

**INCLUSÃO DE TÉCNICAS APRIMORADAS PARA REPRESENTAÇÃO DE
PARÂMETROS DEPENDENTES DA FREQUÊNCIA EM MODELOS DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO (Título até 0.5 página)**

Candidato: Nome Completo

Orientador pretendido: Nome Completo

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos de Potência ou Sistemas Inteligentes e Robótica

RESUMO (até 200 palavras)

As descargas atmosféricas são um dos acontecimentos naturais mais frequentes na natureza. Existem vários mecanismos para proteger as pessoas, equipamentos e estruturas destes fenômenos naturais. As proteções contra descargas diretas direcionam e aterram a descarga. Desta maneira, os dispositivos, membros da tripulação e sistemas elétricos são protegidos de descargas diretas nas unidades de produção offshore. As proteções contra descargas induzidas protegem contra a radiação eletromagnética causada por uma descarga atmosférica. Esta radiação pode induzir ondas de sobretensão e sobrecorrente em dispositivos próximos da corrente de descarga atmosférica. Estas ondas são capazes de danificar os sistemas elétricos e as pessoas. Também apresentam um risco de explosão na presença de líquidos e materiais inflamáveis. Por estes motivos, este projeto propõe um estudo e redimensionamento dos sistemas de proteção elétrica de unidades de produção offshore contra sobretensões e contra sobrecorrentes decorrentes de descargas atmosféricas e de falhas no sistema elétrico de potência. O estudo e redimensionamento será baseado em critérios objetivos definidos com base no estado da técnica e na regulamentação aplicável. Desta maneira, pretende-se obter uma especificação com critérios técnicos e objetivos para ser aplicada em projetos existentes e futuros.

INTRODUÇÃO (até 1 página)

Sabe-se que a resposta em frequência é muito importante para a representação de sistemas em geral principalmente na análise de fenômenos transitórios, compostos por amplas faixas de frequências. Para modelar o sistema adequadamente, é necessário o conhecimento da resposta em frequência e dos parâmetros em função da frequência. No entanto, a maioria das análises são realizadas no domínio do tempo, enfatizando o projeto de pesquisa em questão, destaca-se análise de transitórios eletromagnéticos em sistemas de transmissão de energia elétrica. Em consequência, são necessários métodos matemáticos e computacionais para a inclusão do efeito da frequência em modelos computacionais desenvolvidos para simulações de sistemas de geração, transmissão e distribuição diretamente no domínio do tempo.

Os modelos de sistemas de transmissão, geração e transmissão tentam representar uma realidade eletromagnética nos equipamentos de forma que estes possam ser analisados e principalmente simulados em grande escala. Com este fim, existem diversas vertentes na representação de elementos de sistemas de potencia tais como linhas de transmissão.

Um modelo de linha de transmissão deve levar em consideração o efeito da frequência e a natureza distribuída e eventualmente não linear dos parâmetros¹. Os modelos além de precisos, devem ser compatíveis com outros modelos que operam principalmente no domínio do tempo e.g. *Electromagnetic Transient Program*² e *Universal Line Model*³.

Os modelos de linhas de transmissão podem ser categorizados de várias formas, uma destas divide as linhas de transmissão em aquelas a parâmetros concentrados e parâmetros distribuídos. Vários dos modelos nestas categorias incluem o efeito da frequência nos parâmetros da linha através da análise e representação dos seus modos. Os modos permitem a representação de linhas multi-condutor diretamente no domínio das fases, considerando o acoplamento entre fases. Em vários destes modelos, os elementos dos circuitos equivalentes são calculados a partir dos resíduos e polos obtidos da aplicação do *Vector Fitting*^{5,6,7,8}. O principal problema com esta abordagem é que a quantidade de polos é determinada aleatoriamente ou com critérios pobremente definidos. Em adição, a ordem (quantidade de polos) é considerada a mesma para todos os modos, sendo que cada modo tem uma impedância longitudinal e formato de curva diferente.

Considerando que o ajuste realizado nestes modelos não é eficiente e que em consequência estes modelos se tornam desnecessariamente complexos, sem ganhos na precisão nem na estabilidade, propõe-se incluir os métodos de dimensionamento da quantidade ótima de polos nos modelos mais modernos da cascata de parâmetros concentrados e na cascata de método das características. Através do dimensionamento ótimo das ordens de funções racionais, os circuitos serão simplificados e a complexidade computacional dos modelos será grandemente reduzida, sem reduzir a precisão e representando uma ampla faixa de frequências.

OBJETIVO (até 0.5 página)

A partir da inclusão do método de dimensionamento de circuitos ótimos, espera-se obter variações de modelos na literatura técnica altamente aprimorados, computacionalmente eficientes, e que consigam representar linhas de transmissão até 1 MHz. Os modelos de linhas de transmissão aprimorados poderão ser aplicados tanto na modelagem de linhas de transmissão aéreas trifásicas, com também, na modelagem de diversos outros componentes de sistemas de potência, tais como transformadores e cabos com mais de três modos de propagação.

METODOLOGIA (até 1 página)

Para incluir a metodologia desenvolvida na cascata de parâmetros concentrados com inclusão do efeito da frequência e na cascata de método das características com inclusão do efeito da frequência, são necessários os seguintes os passos

- a) Reescrever as equações diferenciais de ambos modelos para realizar o menor número de *floating point operations per second* (flops). As equações de estado devem permitir que a impedância longitudinal de cada modo seja aproximada com funções racionais de ordem diferente, coerente com a complexidade do modo.
- b) Generalizar os modelos para eles aceitar um sistema de equações ordinárias (ODE) no lugar da impedância longitudinal. Isto é realizado alterando as matrizes das equações de estado dos modelos, para eles incluir submatrizes.
- c) Determinar as novas matrizes de estado dos modelos, e verificar se é vantajoso armazenar elas como matrizes esparsas ou como matrizes completas.
- d) Escrever as equações dos modelos no domínio da frequência. Comparar as matrizes de transferência dos modelos com as matrizes de transferência da solução analítica de uma linha de transmissão.
- e) Comparar as respostas dos modelos aprimorados com outros modelos de linhas de transmissão modernos *e.g.* Universal Line Model.

Os modelos aprimorados serão implementados em Simulink para conseguir simular elementos não lineares, como retificadores e disjuntores. Neste caso, o desafio tecnológico será generalizar o método para que seja corretamente implementado no Simulink. Em termos gerais, o projeto de pesquisa tem como principal desafio aprimorar os modelos de linhas de transmissão para eles incluir o método do ajuste desenvolvido.

CRONOGRAMA (até 1 página)

Considerando um período de 24 meses, o projeto é estruturado nas seguintes etapas:

1ª etapa: Período para cursar as disciplinas e obter os créditos necessários para o programa.

2ª etapa: Levantamento bibliográfico sobre modelos de linhas de transmissão

3ª etapa: Implementação dos modelos de linhas de transmissão no domínio da frequência e do tempo

4ª etapa: Desenvolvimento dos aprimoramentos

5ª etapa: Divulgação dos resultados, publicação, qualificação e defesa

As etapas descritas anteriormente serão desenvolvidas de acordo com o cronograma mostrado na Tabela 1.

Etapas	Período(em meses)			
	1 - 6	7-12	13-18	19-24
1				
2				
3				
4				
5				

Tabela 1. Cronograma de execução do projeto.

REFERENCIAS (até 1 pagina)

- ¹ 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, v. 18, n. 2, p. 564–570, abr. 2003.
- ² DOMMEL, H. W. **Electromagnetic Transients Program Theory Book.** Portland, OR: Bonneville Power Administration, 1986f.
- ³ 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, v. 14, n. 3, p. 1032–1037, 1999k. ISSN 08858977. DOI 10.1109/61.772350.
- ⁴ MARTI, L. **Simulation of Transients in Underground Cables with Frequency-Dependent Modal Transformation Matrices.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 3, p. 1099–1110, 1988h. ISSN 19374208. DOI 10.1109/61.193892.
- ⁵ GUSTAVSEN, B. **Relaxed vector fitting algorithm for rational approximation of frequency domain responses.** Proceedings - 10th IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects, SPI 2006. *Anais...*2007vDOI 10.1109/SPI.2006.289202.
- ⁶ ARAÚJO, M. R.; BATISTA, E. A. **A practical first-zone distance protection formulation based on the nominal π transmission line model.** Electric Power Systems Research, v. 246, p. 111665, set. 2025.
- ⁷ SOUMA JINNO; TOKI, H.; ABE, M. Time-Domain Transmission Line Analysis Incorporating Frequency-Dependent Magnetic Material Properties. **2025 Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (APEMC).** p. 237–240, 19 maio 2025.
- ⁸ PETTANICE, G.; SPINA, D.; ANTONINI, G. Time and Frequency Macromodeling Techniques for Electromagnetic Systems with Propagation Delays. **2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP),** p. 1–5, 30 mar. 2025.