

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 22/01/2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA

CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

JUAN PAULO ROBLES BALESTERO

**REPRESENTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO DOMÍNIO DO
TEMPO POR MEIO DO CIRCUITO π EQUIVALENTE**

Ilha Solteira

2022

JUAN PAULO ROBLES BALESTERO

**REPRESENTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NO DOMÍNIO DO
TEMPO POR MEIO DO CIRCUITO π EQUIVALENTE**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em Engenharia
Elétrica.

Especialidade: Automação

Prof. Dr. Sérgio Kurokawa
Orientador

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA


Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B184r Balestero, Juan Paulo Robles.
Representação de linhas de transmissão no domínio do tempo por meio do
circuito π equivalente / Juan Paulo Robles Balestero. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
174 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2022

Orientador: Sérgio Kurokawa
Inclui bibliografia

1. Modelo de linha de transmissão. 2. Transitórios eletromagnéticos. 3.
Análise no domínio do tempo. 4. Vector Fitting. 5. Circuito π equivalente.


Raiane da Silva Santos

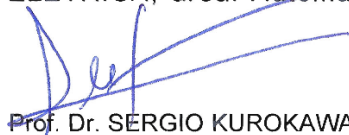
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Representação de linhas de transmissão no domínio do tempo por meio do circuito Pi equivalente

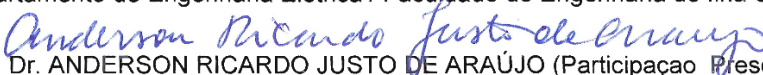
AUTOR: JUAN PAULO ROBLES BALESTERO

ORIENTADOR: SERGIO KUROKAWA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. SERGIO KUROKAWA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. ANDERSON RICARDO JUSTO DE ARAÚJO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação - UNICAMP

Prof. Dr. CLAUDINER MENDES DE SEIXAS (Participação Virtual)
Câmpus de Votuporanga / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Prof. Dr. EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP

Prof. Dr. FELIPE VIGOLVINO LOPES (Participação Virtual)
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Ilha Solteira, 22 de julho de 2022

Dedico
ao meu pai *Paulo Balestero*
e minha mãe *Maria Robles (in memoriam)*
que com dedicação e exemplos me ensinaram os valores da vida
e tornaram tudo até aqui possível.

AGRADECIMENTOS

À DEUS agradeço, pela sua infinita bondade e pela trajetória traçada em minha vida, especialmente nesse período tão complexo e importante na minha carreira docente.

Agradeço aos meus Filhos Pedro e Miguel e especialmente à minha esposa Fernanda por tamanho carinho, paciência, atenção e com apoio inestimável que sempre me deu forças para lutar e persistir no caminho para que essa conquista se tornasse possível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Kurokawa, por oportunizar um trabalho de tamanha importância na minha carreira. Agradeço também a ele pela dedicação, paciência e prontidão em esclarecer todas as minhas dúvidas e principalmente em conduzir o meu trabalho de pesquisa com muita seriedade, orientando com maestria, o que me possibilitou vencer os desafios e superar os diversos obstáculos a fim de obtermos os melhores resultados.

Aos membros da comissão examinadora desta tese, Anderson Ricardo Justo de Araújo, Claudiner Mendes de Seixas, Eduardo Coelho Marques da Costa e Felipe Vigolvinho Lopes que se disponibilizaram em avaliar e contribuir nas correções com muita dedicação e competência.

Aos colegas pesquisadores do Grupo de Análise de transitórios eletromagnéticos (GATE) pela intensa troca de conhecimentos e informações com o objetivo de fortalecer juntos a pesquisa científica.

Ao Instituto Federal de São Paulo por conceder-me tempo suficiente para a realização dessa tarefa. Agradeço também pela concessão de infraestrutura e incentivo concedido, assim como aos servidores do campus de Votuporanga que me auxiliaram nesse caminho.

Aos familiares e amigos que incentivam de diferentes maneiras, e também oferecem sempre a mão amiga em tarefas difíceis do cotidiano. A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

*“Se você quiser descobrir os segredos do Universo,
pense em termos de energia, frequência e vibração.”*
Nikola Tesla

RESUMO

Esse trabalho apresenta um novo modelo de linha de transmissão para simulação de transitórios eletromagnéticos diretamente no domínio do tempo. Para tanto, utiliza-se o circuito π equivalente exato, que representa a linha considerando seus parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. As admitâncias que compõem o circuito π equivalente exato são aproximadas por funções racionais utilizando a técnica do *Vector Fitting*. Utilizando as respectivas frações parciais, para cada admitância, é sintetizado um circuito elétrico composto por uma associação de elementos discretos (resistor, indutor e capacitor), modelando assim a linha de transmissão por elementos de circuito. Isso possibilita seu uso na maioria dos programas de simulação de circuitos elétricos, e por consequência, permite facilmente a conexão de elementos variáveis com o tempo na simulação de linhas de transmissão. O comportamento das admitâncias que compõem o circuito π equivalente exato é analisado no domínio da frequência, levando em conta a variação do comprimento da linha. O modelo proposto é avaliado e validado, utilizando o programa ATP/ATPDraw, por meio de distintos cenários de simulação envolvendo diversos fenômenos transitórios, tais como operações de chaveamento, curtos-circuitos e até mesmo descargas atmosféricas. O novo modelo agrega as mesmas características do modelo π equivalente exato, representado diretamente no domínio do tempo, não somente em regime permanente, mas também em períodos transitórios dispensando o cálculo prévio do tempo de propagação τ e sobretudo, sem a necessidade do uso de convoluções ou de transformada inversa de Laplace ou Fourier, sendo uma alternativa para o estudo de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de energia.

Palavras-chaves: Modelo de linha de transmissão. Transitórios eletromagnéticos. Análise no domínio do tempo. Circuito π equivalente. *Vector Fitting*.

ABSTRACT

This work presents a novel transmission line model for simulating electromagnetic transients directly in time domain. For that, the exact equivalent π -circuit is used, which represents the line taking into account its distributed and frequency-dependent parameters. The admittances that constitute the exact equivalent π -circuit are approximated by rational functions using the vector fitting technique. Using the respective partial fractions, for each admittance, an electrical circuit is synthesized consisting of an association of discrete elements (resistor, inductor, and capacitor) aiming at modeling the transmission line by means of circuit elements. This makes it possible to use it in any circuit simulation program, and consequently, allows the connection of non-linear elements in the simulation of transmission lines. The behavior of the admittances that make up the exact equivalent π -circuit is analyzed in the frequency domain, taking into account the variation of the line length. The proposed model is evaluated and validated through different simulation scenarios involving several transient phenomena, such as switching operations, short circuits and even lightning. The novel model aggregates the same features of the exact equivalent π -circuit directly in the time domain, not only in steady-state, but also during transients, eliminating the need of previous calculation of the delay time τ and the need to use convolutions or inverse Laplace or Fourier transform, being an alternative for the study of electromagnetic transients in power systems.

keywords: Transmission line model. Electromagnetic transients. Time domain analysis. Equivalent π -circuit. Vector Fitting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Linha de transmissão monofásica.	25
Figura 2	–	Circuito equivalente de um elemento infinitesimal da LT.....	25
Figura 3	–	Processo de obtenção do modelo proposto.	31
Figura 4	–	Circuito π equivalente exato de uma linha de transmissão.	32
Figura 5	–	Circuitos equivalentes RL e RLC.	36
Figura 6	–	Circuito representativo para uma admitância genérica.	38
Figura 7	–	Circuito elétrico representativo da LT formada por elementos de circuito. ...	38
Figura 8	–	Silhueta da linha de transmissão monofásica.....	41
Figura 9	–	Resistência própria total, resistência do solo e resistência interna em função da frequência.	42
Figura 10	–	Indutância interna, Indutância do solo, Indutância externa e Indutância total em função da frequência.	42
Figura 11	–	Impedância longitudinal da LT.	43
Figura 12	–	Admitância transversal da LT.	44
Figura 13	–	Admitância $Y_{z\pi}$ para uma LT de 100 km.	45
Figura 14	–	Módulo de $Y_{z\pi}$ para diferentes comprimentos de linha.	46
Figura 15	–	Picos de ressonância do módulo de $Y_{z\pi}$ em função do comprimento da linha.	47
Figura 16	–	Aproximações da admitância $Y_{z\pi}$ para a LT de 100 km.	48
Figura 17	–	Aproximações do módulo de $Y_{z\pi}$ para diferentes comprimentos de linha.	49
Figura 18	–	Admitância Y_{π} para LT de 100 km.	50
Figura 19	–	Módulo de Y_{π} para diferentes comprimentos de linha.	51
Figura 20	–	Picos de ressonância do módulo de Y_{π} em função do comprimento da linha.	52
Figura 21	–	Aproximações da admitância Y_{π} para a LT de 100 km.	53
Figura 22	–	Aproximações do módulo de Y_{π} para diferentes comprimentos de linha.....	54
Figura 23	–	Corrente no terminal receptor, $I_B(\omega)$	56
Figura 24	–	Tensão no terminal receptor, $V_B(\omega)$	58
Figura 25	–	Implementação do modelo proposto no ATP/ATPDraw.	64
Figura 26	–	LT com fonte de tensão constante e terminal receptor em circuito aberto.	65
Figura 27	–	Tensão no terminal receptor em circuito aberto, $V_B(t)$, da LT energizada com degrau de tensão.	66
Figura 28	–	LT com fonte de tensão constante e terminal receptor em curto-circuito.....	67

Figura 29	–	Corrente no terminal receptor em curto-circuito, $I_B(t)$, da LT energizada com degrau de tensão.	68
Figura 30	–	LT com incidência de uma descarga atmosférica no terminal emissor.	69
Figura 31	–	Corrente impulsiva aplicada na Linha de transmissão.	70
Figura 32	–	Tensão no terminal receptor em circuito aberto, $V_B(t)$, com incidência de descarga atmosférica no emissor.	71
Figura 33	–	LT com fonte de tensão senoidal e carga não linear.	72
Figura 34	–	Tensão no receptor, $V_B(t)$, com carga não linear e energização senoidal.	73
Figura 35	–	Corrente no receptor, $I_B(t)$, com carga não linear e energização senoidal.	74
Figura 36	–	Tensão no terminal receptor, $V_B(t)$, na comparação com modelo de Jmarti-ATP em transitórios de alta frequência.	75
Figura 37	–	Silhueta da linha de transmissão trifásica.	79
Figura 38	–	Resistências longitudinais da LT trifásica.	80
Figura 39	–	Indutâncias longitudinais da LT trifásica.	81
Figura 40	–	Linha de transmissão trifásica.	82
Figura 41	–	Circuitos π equivalentes dos modos de propagação.	82
Figura 42	–	Modelo proposto trifásico implementado no ATP/ATPDraw.	83
Figura 43	–	Admitância $Y_{z\pi}$ dos três modos de propagação.	85
Figura 44	–	Aproximações da admitância $Y_{z\pi}$ dos modos α e β	86
Figura 45	–	Aproximações da admitância $Y_{z\pi}$ do modo z	87
Figura 46	–	Módulo de $Y_{z\pi}$ dos modos α e β para diferentes comprimentos de linha.	88
Figura 47	–	Módulo de $Y_{z\pi}$ do modo z para diferentes comprimentos de linha.	88
Figura 48	–	Admitância Y_π dos três modos de propagação.	89
Figura 49	–	Aproximações da admitância Y_π dos modos α e β	90
Figura 50	–	Aproximações da admitância Y_π do modo z	91
Figura 51	–	Módulo de Y_π dos modos α e β para diferentes comprimentos de linha.	92
Figura 52	–	Módulo de Y_π do modo z para diferentes comprimentos de linha.	92
Figura 53	–	LT trifásica com fonte de tensão constante e terminal receptor em circuito aberto.	97
Figura 54	–	Modos de propagação da LT trifásica.	98
Figura 55	–	Tensões no terminal receptor no modo α , $V_{B\alpha}(t)$, e no modo β , $V_{B\beta}(t)$	99
Figura 56	–	Tensão no terminal receptor no modo z , $V_{Bz}(t)$	100
Figura 57	–	Tensão no terminal receptor na fase 1, $V_{Bf1}(t)$	101

Figura 58	–	Tensão no terminal receptor na fase 2, $V_{Bf2}(t)$, e fase 3, $V_{Bf3}(t)$	102
Figura 59	–	LT trifásica com incidência de descarga atmosférica no terminal emissor. .	103
Figura 60	–	Tensão no terminal receptor na fase 1, $V_{Bf1}(t)$	104
Figura 61	–	Tensão no terminal receptor na fase 2, $V_{Bf2}(t)$, e fase 3, $V_{Bf3}(t)$	105
Figura 62	–	Condutores i e k e suas imagens.....	120
Figura 63	–	Circuito equivalente para a admitância Y_r	125
Figura 64	–	Circuito equivalente para a admitância Y_c	126
Figura 65	–	Linha de transmissão trifásica.....	171
Figura 66	–	Modos de propagação da LT trifásica.....	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Número de polos/resíduos e frequências de ajustes da admitância $Y_{z\pi}$	48
Tabela 2	– Número de polos/resíduos e frequências de ajustes da admitância Y_{π}	53
Tabela 3	– Ajuste simultâneo das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π}	55
Tabela 4	– Polos e resíduos da aproximação da admitância $Y_{z\pi}$ com 15 polos.	59
Tabela 5	– Parâmetros dos circuitos RL (polos reais) da admitância $Y_{z\pi}$ com 15 polos. .	59
Tabela 6	– Parâmetros dos circuitos RLC (polos complexos) admitância $Y_{z\pi}$ com 15 polos.	60
Tabela 7	– Polos e resíduos da aproximação da admitância Y_{π} com 30 polos.	60
Tabela 8	– Parâmetros dos circuitos RL (polos reais) da admitância Y_{π} com 30 polos....	61
Tabela 9	– Parâmetros dos circuitos RLC (polos complexos) da admitância Y_{π} com 30 polos.	61
Tabela 10	– Número de polos utilizados na comparação com modelo de JMarti-ATP.	72
Tabela 11	– Polos e resíduos da aproximação das admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 30 polos.	93
Tabela 12	– Parâmetros dos circuitos RL para as admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 30 polos. .	94
Tabela 13	– Parâmetros dos circuitos RLC para as admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 30 polos.	94
Tabela 14	– Polos e resíduos da aproximação das admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 20 polos. .	95
Tabela 15	– Parâmetros dos circuitos RL para as admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 20 polos. .	95
Tabela 16	– Parâmetros dos circuitos RLC para as admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 20 polos. .	96
Tabela 17	– Número de Polos para os ajustes das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} nos modos de propagação.....	97
Tabela 18	– Polos e resíduos da aproximação da admitância $Y_{z\pi}$ com 25 polos.	129
Tabela 19	– Parâmetros dos circuitos RL da admitância $Y_{z\pi}$ com 25 polos.	130
Tabela 20	– Parâmetros dos circuitos RLC da admitância $Y_{z\pi}$ com 25 polos.....	130
Tabela 21	– Polos e resíduos da aproximação da admitância $Y_{z\pi}$ com 60 polos.	131
Tabela 22	– Parâmetros dos circuitos RL da admitância $Y_{z\pi}$ com 60 polos.	132
Tabela 23	– Parâmetros dos circuitos RLC da admitância $Y_{z\pi}$ com 60 polos.	132
Tabela 24	– Polos e resíduos da aproximação da admitância Y_{π} com 45 polos.	133
Tabela 25	– Parâmetros dos circuitos RL da admitância Y_{π} com 45 polos.	134

Tabela 26	–	Parâmetros dos circuitos RLC da admitância Y_{π} com 45 polos.....	135
Tabela 27	–	Polos e resíduos da aproximação da admitância Y_{π} com 100 polos.	135
Tabela 28	–	Parâmetros dos circuitos RL da admitância Y_{π} com 100 polos.	137
Tabela 29	–	Parâmetros dos circuitos RLC da admitância Y_{π} com 100 polos.	138
Tabela 30	–	Polos e resíduos da aproximação das admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 100 polos.	139
Tabela 31	–	Parâmetros dos circuitos RL para as admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 100 polos.	141
Tabela 32	–	Parâmetros dos circuitos RLC para as admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 100 polos.	141
Tabela 33	–	Polos e resíduos da aproximação das admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 400 polos.	142
Tabela 34	–	Parâmetros dos circuitos RL para as admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 400 polos.	148
Tabela 35	–	Parâmetros dos circuitos RLC para as admitâncias $Y_{z\pi\alpha}$ ou $Y_{z\pi\beta}$ com 400 polos.	148
Tabela 36	–	Polos e resíduos da aproximação das admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 80 polos.	154
Tabela 37	–	Parâmetros dos circuitos RL para as admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 80 polos.	156
Tabela 38	–	Parâmetros dos circuitos RLC para as admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 80 polos.	156
Tabela 39	–	Polos e resíduos da aproximação das admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 260 polos.	157
Tabela 40	–	Parâmetros dos circuitos RL para as admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 260 polos.	161
Tabela 41	–	Parâmetros dos circuitos RLC para as admitâncias $Y_{\pi\alpha}$ ou $Y_{\pi\beta}$ com 260 polos.	162
Tabela 42	–	Polos e resíduos da aproximação da admitância $Y_{z\pi z}$ com 60 polos.	165
Tabela 43	–	Parâmetros dos circuitos RL da admitância $Y_{z\pi z}$ com 60 polos.	166
Tabela 44	–	Parâmetros dos circuitos RLC da admitância $Y_{z\pi z}$ com 60 polos.....	167
Tabela 45	–	Polos e resíduos da aproximação da admitância $Y_{\pi z}$ com 50 polos.	168
Tabela 46	–	Parâmetros dos circuitos RL da admitância $Y_{\pi z}$ com 50 polos.	169
Tabela 47	–	Parâmetros dos circuitos RLC da admitância $Y_{\pi z}$ com 50 polos.	169

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	17
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES.....	21
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	MODELO DE LINHA DE TRANSMISSÃO PARA ESTUDO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	24
2.1	EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DA LINHA DE TRANSMISSÃO MONOFÁSICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	24
2.2	SOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DA LINHA DE TRANSMISSÃO MONOFÁSICA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	27
2.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	29
3	DESCRIÇÃO DO MODELO PROPOSTO	30
3.1	DESCRIÇÃO GERAL DO MODELO	30
3.2	CIRCUITO π EQUIVALENTE DA LINHA DE TRANSMISSÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	31
3.3	SÍNTESE DAS ADMITÂNCIAS DO CIRCUITO π EQUIVALENTE POR ELEMENTOS DE CIRCUITO	35
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	39
4	DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO ..	40
4.1	PARÂMETROS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DA LT MONOFÁSICA ..	40
4.2	APROXIMAÇÃO DA ADMITÂNCIA $Y_{z\pi}$ POR FRAÇÕES PARCIAIS	44
4.3	APROXIMAÇÃO DA ADMITÂNCIA Y_{π} POR FRAÇÕES PARCIAIS	50
4.4	AJUSTE SIMULTÂNEO DAS ADMITÂNCIAS $Y_{z\pi}$ E Y_{π}	54
4.5	REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO π EQUIVALENTE EXATO POR ELEMENTOS DE CIRCUITO.	58
4.6	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	62

5	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	64
5.1	ENERGIZAÇÃO DA LT	65
5.2	INCIDÊNCIA DE DESCARGA ATMOSFÉRICA NA LT	68
5.3	COMPARAÇÃO COM MODELO JMARTI	71
5.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	76
6	UTILIZAÇÃO DO MODELO PROPOSTO PARA REPRESENTAR LINHAS TRIFÁSICAS	78
6.1	PARÂMETROS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DA LT TRIFÁSICA.....	78
6.2	REPRESENTAÇÃO DA LINHA TRIFÁSICA PELO MODELO PROPOSTO	81
6.3	APROXIMAÇÃO DAS ADMITÂNCIAS $Y_{z\pi}$ POR FRAÇÕES PARCIAIS	83
6.4	APROXIMAÇÃO DAS ADMITÂNCIAS Y_{π} POR FRAÇÕES PARCIAIS	88
6.5	REPRESENTAÇÃO DA LINHA TRIFÁSICA POR ELEMENTOS DE CIRCUITO	93
6.6	SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS RESULTANTES DA ENERGIZAÇÃO DA LINHA	96
6.7	SIMULAÇÕES DE TRANSITÓRIOS RESULTANTES DA INCIDÊNCIA DE DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	103
6.9	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	106
7	CONCLUSÕES.....	108
7.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	108
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
	REFERÊNCIAS.....	112
	APÊNDICE A – PARÂMETROS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DA LT	119
	APÊNDICE B – CIRCUITOS ELÉTRICOS QUE SINTETIZAM AS FRAÇÕES PARCIAIS DO VECTOR FITTING	125
	APÊNDICE C – PARÂMETROS DO CIRCUITO II EQUIVALENTE EXATO SINTETIZADO COM MAIOR NÚMERO DE POLOS	129
	APÊNDICE D – REPRESENTAÇÃO DE LINHAS TRIFÁSICAS NO DOMÍNIO MODAL	171

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Embora os sistemas elétricos de potência operem em regime permanente, estão sujeitos a transitórios eletromagnéticos, e por isso, o estudo de fenômenos transitórios é de extrema importância no projeto e desenvolvimento de sistemas robustos para garantir a estabilidade durante as situações extremas geradas em períodos transitórios (FARIA, 2008; RACHIDI; TKACHENKO, 2008). As causas dos fenômenos transitórios incluem operações de chaveamento, curtos-circuitos e até mesmo descargas atmosféricas, que podem gerar sobretensões e sobrecorrentes, distorcendo de maneira significativa as formas de onda de tensão e corrente (DOMMEL; MEYER, 1974). Conseqüentemente, diversas especificações de um sistema elétrico tais como nível de isolamento dos equipamentos e potência nominal, são estabelecidas a partir das possíveis situações transitórias em que serão submetidos. Tais especificações são de suma importância para evitar prejuízos, tais como danos aos equipamentos elétricos conectados às linhas, interrupções no fornecimento de energia elétrica, mas também garantir a segurança aos seres humanos que circulam nas proximidades de linhas de transmissão que atravessam os centros urbanos (KHAN, 2018).

Dentre os diversos modelos de linhas de transmissão usados na simulação de transitórios eletromagnéticos, têm melhor precisão aqueles que levam em conta o efeito da frequência, ou seja, quando o cálculo dos parâmetros longitudinais da linha de transmissão (LT) são obtidos considerando o efeito pelicular (efeito skin) e do solo sobre os condutores. Tais parâmetros devem ser considerados distribuídos ao longo do comprimento da linha, o que faz com que as correntes e tensões por toda sua extensão tenham o comportamento de ondas, e nesse caso, podem ser obtidas a partir das soluções das equações hiperbólicas da linha (BUDNER, 1970). Dessa forma, tais equações, permitem considerar a natureza distribuída dos parâmetros da linha e sua dependência da frequência. O circuito π equivalente exato da linha de transmissão, representa diretamente as equações hiperbólicas da linha, e por esse motivo o termo “exato” é usado para intitular esse modelo, pois ele exerce tal representação sem o uso de aproximações (DOMMEL HERMANN, 1996).

Na literatura o modelo π equivalente exato é amplamente utilizado para análise de transitórios no domínio da frequência (BILAL *et al.*, 2019). Porém em Marti, Marti e Dommel (1993) é evidenciado que no domínio do tempo só é possível sua utilização em regime permanente onde a solução é obtida para uma única frequência, tanto nas frequências fundamentais quanto nas harmônicas. Essa restrição inviabiliza sua utilização para a simulação de transitórios eletromagnéticos, porque nesse período a resposta da linha abrange uma ampla faixa de frequências, alcançando dezenas de MHz (MARTINEZ-VELASCO, 2020; WG33, 1990).

Em Macias, Exposito e Soler (2005), demonstra-se que ao considerar linhas de comprimento curto o circuito π equivalente exato tende ao chamado “circuito π nominal” da LT, que pode ser implementado utilizando elementos de circuito (resistor, indutor e capacitor), e portanto, permitindo a análise de transitórios no domínio do tempo. Nesse caso, para linhas de maiores comprimentos, utiliza-se um grande número de circuitos π nominais em cascata para calcular com precisão as respostas transitórias, cujas faixas de frequências estejam na ordem dos kHz. Embora esse método seja atrativo e fácil de implementar, ele tem a desvantagem de incluir picos errôneos que distorcem as respostas transitórias, principalmente em seus valores de pico, denominados “oscilações espúrias” (ARAÚJO *et al.*, 2017).

Essas oscilações são consequências da cascata de circuitos π nominal que representa a LT, mas não representam o valor real dos transitórios eletromagnéticos. Para atenuar as oscilações espúrias, em Chrysochos *et al.* (2015) é proposto o uso de resistências de amortecimento adicionadas em paralelo à impedância longitudinal de cada seção do circuito π nominal. Posteriormente em Colqui, De Araújo e Kurokawa (2019) e Colqui *et al.* (2021) é apresentada uma metodologia para realizar melhor ajuste nos valores das resistências de amortecimento a fim de reduzir a distorção nas respostas transitórias.

O circuito π nominal, em sua forma mais original, não leva em conta o efeito da frequência, então, para melhorar a precisão dos resultados usando esse modelo, em Costa; Kurokawa, Pissolato e Prado (2010) e Kurokawa *et al.* (2009) os autores apresentaram propostas que inclui a dependência da frequência nos parâmetros longitudinais da linha. O procedimento é realizado a partir da aproximação racional de tais parâmetros que são sintetizados por um circuito elétrico equivalente. Apesar das melhorias introduzidas, no modelo que utiliza o circuito π nominal em cascata, ele ainda utiliza uma aproximação relevante, pois

considera que um pequeno segmento de linha seja representado por parâmetros discretos, e portanto não considera que os parâmetros da linha são distribuídos ao longo do seu comprimento (ARAUJO; SILVA; KUROKAWA, 2014).

Uma técnica que permite a análise transitória no domínio do tempo utilizando o circuito π equivalente exato da LT, baseia-se na transformação da frequência para o tempo, utilizando transformadas inversas de Laplace ou Fourier (GÓMEZ; URIBE, 2009; URIBE *et al.*, 2002). Atualmente o método da transformada numérica de Laplace ou NLT (do inglês *Numerical Laplace Transformation*), com a implementação descrita em Moreno e Ramirez (2008) é o mais utilizado por ser bastante rápido e preciso. A técnica consiste em calcular as tensões e as correntes da linha no domínio da frequência e transformá-las para o domínio do tempo usando a NLT. A implementação detalhada em Moreno e Ramirez (2008), soluciona alguns erros na transformada numérica de Laplace, tal como as imprecisões denominadas oscilações de Gibbs, as quais, por sua vez, resultam em variações na amplitude e oscilações do sinal de saída a ser analisado (GÓMEZ; URIBE, 2009). Para minimizar esses erros, podem ser utilizados os métodos de janelamento, tais como: *Hamming window* proposto em (WEDEPOHL, 1983) e *Lanczos window* proposto em Day, Mullineux; e Reed (1965), entre outros métodos aplicados no processamento digital de sinais.

Apesar do uso da NLT oferecer excelente precisão, a obtenção da resposta transitória no domínio da frequência impede muitas vezes, a conexão de elementos variáveis no tempo. Tais elementos apresentam características bem conhecidas no domínio do tempo, mas não possui sua representação no domínio da frequência. Dessa maneira, torna-se complexa a simulação de eventos que desencadeiam mudanças súbitas das configurações de rede, como por exemplo, faltas ou chaveamento de disjuntores (MAMIŞ, 2003; MARTI, 1988). Alguns modelos incluem tais elementos no domínio da frequência, como por exemplo, a técnica baseada no princípio de superposição desenvolvida em Gómez e Uribe (2009). Porém não abrangem toda variedade de elementos que podem ser conectados aos terminais da linha (e.g. descargas disruptivas nas cadeias de isoladores, transformadores, para-raios, etc) quando comparado à simulação de transitórios realizada diretamente no domínio do tempo (SALARI; PORTELA, 2006).

Diversos modelos são desenvolvidos para obter as tensões e correntes nos terminais da linha, diretamente no domínio do tempo, e dentre eles predomina o uso do modelo de JMarti

(MARTI, 1982) e o Modelo Universal da Linha ou ULM (do inglês *Universal Line Model*) (MORCHED; GUSTAVSEN; TARTIBI, 1999). Ambos, consideram que os parâmetros da LT são distribuídos por unidade de comprimento e levam em conta o efeito da frequência. Esses modelos são caracterizados principalmente pela aproximação racional da admitância característica $Y_c(\omega)$ e da função de propagação $H(\omega)$. O ajuste de $Y_c(\omega)$ é em geral simples, mas o ajuste de $H(\omega)$ é mais complexo, pois também é necessário associar um tempo de propagação τ .

O modelo de JMarti foi apresentado em Marti (1982), e algumas melhorias foram propostas recentemente em Martí e Tavighi (2017). Ele é implementado em programas de Transitórios Eletromagnético (EMTP), como o *Alternative Transient Program* (ATP-EMTP), onde $Y_c(\omega)$ e $H(\omega)$ são aproximadas por funções racionais utilizando o método de Bode, que consiste em encontrar funções racionais que tenham apenas polos e zeros reais (BAÑUELOS-CABRAL; GUTIÉRREZ-ROBLES; GUSTAVSEN, 2017; BODE, 1945). Tais funções, que estão no domínio da frequência são levadas ao domínio do tempo por meio da transformada inversa de Laplace, onde correspondem a uma soma de funções exponenciais decrescentes. Em geral, emprega-se a teoria proposta por Semlyen e Dabuleanu (1975) para solucionar as convoluções, nas funções do cálculo de tensão e corrente, de maneira recursiva. Em Bañuelos-cabral *et al.* (2019), os autores apresentam uma proposta de melhoria da precisão do modelo, substituindo o método de Bode pela técnica do *Vector Fitting*, mas restringindo ainda, em funções racionais somente com polos e zeros reais (GUSTAVSEN; SEMLYEN, 1999).

Para linhas polifásicas, o modelo de JMarti se baseia na técnica da decomposição modal, que desacopla a LT em linhas monofásicas independentes, para o cálculo de correntes e tensões em cada linha. Em seguida, usando matrizes de transformação modal inversa, obtém-se as respostas transitórias para a LT polifásica (PAUL, 1996). No processo de decomposição modal, JMarti considera uma matriz de transformação constante e invariante com a frequência (CABALLERO; COSTA; KUROKAWA, 2017; FARIA; BRICENO, 1997; TAVARES; PISSOLATO; PORTELA, 1998).

O ULM contorna algumas limitações do modelo de JMarti, pois a solução das equações diferenciais da LT no domínio do tempo, é realizada diretamente no domínio das fases. Dessa forma, o modelo evita simplificações decorrentes das transformações modais, e portanto, se torna mais adequado para o estudo de problemas tais como aqueles associados a

linhas de transmissão que apresentem geometria fortemente assimétrica ou cabos subterrâneos. No ULM, as funções $Y_c(t)$ e $H(t)$, no domínio do tempo, correspondem a uma soma de funções exponenciais decrescentes, na qual as convoluções que envolvem essas funções, são solucionadas também de maneira recursiva (SEMLYEN; DABULEANU, 1975).

Esse modelo também está disponível em programas do tipo EMTP (do inglês *Electromagnetic Transient Program*), e recentemente em Zanon, Leal e De conti (2021) os autores apresentam uma técnica que permite a implementação do ULM no ATP-EMTP. Atualmente, é o modelo mais preciso e empregado para representar linhas simétricas e assimétricas pois produz resultados estáveis e satisfatórios. Apesar de serem bastante precisos, tanto JMarti quanto ULM dependem principalmente do cálculo prévio do tempo de propagação τ , que é realizado numericamente e pode afetar a qualidade da aproximação racional (DE TOMMASI; GUSTAVSEN, 2007; GUSTAVSEN, 2004; 2016).

Esse contexto motivou a realização desse trabalho, que se dedica a propor um modelo, que considera a natureza distribuída dos parâmetros da linha e inclui o efeito da frequência, mas se distingue por ser desenvolvido diretamente no domínio do tempo, sem a necessidade do cálculo do tempo de propagação τ ou do uso da transformada numérica de Laplace. Busca-se com essa proposta, ampliar a disponibilidade de modelos alternativos de linhas de transmissão para a análise diversos fenômenos eletromagnéticos e suas respostas transitórias.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Esse trabalho tem como objetivo propor um novo modelo de LT para a simulação de transitórios eletromagnéticos representado diretamente no domínio do tempo. O modelo proposto constitui da síntese do circuito π equivalente exato da LT por um circuito elétrico composto por uma associação de elementos discretos (resistor, indutor e capacitor). Assim, utiliza-se somente um único circuito π para modelar a LT para qualquer comprimento.

De maneira específica, neste trabalho também é realizada uma análise gráfica das admitâncias que compõem o circuito π equivalente exato, com respeito ao seu comportamento em função da frequência, levando em conta a variação do comprimento da linha.

O novo modelo pode ser usado em programas do tipo EMTP tais como ATP, EMTP-RV ou PSCAD, e além disso, por ser formado somente por elementos de circuitos, ele pode ser implementado em outro programa de simulação de circuitos elétricos.

A nova modelagem agrega os benefícios do modelo π equivalente exato, que considera os parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. A principal vantagem dessa abordagem é possibilitar a simulação de transitórios eletromagnéticos diretamente no domínio do tempo, dispensando o cálculo prévio do tempo de propagação τ e sobretudo a utilização de convoluções e transformadas inversas de Laplace ou Fourier.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa tese está organizada em sete capítulos, que além desta introdução contém os seguintes assuntos.

No Capítulo 2 são desenvolvidas as equações diferenciais que modelam a LT no domínio da frequência, as quais consideram a dependência da frequência e a natureza distribuída dos parâmetros da linha. Uma vez estabelecidas as equações diferenciais, serão mostradas as suas soluções exatas, que são a base para a implementação do modelo proposto nessa tese.

No Capítulo 3 o modelo proposto é descrito detalhadamente. É realizada a dedução das equações das admitâncias que compõem o circuito π equivalente, no domínio da frequência, e de maneira genérica, a síntese dessas admitâncias por elementos de circuito.

No Capítulo 4 o modelo de linha proposto é desenvolvido e implementado. Inicialmente são calculados os parâmetros da LT monofásica com o objetivo de se obter as admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} do respectivo circuito π equivalente exato. Utilizando o *Vector Fitting* (VF) faz-se a aproximação racional das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} , além de um estudo a fim de identificar a quantidade ideal de polos para cada admitância, e seu comportamento com a variação do comprimento da LT. Por fim, são apresentados os valores numéricos dos polos e resíduos e principalmente dos elementos que compõem o circuito π equivalente para cada LT modelada.

No Capítulo 5 é realizada a validação do modelo no domínio do tempo. São avaliados resultados de simulação durante o transitório eletromagnético, para a linha energizada com uma fonte de tensão contínua e também resultante da incidência de uma descarga atmosférica, nesse caso, modelada por uma fonte de corrente. Na última seção do capítulo, o modelo proposto é comparado com o modelo de JMarti, disponível no programa ATP/ATPDraw, a partir de resultados de simulação, também de transitórios eletromagnéticos de alta e baixa frequência.

No Capítulo 6 o modelo é utilizado para representar linhas trifásicas simétricas e idealmente transpostas. O procedimento é realizado com o uso da transformação modal, e para cada modo de propagação é implementado um circuito π equivalente exato formado por elementos de circuito. A partir da aproximação racional das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} , para todos os modos de propagação, é elaborada uma análise da quantidade ideal de polos para cada admitância, e seu comportamento com a variação do comprimento da LT. Ainda neste capítulo, o modelo é desenvolvido e implementado, e seus resultados de simulação são obtidos tanto para energização da linha, quanto para simulação da incidência de uma descarga atmosférica.

No Capítulo 7 são evidenciadas as principais conclusões sobre o trabalho, principalmente sobre o desenvolvimento e resultados, além das propostas de continuidade para trabalhos futuros.

Os apêndices são apresentados na seguinte ordem:

No Apêndice A são apresentadas as equações para o cálculo dos parâmetros longitudinais onde considera-se o efeito pelicular e o efeito do solo, e também os cálculos dos parâmetros transversais onde as condutâncias são desconsideradas e a capacitância assumida como sendo constante.

No Apêndice B são desenvolvidas as equações que determinam os parâmetros dos elementos de circuitos do ramo RL do ramo RLC que formam o respectivo circuito π equivalente exato.

No Apêndice C são apresentados valores numéricos dos polos, resíduos e os parâmetros dos circuitos RL e RLC que formam o respectivo circuito π equivalente exato.

No Apêndice D é apresentado o equacionamento para a representação de linhas trifásicas no domínio modal.

7. CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES GERAIS

Esse trabalho apresenta um novo modelo para representação de linhas de transmissão diretamente no domínio do tempo. A proposta constitui da síntese do circuito π equivalente exato por elementos de circuito. O modelo, é obtido a partir das equações hiperbólicas da linha, que além de considerar os parâmetros distribuídos da LT, permite levar em conta o efeito da frequência sobre os condutores. O processo de síntese, utiliza a técnica do *Vector Fitting* para obtenção dos polos e zeros da função racional que aproxima as admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} do respectivo circuito π equivalente exato.

Para o desenvolvimento e implementação do modelo, foi investigado uma LT monofásica de 100 km. Baseado nos parâmetros dessa linha, foram obtidas as admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} do circuito π equivalente exato e suas respectivas aproximações racionais, para diferentes casos. A partir da curva da admitância $Y_{z\pi}$ nota-se que sua impedância recíproca tem um comportamento resistivo e indutivo para baixas frequências, concordando com o comportamento da impedância longitudinal da linha. A curva da admitância Y_{π} apresentou um comportamento puramente capacitivo, sendo sua condutância nula para baixas frequências, o que se assemelha à característica da admitância transversal da linha. Essas características representam um comportamento típico do modelo π nominal da LT de comprimento curto ou médio.

Para altas frequências, ambas as admitâncias possuem uma característica oscilatória entre um comportamento indutivo ou capacitivo. Observou-se a partir dos gráficos de módulo das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} que a quantidade picos de ressonância aumentam proporcionalmente, à medida que se aumenta a faixa de frequência a ser ajustada. Essa característica exigiu um maior número de polos para ajustar as curvas das admitâncias até frequências mais altas. Entretanto, comparando-se os valores das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} exatas, com suas respectivas aproximações, observa-se que as curvas se sobrepõe durante toda faixa de frequência de ajuste definida. Portanto, a síntese das admitâncias para frequências maiores é viabilizada, desde que seja utilizado um maior número de polos, e para esse aumento não houve restrição alguma.

Ao analisar o comportamento do modelo com a variação do comprimento da linha, concluiu-se que, a quantidade de polos utilizada não se altera com esta variação. Isso se deve ao fato que, variando o comprimento da LT, a quantidade de picos de ressonância do módulo das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} praticamente não se alteram, sendo então, a principal mudança nas curvas das admitâncias, o deslocamento da região dos picos de ressonância ao longo do espectro de frequência.

Ainda no domínio da frequência, investigou-se a resposta do modelo para um ajuste simultâneo das admitâncias $Y_{z\pi}$ e Y_{π} , considerando um impulso unitário aplicado no terminal emissor do circuito π equivalente. Averiguou-se que quando o terminal receptor é colocado em curto-circuito, a admitância Y_{π} não interfere na resposta do modelo. Porém, com terminal receptor em circuito aberto demonstrou-se que a frequência máxima de ajuste da admitância Y_{π} deve ser a mesma definida para o ajuste de $Y_{z\pi}$.

Para a validação do modelo, foram analisadas suas respostas transitórias quando, submetido à energização, e também a uma descarga atmosférica. Os resultados, no domínio do tempo comprovam que, para se obter as melhores respostas, a admitância $Y_{z\pi}$ deve ser ajustada até a frequência em que terminam os picos de ressonância, e a frequência máxima de ajuste da admitância Y_{π} deve ser a mesma definida para o ajuste de $Y_{z\pi}$. A partir dos resultados de simulação, observou-se que mesmo utilizando um menor número de polos, durante o período transitório seu comportamento foi bastante satisfatório. Com a quantidade adequada de polos, alcançou-se os melhores resultados, com excelente desempenho para todas simulações transitórias frente aos diferentes tipos de distúrbios, viabilizando a utilização do modelo.

Uma comparação do modelo proposto com o modelo de JMarti, realizada com uma fonte de tensão senoidal no emissor e uma carga não linear conectada em seu terminal receptor, permitiu concluir que, mesmo com poucos polos, o modelo proposto apresenta resultado idêntico ao de JMarti em regime permanente. Com o modelo proposto ajustado com a quantidade adequada de polos, em período transitório, tanto para energização quanto para descarga atmosférica, o novo modelo apresentou respostas semelhantes ao de JMarti.

Na representação de linhas trifásicas idealmente transposta, o modelo proposto foi implementado no domínio dos modos. Nesse caso, para os três modos de propagação, as admitâncias apresentaram comportamento idêntico ao de linhas monofásicas. A principal diferença ocorreu com os modos α e β , que apresentaram um número elevado de picos de

ressonância quando comparados ao modelo monofásico, diferente do modo z que manteve praticamente o mesmo número de polos. Com a variação do comprimento da linha, em todos os modos de propagação do modelo trifásico, a quantidade de polos utilizada também não se alterou.

As simulações no domínio do tempo, novamente foram todas realizadas no programa ATP/ATPDraw, para linhas com terminal receptor em circuito aberto e os resultados foram obtidos tanto para energização quanto para descarga atmosférica. Concluiu-se que, apesar da quantidade excessiva de polos para a aproximação racional das admitâncias dos modos α e β , não foi necessário ajustar a admitância $Y_{z\pi}$ até o final de seus picos de ressonância para conseguir melhor resultado no domínio do tempo. Além disso, a excelente resposta transitória, também viabilizou o uso do modelo para linhas trifásicas.

Para se obter resultados do novo modelo, semelhante aos valores de referência, foi necessário o emprego de um maior número de polos, o que resultou no uso de uma quantidade maior de elementos de circuito (RLC) para construir o circuito π equivalente exato no domínio do tempo. Entretanto, a quantidade de elementos de circuito se torna indiferente ao se implementar o novo modelo em programas de simulações de circuitos, uma vez que os recursos computacionais disponíveis facilitam bastante a manipulação dos parâmetros dos elementos de circuito. Além disso, utilizando o programa ATP/ATPDraw, as simulações foram realizadas de forma praticamente instantâneas.

Em resumo, a nova modelagem agrega os benefícios do circuito π equivalente exato, visto que considera os parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. A principal vantagem dessa abordagem é possibilitar a simulação de transitórios eletromagnéticos diretamente no domínio do tempo, dispensando o cálculo prévio do tempo de propagação τ e sobretudo o uso de convoluções ou transformadas inversas de Laplace ou Fourier.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para continuação deste trabalho, propõe-se:

- A investigação do novo modelo em linhas mais curtas. Como pôde-se observar, para linhas de comprimento menor que 50 km, com a diminuição do comprimento da LT o

número de picos de ressonâncias cresce de maneira abrupta, o que deve exigir e uma grande quantidade de polos. Desse modo, sugere-se avaliar o comportamento do modelo e explorar a possibilidade de utiliza-lo nestas condições.

- Otimizar o ajuste simultâneo das admitâncias de $Y_{z\pi}$ e Y_{π} , através de um estudo mais aprofundado das frequências máximas de ajuste das admitâncias, com objetivo de reduzir o número de polos/resíduos e consequentemente o número de elementos de circuitos utilizados no modelo. Como foi observado na seção 4.4, o ajuste simultâneo foi feito de maneira empírica, o que sugere a possibilidade de existência de outros critérios de ajuste, como por exemplo através de um tratamento analítico, ou outra proposta que defina mais claramente a influência que cada admitância exerce na resposta do modelo como um todo.
- Implementação e investigação da resposta do modelo trifásico para linhas sem transposição, considerando uma única matriz transformação modal composta somente por números reais (assim como é utilizada no JMarti do ATP/ATPDraw) de maneira que esta matriz possa ser representada por transformadores ideais.
- Considerar no cálculo da admitância transversal, a condutância e a variação da capacitância, e nos parâmetros longitudinais a variação da resistência do solo com a frequência a fim de investigar a influência desses parâmetros no modelo proposto em transitórios eletromagnéticos;

8. REFERÊNCIAS

AMETANI, A. A general formulation of impedance and admittance of cables. **IEEE transactions on power apparatus and systems**, Piscataway, n. 3, p. 902-910, 1980.

AMETANI, A.; NAGAOKA, N.; BABA, Y.; OHNO, T. *et al.* **Power system transients: theory and applications**. [S. l.]: CRC Press, 2016. 1315366797.

AMETANI, A.; OHNO, T.; NAGAOKA, N. **Cable system transients: theory, modeling and simulation**. [S. l.]: Wiley & Sons, 2015.

ANTONINI, G. SPICE equivalent circuits of frequency-domain responses. **IEEE transactions on electromagnetic compatibility**, Piscataway, v. 45, n. 3, p. 502-512, 2003.

ARAUJO, A.; SILVA, R.; KUROKAWA, S. Comparing lumped and distributed parameters models in transmission lines during transient conditions. *In: IEEE/PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE & EXPOSITION, 2014, [s. l.]. Proceedings [...]* [S. l.: s. n.], 2014. p. 1-5.

ARAÚJO, A. R.; KUROKAWA, S.; SHINODA, A. A.; COSTA, E. C. Mitigation of erroneous oscillations in electromagnetic transient simulations using analogue filter theory. **IET Science, Measurement & Technology**, Stevenage, v. 11, n. 1, p. 41-48, 2017.

BAZELYAN, E. M.; RAIZER, Y. P. **Lightning physics and lightning protection**. [S. l.]: CRC Press, 2000.

BAÑUELOS-CABRAL, E.; GUTIÉRREZ-ROBLES, J.; GARCÍA-SÁNCHEZ, J.; SOTELO-CASTAÑÓN, J. *et al.* Accuracy enhancement of the JMarti model by using real poles through vector fitting. **Electrical Engineering**, Piscataway, v. 101, n. 2, p. 635-646, 2019.

BAÑUELOS-CABRAL, E. S.; GUTIÉRREZ-ROBLES, J. A.; GUSTAVSEN, B. Rational fitting techniques for the modeling of electric power components and systems using MATLAB environment. *In: Rational Fitting Techniques for the Modeling of Electric Power Components and Systems Using MATLAB Environment*: IntechOpen, 2017.

BILAL, G.; GOMEZ, P.; SALCEDO, R.; VILLANUEVA-RAMIREZ, J. M. Electromagnetic transient studies of large distribution systems using frequency domain modeling methods and network reduction techniques. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 110, p. 11-20, 2019.

- BODE, H. W. **Network analysis and feedback amplifier design**. [S. l.: s. n.], 1945.
- BUDNER, A. Introduction of Frequency-Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transients Program. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, n. 1, p. 88-97, 1970.
- CABALLERO, P. T.; COSTA, E. C. M.; KUROKAWA, S. Modal decoupling of overhead transmission lines using real and constant matrices: Influence of the line length. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 92, p. 202-211, 2017.
- CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. **The Bell System Technical Journal**, Piscataway, v. 5, n. 4, p. 539-554, 1926.
- CHRYSOCHOS, A. I.; TSOLARIDIS, G. P.; PAPADOPOULOS, T. A.; PAPAGIANNIS, G. K. **Damping of oscillations related to lumped-parameter transmission line modeling**. [S. l.: s. n.], 2015.
- CLARKE, E. **Circuit Analysis of A-C Power Systems**: Graph. Darst. London: Wiley, 1950.
- COLQUI, J. S.; DE ARAÚJO, A. R.; KUROKAWA, S. Improving the performance of a lumped transmission line model used in electromagnetic transient analysis. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Stevenage, v. 13, n. 21, p. 4942-4951, 2019.
- COLQUI, J. S.; DE ARAÚJO, A. R.; KUROKAWA, S.; FILHO, J. P. Optimization of Lumped Parameter Models to Mitigate Numerical Oscillations in the Transient Responses of Short Transmission Lines. **Energies**, Basel, v. 14, n. 20, p. 6534, 2021.
- COLQUI, J. S.; TIMANÁ, L. C.; CABALLERO, P. T.; KUROKAWA, S. *et al.* A modified implementation of the Folded Line Equivalent transmission line model in the Alternative Transient Program. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 211, p. 108185, 2022.
- COLQUI, J. S. L.; ERASO, L. C. T.; CABALLERO, P. T.; PISSOLATO FILHO, J. *et al.* Implementation of Modal Domain Transmission Line Models in the ATP Software. **IEEE Access**, Piscataway, v. 10, p. 15924-15934, 2022.
- COSTA, E.; KUROKAWA, S.; PISSOLATO, J.; PRADO, A. Efficient procedure to evaluate electromagnetic transients on three-phase transmission lines. **IET generation, transmission & distribution**, Stevenage, v. 4, n. 9, p. 1069-1081, 2010.
- DAY, S. J.; MULLINEUX, N.; REED, J. Developments in obtaining transient response using Fourier transforms: Part I: Gibbs phenomena and Fourier integrals. **International Journal of Electrical Engineering Education**, London, v. 3, n. 4, p. 501-506, 1965.

DE SEIXAS, C. M.; KUROKAWA, S. Using circuit elements to represent the distributed parameters of a grounding system under lightning strokes. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 172, p. 213-220, 2019.

DE SIQUEIRA, J. C. G.; BONATTO, B. D. **Introduction to Transients in Electrical Circuits: Analytical and Digital Solution Using an EMTP-based Software**. Springer Nature, 2021. 3030682498.

DE TOMMASI, L.; GUSTAVSEN, B. **Accurate transmission line modeling through optimal time delay identification**. [S. l.: s. n.], 2007.

DESCHRIJVER, D.; MROZOWSKI, M.; DHAENE, T.; DE ZUTTER, D. Macromodeling of multiport systems using a fast implementation of the vector fitting method. **IEEE Microwave and wireless components letters**, Piscataway, v. 18, n. 6, p. 383-385, 2008.

DOMMEL HERMANN, W. EMTP theory book/Hermann W. Dommel. **British Columbia: Microtran Power System Analysis Corporation Vancouver**. [S. l.: s. n.], 1996.

DOMMEL, H. W.; MEYER, W. S. Computation of electromagnetic transients. **Proceedings of the IEEE**, Piscataway, v. 62, n. 7, p. 983-993, 1974.

FARIA, J. B. **Electromagnetic foundations of electrical engineering**. London: John Wiley & Sons, 2008. 0470697482.

FARIA, J. B.; BRICENO, J. H. On the modal analysis of asymmetrical three-phase transmission lines using standard transformation matrices. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 12, n. 4, p. 1760-1765, 1997.

GARBELIM PASCOALATO, T. F.; JUSTO DE ARAÚJO, A. R.; LEON COLQUI, J. S.; KUROKAWA, S. *et al.* A Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Electromagnetic Transient Analysis of Overhead Transmission Lines Using Modal Decomposition. **Energies**, Basel, v. 15, n. 5, p. 1687, 2022.

GLOVER, J. D.; SARMA, M. S.; OVERBYE, T. **Power system analysis & design, SI version**. Cengage Learning, 2012. 1133386687.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power system analysis**. [S. l.: s. n.], 2003.

GUSTAVSEN, B. Computer code for rational approximation of frequency dependent admittance matrices. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 17, n. 4, p. 1093-1098, 2002.

GUSTAVSEN, B. **Time delay identification for transmission line modeling**. Piscataway: IEEE, 2004. p. 103-106.

GUSTAVSEN, B. Improving the pole relocating properties of vector fitting. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 3, p. 1587-1592, 2006.

GUSTAVSEN, B. Optimal time delay extraction for transmission line modeling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 32, n. 1, p. 45-54, 2016.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. **IEEE Transactions on power delivery**, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1052-1061, 1999.

GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Enforcing passivity for admittance matrices approximated by rational functions. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 16, n. 1, p. 97-104, 2001.

GÓMEZ, P.; URIBE, F. A. The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, London, v. 31, n. 2-3, p. 116-123, 2009.

HOFMANN, L. Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air, and ground. **IEEE transactions on power delivery**, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 564-570, 2003.

HOIDALEN, H. **User manual supplements new feature in ATPDraw v5**. Citeseer 2007.

JIA, W.; XIAOQING, Z. **Double-exponential expression of lightning current waveforms**. Piscataway: IEEE, 2006. p. 320-323.

KHAN, S. **Industrial power systems**. London: Crc Press, 2018. 1315221438.

KUROKAWA, S.; YAMANAKA, F. N.; PRADO, A. J.; PISSOLATO, J. Inclusion of the frequency effect in the lumped parameters transmission line model: State space formulation. **Electric power systems research**, Amsterdam, v. 79, n. 7, p. 1155-1163, 2009.

LEON COLQUI, J. S. **Aperfeiçoamento da representação de linhas de transmissão de energia elétrica por elementos discretos de circuitos: aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos**. [S. l.: s. n.], 2021.

MACIAS, J. R.; EXPOSITO, A. G.; SOLER, A. B. A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 894-903, 2005.

MAMIŞ, M. Computation of electromagnetic transients on transmission lines with nonlinear components. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 150, n. 2, p. 200-204, 2003.

MARTI, J.; MARTI, L.; DOMMEL, H. **Transmission line models for steady-state and transients analysis**. IEEE. 744-750. 1993.

MARTI, J. R. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, n. 1, p. 147-157, 1982.

MARTI, L. Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices. **IEEE transactions on Power delivery**, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1099-1110, 1988.

MARTINEZ, J. A.; GUSTAVSEN, B.; DURBAK, D. Parameter determination for modeling system transients-Part I: overhead lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 2038-2044, 2005.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. **Power system transients: parameter determination**. CRC press, 2017. 1351834878.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. **Transient Analysis of Power Systems: A Practical Approach**. John Wiley & Sons, 2020. 1119480531.

MARTÍ, J. R.; TAVIGHI, A. Frequency-dependent multiconductor transmission line model with collocated voltage and current propagation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 33, n. 1, p. 71-81, 2017.

MESTRINER, D.; BRIGNONE, M.; PROCOPIO, R.; PIANTINI, A. *et al.* A new channel-base lightning current formula with analytically adjustable parameters. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 63, n. 2, p. 542-549, 2020.

MINGLI, W.; YU, F. Numerical calculations of internal impedance of solid and tubular cylindrical conductors under large parameters. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 151, n. 1, p. 67-72, 2004.

MORCHED, A.; GUSTAVSEN, B.; TARTIBI, M. A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1032-1038, 1999.

MORENO, P.; RAMIREZ, A. Implementation of the numerical Laplace transform: A review task force on frequency domain methods for EMT studies, working group on modeling and analysis of system transients using digital simulation, general systems subcommittee, IEEE Power Engineering Society. **IEEE Transactions on power delivery**, Piscataway, v. 23, n. 4, p. 2599-2609, 2008.

NANEVICZ, J.; VANCE, E.; HAMM, J. Observation of lightning in the frequency and time domains. **Electromagnetics**, New York, v. 7, n. 3-4, p. 267-286, 1987.

NAZARI, M.; MOINI, R.; FORTIN, S.; DAWALIBI, F. P. *et al.* Impact of frequency-dependent soil models on grounding system performance for direct and indirect lightning strikes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 63, n. 1, p. 134-144, 2020.

PAPADOPOULOS, T. A.; CHRYSOCHOS, A. I.; TRAIANOS, C. K.; PAPAGIANNIS, G. Closed-form expressions for the analysis of wave propagation in overhead distribution lines. **Energies**, Basel, v. 13, n. 17, p. 4519, 2020.

PAUL, C. R. Decoupling the multiconductor transmission line equations. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Piscataway, v. 44, n. 8, p. 1429-1440, 1996.

PETTERSSON, P. Image representation of wave propagation on wires above, on and under ground. **IEEE transactions on power delivery**, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 1049-1055, 1994.

PORTELA, C.; TAVARES, M. Modeling, simulation and optimization of transmission lines. Applicability and limitations of some used procedures. **IEEE Transmission and Distribution Latin America**, p. 38, 2002.

PORTELA, C. M.; TAVARES, M. C. Six-phase transmission line-propagation characteristics and new three-phase representation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 8, n. 3, p. 1470-1483, 1993.

RACHIDI, F.; TKACHENKO, S. **Electromagnetic field interaction with transmission lines: from classical theory to HF radiation effects**. WIT press, 2008. 1845640632.

SALARI, J. C.; PORTELA, C. A methodology for electromagnetic transients calculation—An application for the calculation of lightning propagation in transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 527-536, 2006.

SEIXAS, C. M. D. **Uma proposta de representação de sistemas de aterramento diretamente no domínio do tempo**. [S. l.: s. n.], 2017.

SEMLYEN, A.; DABULEANU, A. Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. 94, n. 2, p. 561-571, 1975.

SINGH, A.; MARTI, J. R.; SRIVASTAVA, K. D. Algorithms for fast simulation of transformer windings for diagnostic testing of power transformers. **IEEE transactions on power delivery**, Piscataway, v. 25, n. 3, p. 1564-1572, 2010.

SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. Dover Publications, 1968.

TAVARES, M.; PISSOLATO, J.; PORTELA, C., 1998, **New mode domain multiphase transmission line model-Clarke transformation evaluation**. IEEE. 860-864.

TLEIS, N. **Power Systems Modelling and Fault Analysis: theory and practice**. Elsevier Science, 2019. 9780128151181.

URIBE, F. A.; NAREDO, J. L.; MORENO, P.; GUARDADO, L. Electromagnetic transients in underground transmission systems through the numerical Laplace transform. **International journal of electrical power & energy systems**, London, v. 24, n. 3, p. 215-221, 2002.

WEDEPOHL, L. **Power system transients**: Errors incurred in the numerical inversion of the Laplace transform. [S. l.: s. n.], 1983

WEDEPOHL, L. M. Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, Stevenage, v. 110, n. 12, p. 2200-2212, 1963.

WEDEPOHL, L. M.; NGUYEN, H. V.; IRWIN, G. D. Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using Newton-Raphson method. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 11, n. 3, p. 1538-1546, 1996.

WG33, C. Guide ines for Representation of Network Elements when Calculating Transients. **CIGRE Technical Brochure**, 1990.

XU, W. Component modeling issues for power quality assessment. **IEEE Power Engineering Review**, Piscataway, v. 21, n. 11, p. 12-17, 2001.

ZANETTA JR, L. C. **Fundamentos de sistemas elétricos de potência**. [S. l.]: Editora Livraria da Física, 2006. 8588325411.

ZANON, F. O.; LEAL, O. E.; DE CONTI, A. Implementation of the universal line model in the alternative transients program☆. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 197, p. 107311, 2021.