos através da EPE (Empresa de pesquisa Energética), onde estão disponibilizados dados de fluxo, e do ONS (Operador *10*

Nacional do Sistema Elétrico) onde se obtém dados de curto-circuito.

Sendo assim, para modelagem do sistema, foram utilizados os dados de curtocircuito do banco de dados da EPE "sistema interligado nacional – plano decenal – ciclo 2011-2010" e os dados de fluxo de potência, o caso de referência do ONS "PAR 11-14 – 04/11/2010 – DEZ 11 – MAR 12 – MED", que apesar de se tratar de um caso de carga média, foi o que apresentou o menor fluxo de potência na linha em estudo. E nessas condições o nível de tensão estará maior do que nos casos de fluxo de potência maiores, sendo esta uma condição para obter maiores sobretensões nas manobras de energização.

De posse desses dados, utiliza-se o programa computacional ANAREDE e obtém-se informações como fluxo nas linhas, valores de cargas e bancos de reatores, tap dos transformadores, tensões nas barras e dados de sequência positiva. E utiliza-se o programa computacional ANAFAS e obtém-se informações como nível de curto nas barras, conexões dos transformadores, dados de sequência zero e modelos dos equivalentes.

Com as informações importadas dos programas ANAREDE e ANAFAS é utilizado a ferramenta computacional ATPDraw para fazer o modelo eletromagnético.

Para modelagem da LT 230 kV Picos – Tauá (ver apêndice 7.3), foi utilizado um modelo por parâmetros distribuídos, com o auxílio da rotina LCC do ATPDraw modelo de Bergeron. Embora o modelo de linha mais adequado para esse tipo de estudo seja o modelo JMarti (que representa a linha por parâmetros dependentes da frequência), é também mais complexo para utilizar-lo se comparado com o modelo de Bergeron. E a diferença nos resultados entre os dois modelos não é muito expressiva quando utilizado em manobras de energização de LTs, devido esse tipo de manobra não apresentar sobretensões muito elevadas. Se esse estudo fosse referente à sobretensões atmosféricas, por exemplo, seria necessário utilizar o modelo JMarti.

11

A configuração da torre adotada está representada pela Figura 6, que mostra a disposição dos cabos condutores das fases do tipo Grosbeak, e também a disposição dos cabos pára-raios do tipo 3/8" EHS. Foi considerada uma flecha de 14,6 metros para os condutores e uma flecha de 8,7 metros para os cabos pára-raios.

Todas as manobras de energização foram simuladas considerando as seguintes premissas:

- Terminal remoto da linha em aberto;
- Tempo de simulação 300 ms;
- Passo de integração 10 µs;
- Para as manobras estatísticas os disjuntores foram representados através de chaves estatísticas com distribuição normal ou uniforme, considerando o tempo de fechamento de 20 ms e o desvio padrão (σ) de 0,001375 s;
- Para as manobras determinísticas disjuntores representados através de chaves por tempo controlado;
- Linhas de transmissão representadas por parâmetros distribuídos invariantes na frequência;
- Transformadores considerando as características não lineares (saturação) e as perdas (ver apêndice 7.4);
- Equivalentes a um grau de vizinhança do sistema, representados por modelos R-L acoplados;



Figura 6 - Configuração da torre para a LT 230 kV Picos – Tauá

4. **RESULTADOS**

4.1. ESTUDO DE CASO SIMPLES

4.1.1. CASO SIMPLES SEM PERDAS NA LT

Inicialmente será simulada a manobra de energização desconsiderando as perdas ôhmicas da linha, considerando um sistema simplificado, composto por uma geração equivalente e LT 230 kV Picos – Tauá interconectados através de um disjuntor. O disjuntor é representado inicialmente por uma chave temporal, conforme apresentado na Figura 7:





determinísticas

No modelo do equivalente é considerado um elemento R-L acoplado com Zzero = $(2,0437 + j25,59)\Omega$ e Zpositiva = $(0,5174+j25,96)\Omega$, com uma potência de curto-circuito de 1959 MVA.

A primeira manobra de energização é feita considerando o tempo de fechamento de 10 ms para os três pólos do disjuntor, atingindo uma sobretensão de 435,9 kV (tensão faseterra, valor de pico), na fase c, aos 12 ms.



Figura 8 - Energização da linha sem perdas com tempo de fechamento de 10 ms

Contudo, na prática os disjuntores não fecham simultaneamente. Devido a este fato foi então simulado o mesmo caso, mas com o fechamento dos pólos do disjuntor em tempos variados, sendo 0,0100s para a fase A, 0,0167s para a fase B e 0,0233s para a fase C. O resultado obtido é apresentado na *Figura 9*, onde pode ser observado que a sobretensão atingiu o valor de 404,02 kV (tensão fase-terra, valor de pico), na fase A, aos 17 ms.





Ao comparar estes dois casos é verificada a influência que o tempo de fechamento dos disjuntores tem nos patamares alcançados pela sobretensão, sendo assim, a análise de sobretensões não pode ser concluída a partir de uma única manobra de energização e sim de um conjunto de manobras.

A utilização de ferramentas computacionais permite elaborar uma série de manobras obtendo uma grande quantidade de dados, os quais devem passar por um tratamento estatístico. Para poder entender melhor esta análise serão elaborados casos considerando dois tipos de distribuições estatísticas, sendo estas a distribuição uniforme e a distribuição gaussiana ou normal.

Sendo assim, foi montado o sistema mostrado na Figura 10, onde para realizar a energização da linha os disjuntores foram modelados por chaves estatísticas com as quais é possível realizar uma gama de energizações (escolhendo a distribuição estatística a ser utilizada para o fechamento da chave). Para uma melhor análise comparativa entre os métodos estatísticos, serão efetuados casos com amostras de 100, 200, 400 e 500 manobras utilizando as duas formas de distribuição. Cabe ressaltar que as energizações foram efetuadas com o terminal remoto da linha em aberto e desconsiderando as perdas na linha de transmissão.



Figura 10 - Modelo do sistema simplificado conectado com chaves estatísticas

Distribuição Gaussiana

A distribuição gaussiana ou normal é uma distribuição de probabilidades definida por uma função de dois parâmetros: média (μ) e desvio padrão (σ) [6]. Esta curva probabilística, *Figura 11*, pode ser representada através de uma curva em formato de sino de área igual a 1, ou seja, para cada trecho de área sob a curva existe uma probabilidade correspondente. Uma propriedade característica da distribuição normal é que 68% de todas as suas observações caem dentro de um intervalo de 1 desvio padrão da média, um intervalo de 2 desvios padrões inclui 95% dos valores, e 99% das observações caem dentro de um intervalo de 3 desvios padrões da média.



Figura 11 – Curva de distribuição gaussiana

A *Tabela 1* mostra os valores médios, máximos e desvios padrões das sobretensões no início e final da linha utilizando a distribuição gaussiana. Os dados foram obtidos dos relatórios gerados pela ferramenta computacional ATPDraw.

Tabela 1 – Resultados utilizando distribuição gaussiana

		início da linh	a	final da linha		
nº de	valor médio	desvio	valor máximo	valor médio	desvio	valor máximo
casos	(p.u.)	padrão	(p.u.)	(p.u.)	padrão	(p.u.)
100	1,4701	0,1171	1,6958	2,3685	0,3135	3,1864
200	1,4924	0,1185	1,7695	2,4097	0,2956	3,0429
400	1,4792	0,1157	1,8008	2,3912	0,2963	3,0802
500	1,4840	0,1131	1,8698	2,4291	0,2972	3,1282

ESTATÍSTICO COM DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA

Conforme a teoria da distribuição normal [6], à medida que é aumentado o tamanho da amostra a aproximação vai se tornando mais exata, tendo que para 500 manobras o valor médio obtido foi de 2,42 p.u. com desvio padrão de 0,2972 p.u. para o final da linha, ou seja 99 % dos valores estão entre 2,42 \pm 0,2972 p.u. Sendo ressaltado que os resultados obtidos para as diversas amostras não divergem muito entre si, ao redor de 2%.

Depois de obtidos os resultados, foi possível verificar os tempos de fechamentos das chaves onde ocorreram os piores casos e assim com a ferramenta ATPDraw utilizar chaves determinísticas e plotar as formas de onda desses casos. E utilizando a ferramenta ATP Launcher foi possível plotar a distribuição dos picos máximos de sobretensões para os diferentes casos.



Figura 12 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 100 energizações



Figura 14 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 100 energizações





Figura 15 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 100 energizações



Figura 16 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 100 energizações



Figura 18 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 100 energizações



Figura 17 - Probabilidade das sobretensões no final da linha para 100 energizações



Figura 19 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 100 energizações



Figura 20 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 200 energizações



Figura 22 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 200 energizações





Figura 23 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 200 energizações



Figura 24 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 200 energizações



Figura 26 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 200 energizações



Figura 25 - Probabilidade das sobretensões no final da linha para 200 energizações



Figura 27 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 200 energizações



Figura 28 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 400 energizações



Figura 30 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 400 energizações





Figura 31 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 400 energizações



Figura 32 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 400 energizações



Figura 34 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 400 energizações





Figura 35 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 400 energizações



Figura 36 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 500 energizações



Figura 38 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 500 energizações



Figura 37 - Probabilidade das sobretensões no início da linha para 500 energizações



Figura 39 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 500 energizações



Figura 40 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 500 energizações



Figura 42 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 500 energizações



Figura 41 - Probabilidade das sobretensões no final da linha para 500 energizações



Figura 43 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 500 energizações

> Distribuição Uniforme

A distribuição uniforme é aquela em que a probabilidade de se gerar qualquer ponto em um intervalo contido no espaço amostral é proporcional ao tamanho do intervalo. Sendo esta uma distribuição mais simples que a distribuição de gauss.

De modo semelhante, a Tabela 2 foi elaborada com os resultados obtidos utilizando distribuição uniforme.

Tabela 2 - Resultados utilizando distribuição uniforme

	início da linha			final da linha		
nº de	valor médio	desvio	valor máximo	valor médio	desvio	valor máximo
casos	(p.u.)	padrão	(p.u.)	(p.u.)	padrão	(p.u.)
100	1,4737	0,1199	1,7111	2,4030	0,3241	3,1798
200	1,4784	0,1200	1,7748	2,1927	0,2451	3,2014
400	1,5025	0,1194	1,7952	2,4235	0,2948	3,1719
500	1,4095	0,1083	1,7962	2,4107	0,3030	3,2746

ESTATÍSTICO COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME

Nestes casos é observado que o valor médio também esta em torno de 2,42 p.u., contudo apresenta uma maior variação quando modificado o tamanho da amostra, por volta de 2,5%.



Figura 44 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 100 energizações



Figura 46 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 100 energizações



Figura 45 - Probabilidade das sobretensões no início da linha para 100 energizações



Figura 47 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 100 energizações


Figura 48 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 100 energizações



Figura 50 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 100 energizações



Figura 49 - Probabilidade das sobretensões no final da linha para 100 energizações



Figura 51 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 100 energizações



Figura 52 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 200 energizações



Figura 54 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 200 energizações





Figura 55 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 200 energizações



Figura 56 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 200 energizações



Figura 58 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 200 energizações



Figura 59 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 200 energizações



Figura 60 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 400 energizações



Figura 62 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 400 energizações



Figura 61 - Probabilidade das sobretensões no início da linha para 400 energizações



Figura 63 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 400 energizações



Figura 64 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 400 energizações



Figura 66 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 400 energizações



Figura 65 - Probabilidade das sobretensões no final da linha para 400 energizações



Figura 67 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 400 energizações



Figura 68 - Distribuição dos máximos picos no início da linha para 500 energizações



Figura 70 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 500 energizações



Figura 69 - Probabilidade das sobretensões no início da linha para 500 energizações



Figura 71 - Pior caso de sobretensões no início da linha para 500 energizações



Figura 72 - Distribuição dos máximos picos no final da linha para 500 energizações



Figura 74 - Pior caso de sobretensões no final da linha para 500 energizações



15 19 23 27 (file SPERDA-DETER-UNIF-500.pl4; x-var t) v:FINA-A v:FINA-B v:FINA-C

Figura 75 - Pior caso de sobretensões no final da linha para

500 energizações

31

[ms] 35

-500 -

Comparando os resultados obtidos ao utilizar os dois tipos de distribuições estatísticas, são observadas poucas divergências entre os valores médios e desvios padrões, mostrando que qualquer um deles apresenta resultados satisfatórios para análises de sobretensões para energizações. São observadas variações nos valores máximos obtidos por ambos os métodos, contudo não é possível afirmar que existe uma quantidade exata de amostras para obter melhores resultados, pois como pode ser observado, os valores máximos de sobretensões indicam uma divergência menor que 5%. De maneira geral, a distribuição normal é mais utilizada já que esta ocorre naturalmente em muitas, senão todas as medidas de situações físicas, biológicas e sociais.

4.1.2. CASO SIMPLES COM PERDAS NA LT

Neste momento será feito a energização da LT indicado na *Figura 10*. Serão consideradas as perdas ôhmicas e será utilizada a distribuição gaussiana com 400 amostras. O resultado está indicado na *Tabela 3*

Tabela 3 – Resultado da energização da LT considerando as perdas ôhmicas

	início da linha			final da linha		
nº de	valor médio	desvio	valor máximo	valor médio	desvio	valor máximo
casos	(p.u.)	padrão	(p.u.)	(p.u.)	padrão	(p.u.)
400	1,1701	0,0604	1,2941	1,2491	0,1014	1.5153

ESTATÍSTICO COM DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA

É possível comparar os dados da *Tabela 3* com os da *Tabela 1* para a energização com 400 amostras e verificar que considerar as perdas ôhmicas da LT varia os valores da sobretensão. Como exemplo, verifica-se que o valor máximo de sobretensão no final da LT, quando são consideradas as perdas ôhmicas, decai de 50,81% em relação ao valor máximo de sobretensão quando não são consideradas as perdas ôhmicas.

Conclui-se que as perdas ôhmicas em uma linha de transmissão atuam como

limitadoras naturais de sobretensão achatando os picos de tensão.

4.2. ESTUDO DE CASO REAL

No item 4.1 é mostrada a importância de uma análise estatística para o estudo de energização. Neste item será feita a análise da manobra de energização em um sistema real. Esta análise tem por objetivo introduzir algumas outras variáveis que irão influenciar as energizações.

O sistema escolhido para as análises é mostrado na Figura 76, onde a linha destacada em vermelho (LT 230 kV Picos – Tauá) será a linha na qual serão feitas as manobras de energização e os elementos em azul representam os equivalentes de referência e equivalentes de transferência gerados com o auxílio da ferramenta computacional ANAFAS, para representar o comportamento eletromagnético do restante do sistema. Neste sentido foram utilizados equivalentes de fronteira nas barras de São João do Piauí e Milagres, ambas em 230 kV.



Figura 76 – Sistema modelado

Este sistema representa uma região existente do sistema elétrico brasileiro, o qual foi

formado com as informações obtidas a partir do site da Empresa de Pesquisa Energética – EPE e do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

Como pode ser observado na Figura 76, o sistema a ser modelado contém apenas um grau de vizinhança a partir da linha em análise, quando o ideal seria considerar dois ou três graus de vizinhança, porém esta consideração para esse sistema aumentaria de maneira significativa a complexidade do modelo a ser estudado, devido as barras com um grau de vizinhança estarem conectadas com outras dezenas de barras. E essa complexidade fugiria do foco deste trabalho.

4.2.1. VERIFICAÇÃO DO MODELO

Os dados de fluxo e curto-circuito serviram tanto para a elaboração da modelagem do sistema elétrico, quanto para a verificação do circuito no ATPDraw. A verificação foi elaborada fazendo uma comparação dos patamares de tensão e ângulo do caso base de fluxo de potência com os patamares obtidos no modelo eletromagnético, descritos em detalhe na Tabela 4. Essa verificação é necessária para ter a certeza de que os dados do sistema modelado no ATPDraw estão coerentes com os dados reais do sistema, uma vez que tamanha a quantidade de informações necessárias para obter o modelo eletromagnético, erros de inclusão de dados poderiam acarretar um modelo que não representasse de maneira correta o sistema real.

Tensão nas barras					
Porro	Ana	irede	ATP		
Dalla	pu	Graus	pu	Graus	
São João do Piauí 230	1,014	-5,4	1,015	-4,6	
Picos 230	0,976	-14,1	0,979	-10,6	
Tauá 230	0,999	-17,2	1,010	-21,0	
Milagres 230	0,998	-15,7	0,999	-15,9	
Tauá 69	1,001	-48,7	1,009	-52,5	
Picos 69	0,954	-47,2	0,937	-44,8	

Tabela 4 – Verificação dos Patamares de tensão

Na Tabela 4 é visto que as diferenças entre os patamares de tensão fornecidos na base de dados do ONS e os patamares de tensão obtidos no modelo são muito próximas, tendo uma diferença percentual máxima de 1,67 % nos módulos de tensão e uma diferença de 3,83 º nos ângulos.

Posteriormente também foram analisados os níveis de curto-circuito monofásico e trifásico nas barras do sistema modelado, conforme descrito na Tabela 5:

Níveis de Curto-Circuito (kA)					
Dorro	Trifási	со	Monofásico		
Dalla	ANAFAS	ATP	ANAFAS	ATP	
São João do Piauí 230	5,18	5,26	5,20	5,74	
Picos 230	1,82	1,51	2,10	1,91	
Tauá 230	1,78	1,37	2,42	1,81	
Milagres 230	16,80	16,85	16,55	16,60	
Tauá 69	3,32	3,37	1,12	0,94	
Picos 69	3,06	3,11	1,36	1,43	

Tabela 5 - Validação dos níveis de curto-circuito

Nesta tabela comparativa podem ser observadas algumas diferenças entre os níveis de tensão obtidos com o banco de dados da EPE e os conseguidos no modelo eletromagnético, porém deve ser ressaltado que o modelo utilizado para a linha de transmissão não têm os mesmos parâmetros que o considerado no caso base da EPE, isto porque os parâmetros do modelo foram constituídos com a utilização de uma torre típica e um cabo típico, sendo este diferente do considerado na LT 230 kV Picos – Tauá real. Esta diferença era esperada uma vez que não existem informações que detalhem a configuração da linha de transmissão em estudo, tendo que ser assim utilizado uma configuração típica. Todavia deve ser observado que para os fins deste trabalho não é necessário reproduzir com fidelidade o sistema real e sim nos aproximar a ele, de maneira a representar algumas características, como a saturação dos transformadores e as reflexões e refrações das ondas trafegantes no sistema.

4.2.2. ENERGIZAÇÃO DA LT 230 kV PICOS - TAUÁ

As manobras de energização foram simuladas em dois tempos, primeiramente através de casos estatísticos (utilizando uma distribuição gaussiana) de maneira a identificar o pior caso numa sequência de manobras e, posteriormente, um caso determinístico que descreve as sobretensões obtidas nesta pior situação.

Em todos os casos foram feitas medições de tensão no inicio no meio e no final da Linha de transmissão.

O modelo utilizado nos estudos de transitórios eletromagnéticos é mostrado na Figura 77:



Figura 77 - Sistema modelado no ATPDraw para o caso real

A Tabela 6 mostra as sobretensões obtidas no caso estatístico:

	Terminal de Picos		½ da linha		Terminal de Tauá					
N⁰										
de	Vpré	Vméd	σ	Vmáx	Vméd	σ	Vmáx	Vméd	σ	Vmáx
casos	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)	(pu)
200	1,05	1,282	0,0745	1,461	1,42	0,1532	1,786	1,552	0,1841	1,979

Tabela 6 - Resultados obtidos com manobras de energização

Nesta simulação pode ser observado que a máxima sobretensão atingiu o patamar de 1,979 pu nas sobretensões, valor este abaixo do valor de 2,2 pu (valor típico para sobretensão máxima para este tipo de manobras).

A Figura 78, Figura 79 e Figura 80, mostram as sobretensões no início, meio e fim da LT, obtidas para o pior caso das energizações.



Figura 78 - Sobretensão no Inicio da LT



Figura 79 - Sobretensão no meio da LT



Figura 80 - Sobretensão no fim da LT

Nestes gráficos pode ser observado que a manobra de energização tem um comportamento transitório rápido, que neste caso aparece nos primeiros 40 ms, onde pode ser observadas as maiores sobretensões (as sobretensões podem ser identificadas nas figuras através da comparação com o valor de referência indicado em marrom nos gráficos, que indica o valor eficaz nominal de tensão da LT). Nestes gráficos também é visto que o fechamento das fases, que não é sincronizada (ou seja, os três pólos não fecham ao mesmo tempo) afeta no patamar das sobretensões nas outras fases.

Nesta simulação também pode ser observada a deformação na forma de onda no momento da energização. Estas deformações acontecem devido às diversas reflexões e

refrações que acontecem ao efetuar esta manobra, causando assim uma sobreposição de ondas que por consequência irá formar a onda de tensão transitória plotada nos gráficos.

Pode ainda se observar as formas de onda das sobretensões devido à manobra de energização em um sistema complexo mais próximo de um sistema real. Claro que para um estudo de energização o modelo do sistema tende a ser bem mais complexo e também são considerados valores máximos de valor de tensão pré-manobra e abordados casos considerando contingências no sistema (condições N e N-1) o que pode ocasionar maiores sobretensões do que as obtidas neste trabalho.

Deve-se destacar que estudar o sistema com a presença de pára-raios é necessário para obter melhores resultados. E em casos mais severos de sobretensão de energização, podem ser necessários alguns equipamentos que limitem estas sobretensões tais como resistores de pré-inserção e sincronizadores de fechamento, e nestes casos, também devem ser simulados a atuação destes nas manobras.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram abordados aspectos referentes à modelagem de sistemas para estudos de transitórios eletromagnéticos, especificamente para manobras de energização de linhas de transmissão. Foi observado que as perdas ôhmicas numa linha de transmissão atuam como limitadoras naturais de sobretensão achatando os picos de tensão (verificação feita ao comparar os patamares de sobretensão obtidas no item 4.1.1, caso simples sem perdas, e no item 4.1.2, caso simples que considera as perdas). Também foi mostrada a importância das análises estatísticas em fenômenos de chaveamento, onde é necessário obter uma amostra de manobras para obter valores de sobretensões que sirvam de referência.

Devido ao grau de complexidade dos sistemas elétricos, a elaboração de modelos para análises de alguns fenômenos elétricos é complexa e deve ser feita com muita cautela, visando sempre reproduzir as características elétricas que tenham influência no fenômeno analisado. Neste trabalho foi possível mostrar a correta modelagem dos equipamentos para estudos transitórios eletromagnéticos. Neste sentido, para as manobras de energização, devem ser levados em conta não linearidades, níveis de curto-circuito, condições prémanobra entre outras variáveis, que irão afetar os resultados obtidos para as sobretensões de energização.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

.

 [1] C. Fonseca, D'Ajuz, A. e outros – "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão

[2] Araújo, A. E. A.; Neves, W. L. A. – Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia. 1^a edição, Editora UFMG, 2005.

[3] Nunes, R. R. – Coordenação de Isolamento para Transitórios de Manobra Considerando a Forma de Onda das Sobretensões. Dissertação de mestrado – UFMG, Belo Horizonte, 2006.

[4] Pereira, R. C. – Sistema de Monitoramento de Descargas Atmosféricas
 Implantado no Centro de Controle da Coelce. Monografia de graduação – UFC, Fortaleza,
 2010.

[5] Cogo, J. R.; de Oliveira, A. R. C. – Aplicação do Método de Integração Trapezoidal em Sistemas Elétricos. Seminário de Pesquisa EFEI, 1983.

[6] Freund, J. E. – Estatística Aplicada. 11ª edição, Editora Bookman, 2004.

[7] Haffner, S. – Introdução aos Transitórios Eletromagnéticos, 2007.

[8] Zanetta Jr, L.C. – Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

7. APÊNDICE

7.1. EQUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO PARA LINHAS MONOFÁSICAS

Considerando um condutor a certa altura sobre um solo ideal (resistividade nula) podemos deduzir as equações básicas do fenômeno de propagação em linhas de transmissão. A Figura 81 mostra o campo eletromagnético de um determinado ponto e instante da linha de transmissão, onde o condutor está conduzindo uma corrente i e também está submetido a uma tensão v, supondo solo ideal.



Figura 81 – Campo eletromagnético de uma linha monofásica / solo ideal

Como o arranjo em questão utiliza um solo ideal, podemos substituir o solo ideal por um condutor imagem abaixo do solo e com profundidade igual à altura do condutor real. Sendo assim, o novo arranjo equivale a dois condutores paralelos como mostra a Figura 82.



Figura 82 – Campo eletromagnético de uma linha monofásica / condutor imagem

Esse problema pode ser resolvido pela teoria de circuitos [2] desde que algumas hipóteses para simplificar sejam utilizas. A primeira hipótese seria considerar que a distância entre os condutores é pequena em relação ao campo da onda propagante. A segunda hipótese é considerar que a corrente nos condutores não é constante ao logo da linha e considerar a linha como um elemento com parâmetros distribuídos (resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento). Isso porque não é possível determinar regiões no espaço que envolve a linha de transmissão onde exista somente campo magnético ou somente campo elétrico, sendo assim, não se pode falar em resistência, indutância e

capacitância concentradas em determinados pontos.

A seguir observa-se a Figura 83 que representa um elemento diferencial de uma linha monofásica representado por dois condutores.



Figura 83 – Elemento diferencial de uma linha monofásica

Seja *c* a capacitância por unidade de comprimento (F/m); *l* a indutância por unidade de comprimento (H/m); *r* a resistência por unidade de comprimento (Ω /m); e *g* a condutância por unidade de comprimento (S/m).

Aplicando a Lei de Indução de Faraday ao caminho pontilhado da Figura 83 tem-se:

$$\oint_{L} \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{dl} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{S} \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{dS} \,. \tag{6.1}$$

A integral de linha do campo elétrico da equação (6. 1) é igual à queda resistiva e, portanto, a equação (6. 1) pode ser escrita como:

$$\oint_{L} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = i \cdot \frac{r}{2} dx + v(x,t) + \frac{\partial v}{\partial x} dx + i \cdot \frac{r}{2} dx - v(x,t)$$
(6.2)

$$= -\frac{\partial}{\partial t} \int_{S} \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{dS} = -\frac{\partial \phi}{\partial t}.$$
(6.3)

O fluxo magnético que atravessa a área ABCD é proporcional à corrente, e pode ser descrito por:

$$\phi = l \cdot dx \cdot i \tag{6.4}$$

No cálculo do campo magnético é suposto que a corrente é constante ao longo do comprimento *dx*, por isso a equação (6. 4) é aproximada. Essa aproximação é válida se a distância entre o condutor e solo ou entre os condutores for pequena em relação ao comprimento da onda viajante. A partir das equações (6. 2), (6. 3) e (6. 4), pode-se escrever:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = r \cdot i(x,t) + l \frac{\partial i}{\partial x}$$
(6.5)

A equação (6. 5) mostra que a variação da tensão ao longo da linha se deve a queda de tensão da sua resistência mais a da sua indutância.

A partir da Figura 84 é possível examinar a variação da corrente ao longo da linha.



Figura 84 – Equação de continuidade da corrente

A equação de continuidade expressa a conservação da carga para o volume limitado pela linha pontilhada na Figura 84. A corrente que entra é *i*(*x*,*t*), e a que sai é *i*(*x*,*t*) + $\frac{\partial i}{\partial x}$ *dx*. Parte da diferença entre a corrente que entra e a que sai se deve a corrente que sai pelo lado do cilindro em direção ao outro condutor. E que é proporcional à tensão e é igual a $v(x,t) \cdot g \cdot dx.$

A outra parte da diferença se deve às cargas que desaparecerão da seção *dx* do condutor ou que se acumularão na seção *dx* do condutor. A taxa de variação da carga em *dx* pode ser escrita por:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} [c \cdot dx \cdot v(x, t)] = c \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$
(6.6)

Então a equação de continuidade fornece:

$$i(x,t) + \frac{\partial i}{\partial t}dx + v(x,t) \cdot g \cdot dx - i(x,t) = -c \cdot dx \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$
(6.7)

Portanto,

$$-\frac{\partial i}{\partial t} = g \cdot v(x,t) + c \frac{\partial v}{\partial t}$$
(6.8)

A equação (6. 8) mostra que a variação da corrente ao longo da linha se deve à fuga de cargas para o outro condutor e, também, ao seu acumulo na superfície deste condutor.

Deste modo, as equações que governam a propagação de ondas eletromagnéticas em linhas monofásicas são:

$$-\frac{\partial v}{\partial x} = r \cdot i(x,t) + l \frac{\partial i}{\partial x} \qquad e \qquad -\frac{\partial i}{\partial t} = g \cdot v(x,t) + c \frac{\partial v}{\partial t} \qquad (6.9)$$

> Uso da Transformada de Laplace:

A Transformada de Laplace é uma ferramenta matemática útil para resolver equações diferenciais como no caso das equações (6. 9). Por tanto, faz-se

$$\int_0^\infty \frac{\partial v}{\partial x} \cdot e^{-st} dt = \frac{d}{dx} \int_0^\infty v(x,t) \cdot e^{-st} dt$$

$$\int_0^\infty \frac{\partial v}{\partial t} \cdot e^{-st} dt = sV(x,t) - v(x,0)$$

onde as letras maiúsculas indicam as Transformadas de Laplace das funções das letras em minúsculas. As relações são válidas tanto para tensão quanto para corrente. Como nessas condições *s* é apenas um parâmetro, as derivadas parciais em *x* foram substituídas por derivadas totais. Para condições iniciais nulas tem-se:

$$-\frac{dV}{dx} = (r+sl) \cdot I(x,s)$$

$$-\frac{dI}{dt} = (a+sc) \cdot V(x,s)$$
(6.10)

$$-\frac{dx}{dx} = (y + sc) \cdot v(x, s)$$
(6. 11)

A partir da equação (6. 10) deriva-se em relação a *x* e substitui-se a derivada da corrente descrita na equação (6. 11). De forma análoga faz-se para equação da corrente. Então:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = (r+sl)(g+sc) \cdot V(x,s); \\ \frac{d^2I}{dx^2} = (r+sl)(g+sc) \cdot I(x,s)$$
(6.12)

Fazendo-se $\gamma = \sqrt{(r+sl)(g+sc)}$ e resolvendo a equação da tensão, tem-se

$$V(x,s) = A(s)e^{-\gamma x} + B(s)e^{\gamma x}$$
(6. 13)

A partir da equação (6. 10) e com a solução da tensão, calcula-se a solução para corrente.

$$I(x,s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)}e^{-\gamma x} - \frac{B(s)}{Z_c(s)}e^{\gamma x}$$
(6. 14)

onde,
$$Z_c(s) = \sqrt{\frac{(r+sl)}{(g+sc)}}$$

As constantes A(s) e B(s) são determinadas a partir das condições de contorno no início e final da linha.

Os casos em que a linha não tenha perdas e nem distorção, $Z_{C}(s)$ transforma-se em

uma constante real pura.

Para linhas sem perdas, r = g = 0 e portanto, $\gamma = s\sqrt{lc}$ e $Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}}$, pode-se *então* escrever:

$$V(x,s) = A(s)e^{-\frac{sx}{\nu}} + B(s)e^{\frac{sx}{\nu}}, \quad I(x,s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)}e^{-\frac{sx}{\nu}} - \frac{B(s)}{Z_c(s)}e^{\frac{sx}{\nu}}$$
(6.15)

onde, $\nu = 1/\sqrt{lc}$.

Para linhas sem distorção,

$$\gamma(s) = \sqrt{(r+sl)(g+sc)} = \sqrt{lc} \cdot \sqrt{(s+\delta)^2 - \sigma^2} = \frac{\sqrt{(s+\delta)^2 - \sigma^2}}{\nu}$$

е

$$Z_c(s) = \sqrt{\frac{l}{c}} \cdot \sqrt{\frac{s+\delta+\sigma}{s+\delta-\sigma}}$$
,

em que

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} + \frac{g}{c} \right) \text{ é o fator de atenuação e}$$
$$\sigma = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} - \frac{g}{c} \right) \text{ é o fator de distorção.}$$

Uma linha sem distorção ocorre para $\sigma = 0$. Deste modo, $\gamma(s) = \frac{s+\delta}{v}$ e $Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}}$.

As equações (6. 13) e (6. 14) são então escritas como:

$$V(x,s) = A(s)e^{-\frac{\delta x}{\nu}} \cdot e^{-\frac{sx}{\nu}} + B(s)e^{\frac{\delta x}{\nu}} \cdot e^{\frac{sx}{\nu}}$$

е

$$I(x,s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)}e^{-\frac{\delta x}{\nu}} \cdot e^{-\frac{sx}{\nu}} - \frac{B(s)}{Z_c(s)}e^{\frac{\delta x}{\nu}} \cdot e^{\frac{sx}{\nu}}$$

7.1.1. REFLEXÕES

Reflexões em descontinuidades:

Para linhas monofásicas sem perdas, vale a solução geral em qualquer ponto da linha:

$$V(x,s) = A(s)e^{-\frac{sx}{\nu}} + B(s)e^{\frac{sx}{\nu}} = V_p(x,s) + V_r(x,s) e$$
$$I(x,s) = \frac{A(s)}{Z_c(s)}e^{-\frac{sx}{\nu}} - \frac{B(s)}{Z_c(s)}e^{\frac{sx}{\nu}} = I_p(x,s) + I_r(x,s) .$$

Onde, $V_p(x,s)$ e $I_p(x,s)$ são ondas se propagando na direção do crescimento de x – ondas progressivas. E $V_r(x,s)$ e $I_r(x,s)$ são ondas se propagando na direção negativa de x – ondas regressivas.

Uma característica das ondas de corrente é que uma corrente se movendo da direção positiva de *x* é aquela que produz uma deflexão positiva no amperímetro da Figura 85. De maneira análoga uma corrente se movendo da direção negativa de *x* é aquela que produz uma deflexão negativa no amperímetro.



Figura 85 – Interpretação dos sinais da equação de onda de corrente

Outra característica importante das ondas de corrente e tensão é que ondas se propagando em sentido contrário se somam no ponto de encontro e depois continuam viajando independentes, respeitando assim, o princípio da superposição.

Comportamento das Ondas em Descontinuidades:

As descontinuidades em linhas de transmissão são definidas como mudanças bruscas da relação entre tensão e corrente em um determinado ponto da linha de transmissão. Como exemplo dessas descontinuidades tem-se junções de linhas diferentes, terminais abertos e curto-circuito.

A Figura *86* mostra uma onda progressiva de tensão $V_p(x, s)$ acompanhada por uma onda progressiva de corrente $I_p(x, s)$, incidindo em uma impedância concentrada Z(s) que representa uma descontinuidade localizada em x = 0. A razão entre tensão e corrente no ponto x = 0 é:



Figura 86 – Descontinuidade: impedância concentrada Z(s)

Inicialmente, tem-se:

$$V_p(x,s) = A_1(s) \cdot e^{-\frac{sx}{v}}$$
 $e \quad I_p(x,s) = \frac{A_1(s)}{Z_c} e^{-\frac{sx}{v}}$

O par de ondas regressivas na descontinuidade é:

$$V_r(x,s) = A_2(s) \cdot e^{\frac{sx}{\nu}} \qquad e \quad I_r(x,s) = -\frac{A_2(s)}{Z_c} e^{\frac{sx}{\nu}}$$

Em x = 0, ponto da descontinuidade, tem-se:

$$V_p(0,s) = A_1(s),$$
 $I_p(0,s) = \frac{A_1(s)}{Z_c},$ $V_r(0,s) = A_2(s)$ e $I_r(0,s) = -\frac{A_2(s)}{Z_c}$

Encontra-se a tensão $V_0(s)$ e a corrente $I_0(s)$ na descontinuidade usando a propriedade da superposição.

$$V_0(s) = V_p(0,s) + V_r(0,s) = A_1(s) + A_2(s)$$
$$I_0(s) = I_p(0,s) + I_r(0,s) = \frac{A_1(s) - A_2(s)}{Z_c}$$

Tem-se também que $V_0(s) = Z(s) \cdot I_0(s)$. Pode então deduzir que:

$$A_{2}(s) = \frac{Z(s) - Z_{c}}{Z(s) + Z_{c}} \cdot A_{1}(s) = G(S) \cdot A_{1}(s)$$

$$A_1(s) + A_2(s) = 2 \cdot \frac{Z(s)}{Z(s) + Z_c} \cdot A_1(s) = H(s) \cdot A_1(s)$$

ou seja,

$$V_0(s) = H(s) \cdot A_1(s) ,$$

$$I_0(s) = \frac{2 \cdot Z_c}{Z(s) + Z_c} \cdot \frac{A_1(s)}{Z_c} = K(s) \cdot \frac{A_1(s)}{Z_c} ,$$

$$V_r(x,s) = A_2(s) \cdot e^{\frac{sx}{v}} = G(S) \cdot A_1(s) \cdot e^{\frac{sx}{v}} \qquad e$$

$$I_r(x,s) = -\frac{A_2(s)}{Z_c} e^{\frac{sx}{v}} = -\frac{G(s)}{Z_c} \cdot A_1(s) \cdot e^{\frac{sx}{v}}$$

G(s) e H(S) são chamados de coeficiente de reflexão e coeficiente de refração da tensão, respectivamente. Analogamente para a corrente, – G(s) e K(s) são chamados de coeficiente de reflexão e coeficiente de refração da corrente, respectivamente.

A Tabela 7 mostra de forma mais clara esses coeficientes.

	Coeficiente de reflexão	Coeficiente de refração
Tensão	$\frac{Z(s) - Z_c}{Z(s) + Z_c}$	$\frac{2 \cdot Z(s)}{Z(s) + Z_c}$
Corrente	$-\frac{Z(s)-Z_c}{Z(s)+Z_c}$	$\frac{2 \cdot Z_c}{Z(s) + Z_c}$

Tabela 7 - Coeficientes de reflexão e refração

> Terminação resistiva:

Para análise de terminação resistiva, *Tabela 7* pode ser modificada de tal forma que Z(s) = R.

Tabela 8 - Coeficientes de reflexão e refração para terminação resistiva

	Coeficiente de reflexão	Coeficiente de refração
Tensão	$\frac{R - Z_c}{R + Z_c}$	$\frac{2 \cdot R}{R + Z_c}$
Corrente	$-\frac{R-Z_c}{R+Z_c}$	$\frac{2 \cdot Z_c}{R + Z_c}$

No caso de linhas sem perdas, Z_c é um número real, resultando em coeficientes de reflexão e refração também reais. Desta forma não existe deformação da onda incidente quando ela é refletida ou refratada nessa terminação.

Para o caso de circuito aberto ($R \rightarrow \infty$), *Tabela 8* pode ser escrita da seguinte maneira:

	Coeficiente de reflexão	Coeficiente de refração
Tensão	1	2
Corrente	-1	0

Tabela 9 - Coeficientes de reflexão e refração para circuito aberto

Nesse caso, o coeficiente de reflexão igual a 1 indica que $V_r(0,s) = V_p(0,s)$. E de forma coerente, o coeficiente de refração é igual a 2, pois $V_0(s) = V_p(0,s) + V_r(0,s) = 2 V_p(0,s)$. Concluindo que a tensão na terminação em aberto é o dobro da tensão incidente na descontinuidade.

E para o caso de curto-circuito (*R=0*), *Tabela 8* pode ser escrita como:

	Coeficiente de reflexão	Coeficiente de refração
Tensão	-1	0
Corrente	1	2

Tabela 10 - Coeficientes de reflexão e refração para terminal em curto-circuito

Concluindo que nesse caso (curto-circuito), quem dobra de valor após a incidência é a corrente refratada.

Verifica-se para esses dois casos extremos ($R \rightarrow \infty e R = 0$), que o valor da tensão ou corrente dobra após a incidência. Esse fenômeno somente acontece em circuitos com parâmetros distribuídos. Considerando a energia eletromagnética que se propaga na linha, é possível entender esse fenômeno. Sabendo-se que a energia se divide igualmente entre energia elétrica ($\frac{1}{2}ce^2$) e energia magnética ($\frac{1}{2}li^2$) durante sua propagação e que, quando encontra uma descontinuidade, parte é refletida e parte é absorvida, conserva-se a energia total. No caso de curto-circuito, a energia elétrica que desapareceria no momento da incidência ($V_0(s) = 0$), transforma-se em energia magnética. Considere que I_1 seja a corrente incidente no curto-circuito, I_2 a corrente refletida e I_3 a corrente refratada. Sendo assim, a energia eletromagnética que viaja em direção ao curto é:

$$w_{total}^{antes} = w_{elet} + w_{mag} = 2w_{mag} = li^2$$

A energia total depois da incidência somente será magnética:

$$w_{total}^{depois} = \frac{1}{2}l \cdot {I_1}^2 + \frac{1}{2}l \cdot {I_2}^2$$

A energia antes e depois tem que ser iguais:

$$w_{total}^{antes} = w_{total}^{depois} \Rightarrow I_1 = I_2$$

Como a corrente refratada é a soma da corrente incidente com a refletida ($I_3 = I_1 + I_2$), então, $I_3 = 2 I_1$.

Fazendo uma análise semelhante para o caso de circuito aberto é possível chegar à conclusão de que $V_3 = 2 V_1$.



Figura 87 – Efeito da carga resistiva nos terminais da linha

A Figura 87 mostra o comportamento da onda de tensão após trafegar em uma linha de transmissão em direção a diferentes tipos de terminações. A Figura 87-a mostra que a tensão no terminal aberto é o dobro da tensão incidente. A Figura 87-b mostra que a tensão no terminal é a mesma da tensão incidente devido ao fato de a resistência do terminal ser igual a impedância de surto (R = Z). A Figura 87-c mostra que a tensão refletida é igual e tem sinal contrário ao da onda incidente quando o terminal está em curto-circuito. E a Figura 87-d mostra como a tensão se comporta com a terminação constituída por um centelhador, primeiramente se comporta como no caso de terminal aberto, e após atingir a

tensão de ruptura se comporta como no caso de curto-circuito.

> Terminação indutiva



Figura 88 – Linha semi-infinita: terminação indutiva

No caso de terminação indutiva, será visto que as ondas refletidas e refratadas terão deformações, pois agora os coeficientes de reflexão e refração são dependentes da frequência, como mostra o quadro abaixo.

	Coeficiente de reflexão	Coeficiente de refração
Tensão	$\frac{sL - Z_c}{sL + Z_c}$	$\frac{2 \cdot sL}{sL + Z_c}$
Corrente	$-\frac{sL-Z_c}{sL+Z_c}$	$\frac{2 \cdot Z_c}{sL + Z_c}$

Tabela 11 - Coeficientes de reflexão e refração para terminação indutiva

A Figura 88 mostra uma terminação indutiva. Supondo um degrau unitário ($V_r(x,s) = \frac{1}{s} \cdot e^{-\frac{sx}{v}}$; $I_r(x,s) = \frac{1}{z_c} \cdot \frac{1}{s} \cdot e^{-\frac{sx}{v}}$) incidindo em t = 0, as ondas refletidas podem ser escritas por:

$$V_r(x,s) = \left[\frac{sL - Z_c}{sL + Z_c}\right] \cdot \frac{1}{s} \cdot e^{\frac{sx}{v}}$$

$$I_r(x,s) = -\left[\frac{sL - Z_c}{sL + Z_c}\right] \cdot \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{1}{s} \cdot e^{\frac{sx}{v}}$$

A tensão refletida pode ser escrita na forma:

$$V_r(x,s) = \left[\frac{2}{s + \frac{Z_c}{L}} - \frac{1}{s}\right] \cdot e^{\frac{sx}{v}}$$

E que no domínio do tempo fica:

$$V_r(x,t) = 2 \cdot e^{-\frac{Z_c}{L}\left(t + \frac{x}{\nu}\right)} \cdot u\left(t + \frac{x}{\nu}\right) - u\left(t + \frac{x}{\nu}\right)$$

A linha está localizada no intervalo (- ∞ ,0), sendo assim, a tensão refletida em um ponto qualquer da linha (x = - X, com X > 0) é:

$$V_r(-X,t) = 2 \cdot e^{-\frac{Z_c}{L} \left(t - \frac{X}{\nu}\right)} \cdot u\left(t - \frac{X}{\nu}\right) - u\left(t - \frac{X}{\nu}\right)$$

Essa expressão está mostrada na Figura 89-a.



Figura 89 – Terminação indutiva

Para conhecer o comportamento da tensão sobre indutores, basta fazer:

$$V_0(s) = V_p(0,s) + V_r(0,s) = \frac{1}{s} + \frac{2}{s + \frac{Z_c}{L}} - \frac{1}{s} = \frac{2}{s + \frac{Z_c}{L}}$$

Ou seja,

$$V_0(t) = 2 \cdot e^{-\frac{Z_c}{L} \cdot t} \cdot u(t)$$

Essa expressão mostra que inicialmente o indutor se comporta como um circuito aberto $[V_0(0) = 2u(t)]$ e depois como um curto-circuito para t $\rightarrow \infty$ $[V_0(t \rightarrow \infty) = 0]$, como mostra a Figura 89-b.

> Terminação capacitiva

De forma análoga ao indutor, pode-se analisar o comportamento de ondas incidentes em uma terminação capacitiva. O quadro abaixo mostra os coeficientes de reflexão e refração para capacitor.

	Coeficiente de reflexão	Coeficiente de refração
Tensão	$\frac{\frac{1}{sC} - Z_c}{\frac{1}{sC} + Z_c}$	$\frac{2 \cdot \frac{1}{sC}}{\frac{1}{sC} + Z_c}$
Corrente	$-\frac{\frac{1}{sC} - Z_c}{\frac{1}{sC} + Z_c}$	$\frac{\frac{2 \cdot Z_c}{\frac{1}{sC} + Z_c}}{\frac{1}{sC} + Z_c}$

Tabela 12 - Coeficientes de reflexão e refração para terminação capacitiva

A tensão refletida para uma onda incidente na forma de um degrau unitário é:

$$V_r(x,s) = \frac{\frac{1}{sC} - Z_c}{\frac{1}{sC} + Z_c} \cdot \frac{1}{s} \cdot e^{\frac{sx}{v}} = \left[\frac{1}{s} - \frac{2}{2 + \frac{1}{CZ_c}}\right] \cdot e^{\frac{sx}{v}}$$

No domínio do tempo fica:

$$V_r(x,t) = u\left(t + \frac{x}{\nu}\right) - 2e^{-\frac{1}{CZ_c}\left(t + \frac{x}{\nu}\right)} \cdot u\left(t + \frac{x}{\nu}\right)$$

Uma análise semelhante à anterior é mostrada na Figura 90. Pode-se observar que inicialmente o capacitor se comporta como um curto-circuito, e depois como um circuito aberto.



Figura 90 – Terminação capacitiva

7.2. MÉTODO NUMÉRICO DE CÁLCULO INTEGRAÇÃO TRAPEZOIDAL

O cálculo computacional de transitório eletromagnéticos no domínio do tempo tem como pressuposto a discretização das equações diferenciais descritivas dos vários elementos de circuito. Assim, as regras de discretização (ou integração) desempenham um papel fundamental na formulação de qualquer programa de transitórios, como é o caso do ATP, que usa o método de integração trapezoidal.

O método de integração trapezoidal consiste em transformar um conjunto de equações diferenciais em um conjunto equivalente de equações algébricas [5].

Os processos numéricos de integração tem como objetivo definir o valor da integral dentro de um intervalo definido, o que corresponde a área sob a curva que define a função f(x) no intervalo X_n a X_{n+1}, como mostrado na Figura 91.


Figura 91 – Aplicação do método de integração trapezoidal

No caso do método trapezoidal considera-se uma interpolação linear, representandose a função f(x) através de um polinômio p(x). Portanto, a área sob a reta definida pelo polinômio caracteriza o valor da integral, e como essa área é da forma de trapézio como mostrado na Figura *91*, tem-se:

$$A = \int_{X_n}^{X_{n+1}} f(x)dx = \frac{\Delta x}{2} [f(x_{n+1}) + f(x_n)]$$
(6. 16)

Onde o valor Δx corresponde ao intervalo compreendido entre X_n e X_{n+1}. A solução de equações diferenciais se caracteriza por uma família de curvas, porém deve existir uma solução única para o sistema em análise, definida em termos das condições iniciais do sistema.

Considerando-se a equação diferencial descrita na equação (6. 16).

$$\frac{dY}{dx} = f(x, Y(x)) \tag{6.17}$$

Integrando a equação no intervalo X_n a X_{n+1}.

$$Y(x_{n+1}) = Y(x_n) + \int_{X_n}^{X_{n+1}} f(x, Y(x)) dx$$
(6. 18)

Aplicando-se a regra de integração trapezoidal definida na equação (6. 16) obtém-se:

$$Y(x_{n+1}) = Y(x_n) + \frac{\Delta x}{2} \left[f(x_n, Y(x_n)) + f(x_{n+1}, Y(x_{n+1})) \right]$$
(6. 19)

Adotando-se os seguintes valores:

$$Y_{n+1} = Y(x_{n+1})$$

$$Y_n = Y(x_n)$$

Substituindo estes valores na equação (6. 19) tem-se:

$$Y_{n+1} = Y_n + \frac{\Delta x}{2} [f(x_n, Y_n) + f(x_{n+1}, Y_{n+1})]$$
(6. 20)

A equação (6. 20) caracteriza o método trapezoidal implícito devido ao fato do termo Tn+1 aparecer nos dois lados da equação, o que exige a aplicação de um método interativo de solução. Porém, para aplicação em sistemas elétricos existe a possibilidade de explicitação.

7.3. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Existem alguns modelos de linhas de transmissão que podem ser utilizados na ferramenta computacional ATPDraw, como é mostrado a seguir.

> Modelo de Clarke

O modelo de Clarke implementado no ATPDraw é utilizado para representar linhas idealmente transpostas e com parâmetros distribuídos. Este modelo utiliza transformação modal para desacoplar as fases e facilitar os cálculos, sendo assim, a transformação de Clarke (abc $\rightarrow 0\alpha\beta$) é utilizada nesse modelo e segue da seguinte forma:

$$Transformação 0 - \alpha - \beta: \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$
$$Transformação inversa: \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

onde, *abc* indicam as fases *a*, *b* e *c* de um circuito trifásico, e $0\alpha\beta$ indicam as componentes simétricas de Clarke.

> Modelo de Bergeron

Este modelo faz parte do grupo de modelos LCC do ATPDraw em que a entrada de dados é feita a partir dos parâmetros físicos da linha, o que quase sempre facilita o trabalho do usuário, uma vez que a maioria dos dados sobre linhas de transmissão normalmente estão disponíveis de acordo com seus parâmetros físicos.

O modelo de Bergeron também utiliza transformação modal e também é utilizado para representar linhas com parâmetros distribuídos.

A linha em estudo (Picos – Tauá, 230 kV) foi modelada por parâmetros distribuídos, com o auxilio da rotina LCC do ATPDraw modelo de Bergeron. A configuração da torre adotada está representada pela Figura 6.

7.4. TRANSFORMADORES

Os transformadores estão representados por suas resistências, reatâncias e considerando sua saturação (através da característica não-linear), O modelo Transformer do ATPDraw foi utilizado para representar estes equipamentos e a característica não linear utilizada neles é mostrada na *Figura 92*:



Figura 92 – Característica não linear dos transformadores