



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

SISTEMA BENCHMARK PARA TESTES DE FUNÇÕES BASEADAS NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES: UMA CONTRIBUIÇÃO DO GRUPO ESPELHO B5.55 BRASIL

NILO SÉRGIO SOARES RIBEIRO(1);FELIPE VIGOLVINO LOPES(2);FABIANO SCHMIDT(3);SÉRGIO FELIPE
FALCÃO LIMA(3);KLEBER MELO E SILVA(4);EDUARDO PASSOS AQUINO RIBEIRO(5);LUIZA
MENDONÇA AVIANI RIBEIRO
ELETROBRAS ELETRONORTE(1);UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA(2);EMPRESA DE PESQUISA
ENERGÉTICA - EPE(3);FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA(4);OPERADOR NACIONAL DO
SISTEMA ELÉTRICO ONS(5)

RESUMO

O presente trabalho visa apresentar o resultado de uma das atividades do Grupo Espelho B5.55 do Cigré Brasil, que tem como foco o estudo de funcionalidades baseadas na teoria de ondas viajantes (aqui chamadas de funções TW, do termo em inglês Traveling Waves). Trata-se de um sistema benchmark que contempla cenários de interesse para estudos sobre TW em redes elétricas realizados em programas do tipo Electromagnetic Transients Programs (EMTP). Tal sistema é, de acordo com a literatura, inédito, sendo mais abrangente do que outros sistemas teste reportados na literatura no que se refere ao teste de funcionalidades TW.

PALAVRAS-CHAVE

Benchmark, EMTP, faltas, ondas viajantes, sistemas elétricos de potência, transitórios eletromagnéticos.

1.0 1.0 INTRODUÇÃO

Diante da evolução dos sistemas elétricos de potência, do consequente aumento de sua complexidade e do aprimoramento da legislação pertinente, tem se tornado cada vez mais necessária a utilização de recursos computacionais para minimizar a quantidade aferições e intervenções em campo ~~apra-para~~ fins de validação e desenvolvimento de funcionalidades emergentes para monitoração da rede elétrica. Neste contexto, simulações computacionais se mostram atrativas, pois viabilizam análises confiáveis, evitando os impactos sistêmicos que poderiam culminar em casos de testes em campo no sistema real.

Considerando o exposto, nota-se que não só ferramentas computacionais de simulação têm sido demandadas, mas também modelos e sistemas que sejam coerentes com o mundo real e que contemplem situações operativas de interesse para avaliação e validação das tecnologias investigadas. Desse modo, fazem-se necessários sistemas de referência que permitam a coleta de resultados de simulações representativas quanto aos fenômenos verificados em sistemas reais, permitindo uma tomada de decisão quanto à viabilidade ou não de novas tecnologias. Como exemplo, destacam-se as funções TW, as quais ganharam popularidade notória nos últimos anos e que ainda carecem de sistemas de teste de referência, que permitam avaliar as particularidades cabíveis para esse tipo de tecnologia.

Alinhado o ideal supracitado, o Cigré tem desempenhado um papel muito importante em seus grupos de estudo, propondo sistemas de referência, que aqui serão referenciados como sistemas *benchmark*. No contexto do presente trabalho, dá-se destaque às atividades do Grupo Espelho B5.55 Brasil, que tem realizado estudos no âmbito de aplicações TW e de desenvolvimentos para suporte de pesquisas nesta área de conhecimento. De fato, os fenômenos associados à propagação de TWs em sistemas elétricos de potência é por si só desafiador, tendo em vista que requerem análises em escala de tempo da ordem de microssegundos, e que as características das frentes de onda podem mudar a depender do meio sobre o qual se propagam e também das características do evento gerador das ondas, tal como curtos-circuitos. Portanto, na indisponibilidade de um sistema de referência e de oscilografias reais com taxa de amostragem compatível com as tecnologias TW, análises são realizadas com base em diferentes modelos computacionais, o que, apesar de não comprometer a viabilidade de estudos na área, pode dificultar o debate uniforme entre grupos de pesquisa, ou mesmo impor incertezas quanto ao aproveitamento de achados científicos anteriores que permitiriam a continuidade dos avanços tecnológicos das funções TW.

Cientes da relevância do contexto citado, neste trabalho, propõe-se um sistema *benchmark* para programas EMTP visando o estudo de funções TW. O sistema proposto contempla uma vasta gama de cenários de interesse para análises de TWs em sistemas elétricos de potência, permitindo a simulação de transitórios eletromagnéticos compatíveis com os verificados em sistemas reais. Os desenvolvimentos foram realizados no âmbito do grupo espelho B5.55 Brasil e contou com a participação de diversos especialistas da área de análise de modelagem de

transitórios eletromagnéticos. Dos resultados obtidos, atesta-se a utilidade do sistema desenvolvido para estudos sobre TW, o qual se mostra inédito em nível mundial.

2.0 SISTEMA *BENCHMARK* EMTP PROPOSTO PARA ESTUDOS DE TWs

Na literatura, encontram-se disponíveis diversos sistemas *benchmark* que visam análises diversas. Esses modelos diferem em termos da finalidade dos estudos de interesse e da metodologia de simulação empregada, podendo apresentar complexidade variável a depender do objeto de estudo. No caso de funções TW, conforme mencionado anteriormente, programas EMTP se mostram como a melhor opção, visto que permitem a simulação de transitórios eletromagnéticos, havendo limitações controladas da abrangência do espectro de frequências dos sinais simulados a partir da escolha apropriada dos passos de cálculo empregados. Tal fato justifica a escolha de plataforma de simulação do sistema *benchmark* proposto, cujo desenvolvimento é realizado no programa *Alternative Transients Program* (ATP).

Analisando a literatura, verifica-se que para estudo de fluxo de carga e estabilidade transitória, por exemplo, os sistemas teste disponibilizados pelo IEEE são extensamente utilizados em atividades de desenvolvimento e de prova de conceito. Contudo, pouco se tem sobre sistemas teste em programas EMTP para estudos de funcionalidades TW. Na opinião dos autores, um dos que mais se adequariam a tal cenário investigativo seria o sistema *benchmark* disponibilizado pelo *Power System Relaying and Control Committee* (PSRC-IEEE), cuja documentação pode ser encontrada em https://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/EMTP_20Ref_20Model-Final.pdf, de livre acesso. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático do sistema teste disponibilizado pelo PSRC-IEEE. Nele é possível observar que o sistema é composto por duas fontes ideais atrás de uma impedância, sendo elas S1 e S3, uma máquina síncrona representada por S2, uma linha de circuito duplo entre as barras BUS 1 e BUS 2, uma linha a circuito simples entre as barras BUS 2 e BUS 4 e um TAP de linha (derivação) entre o trecho de linha mZ_{L1} e a barra BUS 3. O sistema conta também com a representação de transformadores de potencial capacitivo (TPC) e transformadores de corrente (TC) instalados nas barras BUS 1, BUS 2 e BUS 3. https://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/EMTP_20Ref_20Model-Final.pdf, sendo de livre acesso.

Na Figura 1, apresenta-se um diagrama esquemático do referido sistema, no qual incluem-se duas fontes equivalentes de ~~Thévenin~~ *Thevenin* representadas por S1 e S3, uma máquina síncrona representada por S2, uma linha de circuito duplo entre as barras BUS 1 e BUS 2, uma linha a circuito simples entre as barras BUS 2 e BUS 4 e um TAP de linha (derivação) conectado a uma distância *m* da barra BUS 1. O sistema conta também com a representação de transformadores de potencial capacitivo (TPC) e transformadores de corrente (TC) instalados nas barras BUS 1, BUS 2 e BUS 3. Cabe destacar que os transformadores para instrumentos são disponibilizados originalmente visando estudos de funções de proteção fasorial. No entanto, os modelos permitem a simulação de transitórios associados às suas respostas em frequência, com diferentes limitações da representação do espectro. Por exemplo, o modelo de transformador de corrente (TC) é considerado confiável para estudos de altas frequências, se adequando perfeitamente a pesquisas sobre funções TW. Por outro lado, os transformadores de potencial capacitivos (TPC) são capazes de representar frequências até a ordem de 10 kHz, recaindo em atenuações mais relevantes de transitórios de falta pela ausência da modelagem de capacitâncias espúrias que poderiam ~~surgir e impactar nas~~ *surgir e impactar nas* altas frequências. Mesmo assim, tais modelos são considerados representativos, sendo aproveitados no sistema proposto.

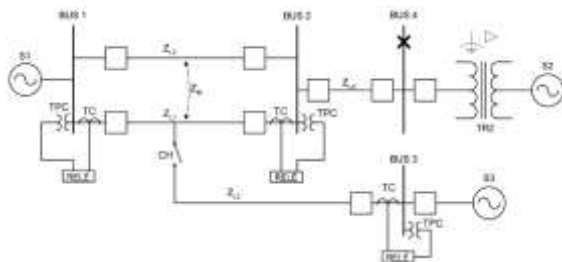


Figura 1 – Sistema teste disponibilizado pelo PSRC-IEEE.

Os parâmetros elétricos das linhas foram calculados por meio da subrotina *Line Cable Constants* (LCC), disponível na instalação do ATP, o qual é utilizado para realizar as simulações e para implementar os modelos em um arquivo principal em forma de arquivos “perfurados” ou arquivos .pch (*punch files*). Com isso, confere-se flexibilidade para alteração dos modelos em uso sem a necessidade de se alterar o arquivo base principal. As fontes S1 e S3 são do tipo fonte ideal e a fonte S2 uma máquina síncrona do tipo 59. O transformador foi representado por meio do modelo BCTAN, representando um transformador por meio de sua matriz impedância e possibilitando a representação do

Comentado [fs1]: É o link que está abaixo?

Formatado: Fonte: (Padrão) Arial

Comentado [fs2]: Este texto parece similar ao anterior.

Comentado [fs3]: Já vi locais definindo como “Line Constants, Cable Constants and Cables Parameters”. Sempre fico na dúvida qual é a definição dessa sigla.

acoplamento magnético existente em transformadores trifásicos. Os transformadores de corrente e de potencial capacitivo foram representados conforme [2].

Apesar de sua representatividade para estudos de proteção fasorial, o sistema teste desenvolvido pelo PSRC-IEEE possui peculiaridades que podem limitar a abrangência de avaliações de aplicações TW. De fato, as TWs possuem formas que dependem dos meios de propagação, das discontinuidades ao longo da rede elétrica e das terminações no entorno dos pontos de medição, características essas em número reduzido no sistema PSRC-IEEE. Sendo assim, a partir de estudos dos aspectos sistêmicos de interesse para pesquisas sobre TWs e para avaliação de dispositivos com funções TW, o grupo B5.55 Brasil propôs a ampliação do sistema PSRC-IEEE, dando origem ao modelo *benchmark* que será chamado daqui em diante como sistema CIGRE-B5-TW. No modelo, considera-se a representação detalhada de diversas partes do sistema que não se fazem presentes em modelos *benchmark* anteriores, permitindo a realização de estudos mais abrangentes sobre funcionalidades TW, a exemplo de algoritmos de proteção, localização de faltas e de outras funcionalidades para análise de faltas.

O referido sistema tem sido largamente empregado por acadêmicos e profissionais da área de proteção ao redor do mundo, e os resultados são bem satisfatórios para testes de lógicas e esquemas convencionais. Entretanto, dadas as peculiaridades envolvidas com a aplicação das TW, o referido sistema não tem condições de reproduzir todas as características de tal fenômeno, principalmente pelo fato de que as TW são sensivelmente afetadas pelas discontinuidades ao longo do sistema elétrico e pelo meio ao qual as ondas eletromagnéticas se propagam. Sendo assim, a representação detalhada de múltiplos meios de transmissão, por linhas aéreas, subterrâneas e subaquáticas, das subestações e do solo, possibilita que sejam estudadas a influência dessas variáveis no desempenho de proteções no domínio do tempo utilizando as TW.

3.0 SISTEMA *BENCHMARK* PROPOSTO PELO GRUPO ESPELHO B5.55 BRASIL

Com vistas a preencher as lacunas apresentadas no sistema teste descrito no item acima, foi desenvolvido no âmbito do grupo B5.55 subgrupo G1, após várias discussões, um sistema para ser utilizado como *benchmark* para estudos de lógicas e esquemas de proteção no domínio do tempo utilizando as funções TW disponíveis em alguns equipamentos no mercado. O desenvolvimento do sistema teve como premissa manter algumas características do sistema do PSRC, tais como o TAP derivado de umas das linhas de circuito duplo e uma máquina síncrona conectada, embora estas sejam as únicas características mantidas. O sistema proposto pelo B5.55 Brasil é composto por 12 barras, sendo que 3 dessas barras são representações detalhadas dos barramentos de subestações na configuração barra dupla com disjuntor e quatro chaves, arranjo típico de subestações em nível de 230 kV utilizadas no Brasil. As linhas de transmissão foram configuradas de forma a refletir as topologias mais utilizadas no Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo linhas de circuito simples, circuitos duplos, circuitos perfeitamente transpostos, circuitos transpostos via blocos de transposição, linhas não homogêneas, linhas com compensação série e shunt e

O sistema CIGRE-B5-TW é composto por 12 barras, sendo três dessas barras modeladas a partir de representações detalhadas dos barramentos de subestações na configuração barra dupla com disjuntor e quatro chaves, que é o arranjo típico de subestações em nível de 230 kV no Brasil. As linhas de transmissão foram configuradas de forma a refletir as topologias mais utilizadas no Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo linhas de circuito simples, circuitos duplos, circuitos perfeitamente transpostos, circuitos transpostos via blocos de transposição, linhas não homogêneas, linhas com compensação série e shunt e linhas híbridas, além de modelos de TCs e TPCs, conforme mencionado anteriormente. Os modelos desenvolvidos serão detalhados nas subseções a seguir. Na Figura 2, apresenta-se o modelo do sistema CIGRE-B5-TW implementado no ATP/ATPDraw.

Comentado [fs4]: Este texto parece similar ao anterior.

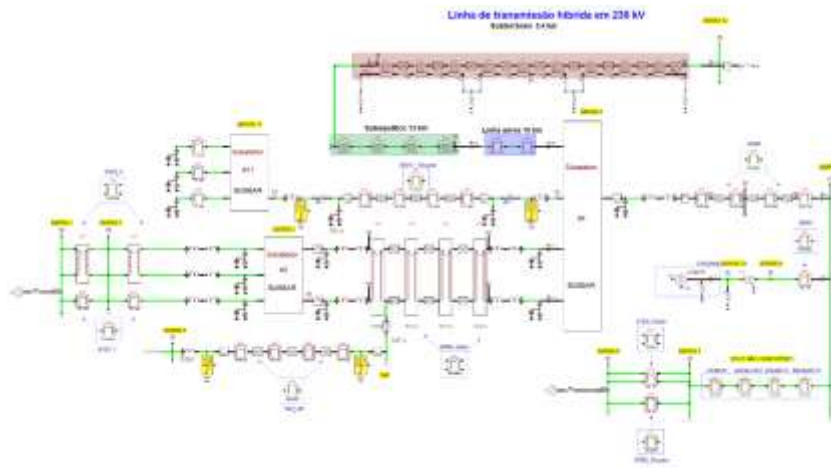


Figura 2 – Sistema *benchmark* CIGRE-B5-TW.

3.1 - Modelos das linhas de transmissão aéreas

Conforme mencionado anteriormente, o principal objetivo do sistema *benchmark* CIGRE-B5-TW consiste em disponibilizar para a comunidade científica e industrial um modelo EMTP que seja capaz de fornecerem que seja possível simular sinais de tensão e corrente realísticos, representando apropriadamente as TWs e contemplando a maior quantidade possível de variáveis que influenciam funções TW. Para tanto, várias configurações são consideradas no sistema ilustrado na Figura 2, tais como:

Circuito entre as barras 1, 2 e 3 (50 km + 40 km):

- Circuito duplo: 2 x Cuckoo 795 MCM/ OPGW 24 FO e Dottrel na torre Danúbio;
- Circuito simples: 2 x Grosbeak 636 MCM 26/7/ OPGW 24 FO e Dottrel na torre convencional.

Circuito entre as barras 3 e 4 (200 km):

- Circuito duplo: 2 x Cuckoo 795 MCM/ OPGW 24 FO e Cochín na torre Danúbio.

Circuito entre o TAP e a barra 5 (225 km):

- Circuito simples: 1 x Tern 795 MCM/ OPGW 24FO e Brahma, torre convencional.

Circuito entre as barras 4 e 6 (100 km):

- Circuito simples: 3 x ACAR 700 18/19/ OPGW 24FO e Dorking, torre Delta.

Circuito entre as barras 4 e 12 (10 km + 13 km + 5,4 km):

- Circuitos simples trecho aéreo: 1 x ACSR-Ruddy 900 MCM/ OPGW 13,3 mm e EARHS 3/8", torre compacta;
- Circuito simples trecho subaquático: 1 x Single-Core Underwatermonopolar 230 kV - XLPE - Al 1200 mm²;
- Circuito simples trecho subterrâneo: 1 x Single-Core Undergroundmonopolar 230 kV - XLPE - Al 1600 mm².

Circuito entre as barras 6 e 7 solo não homogêneo (30 km + 30 km + 30 km + 30 km):

- Circuito simples trecho Micaxisto: 2 x Rail 954 MCM 45/8/ OPGW 24FO e Dorking, torre compacta;
- Circuito simples trecho Granito: 2 x Rail 954 MCM 45/8/ OPGW 24FO e Dorking, torre compacta;
- Circuito simples trecho Argiloso: 2 x Rail 954 MCM 45/8/ OPGW 24FO e Dorking, torre compacta;
- Circuito simples trecho Humus: 2 x Rail 954 MCM 45/8/ OPGW 24FO e Dorking, torre compacta.

Circuito entre as barras 6 e 9 (120 km):

- Circuito simples: 2 x ACAR 850 MCM 18/19/ OPGW 24FO e Dottrel, torre monomastro estaiada.

Circuito entre as barras 7 e 8 (100 km):

- Circuito duplo: 2 x Grosbeak 636 MCM 26/7/ OPGW 24FO e Brahma, torre tronco piramidal;

- Circuito simples: 2 x Grosbeak 636 MCM 26/7/ OPGW 24FO e Brahma, torre monomastro estaiada.

Circuito entre as barras 11 e TPC no terminal remoto (37,5 km + 15 km + 17 km):

- Circuito simples: 1 x Tern 795 MCM/ OPGW 24FO e Brahma, torre convencional;
- Circuito simples: 1 x Grosbeak 636 MCM 26/7/ OPGW 24 FO e Brahma, torre monomastro estaiada;
- Circuito simples: 2 x Grosbeak 636 MCM 26/7/ OPGW 24 FO e Dottrel na torre convencional.

Como o sistema foi desenvolvido no ambiente do ATP/ATPDraw, versão 7.2 [3], optou-se por representar as linhas diretamente pelos elementos LCC, o que possibilita que todos os modelos de linhas de transmissão disponíveis na referida ferramenta sejam utilizados em caso de interesse. Ainda assim, como ajuste padrão, todas as linhas foram modeladas segundo o modelo J Marti, o qual permite a avaliação das TWs considerando a variação dos parâmetros elétricos das linhas em função da frequência dos transientes.

3.2 - Representação das subestações

Tendo em vista a possibilidade de haver comportamentos diferentes das TW em função da configuração da subestação, três das doze barras foram representadas em detalhes de sua topologia. Os barramentos não foram representados por seus parâmetros elétricos, mas as capacitâncias parasitas dos equipamentos das subestações foram modeladas, conforme apresentado em [4] e [5]. Apresenta-se na Figura 3 a modelagem no ATP/ATPDraw das subestações modeladas em detalhe, onde é possível observar a configuração barra dupla e disjuntor à-a quatro chaves, em conjunto com as capacitâncias parasitas. Por questões de organização, as SEs foram encapsuladas "white boxes" por meio da funcionalidade "Compress" do ATPDraw.

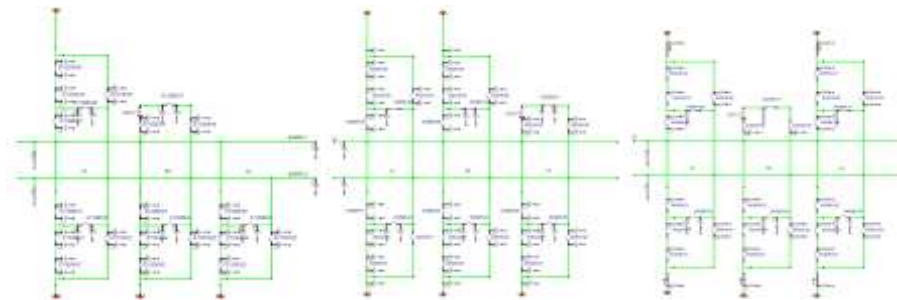


Figura 3 – Subestações detalhadas no sistema CIGRE-B5-TW: (a) SE #3; (b) SE #4; (c) SE #11.

3.3 - Representação da linha híbrida

A linha híbrida do sistema ~~benchmark~~ CIGRE-B5-TW é constituída por ~~três~~ trechos compostos por linha aérea, linha subterrânea e linha subaquática. Visando modelos mais realísticos, nas suas definições buscou-se, sempre que possível, referências e condicionantes de ordem prática. Nesse sentido, os modelos foram desenvolvidos com base na LT 230 kV Ratoões – Biguaçu, ~~muito embora eles não representem com exatidão a mesma~~. Esta LT foi recomendada pelo planejamento no estudo [5], licitada no Leilão de Transmissão nº 02/2018, e atualmente está em fase de construção, com entrada em operação prevista para dezembro de 2022. É importante destacar que, nessa linha híbrida, os modelos tendem a ser mais complexos, requerendo maior cuidado na ~~suas~~ representação dos modelos. Assim, ~~uma~~ exclusivamente na linha híbrida ~~e neste momento~~, visando viabilizar a validação dos modelos, consideraram-se trechos com parâmetros constantes na frequência, o que não exige o modelo da possibilidade de representar os diferentes tempos de propagação das TWs nos trechos distintos. Segundo pesquisa realizada pelo grupo B5.55 Brasil, a não homogeneidade nos tempos de propagação e diferentes níveis de atenuação das ondas de modo aéreo consistem nas maiores problemáticas a serem avaliadas em linhas híbridas, fato esse que demonstra a viabilidade de uso no modelo proposto neste tipo de análise.

3.3.1 Trecho aéreo

Este trecho da linha foi representado ~~per~~ com cabos CAA Ruddy (900 MCM) nas fases e cabos tipo EAR 3/8" e OPGW 13,3 mm como cabos guarda. A silhueta da estrutura utilizada foi a "cara de cão", em circuito simples, com vão médio de 450 m e temperatura de 50 °C. ~~Foi utilizada uma tração de 20% da carga de ruptura do cabo.~~ A Tabela trecho aéreo conforme empregado no sistema teste.

Tabela 1 – Coordenadas dos cabos na estrutura e flechas – silhueta típica

Elemento	X [m]	Y [m]	Flecha [m]
Fase A	-4,3	26,4	17,8
Fase B	0	30,6	17,8
Fase C	4,3	26,4	17,8
Para-raios 1	-3,5	33,3	14,9
Para-raios 2	3,5	33,3	14,9

3.3.2 Trecho subaquático

Foram adotados cabos monopolares isolados a XLPE, de Alumínio 1200 mm². Esta escolha visa atender ao requisito de corrente do projeto *original*, de 1100 A. Certas limitações são observadas quando da representação de tais tipos de cabos em programas do tipo EMTP. De fato, os cabos isolados possuem detalhes construtivos bastante particulares, e por isso, para um maior detalhamento geral das suas características, sugere-se verificar [6] e [7]. Não obstante, é sabido que os modelos de cabos isolados disponíveis no ATP/ATPDraw apresentam limitações para a representação de todos os detalhes construtivos reais. Basicamente, os modelos permitem a entrada de, no máximo, três camadas metálicas e três camadas isolantes. Além disso, essas camadas são consideradas como tubos de material uniforme.

Por outro lado, as tecnologias que envolvem a fabricação dos mesmos têm evoluído e novos materiais têm se consolidado. Essa evolução tem sido fortemente capitaneada pela necessidade de mitigação de efeitos térmicos que diminuem a capacidade térmica desse tipo de instalação. Logo, diversos aspectos construtivos, como encordoamento, fitas bloqueadoras, camadas semicondutoras, camadas de diferentes materiais etc, não podem ser explicitamente representados. Assim, é prática comum e necessária realizar correções nos dados físicos para a entrada no *software* que visem uma reprodução mais realista nas simulações dos modelos, conforme tratado em [8], [9] e [10]. Todos os referidos procedimentos foram seguidos considerando as características do cabo subaquático listadas na Tabela 2.

Formatado: Fonte: Itálico

Tabela 2 – Características principais do cabo subaquático – 1200 mm²

Camada	Material	Espessura [mm]	Diâmetro [mm]
Condutor	Alumínio	-	43,20
Blindagem do condutor	Semicondutor	2,40	48,00
Isolação	XLPE	20,00	88,00
Blindagem da isolação	Semicondutor	1,80	91,60
Blindagem metálica	Liga de Chumbo	2,50	96,60
Capa anticorrosiva <i>HDPE</i>	<i>HDPE</i> semicondutor	2,11	100,82
Enchimento	Fios de plástico	6,00	112,82
Berço de armadura	Fios de PP com betume	2,30	117,42
Armadura (94 fios)	Cobre	3,50	124,42
Cobertura	Fios de PP com betume	4,40	133,22

Foje ao escopo deste trabalho apresentar os detalhes das correções acima descritas. Entretanto, *à* título de orientação, é importante destacar que as principais correções realizadas são aplicadas nos dados do condutor, nos dados da blindagem metálica, nos dados da armadura, nos dados da isolação, nos dados do berço de armadura, enchimento e capa anticorrosiva, bem como nos dados da cobertura. Outro ponto de destaque é a questão das transposições, conexões e aterramentos das blindagens, as quais foram representadas dentro do cabível para os testes de interesse. Uma vez que esses detalhes consistem em tópicos muito específicos, indica-se a leitura dos documentos [11], [12] e [13].

Para a validação do modelo computacional, normalmente se compara os parâmetros obtidos *a 60 Hz* com cálculos propostos por bibliografias técnicas, com *data-sheets* de cabos, ou mesmo com outro *software*. Neste trabalho optou-se por comparar com os parâmetros calculados pelo *software* CYMCAP [14], que é uma ferramenta amplamente utilizada no mundo, sendo, portanto, uma referência confiável. A partir dos resultados dispostos na Tabela 3 pode-se concluir que as diferenças mais importantes estão nas reatâncias, especialmente na sequência zero. Não obstante, como a maior diferença ainda é inferior a 5 %, julga-se que o modelo obtido está adequado para este trabalho. *Para a validação do modelo computacional, normalmente se comparam os parâmetros obtidos com cálculos propostos por bibliografias técnicas, com data-sheets de cabos, ou mesmo com outro software. Neste trabalho optou-se por comparar com os parâmetros calculados pelo software CYMCAP [14], que é uma ferramenta amplamente utilizada no mundo, sendo, portanto, uma referência confiável. A partir dos resultados dispostos na Tabela 3, pode-se concluir que as diferenças mais importantes estão nas reatâncias, especialmente na sequência zero. Não obstante, como a maior diferença ainda é inferior a 5 %, julga-se que o modelo obtido está adequado para este trabalho.*

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: Itálico

Tabela 3 – Comparação entre parâmetros do trecho subaquático *a 60 Hz* – ATP *versus* CYMCAP

Fonte	r1 [Ω/km]	x1 [Ω/km]	r0 [Ω/km]	x0 [Ω/km]	b [μS/km]
ATP	0,0525	0,0930	0,0524	0,0927	86,4,930
CYMCAP	0,0527	0,0945	0,0525	0,0942	86,4,618
Erro [%]	-0,38 %	-1,59 %	-0,19 %	-1,59 %	0,04 %

Formatado: Fonte: Itálico

3.3.3 Trecho subterrâneo

Foram adotados cabos monopolares isolados a XLPE, de Alumínio 1600 mm². Esta escolha visa atender ao requisito de corrente do projeto original, de 1100 A. Assim como no caso do trecho subaquático, aAs limitações dos modelos são basicamente as mesmas ~~daquelas discutidas na Seção 1.3.2~~. Na Tabela 4, apresentam-se as características subterrâneas.

Tabela 4 – Características principais do cabo subterrâneo – 1600 mm²

Camada	Material	Espessura [mm]	Diâmetro [mm]
Condutor	Alumínio	-	49,00
Blindagem do condutor	Semicondutor	1,80	52,60
Isolação	XLPE	23,00	98,60
Blindagem da isolação	Semicondutor	2,30	103,20
Blindagem metálica (90 fios, passo de 8)	Cobre	1,85	106,90
Capa laminada	Alumínio	0,25	107,40
Cobertura	HDPE	4,50	116,40

As estratégias adotadas para os ajustes nos dados, em geral, também são as mesmas empregadas nos cabos subaquáticos. ~~Ressalta-se, porém, que as dimensões do cabo foram mantidas fixas.~~ A Tabela 5 apresenta uma comparação entre os valores obtidos pela utilização da subrotina LCC do ATP e o software CYMCAP.

Tabela 5 – Comparação entre parâmetros do trecho subterrâneo a 60 Hz – ATP versus CYMCAP

Fonte	r1 [Ω/km]	x1 [Ω/km]	r0 [Ω/km]	x0 [Ω/km]	b [μS/km]
ATP	0,0212	0,2436	0,0894	0,0750	83,4,440
CYMCAP	0,0212	0,2467	0,0895	0,0785	83,4,044
Erro [%]	0,00 %	-1,26 %	-0,11 %	-4,46 %	0,05 %

Assim como no caso do trecho com cabos subaquáticos, a maior diferença ainda é inferior a 5 %, julgando-se que o modelo obtido está adequado para este trabalho.

3.4 - Solo não-homogêneo e transposições

A resistividade do solo ao longo das linhas de transmissão podem afetar diretamente os seus parâmetros elétricos, fato este que se torna relevante especialmente quando consideradas análises de transitórios eletromagnéticos em uma vasta faixa de frequências. Normalmente, as resistividades dos solos são assumidas uniformes mesmo quando consideradas linhas muito longas. Entretanto, sabe-se que tal condição não é realística. Portanto, visando contemplar um cenário de solo heterogêneo, em que se recai em uma não-homogeneidade dos parâmetros elétricos da linha, em especial os de sequência zero, considera-se no sistema CIGRE-B5-TW uma linha que é seccionada-particionada em trechos modelados com valores de resistividade do solo que variam ao longo da rede elétrica. Esses valores foram obtidos a partir do agrupamento de medições em um sistema real, permitindo a modelagem de um cenário bastante realístico. Em resumo, a linha aérea é modelada via modelo J Marti, sendo seccionada-particionada em quatro trechos com resistividades de 92.34 (Humus) 346.95 (Argiloso), 546.19 (Granito) e 79.51 (Micaxisto) Ωhm.m.

Um outro aspecto relevante do sistema elétrico que pode interferir no estudo de funções TW se refere à transposição de linhas de transmissão. Em muitos trabalhos, as linhas são consideradas perfeitamente transpostas, muito embora tal prática não reflita exatamente as incertezas dos ciclos de transposição verificados em alguns sistemas. Desse modo, o sistema CIGRE-B5-TW contempla linhas perfeitamente transpostas e linhas transpostas a partir de trechos não transpostos com permuta de fases implementada via blocos de transposição. Desse modo, permite-se que que estudos de TW modais e de fase sejam realizados de forma mais realística.

4.03 UTILIZAÇÃO DO MODELO E RESULTADOS OBTIDOS

O sistema teste foi desenvolvido no ATPDraw, versão 7.2. Devido às diferenças de desenvolvimento entre as versões 6.x e 7.x do ATPDraw, o sistema somente poderá ser utilizado em versões superiores. O sistema foi executado na versão ATP Laucher Ver 1.20, com tpbig padrão (instalado na versão 1.20 do ATP, via ATP Easy Installer, disponível para download no sítio <http://ps.eei.eng.osaka-u.ac.jp/iaug/support/ATPeasy/>, acessível a usuários devidamente autorizados a utilizar o ATP), e passo de integração de 1 μs. Dessa forma, espera-se que não sejam verificados problemas quanto à execução do sistema em questão.

Com o objetivo de ilustrar algumas das aplicações do sistema aqui proposto, foram realizadas algumas simulações de faltas em alguns pontos do sistema. Para tanto, foram aplicadas faltas monofásicas em quatro pontos distintos, à saber:

- Caso 1 - Falta monofásica aplicada no meio da linha entre as barras 4 e 6, na fase A;
- Caso 2 - Falta monofásica aplicada no meio da linha de circuito duplo entre as barras 3 e 4;

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Recuo: À esquerda: 0 cm, Deslocamento: 0,63 cm, Espaço Antes: 12 pt, Vários níveis + Nível: 1 + Estilo da numeração: 1, 2, 3, ... + Iniciar em: 3 + Alinhamento: Esquerda + Alinhado em: 0 cm + Recuar em: 0,63 cm

- Caso 3 - Falta monofásica no meio de cada um dos circuitos da linha híbrida entre as barras 4 e 12;
- Caso 4 - Falta interna na SE 04;
- Caso 5 - Falta externa na SE 04

Devido às limitações de espaço deste Informe Técnico (IT), apenas os cinco casos acima foram executados e algumas grandezas foram apresentadas nos gráficos da figura abaixo. Contudo, várias são as possibilidades de utilização do sistema teste aqui proposto.

A forma mais adequada para quantificar as TW incidentes e refletidas é por meio da utilização de algoritmos que sejam capazes de detectar variações nas formas de onda de tensão ou de corrente. Para tanto, na literatura encontramos vários trabalhos cujo foco é a aplicação de técnicas para a detecção de variações nos valores de grandezas elétricas, tais como as ondas transitórias provocadas manobras na rede elétrica, descargas atmosféricas, curtos-circuitos entre outros fenômenos.

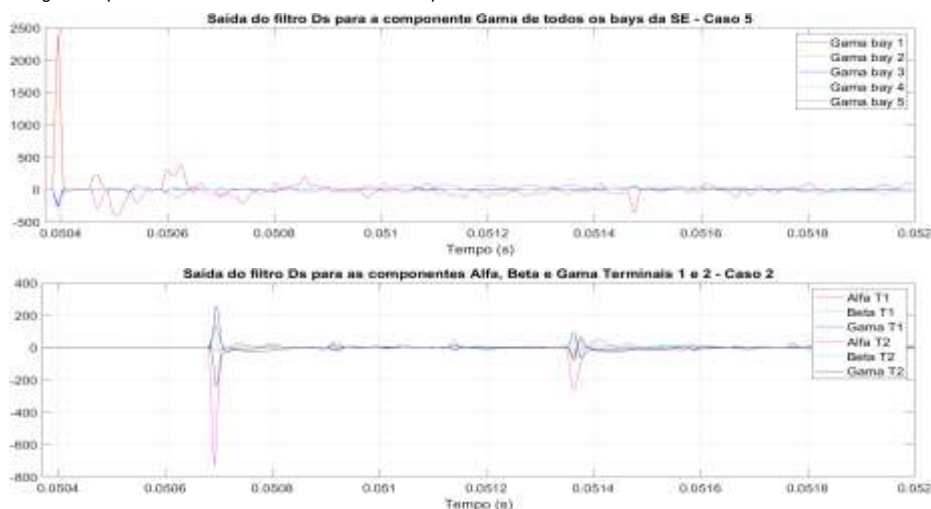
Uma forma tradicionalmente utilizada para a detecção de distúrbios na rede elétrica é por meio da aplicação da transformada Wavelet, a qual, devido às suas características, é capaz de detectar distúrbios na forma de onda de tensões e correntes por menores que sejam as suas variações.

Outra técnica que vem sendo empregada em diversos equipamentos baseados em TW é o filtro digital *Differentiator-Smoother*, ou Filtro DS, o qual apresentará um sinal de saída triangular para sinais de entrada na forma de degraus. Maiores informações acerca da aplicação deste tipo de filtro em sistemas de proteção podem ser encontradas em [14].

Neste trabalho foram utilizadas as transformadas de Clarke, para desacoplar as grandezas de fase em grandezas Alfa, Beta e Gama, as quais foram aplicadas na entrada dos filtros DS.

O principal propósito no desenvolvimento do sistema teste objeto deste IT é o de fornecer registros oscilográficos para ajustes e testes de funções TW que sejam o mais próximo possível de registros reais que ~~têm~~ sido observados. De fato, diversas publicações científicas têm destacado que quando se comparam os resultados de oscilografias reais com simulações computacionais onde as linhas de transmissão estejam representadas por modelos com parâmetros variantes com a frequência (J Marti) são os que mais se aproximam do observado em campo, motivo pelo qual utilizamos tal tipo de modelo no sistema teste.

A Figura 4 apresenta as formas de onda de corrente para os cinco casos descritos acima.



Comentado [fs5]: Numeração referente ao CYMCAP.

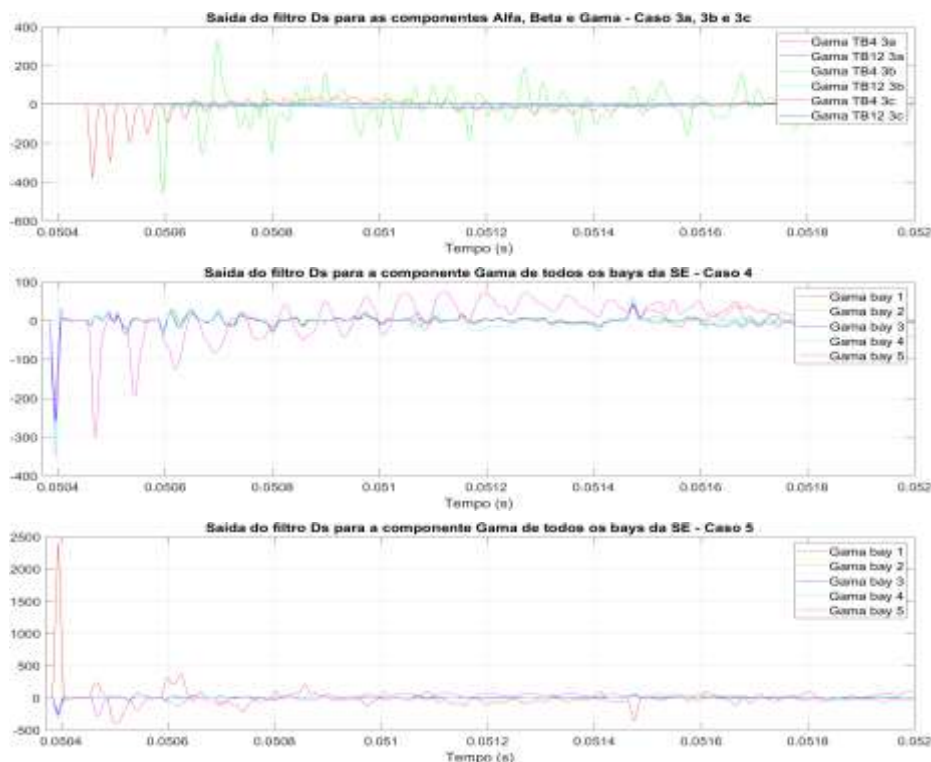


Figura 4 – TW de corrente para os cinco casos analisados.

5.04 CONCLUSÕES

Os elementos da rede elétrica foram representados de forma a considerar os principais aspectos relevantes à representação da dinâmica das TW em sistemas elétricos de potência. Com isso, na falta de registros reais, as oscilografias geradas pelo sistema teste poderão ser utilizadas para a realização de estudos e provas de conceito de funções e algoritmos de proteção baseados nos conceitos associados às TW. O sistema também permite que várias configurações sejam analisadas, possibilitando a análise da influência da topologia da rede no desempenho das funções TW.

6.05 REFERÊNCIAS

- [1] Kundur, Prabha: Power System Stability and Control, 1994.
- [2] P. IEEE, EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing Report, , <http://www.pes-psrc.org>, Power System Relaying Committee, draft 10a, Dec. [Online]. Available, 2004.
- [3] L. P. F. P. Hans Kristian Høidalen, ATPDRAW version 7.3 for Windows Users' Manual, 2021.
- [4] A. Greenwood, Electrical transients in power systems, 2ª edição, 1991.
- [5] F. F. T. T. Force, "MODELING GUIDELINES FOR FAST FRONT TRANSIENTS," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, 1996.
- [6] Cigre, Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables. Technical Brochure n° 556. WG C4.502, 2013.

- [7] CIGRE, Cable Systems Electrical Characteristics. Technical Brochure n° 531 WG B1.30, 2013.
- [8] B. M. J. A. & D. D. Gustavsen, "Parameter determination for modeling system transients-Part II: Insulated cables," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 20, Issue: 3, pp. 2045 - 2050., 2005.
- [9] B. Gustavsen, "Panel session on data for modeling system transients insulated cables.," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001.
- [10] G. B. M. P. M. G. M. M. d. O. F. G. d. O. H. P. d. O. V. R. S. J. Rosas, "Desafios da Modelagem no ATP dos Parâmetros Elétricos da LT 230 kV Curitiba Centro - Uberaba, Circuito Duplo Subterrâneo," em *XXV SNTPEE*, Belo Horizonte, MG, 2019.
- [11] Cigré, "The design of specially bonded cable systems, ELT_028_2. WG 21.07," 1973.
- [12] Cigré, "The design of specially bonded cable systems (Second part), ELT_047_3. WG 21.07," *ELECTRA*, 1976.
- [13] Cigré, Special bonding of high voltage power cables. Technical Brochure n° 283. WG B1.18, 2005.
- [14] CYME, "https://www.cyme.com/software/cymcap/," 2021. [Online].

DADOS BIOGRÁFICOS



É engenheiro eletricitista, mestre em Qualidade da Energia Elétrica e doutorando em Proteção de Sistemas Elétricos. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em simulações digitais de sistemas de transmissão, especialista em transitórios eletromagnéticos e fluxo de carga, modelagem computacional, planejamento energético, qualidade da energia e eficiência energética. Atualmente é engenheiro da ELETROBRAS-ELETRONORTE, em Brasília, atuando na área de estudos elétricos da operação, e Docente no Centro Universitário de Brasília - UniCeub, ministrando as disciplinas de Análise de Sistemas de Potência, Circuitos Polifásicos e Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.

(2) FELIPE VIGOLVINO LOPES

Possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), concluídos em 2009, 2011 e 2014, respectivamente, e pós-doutorado pela UFCG em 2018. É Senior Member do IEEE e membro do Comitê de Estudos B5 do Cigré. Trabalhou como professor da Universidade de Brasília (UnB) de 2014 a 2021 em níveis de graduação e pós-graduação e, em 2021, assumiu o cargo de professor do quadro permanente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Tem experiência nas áreas de Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, Localização de Falhas, e Transitórios Eletromagnéticos.

(3) FABIANO SCHMIDT

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFMT em 2010. Possui mestrado e doutorado pela UNICAMP em 2013 e 2017, respectivamente, onde realizou pesquisas em modelagem matemática/computacional na área de estimação de estado em sistemas de energia elétrica. É analista na Superintendência de Transmissão de Energia da EPE desde 2015. Nesse período tem trabalhado com estudos elétricos para o planejamento da expansão da transmissão.

(4) SÉRGIO FELIPE FALCÃO LIMA

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará em 2012. Mestre pelo Programa de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ingressou no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em 2013, onde atuou em estudos de ampliações e reforços no Sistema Interligado Nacional (SIN). Desde 2015, é Analista de Pesquisa Energética na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e tem trabalhado com estudos de planejamento da transmissão do SIN, com ênfase em estudos de transitórios eletromagnéticos e linhas de transmissão.

(5) KLEBER MELO E SILVA

Recebeu os títulos de B.Sc., M.Sc. e D.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em 2004, 2005 e 2009, respectivamente. Atualmente é Professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), editor associado da *IEEE Transactions on Power Delivery*, membro do Comitê de Estudos B5 (Proteção e Automação) do Cigré e membro do Conselho de Assessoramento Científico (CAC) da FAPDF. De 2019 a 2020 foi professor visitante na Texas A&M University, Texas/US. Tem focado suas pesquisas principalmente na área de proteção de sistemas elétricos de potência, localização de falhas e Transitórios Eletromagnéticos.

(6) EDUARDO PASSOS AQUINO RIBEIRO

Atualmente, atua Trainee no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) na Diretoria de Operação (DOP), como colaborador da Gerência de Análise de Desempenho e de Custos de Operação (AOC). cursando Doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (UnB), em Proteção de Linhas de Transmissão. Mestre em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (UnB) - (2018-2020), em Proteção de Linhas de Transmissão. Graduado no curso de Engenharia Elétrica na Universidade de Fortaleza - UNIFOR (2013-2017). Tem experiência

na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Análise e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência.

(7) LUIZA MENDONÇA AVIANI RIBEIRO

Luiza Mendonça Aviani Ribeiro, 25 anos. Engenheira Eletricista formada pela Universidade de Brasília em 2019. Atualmente: - Mestrado em Engenharia Elétrica na área de Sistemas Elétricos de Potência na Universidade de Brasília - início em 2020 e previsão de término em dezembro de 2021. - Trabalhando na empresa Fazsol Energias Renováveis.