

Teleproteção Via Carrier em Cabos de Alta Tensão Enterrados

Eduardo C. Senger, Josemir C. Santos, Reginaldo P. Leal e Helder de F. Costa

Resumo – O projeto teve por objetivo analisar a viabilidade da utilização de teleproteção via carrier em linhas subterrâneas de alta tensão de 230 a 500 kV. Para atender a esses objetivos foi desenvolvida uma ferramenta computacional para auxiliar o engenheiro no planejamento e projeto desse tipo de comunicação. O uso dessa ferramenta permite propor critérios e padrões de avaliação de desempenho do enlace, alternativos ao método tradicional, para a aplicação da técnica de comunicação via Carrier em sistemas híbridos, nos quais um trecho do enlace é constituído por um cabo subterrâneo conectado em série com uma linha aérea.

São também apresentados e analisados os resultados obtidos com o uso dessa ferramenta na simulação das topologias de canais OPLAT normalmente utilizados pela CHESF. Esses resultados permitem subsidiar a análise sobre a viabilidade da aplicação de enlaces OPLAT em sistemas constituídos por trechos de linha subterrânea em série com linhas aéreas.

Palavras-chave – Sistemas Carrier; OPLAT; cabo subterrâneo; ATP.

I. INTRODUÇÃO

A aplicação de sistemas de comunicação por ondas portadoras, em geral, é altamente empírica devido à complexidade do sistema elétrico e suas ramificações, tornando muito difícil o cálculo exato de todos os efeitos da propagação de um sinal de alta frequência por uma linha de transmissão.

A viabilidade técnica de se operar um canal de comunicação via ondas portadoras numa determinada linha de alta tensão é definida pela relação entre o nível do sinal obtido no ponto de recepção e o nível do ruído observado no mesmo ponto (SNR, sigla da expressão em inglês “Signal to Noise Ratio”). Além da relação entre o sinal e o ruído ser aceitável, é necessário que o nível do sinal disponibilizado na entrada do receptor seja superior, com uma determinada margem de segurança, à sensibilidade do receptor [1].

Uma vez que as determinações tanto do nível do sinal no

ponto de recepção quanto do nível de ruído presente numa linha de alta tensão são dependentes de fatores aleatórios (como condições ambientais) e variáveis (como atenuações e desempenhos de componentes específicos), no projeto de um canal de comunicação via OPLAT utilizam-se, normalmente, métodos baseados em valores empíricos e em especificações prévias, o que conduz a resultados conservadores, adequados, em geral, para prever o comportamento de sistemas montados em configurações tradicionais operando nas piores condições.

Caso os resultados desses métodos apresentem panoramas favoráveis é possível confiar que os sistemas implementados terão boas chances de operarem com sucesso.

Por outro lado, quando os sistemas a serem implementados não se enquadram nas configurações tradicionais, como no caso em que trechos de cabos isolados são inseridos em série com linhas aéreas de transmissão, a aplicação dos métodos convencionais de projeto podem não conduzir a resultados confiáveis [4]. Nesses casos, devem ser usadas ferramentas de simulação capazes de representar o sistema proposto com todos os seus componentes para estimar os níveis dos sinais que deverão estar presentes em cada ponto de tal sistema. Associando-se esses resultados às estimativas dos níveis de ruído obtidas por métodos convencionais pode-se avaliar a viabilidade técnica da operação bem sucedida desses sistemas não tradicionais.

Por conseguinte, visando atingir os objetivos do projeto foi desenvolvida uma ferramenta de simulação de sistemas de comunicação via OPLAT utilizando-se modelos desenvolvidos no ambiente ATP.

Os principais resultados do projeto foram a ferramenta de simulação desenvolvida e a caracterização experimental do cabo subterrâneo de 230 kV utilizado pela CHESF em suas instalações.

Com esses resultados, a concessionária tem à sua disposição um recurso para avaliar o desempenho de enlaces via OPLAT de qualquer tipo, tanto já construídos quanto em fase projeto.

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos no projeto intitulado “Teleproteção Via Carrier em Cabos de Alta Tensão Enterrados”, desenvolvido e concluído no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL sob o código 0048-034/2006. A empresa proponente, que deu apoio financeiro ao projeto, é a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF). A entidade executora é a Fundação de Apoio a Universidade de São Paulo (FUSP), que representa o Departamento de Energia e Automação Elétricas (PEA-USP) da Escola Politécnica da USP.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este trabalho foi patrocinado dentro do programa de P&D pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.

R. P. Leal trabalha na CHESF (rpleal@chesf.gov.br).

H. F. Costa trabalha na CHESF (hfcosta@chesf.gov.br).

E.C. Senger é Prof. Dr. do PEA-EPUSP (e-mail: senger@pea.usp.br).

J. C. Santos é Prof. Dr. do PEA-EPUSP (e-mail: josemir@pea.usp.br).

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A principal aplicação das ondas portadoras em sistemas de transmissão de energia destina-se à teleproteção. Nesta aplicação um canal é usado para o envio de um comando originado por uma dada lógica de proteção num extremo da linha, para que esse sinal possa dar partida a uma lógica de proteção no terminal remoto, normalmente, visando reduzir o tempo de isolamento do trecho de linha defeituoso [2].

A aplicação de sistemas de comunicação por ondas portadoras, em geral, é altamente empírica devido à complexidade do sistema considerado, o que torna muito complexo o cálculo exato de todos os efeitos da propagação de um sinal de alta frequência através de uma linha de transmissão.

Os limites práticos para determinar a largura da banda que pode ser utilizada pelas ondas portadoras são ditados, principalmente, pelas atenuações dos sinais, pelas complexidades dos equipamentos de acoplamento e sintonia em alta frequência e pelas dificuldades em se construir circuitos sintonizadores que operem no extremo inferior da banda [3].

A seguir neste trabalho apresenta-se uma ferramenta de simulação de sistemas de comunicação via OPLAT, baseada no ambiente ATP, que foi desenvolvida no âmbito do projeto. Os modelos matemáticos utilizados nessa ferramenta, quando alimentados com dados de componentes reais a serem empregados na montagem de sistemas propostos, permitem que se avalie a viabilidade do sistema operar adequadamente, segundo parâmetros de projeto pré-estabelecidos.

São apresentados também resultados de simulações realizadas com a ferramenta desenvolvida explorando várias topologias de interesse e que permitem avaliar a viabilidade de operação com sucesso de cada uma das alternativas estudadas.

III. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

A metodologia adotada para a execução do projeto foi a do desenvolvimento da ferramenta de simulação; sua validação e sua aplicação aos casos de interesse da CHESF para avaliação de seu desempenho.

A ferramenta de simulação, baseada no software ATP, é constituída por uma interface, escrita em linguagem Visual-Basic, que disponibiliza ao usuário as diversas configurações de sistemas OPLAT e de linhas de transmissão utilizadas pela CHESF. Através dessa interface o usuário pode selecionar o tipo de acoplamento do sinal carrier (entre uma fase e terra ou entre duas fases da linha), a frequência da portadora utilizada, o tipo de linha de transmissão através do qual o sinal irá se propagar (se somente linha aérea, se parte aérea e parte subterrânea, se transposta ou não transposta, etc). Também através dessa interface, de forma bastante amigável, o usuário fornece os dados dos componentes que constituem o sistema de comunicação OPLAT (transmissor, receptor, cabos coaxiais, circuito de sintonia, capacitor de acoplamento, bobina de bloqueio e de dreno, etc) e os dados das linhas de transmissão (posição dos cabos nas torres de transmissão ou na instalação subterrânea, dados dos cabos, resistividade do solo, etc). De forma automática e transparente para o usuário, a ferramenta de simulação gera todos os arquivos de entrada de dados para o ATP, executa esse

software e apresenta os resultados de interesse na tela da interface. Inicialmente são executadas as rotinas *Line Constants* e *Cable Parameters* do ATP que calculam os parâmetros elétricos da linha aérea e subterrânea, respectivamente, para a frequência da portadora carrier de interesse. Após o cálculo dos parâmetros das linhas, o ATP é executado para determinar a propagação, em regime permanente, do sinal carrier através do sistema formado pelos equipamentos OLPAT (lado transmissor e lado receptor) e pela(s) linha(s) de transmissão (aérea e/ou subterrânea).

A validação da ferramenta foi feita através de sua aplicação a uma série de casos envolvendo sistemas típicos de comunicação e da comparação dos resultados dessas simulações com os obtidos através da aplicação do método tradicional (gráfico) de projeto de enlaces via OPLAT.

Para determinar quais topologias de sistemas de comunicação por OPLAT seriam estudados no projeto, o primeiro aspecto levado em consideração foi a identificação dos tipos de linhas aéreas e de acoplamentos de sinais utilizados pela concessionária patrocinadora do projeto em seus sistemas de comunicação. A ferramenta de simulação foi desenvolvida de forma a incorporar modelos de todos os equipamentos e componentes presentes num enlace de comunicação típico e que fosse possível calcular as perdas, ou atenuações, impostas por cada um ao enlace.

Decidiu-se que a ferramenta também deveria fornecer resultados em termos das tensões e dos níveis de potência, em dBm, em pontos estratégicos do enlace para que fosse possível avaliar o desempenho do canal e sua possibilidade de operação bem sucedida.

Como as perdas dependem da frequência da portadora, o usuário define a frequência em que pretende realizar a simulação. Nos resultados apresentados neste trabalho considerou-se as frequências de 30 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz e 500 kHz.

A vantagem desse tipo de abordagem, baseado na utilização da ferramenta de simulação, está em permitir calcular diretamente a tensão e a potência em qualquer ponto do canal. Com isso é possível realizar as análises relativas a atenuações e SNRs de forma mais realista que no método convencional.

As simulações permitem calcular tanto as tensões quanto as potências presentes em cada ponto do canal de comunicação. Assim, torna-se possível calcular as atenuações, ou perdas, impostas individualmente por qualquer componente do enlace. As tensões presentes em certos pontos do enlace podem ser utilizadas para o cálculo de relações sinal-ruído, uma vez que os ruídos, normalmente, são medidos, ou estimados, em unidades de tensão. Contudo, convertendo-se as medidas de ruído para unidade de potência, o que é usual, torna-se possível fazer toda a análise de desempenho do canal em termos de potências, expressas em dBm, e de perdas, expressas em dB. Assim, nesse relatório dá-se preferência aos resultados expressos em termos de potências, o que também facilita as comparações dos resultados das simulações com aqueles obtidos a partir do método convencional.

Cada um dos elementos que compõe um canal de comunicação típico foi modelado utilizando elementos básicos de natureza concentrada ou distribuída, contidos no ATP.

As bobinas de bloqueio foram representadas por um modelo tipo RLC paralelo simples. A ferramenta de simulação permite definir um valor de referência para a perda inserida por cada bobina de bloqueio do canal. Uma vez definido este valor a ferramenta calcula os valores dos componentes do modelo para que a perda inserida seja próxima a ele. No método convencional adota-se a perda máxima admissível para a bobina de bloqueio como sendo o valor de referência de projeto, o que caracteriza o método como conservador por adotar o pior cenário. Caso se deseje aplicar o mesmo critério à ferramenta de simulação basta adotar o valor de referência de perda como sendo o máximo admissível. Nas simulações realizadas neste trabalho adotou-se o valor de referência como sendo igual a 2 dB.

O conjunto de acoplamento é composto pela associação da caixa de sintonia com o ramo formado pelo capacitor de acoplamento e pela bobina de dreno. A caixa de sintonia compreende, neste caso, o transformador de balanceamento, o transformador de casamento de impedâncias (transformador de sintonia) e o conjunto de sintonia (representado por uma associação LC série). Com relação às perdas, as mesmas observações feitas anteriormente para as bobinas de bloqueio valem para os conjuntos de acoplamento. O valor de referência assumido neste trabalho para a perda inserida por cada conjunto de acoplamento foi, também, de 2 dB.

Em todos os casos simulados neste relatório foi adotada a potência do transmissor como sendo igual a 10 W, equivalente a 40 dBm, que é um valor tipicamente utilizado em casos reais.

Neste trabalho foram simulados diversos casos de interesse para o projeto “Teleproteção Via Carrier em Cabos de Alta Tensão Enterrados”, cujo principal objetivo é o de avaliar a viabilidade da operação bem sucedida de um canal de comunicação por OPLAT ao qual se conecta, em série à linha aérea, um trecho de linha subterrânea.

Para analisar as condições de atenuação impostas num canal de comunicação por OPLAT pela inserção de um trecho de linha formada por um cabo isolado no trajeto do sinal, considerou-se necessário simular, inicialmente, o comportamento de um enlace típico (só com linha aérea e sem o trecho de cabo), a fim de verificar se o método baseado na ferramenta de simulação fornece resultados coerentes com os previstos pelo método tradicional.

Decidiu-se, também, simular dois diferentes esquemas de acoplamento: entre fase-terra e entre duas fases. Neste último caso foram simuladas duas situações de acoplamento: entre fase central e lateral de um mesmo circuito e entre as fases centrais no caso de linhas em circuito duplo.

Em ambos os esquemas de acoplamento simulou-se a existência e a ausência de transposições na linha.

Em seguida, foram simulados os mesmos casos anteriormente citados com a inserção do trecho de cabo isolado no enlace. Estas simulações com cabo foram divididas em dois grupos. No primeiro a conexão da linha aérea com o cabo isolado é feita de forma direta e no segundo ela é feita por meio de um desvio. Neste último caso foi simulada a configuração de desvio curto por se considerar que a descontinuidade (conexão entre linha e cabo) é de pequenas dimensões e que, portanto, a distância entre as bases das colunas dos

capacitores de acoplamento (ou TPCs) utilizados não deve ultrapassar os 30 m. É importante considerar as características transitórias dos TPCs ao usar suas colunas capacitivas como capacitores de acoplamento [5].

Os casos estudados podem ser classificados de duas formas: em primeiro lugar, de acordo com os esquemas de acoplamento utilizados e, em segundo lugar, com as configurações dos sistemas implementados para simulação via ATP. Desta forma, os casos estudados foram:

- A. Acoplamento do sinal carrier entre Fase e Terra
 - A.1 Sistema de transmissão: Somente linha aérea
 - A.1.a Tipo de linha aérea: Linha não transposta
 - A.1.b Tipo de linha aérea: Linha Transposta
 - A.2 Sistema de transmissão: Linha aérea + cabo subterrâneo
 - A.2.a Sem desvio na conexão linha aérea-cabo subterrâneo
 - A.2.b Com desvio na conexão linha aérea-cabo subterrâneo
- B. Acoplamento do sinal carrier entre duas fases
 - B.1 Sistema de transmissão: Somente linha aérea
 - B.1.a Acoplamento entre fases central e lateral de um circuito de linha aérea não transposta
 - B.1.b Acoplamento entre fases central e lateral de um circuito de linha aérea transposta
 - B.1.c Acoplamento entre as fases centrais de circuitos distintos de uma linha aérea
 - B.2 Sistema de transmissão: Linha aérea + cabo subterrâneo
 - B.2.a Sem desvio na conexão linha aérea-cabo subterrâneo
 - B.2.b Com desvio na conexão linha aérea-cabo subterrâneo

A seguir, são apresentados os casos mais significativos dentre os acima listados com seus resultados, obtidos das simulações realizadas.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

A. Acoplamento do sinal carrier entre Fase e Terra

1) Sistema de transmissão: Somente linha aérea

Este caso explora o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre a fase central e a terra, que apresenta vantagens consideráveis em termos econômicos e técnicos, uma vez que necessita de um número menor de equipamentos para realizar as conexões, sendo mais simples, barato e ocupando menor espaço na subestação que o esquema de acoplamento entre duas fases.

O primeiro passo necessário para implementar as simulações é definir as características construtivas da linha aérea no módulo do ATP responsável por seu modelamento. O processamento deste módulo devolve os parâmetros da linha aérea desejada que seja utilizados nos passos subsequentes das simulações. No presente estudo foram alimentados os dados de uma linha de transmissão típica de 230 kV com circuito simples, condutores de fase e cabo guarda de aço e solo com resistividade média (100 Ω .m). A partir desses dados foram obtidos os parâmetros elétricos da linha de

transmissão que foram utilizados nas simulações para avaliar o desempenho do canal de comunicação via Carrier.

Os principais parâmetros elétricos obtidos em função da frequência foram os parâmetros modais e a impedância de surto no domínio da fase, Z_{surto} , apresentada na tabela 1.

O parâmetro Z_{surto} , mostrado na tabela 1, é equivalente à impedância característica da linha de transmissão. O valor deste parâmetro no centro da faixa de frequências investigada é de $400,2 \Omega$, que é praticamente igual ao valor de 400Ω normalmente adotado como padrão para linhas de transmissão desta classe de tensão.

De posse dos parâmetros da linha de transmissão foram realizadas as simulações relativas ao desempenho do canal de comunicação em duas configurações, uma da linha sem transposições e outra da linha com transposições. Os resultados dessas simulações são apresentados a seguir.

Tabela 1- Impedância de surto (Z_{surto}) correspondente à fase do meio da linha de transmissão típica de 230 kV simulada no ATP.

Z_{surto} domínio da fase (em ohms) em função da frequência					
30 kHz	100 kHz	200 kHz	300 kHz	400 kHz	500 kHz
406.4	402.3	400.5	399.6	399.1	398.7

a) *Tipo de linha aérea: Linha não transposta*

Este caso explora o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre a fase central e a terra de uma linha aérea operando em 230 kV, com circuito simples e sem transposições. O esquema implementado para representar este tipo de sistema, denominado Sistema 1, é mostrado na figura 1.

Note-se que no sistema apresentado na figura 1, o trecho de linha aérea é composto por uma única seção e é seguido por um trecho entre dois barramentos interligados por condutores ideais. É nesse trecho que, em outros sistemas, inserem-se os cabos isolados.

Como dito anteriormente, os modelos da linha aérea e dos cabos coaxiais são baseados em parâmetros distribuídos, enquanto que os dos demais elementos baseiam-se em parâmetros concentrados.

As impedâncias dos barramentos (ZB) foram considera-

das como sendo iguais à impedância característica de uma linha aérea típica.

Para investigar o comportamento do canal de comunicação com esquema de acoplamento entre fase e terra e configuração denominada sistema 1 foram realizadas simulações variando dois parâmetros: o comprimento da linha e a frequência da portadora.

O objetivo desta varredura foi o de avaliar as situações em que o canal exibe as melhores condições de propagação e, portanto, as maiores chances de operação com sucesso.

Foram escolhidos quatro valores de comprimento da linha (L) para simulação: 50 km, 100 km, 150 km e 200 km.

Os resultados obtidos para o conjunto das simulações com um determinado comprimento de linha em que varia-se a frequência nos seis valores escolhidos são apresentados em tabelas em que cada linha corresponde a uma frequência e cada grupo de duas colunas representa as condições de comunicação num ponto determinado do enlace.

Para tornar mais sintética a apresentação dos resultados escolheu-se um caso base em que o comprimento da linha aérea é $L = 100$ km, por ser este o mais representativo na classe de tensão 230 kV. Para este comprimento são apresentados os resultados detalhados da simulação. Os resultados referentes aos outros comprimentos de linha são expressos de forma resumida, sendo, em geral, reunidos em uma tabela para rápida comparação entre si e com o caso base.

A tabela 2, a seguir, reúne os resultados das simulações relativas ao caso base, comprimento de linha de 100 km, expressos em termos das perdas (ou atenuações) impostas por cada elemento do enlace referido no alto de cada coluna.

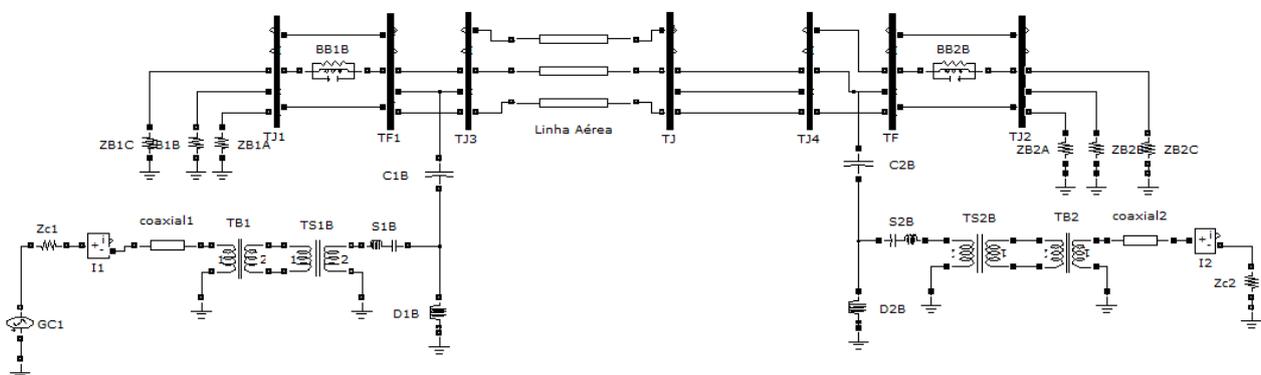


Figura 1 - Sistema 2: Só linha aérea com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposição.

Tabela 2- Perdas em cada um dos elementos e total num sistema com acoplamento entre fase e terra de uma linha aérea de 100 km, circuito simples, sem transposição.

Frequência carrier	Perda circuito acoplamento	Perda Bobina bloqueio lado TX	Perda na linha aérea	Perda Bobina bloqueio lado Rx	Perda circuito acoplamento	Perda total
kHz	dB	dB	dB	dB	dB	dB
30	-2,05	-1,91	-4,63	-1,98	-2,02	-12,59
100	-2,24	-1,80	-5,38	-2,08	-2,02	-13,52
200	-2,22	-1,87	-6,05	-2,08	-2,02	-14,25
300	-1,96	-2,33	-5,89	-2,08	-2,02	-14,29
400	-2,04	-2,09	-7,30	-2,08	-2,02	-15,54
500	-1,81	-2,65	-6,42	-2,08	-2,02	-14,99

Observando os valores de perdas na linha aérea obtidos através das simulações, mostrados na quarta coluna da tabela 2, constata-se que eles variam entre -4,63 dB e -7,3 dB. Pode-se observar também que o valor obtido para a frequência de 100 kHz é 5,38 dB, que é menor do que aquele calculado pelo método convencional em condições de tempo bom, que é de 8,7 dB. Isto mostra, como esperado, que a ferramenta de simulação desenvolvida fornece resultados menos rigorosos que os previstos pelo método tradicional, que é mais conservador. Resta ainda corrigir o resultado da simulação para as condições de tempo adverso. Isto pode ser feito, de forma simplificada, aplicando-se um fator de correção, que pode ser o mesmo utilizado no método tradicional e que vale 1,5 para tensões menores que 230 kV e 1,25 para tensões iguais a 230 kV ou maiores. Fazendo isso obtém-se o valor de 6,73 dB de perda na linha aérea para condições de tempo adverso.

As tabelas 3 e 4, a seguir, apresentam de forma resumida os resultados das simulações realizadas com outros comprimentos de linha. A tabela 3 mostra a perda da linha aérea em função da frequência e a tabela 4 mostra a perda total do canal para os comprimentos de 50, 100, 150 e 200 km.

Tabela 3- Perdas, em dB, somente na linha aérea, num sistema com acoplamento entre fase e terra, circuito simples, sem transposição, em função da frequência e para os comprimentos de linha de 50, 100, 150 e 200 km.

Frequência carrier	Perda (dB) na linha aérea em função do comprimento			
	50 km	100 km	150 km	200 km
kHz				
30	-4,18	-4,63	-3,57	-4,75
100	-4,67	-5,38	-4,90	-6,86
200	-4,71	-6,05	-6,39	-8,85
300	-4,45	-5,89	-7,74	-9,50
400	-5,59	-7,30	-8,77	-6,55
500	-5,61	-6,42	-9,67	-10,83

Nota-se claramente dos valores mostrados na tabela 3 que, apesar das perdas demonstrarem a tendência de crescimento tanto com a frequência quanto com o comprimento da linha, como esperado, sua evolução não se dá de forma monotônica e bem comportada, como previsto no método convencional.

Tabela 4- Perdas totais, em dB, num sistema com acoplamento entre fase e terra, circuito simples, sem transposição, em função da frequência e para os comprimentos de linha de 50, 100, 150 e 200 km.

Frequência carrier	Perda total (dB) em função do comprimento da linha aérea			
	50 km	100 km	150 km	200 km
kHz				
30	-12,10	-12,59	-11,78	-12,88
100	-12,78	-13,52	-13,44	-15,10
200	-12,83	-14,25	-14,86	-17,09
300	-12,79	-14,29	-16,07	-17,80
400	-13,73	-15,54	-17,06	-15,99
500	-13,85	-14,99	-17,94	-19,27

b) Tipo de linha aérea: Linha Transposta

Neste caso foi considerado que há transposições na linha aérea, com isso espera-se verificar através da simulação o efeito das transposições na performance do canal de comunicação via OPLAT. O trecho de linha aérea é composto por três seções ligadas por barramentos ideais. Nessas conexões são feitas as transposições das fases entre si de maneira sequencial. Os demais elementos neste sistema têm as mesmas características que as do sistema anterior.

As tabelas 5 e 6, a seguir, apresentam de forma resumida os resultados das simulações realizadas com os quatro comprimentos de linha, incluindo o caso base. A tabela 5 mostra a perda da linha aérea em função da frequência e a tabela 6 mostra a perda total do canal para os comprimentos de 50, 100, 150 e 200 km.

Observando os valores de perdas na linha aérea de 100 km, mostrados na terceira coluna da tabela 5, nota-se que eles variam entre -4,75 dB e -10,83 dB. Pode-se observar também que o valor obtido para a frequência de 100 kHz é -6,86 dB. Este valor pode ser comparado àquele calculado pelo método convencional em condições de tempo bom, que vale -8,7 dB, ao qual seria o caso de se adicionar o fator de correção por transposição, que é de 4,7 dB, mas isso não é feito porque o método prescreve que o mesmo só deve ser utilizado para linhas com tensão acima de 345 kV.

Tabela 5- Perdas, em dB, somente na linha aérea, num sistema com acoplamento entre fase e terra, circuito simples, com 3 transposições, em função da frequência e para os comprimentos de linha de 50, 100, 150 e 200 km.

Frequência carrier	Perda (dB) na linha aérea transposta em função do comprimento			
	50 km	100 km	150 km	200 km
kHz				
30	-4,55	-4,75	-4,63	-6,33
100	-5,52	-6,86	-8,12	-9,50
200	-5,96	-8,85	-10,90	-12,94
300	-6,98	-9,50	-11,79	-14,82
400	-7,67	-6,55	-14,22	-13,87
500	-8,25	-10,83	-16,62	-20,18

Tabela 6- Perdas totais, em dB, num sistema com acoplamento entre fase e terra, circuito simples, com 3 transposições, em função da frequência e para os comprimentos de linha de 50, 100, 150 e 200 km.

Frequência carrier kHz	Perda total (dB) em função do comprimento da linha aérea transposta			
	50 km	100 km	150 km	200 km
30	-12,44	-12,88	-12,62	-14,27
100	-13,62	-15,10	-16,23	-17,62
200	-14,09	-17,09	-19,02	-21,14
300	-15,15	-17,80	-20,08	-22,93
400	-15,80	-15,99	-22,35	-22,70
500	-16,37	-19,27	-24,83	-28,36

Apesar de ter sido observado um aumento de 1,48 dB da perda na linha devida às transposições (comparado ao valor da tabela 3 na frequência de 100 kHz), o valor obtido ainda é -1,84 dB, menor que o previsto pelo método tradicional, demonstrando que este é realmente muito conservador e justifica o fato dele só sugerir a correção por transposição para linhas operando acima de 350 kV.

Apesar de terem sido estudados os casos de linha aérea com acoplamento entre fase central e terra conectadas a cabos subterrâneos, seus resultados não serão aqui expostos por não serem os mais representativos dos sistemas encontrados na CHESF. A seguir são apresentados os resultados obtidos para o acoplamento do sinal entre duas fases da linha aérea. Este sim, por ser mais representativo, terá os resultados de todos os casos apresentados, incluindo os de conexão entre linha aérea e cabo subterrâneo.

B. Acoplamento do sinal carrier entre duas fases

Os casos apresentados a seguir exploram o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre duas fase da linha aérea, sendo que há dois tipos de linha aqui tratados: as com circuito simples e as com circuito duplo.

1) Sistema de transmissão: Somente linha aérea

a) Acoplamento entre fases central e lateral de um circuito de linha aérea não transposta

Este caso explora o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre a fase central e uma fase lateral de uma linha aérea operando em 230 kV, com circuito simples e sem transposições.

Os parâmetros elétricos deste tipo de linha já foram calculados anteriormente no item A.1.

O esquema implementado para representar este tipo de sistema, denominado Sistema 2, é mostrado na figura 2.

Como no caso apresentado no item A.1.a, no sistema apresentado na figura 2, o trecho de linha aérea é composto por uma única secção e é seguido por um trecho entre dois barramentos interligados por condutores ideais. É nesse trecho que, em outros sistemas, inserem-se os cabos isolados.

Para investigar o comportamento do canal de comunicação com tipo de acoplamento entre fase central e lateral, aqui também foram realizadas simulações variando dois parâmetros: o comprimento da linha e a frequência da portadora, com o objetivo de avaliar as situações em que o canal exibe as melhores condições de propagação e, portanto, as maiores chances de operação com sucesso. Para este tipo de sistema, as tabelas 7 e 8, a seguir, apresentam de forma resumida os resultados das simulações realizadas com os quatro comprimentos de linha, incluindo o caso base em que o comprimento da linha aérea é $L = 100$ km.

A tabela 7 mostra a perda da linha aérea em função da frequência e a tabela 8 mostra a perda total do canal para os comprimentos de 50, 100, 150 e 200 km.

Os valores de perdas na linha aérea mostrados na terceira coluna da tabela 7, variam entre -0,73 dB e -6,38 dB. Comparando-se os valores exibidos na tabela 7, correspondentes ao acoplamento do sinal entre fase e terra, com esses obtidos para o acoplamento do sinal entre duas fases, observa-se que os últimos são sempre menores, confirmando o que prevê o método tradicional. A diferença é maior para as frequências menores, diminuindo à medida que a frequência aumenta.

Para a frequência de 100 kHz a perda calculada é de -3,02 dB, que continua sendo menor do que a prevista pelo método tradicional para o tipo de acoplamento entre fase central e lateral, que é de 4,7 dB. Isto está de acordo com a afirmação de que o método tradicional é mais conservador que o método por simulação. Os valores de perdas na linha aérea mostrados na terceira coluna da tabela 7, acima, variam entre -0,73 dB e -6,38 dB.

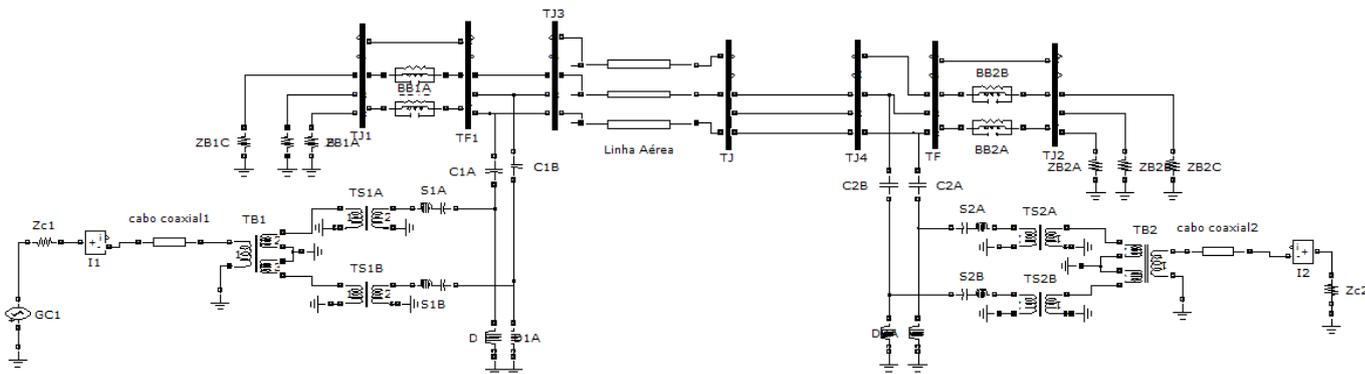


Figura 2 - Sistema 2: Só linha aérea com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposição

Tabela 7- Perdas, em dB, somente na linha aérea, num sistema com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposições, em função da frequência e para comprimentos de linha de 50 a 200 km.

Frequência carrier	Perda (dB) na linha aérea em função do comprimento			
	50 km	100 km	150 km	200 km
30	-0,35	-0,73	-1,13	-1,60
100	-1,51	-3,02	-3,40	-4,97
200	-2,35	-3,89	-6,01	-8,40
300	-2,02	-5,13	-7,47	-9,45
400	-3,09	-6,38	-8,54	-6,93
500	-3,98	-6,13	-9,45	-10,19

Tabela 8- Perdas totais, em dB, num sistema com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposições, em função da frequência e para comprimentos de linha de 50 a 200 km.

Frequência carrier	Perda total (dB) em função do comprimento da linha aérea			
	50 km	100 km	150 km	200 km
30	-9,52	-9,95	-10,40	-10,91
100	-11,17	-12,38	-12,96	-14,42
200	-11,77	-13,38	-15,48	-17,72
300	-11,61	-14,62	-16,87	-18,79
400	-12,62	-15,70	-17,89	-16,74
500	-13,31	-15,60	-18,78	-19,57

Comparando-se os valores exibidos na tabela 5, correspondentes ao acoplamento do sinal entre fase e terra, com esses obtidos para o acoplamento do sinal entre duas fases, observa-se que os últimos são sempre menores, confirmando o que prevê o método tradicional. A diferença é maior para as frequências menores, diminuindo à medida que a frequência aumenta. Para a frequência de 100 kHz a perda calculada é de -3,02 dB, que continua sendo menor do que a prevista pelo método tradicional para o tipo de acoplamento entre fase central e lateral, que é de 4,7 dB. Isto está de acordo com a afirmação de que o método tradicional é mais conservador que o método por simulação.

b) Acoplamento entre fases central e lateral de um circuito de linha aérea transposta

Assim como no anterior, este caso explora o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre uma fase lateral e a fase central. Aqui, no entanto, foi considerado que há trans-

posições na linha aérea. Com isso, espera-se verificar através da simulação o efeito das transposições na performance do canal de comunicação via OPLAT.

O esquema implementado para representar este tipo de sistema, é mostrado na figura 3, a seguir.

No sistema apresentado na figura 3, assim como naquele apresentado na figura 2, o trecho de linha aérea é composto por três secções ligadas por barramentos ideais. Nessas conexões são feitas as transposições das fases entre si de maneira sequencial. Os demais elementos neste sistema têm as mesmas características do sistema anterior, em que não há transposições.

As tabelas 9 e 10, a seguir, apresentam, para este tipo de sistema, de forma resumida os resultados das simulações realizadas com os quatro comprimentos de linha, incluindo o caso base em que o comprimento da linha aérea é $L = 100$ km. A tabela 9 mostra a perda da linha aérea em função da frequência e a tabela 10 mostra a perda total do canal para os comprimentos de 50, 100, 150 e 200 km.

Nesse caso, os valores de perdas na linha aérea, mostrados na terceira coluna da tabela 9, variam entre -4,35 dB e -12,02 dB. Esses valores chegam a ser 5,89 dB maiores que os observados no caso da linha sem transposição, apresentados no item anterior.

Pode-se observar também que o valor obtido para a frequência de 100 kHz é -5,91 dB. Este valor deve ser comparado àquele calculado pelo método convencional em condições de tempo bom, utilizando o fator de correção por transposição constante na tabela 1 daquele relatório, que é de 4,7 dB. Novamente, não se aplica o fator de correção por transposição, pois o mesmo só deve ser utilizado para linhas com tensão acima de 345 kV.

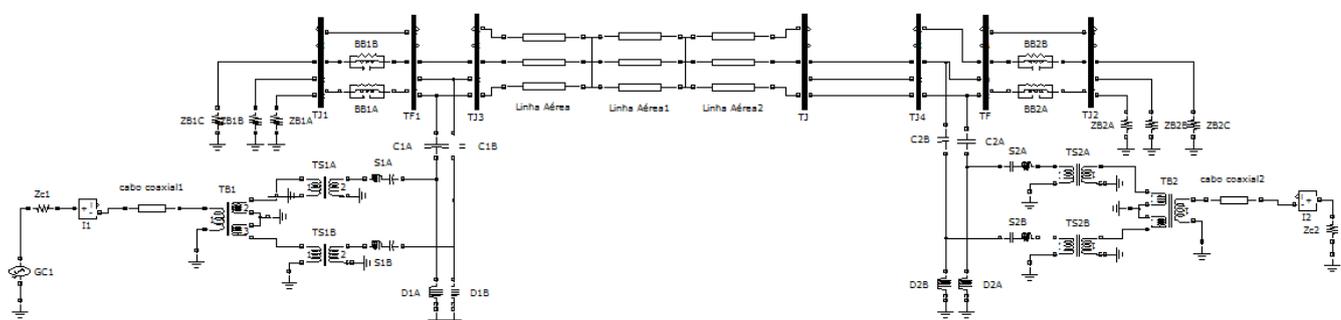


Figura 3 - Sistema 2: Só linha aérea com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposição

Tabela 9 - Perdas, em dB, somente na linha aérea, num sistema com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, com 3 transposições, em função da frequência e para os comprimentos de linha de 50 a 200 km.

Frequência carrier kHz	Perda (dB) na linha aérea em função do comprimento			
	50 km	100 km	150 km	200 km
30	-3,68	-4,35	-4,57	-5,54
100	-4,61	-5,91	-7,37	-8,80
200	-5,46	-7,83	-10,25	-12,45
300	-6,23	-9,44	-11,25	-13,61
400	-6,96	-10,87	-13,23	-13,05
500	-7,48	-12,02	-16,02	-18,95

Tabela 10 – Perdas totais, em dB, num sistema com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, com 3 transposições, em função da frequência e para os comprimentos de linha de 50, 100, 150 e 200 km.

Frequência carrier kHz	Perda total (dB) em função do comprimento da linha aérea			
	50 km	100 km	150 km	200 km
30	-11,44	-12,13	-12,33	-13,30
100	-12,62	-13,90	-15,35	-16,80
200	-13,49	-15,83	-18,31	-20,51
300	-14,22	-17,49	-19,48	-22,00
400	-14,97	-18,87	-21,41	-22,54
500	-15,49	-20,03	-24,47	-28,43

Neste caso, a atenuação prevista pelo método tradicional ficou menor que a calculada pela simulação. Isto demonstra que, apesar de conservador, o método tradicional, por ser aproximado, pode, em certos casos, indicar valores subestimados das perdas da linha aérea e conduzir a conclusões errôneas sobre a viabilidade de operação do canal.

c) Acoplamento entre as fases centrais de circuitos distintos de uma linha aérea

Este caso explora o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre as fases centrais de cada um dos circuitos de uma linha aérea composta por dois circuitos. Para este tipo de acoplamento apenas um tipo de sistema foi simulado: S0 linha aérea, circuito duplo, sem transposição,

Apesar deste tipo de sistema não ser o mais usualmente empregado, decidiu-se implementar pelo menos um caso de simulação com o mesmo para cobrir toda a gama de possibilidades de conexões do sinal de portadora às linhas de alta

tensão existentes na prática.

O esquema implementado para representar este tipo de sistema é mostrado na figura 4, a seguir. O modelo da linha aérea, neste caso, é também baseado em parâmetros distribuídos. No entanto, devido à complexidade das matrizes de impedâncias próprias e mútuas, advinda da existência de dois circuitos instalados lado a lado ao longo do comprimento da linha, esse modelo é calculado separadamente num módulo de simulação específico, cujos resultados são importados para compor a resposta final do sistema. As impedâncias dos barramentos (Z_B) foram consideradas como sendo iguais à impedância característica de uma linha aérea de circuito simples.

Os conjuntos de acoplamento são idênticos aos empregados nas simulações do sistema 1 no acoplamento entre duas fases de uma linha aérea com circuito simples. Cada caixa de sintonia compreende também, neste caso, um transformador de balanceamento, um transformador de casamento de impedâncias (transformador de sintonia) e um conjunto de sintonia.

Para investigar o comportamento do canal de comunicação com esquema de acoplamento às fases centrais de cada circuito de uma linha aérea com circuito duplo, foram realizadas simulações variando apenas a frequência da portadora nos seis valores empregados nos casos anteriores.

Foi escolhido apenas um valor de comprimento da linha (L) para simulação: 100 km.

O objetivo desta simulação foi o de avaliar o desempenho deste tipo de acoplamento comparativamente ao acoplamento entre duas fases de uma linha aérea de circuito simples.

A tabela 11, a seguir, reúne os resultados das simulações relativas ao comprimento de linha de 100 km expressos em termos das perdas impostas por cada elemento ou trecho do enlace referido no alto de cada coluna.

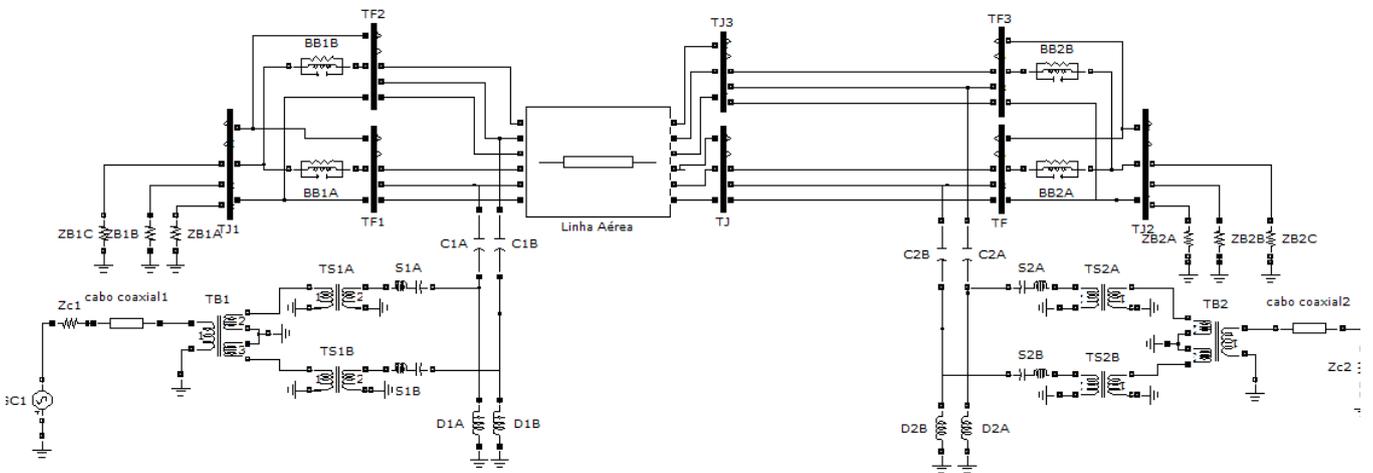


Figura 4 - S0 linha aérea com acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposição

No presente caso, os valores de perdas na linha aérea obtidos através das simulações, mostrados na quarta coluna da tabela 38, variam entre -0,85 dB e -5,28 dB. Esses valores são muito próximos aos observados no caso do acoplamento entre a fase central e uma lateral de uma linha aérea de circuito simples sem transposição, apresentados anteriormente, diferindo daqueles em média por apenas -0,5 dB.

Tabela 11- Perdas em cada um dos elementos e total num sistema com acoplamento entre fases centrais de uma linha aérea de 100 km, circuito duplo, sem transposição.

Frequência carrier	Perda circuito acoplamento	Perda Bobina bloqueio lado TX	Perda na linha aérea	Perda Bobina bloqueio lado Rx	Perda circuito acoplamento	Perda total
kHz	dB	dB	dB	dB	dB	dB
30	-2,38	-2,48	-0,85	-4,60	-2,02	-12,32
100	-2,74	-2,07	-2,67	-4,77	-2,02	-14,28
200	-2,59	-2,42	-3,17	-4,78	-2,02	-14,99
300	-2,58	-2,33	-5,52	-4,79	-2,02	-17,23
400	-2,77	-2,13	-4,30	-4,79	-2,02	-16,00
500	-2,45	-2,58	-5,28	-4,79	-2,02	-17,11

Este tipo de acoplamento demonstrou perdas baixas e pode se constituir na melhor escolha quando a linha de transmissão for de circuito duplo. Para verificar esta hipótese seria necessário simular também os outros tipos de acoplamento em linhas de circuito duplo e comparar os resultados obtidos. Como não há menção no método tradicional a respeito de fator de acoplamento para este tipo de acoplamento não é possível fazer uma comparação com os valores simulados.

2) Sistema de transmissão: Linha aérea + cabo subterrâneo

Assim como nos itens B.1.a e B.1.b, este caso explora o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre a fase central e uma fase lateral de uma linha aérea com circuito simples. Como no caso do item B.1.a, foi considerado que não há transposições na linha aérea. No entanto, neste caso inclui-se um trecho de cabo isolado conectado à linha aérea. O objetivo aqui é avaliar através das simulações o efeito da conexão de um trecho de cabo isolado na performance do canal de comunicação via OPLAT.

Como no caso da linha aérea, antes de implementar as simulações é necessário definir as características construtivas do cabo subterrâneo no módulo do ATP responsável por seu

modelamento. O processamento deste módulo devolve os parâmetros do cabo subterrâneo desejado que serão utilizados nos passos subsequentes das simulações. No presente estudo foram alimentados os dados de um cabo subterrâneo de 230 kV com isolante sólido de XLPE fabricado pela Pirelli e utilizado pela CHESF em subestações como a de Angelim. A partir desses dados foram obtidos os parâmetros elétricos do cabo subterrâneo que foram utilizados nas simulações para avaliar o desempenho do canal de comunicação via Carrier formado por um trecho de linha aérea ligado em série com um trecho de cabo subterrâneo. O valor obtido do parâmetro Z_{surto} , equivalente à impedância característica do cabo subterrâneo, no centro da faixa de frequências investigada, é de 44,1 Ω , que é muito próximo do valor de 44,5 Ω indicado na folha de dados do fabricante do cabo.

Utilizando os parâmetros desse cabo foram realizadas as simulações relativas ao desempenho do canal de comunicação em duas configurações, uma sem desvio na conexão entre a linha e o cabo e outra com desvio na conexão. Os resultados dessas simulações são apresentados a seguir.

a) Sem desvio na conexão linha aérea-cabo subterrâneo

O esquema implementado para representar este tipo de sistema é mostrado na figura 5, a seguir.

No sistema apresentado na figura 5, o trecho de linha aérea é composto por uma única seção, ligada por um barramento não ideal ao trecho de cabo isolado. Este barramento representa a conexão entre a linha e o cabo, que apresenta as perdas dielétricas do cabo de forma localizada representadas por resistências (R1 a R6).

Nesse caso não foi previsto nenhum cuidado para casar as impedâncias características, muito diferentes, da linha aérea e do cabo isolado. Dessa forma, perdas elevadas devem ser introduzidas no enlace nessa configuração. O objetivo é avaliar a severidade de tais perdas, a fim de verificar em quais circunstâncias tal tipo de conexão é admissível. Os demais elementos neste sistema têm as mesmas características que as do sistema analisado no item B.1.a.

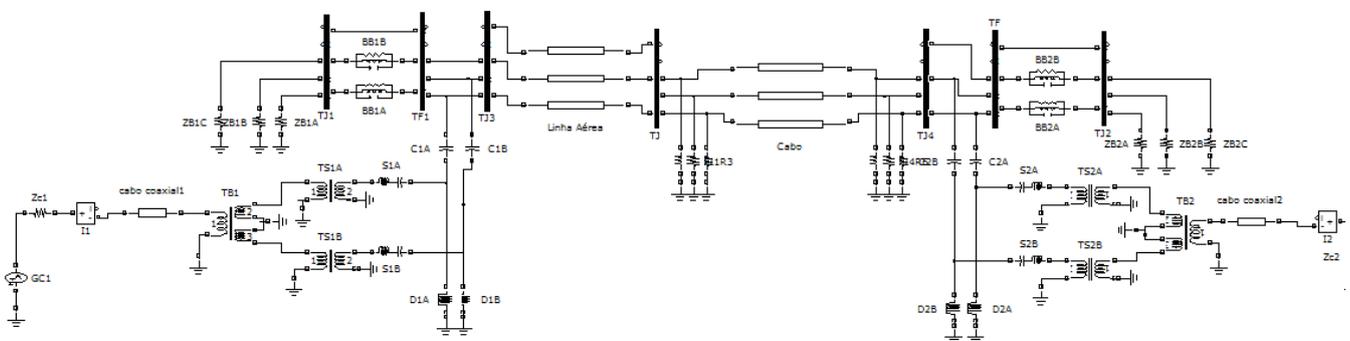


Figura 5- Linha aérea, acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposição + Cabo subterrâneo

Como o foco neste caso dirige-se à influência do cabo isolado na performance do enlace, foram realizadas simulações mantendo-se o comprimento da linha aérea igual ao do

caso base (100 km) e variando-se a frequência da portadora e o comprimento do cabo isolado. Foram escolhidos para simulação os seguintes valores de comprimento do cabo

(Lc): 2 km, 5 km, 10 km e 20 km. Para cada comprimento, foram simulados os mesmos seis valores de frequência de portadora utilizados anteriormente.

Os resultados desse conjunto de simulações foi organizado da mesma forma que nos casos anteriores. Aqui também, para tornar mais sintética a apresentação dos resultados, escolheu-se um caso base em que o comprimento do cabo subterrâneo é $L_c = 0,5$ km. Motivaram esta escolha os fatos de que os trechos de cabos subterrâneos de alta tensão normalmente utilizados são curtos, devido aos seus custos elevados, e por ser este comprimento o mais próximo daquele utilizado em subestações da CHESF, como a de Angelim, que é de 429 m, aproximadamente. Os resultados referentes a todos os comprimentos de cabo são expressos de forma resumida reunidos na tabela 12, a seguir. Cada uma das quatro partes da tabela mostra as perdas da linha aérea, do cabo subterrâneo e total do canal, em função da frequência, para os comprimentos do cabo de 0,5 a 10 km.

Analisando os resultados apresentados na tabela 12 observa-se que as perdas no cabo subterrâneo são pequenas, enquanto que as perdas na linha aérea são substancialmente maiores do que aquelas observadas no caso B.1.a, em que não há cabo subterrâneo conectado à linha aérea, ficando entre $-4,61$ e $-11,97$ dB. O aumento da perda na linha aérea devido ao descasamento na conexão com o cabo foi de, em média, 4,04 dB. Já a perda total do enlace aumentou em média 4,77 dB em relação ao caso anterior.

Estas perdas podem ainda ser aceitáveis para operar o enlace, dependendo da potência do transmissor e da sensibilidade do receptor utilizados.

Tabela 12- Perdas, em dB, na linha aérea, na subterrânea e total, num sistema com acoplamento entre duas fases, circuito simples, sem transposição, conectada diretamente à uma linha subterrânea com comprimentos de 0,5 a 10 km

Frequência carrier kHz	Comprimento do cabo subterrâneo											
	0,5 km			2 km			5 km			10 km		
	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total
30	-9,35	-0,07	-17,75	-9,35	-0,27	-17,96	-9,23	-0,67	-18,24	-9,52	-1,36	-19,22
100	-8,75	-0,14	-17,31	-8,67	-0,57	-17,65	-8,97	-1,40	-18,80	-8,99	-2,78	-20,21
200	-8,75	-0,22	-17,81	-8,52	-0,89	-18,23	-8,76	-2,19	-19,81	-9,31	-4,32	-22,49
300	-10,41	-0,28	-19,17	-10,41	-1,11	-19,99	-10,23	-2,75	-21,46	-10,25	-5,40	-24,15
400	-11,53	-0,36	-20,01	-11,51	-1,43	-21,06	-12,29	-3,46	-23,88	-11,72	-6,93	-26,78
500	-11,69	-0,42	-20,63	-11,77	-1,67	-21,96	-11,81	-4,14	-24,48	-13,29	-7,81	-29,62

b) Com desvio na conexão linha aérea-cabo subterrâneo

Da mesma forma que no caso anterior, este caso explora o esquema de acoplamento do sinal de portadora entre uma fase lateral e a fase central, sendo que não há transposições na linha aérea. Neste caso inclui-se um trecho de cabo isolado conectado à linha aérea através de um desvio que proporciona um acoplamento adequado para os sinais de onda portadora através da descontinuidade provocada pela inserção de bobinas de bloqueio no ponto de junção entre a linha aérea e o cabo subterrâneo. O objetivo aqui é avaliar através da simulação o efeito da conexão entre a linha aérea e um trecho de cabo isolado por meio de um desvio adequado na performance do canal de comunicação via OPLAT.

O esquema implementado para representar este tipo de sistema, denominado Sistema 2, é mostrado na figura 18, a seguir.

Assim como no caso anterior, no sistema apresentado na figura 18, o trecho de linha aérea é composto por uma única secção, ligada por um barramento que representa a conexão entre a linha e o cabo, o qual apresenta de forma localizada as perdas dielétricas do cabo representadas por resistências.

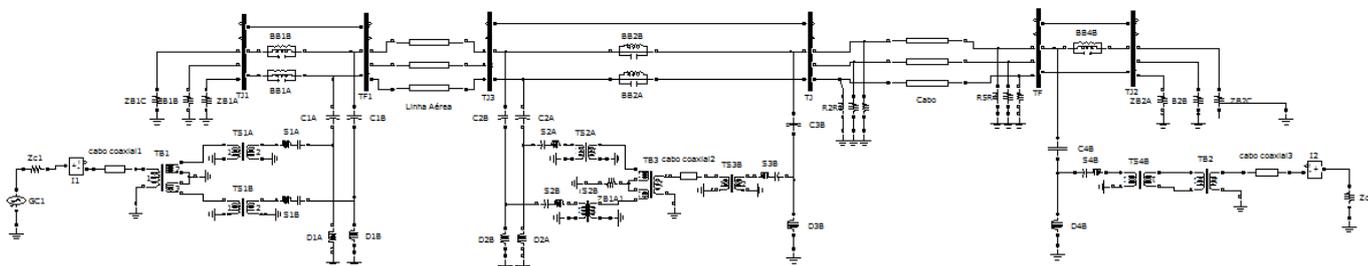


Figura 6- Linha aérea, acoplamento entre fase central e lateral, circuito simples, sem transposição + Cabo subterrâneo (conexão por meio de desvio).

Neste caso, porém, foi previsto um circuito de desvio adequado para casar as impedâncias muito diferentes da linha aérea e do cabo isolado, formado pelas colunas capacitivas e bobinas de dreno de três TPCs (2A, 2B e 3B), por três circuitos de sintonia (TS2A, TS2B e TS3B) e por um cabo coaxial que os conecta (cabo coaxial 2). Os demais elementos neste sistema têm as mesmas características que as do sistema anterior.

Espera-se nessa configuração, comparativamente ao caso anterior, uma redução na perda introduzida no enlace pela inserção de um elemento de transição que provê o adequado casamento de impedâncias entre a linha aérea e o cabo.

Novamente, como no item anterior, foram realizadas simulações mantendo o comprimento da linha aérea fixo, igual a 100 km, e variando-se dois parâmetros: o comprimento do cabo isolado e a frequência da portadora.

Os resultados obtidos para o conjunto das simulações foi organizado da mesma maneira que nos casos anteriores e estão reunidos, de forma resumida, na tabela 13, abaixo.

Tabela 13- Perdas na linha aérea, no cabo subterrâneo e total do canal, num sistema com acoplamento entre a fase central e uma lateral, circuito simples, sem transposição, em função da frequência, conectada por meio de desvio a um cabo subterrâneo com comprimentos de 0,5 a 10 km.

Frequência canal kHz	Comprimento do cabo subterrâneo											
	0,5 km			2 km			5 km			10 km		
	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total	P (dB) linha aérea	P (dB) cabo subterrâneo	P (dB) total
30	-0,76	-0,08	-11,73	-0,64	-0,28	-11,42	-0,62	-0,86	-11,71	-0,75	-1,33	-12,93
100	-2,96	-0,14	-13,67	-2,86	-0,60	-14,25	-2,88	-1,39	-15,05	-2,86	-2,77	-16,44
200	-3,47	-0,22	-14,92	-3,54	-0,92	-15,44	-3,56	-2,19	-16,71	-3,52	-4,27	-19,11
300	-4,43	-0,28	-16,13	-4,39	-1,13	-16,92	-4,37	-2,80	-18,67	-4,35	-5,44	-21,23
400	-5,62	-0,37	-17,29	-5,67	-1,45	-18,27	-5,57	-3,40	-20,49	-5,57	-6,95	-23,93
500	-4,61	-0,42	-18,92	-4,60	-1,67	-18,20	-4,61	-4,15	-20,73	-4,78	-7,70	-25,02

Dos resultados apresentados na tabela 13 para o comprimento de cabo de 0,5 km, nota-se que as perdas no cabo subterrâneo continuam pequenas, variando entre -0,08 e -0,42 dB, e que agora as perdas na linha aérea são substancialmente menores do que aquelas observadas no caso anterior, ficando entre -0,76 e -4,61 dB. As perdas na linha aérea voltaram a ficar próximas daquela observadas no sistema apenas com linha aérea, diferindo destas em média por apenas 0,57 dB. Conclui-se, assim, que as perdas devidas ao descasamento na conexão da linha com o cabo foram praticamente eliminadas pelo desvio.

Já a perda total do enlace situou-se na faixa de -11,73 a -16,92 dB, tendo diminuído em média 3,26 dB em relação ao caso anterior. Assim, essas perdas ficam, em média, 1,51 dB maiores que as perdas observadas no caso da linha aérea sem cabo, demonstrando ter condições praticamente totais de serem aceitáveis para operar o enlace.

V. CONCLUSÕES

Os resultados das simulações realizadas mostram consistência com o previsto pelo método convencional.

Observa-se que, para todos os tipos de acoplamento há uma dependência acentuada da performance do canal com a frequência da portadora utilizada, sendo que, em geral, a atenuação global do canal cresce com a frequência da portadora. Por outro lado, fica evidente dos resultados das simulações que o crescimento da atenuação com a frequência não

se dá de forma monotônica nem bem comportada. Há para cada comprimento de linha aérea e de cabo subterrâneo frequências sucessivas que exibem perdas substancialmente maiores ou menores de forma imprevisível. Isto indica que a aplicação da ferramenta de simulação é uma maneira mais segura para se prever o comportamento de um canal de comunicação por OPLAT numa dada frequência do que o método tradicional, que é muito simplificado.

Observa-se também que os sistemas com acoplamento a duas fases de uma linha aérea, circuito simples, apresentam as menores atenuações, seguidos pelos acoplados entre fase e terra. O sistema estudado com acoplamento entre fases centrais de uma linha aérea com circuito duplo demonstrou, conforme esperado atenuação superior a todos os demais. Contudo a diferença média entre as perdas no acoplamento entre fase central e terra e entre fases centrais de uma linha com circuito duplo é de apenas 0,75 dB, o que demonstra que este tipo de acoplamento não deve, de forma geral, originar perdas proibitivas ao funcionamento de um enlace.

O caso mais representativo das condições reais de uma subestação típica da CHESF, como a de Angelim, refere-se a uma linha aérea de 230 kV, circuito simples, com comprimento em torno de 100 km, à qual o sinal de portadora do sistema de comunicação via OPLAT é acoplado entre a fase central e uma lateral. Por esse motivo, apesar de muitos outros casos terem sido estudados e apresentados no neste relatório, as discussões a seguir referem-se, fundamentalmente, a esse caso.

O modelo simulado no ATP com dados de uma linha aérea típica forneceu os parâmetros necessários para a simulação do sistema de comunicação completo apenas com linha aérea. O principal parâmetro global da linha aérea obtido foi a impedância de surto no domínio da fase, que pode ser considerada equivalente à impedância característica da linha na faixa de frequências normalmente utilizada para as portadoras dos sistemas, que vai dos 30 kHz aos 500 kHz. O valor encontrado desta impedância, em média, foi de 401,1 Ω , muito próximo do considerado padrão para linhas deste nível de tensão.

Foi realizada uma série de simulações do sistema completo a fim de averiguar o desempenho do canal em termos de perdas e níveis de potência em função da frequência da portadora. Os principais resultados dessas simulações, que constam na tabela 7, mostram que a atenuação da linha de transmissão varia entre -0,73 dB e -6,13 dB quando a frequência da portadora vai de 30 kHz a 500 kHz. Nas mesmas condições a perda total do enlace vai de -9,95 a -15,60 dB.

Esses valores são menores do que aqueles obtidos pelo método convencional por dois motivos. O primeiro é que no método convencional consideram-se sempre as piores condições ambientais (penalizando as perdas na linha aérea) e, até o momento, não foram implementadas as influências destas condições no modelo de linha simulado no ATP. O segundo motivo é que no método convencional as perdas nos cabos coaxiais de conexão entre as caixas de sintonia e o transmissor ou o receptor são, em geral, sobreestimadas, enquanto que no método proposto estas perdas são calculadas a partir dos modelos a parâmetros distribuídos simulados no ATP, o que conduz a valores mais modestos.

A fim de avaliar o desempenho do enlace ao se conectar à linha aérea um trecho de cabo isolado, próprio para instalação subterrânea, foram realizadas simulações considerando dois tipos de sistemas: um em que esta conexão é feita de forma direta e outro em que a conexão é feita por meio de um desvio que provê o correto casamento das impedâncias da linha e do cabo.

Nota-se dos resultados apresentados, como esperado, que os sistemas com conexão direta entre cabo e linha apresentam perdas mais dependentes da frequência e atingem valores mais elevados que as exibidas pelos sistemas com conexão efetuada por meio de desvio.

Apesar de que em condições específicas (principalmente em frequências mais baixas de portadora e comprimentos menores de cabos isolados) tenham sido observados valores de atenuação global do enlace menores na conexão direta, quando se observa o conjunto de resultados para todas as frequências e comprimentos de cabos, a vantagem do uso da conexão por desvio permanece evidente. Para os casos analisados em que a frequência da portadora aproxima-se de 100 kHz, comumente utilizada nos enlaces reais, o uso da conexão direta entre cabo e linha só é admissível para comprimentos de cabos curtos, até cerca de 2 km. Para comprimentos de cabos maiores, o uso de desvios na conexão entre cabo e linha demonstrou-se uma alternativa viável para reduzir as perdas e permitir a operação dos enlaces.

Como resultado geral, pode-se afirmar que a ferramenta desenvolvida pode ser utilizada de forma consistente para auxiliar o projeto de enlaces de comunicação via OPLAT, com ou sem a presença de trechos de cabos isolados em série com linhas aéreas em qualquer configuração de acoplamento do sinal de portadora à linha.

Frente ao exposto, pode-se dizer que todos os objetivos iniciais do projeto foram alcançados com êxito.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sanders, M. P.; Ray, R. E.. Power Line Carrier Cannel & Application considerations for transmission line relaying, Pulsar document number C045-P0597.
- [2] Murata, M. M.; FERREIRA, A. E.. Vantagens dos Serviços Convergentes sobre Linhas de Alta Tensão. In: XIII ERIAC - Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano do Cigré, 2009, Puerto Iguazú. XIII ERIAC - Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano do Cigré, 2009.
- [3] ADAMI, J. F. ; Martinez ; DALLBELLO, A. . Modelagem e Simulações de um Sistema de Ondas Portadoras através do ATP. In: EIGHTH LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION_CLAGTEE; Ubatuba; 2009.
- [4] IEEE Std. 643-1980, IEEE Guide for Power-Line Carrier Application.
- [5] Ademar V. de Carvalho Júnior. Interação Transitória entre Transformadores Capacitivos de Potencial e Linhas de Transmissão. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco.
- [6] Tatsuo Udo, Mikio Kawai, "Fault Generated Impulse Noise Voltage in a Transmission Line," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Volume PAS-86, No. 6, pp. 684-687, junho, 1967.