



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO -GTL**

**GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMA ELÉTRICO -  
GTL**

**SISTEMAS DE TELEPROTEÇÃO VIA ONDAS PORTADORAS EM CABOS DE ALTA TENSÃO PARCIALMENTE  
ENTERRADOS**

**Hélder de França Costa  
CHESF**

**Miquel Serra Aguilera  
ZIV - ESPANHA**

**RESUMO**

Equipamentos para LTs com cabos subterrâneos parcialmente enterrados como meio de transmissão são afetados devido à descontinuidade que representa a conexão aéreo-subterrânea da LT. Hoje não existe no mercado nacional solução com equipamentos de Teleproteção de transmissão por Ondas Portadoras e acoplamentos associados para esse tipo de aplicação. Mostraremos com a ZIV / DIMAT, meios para diminuir essas restrições, e soluções para esse arranjo misto de LT, e um trabalho de P&D desenvolvido com a FUSP sobre esse assunto, com resultados de medições em laboratório. Serão mostrados resultados de simulações de casos reais e softwares que realizam essas simulações.

**PALAVRAS-CHAVE**

Teleproteção, Ondas Portadoras, Linha de Transmissão, Cabo Enterrado, Conexão LT Aérea-Subterrânea

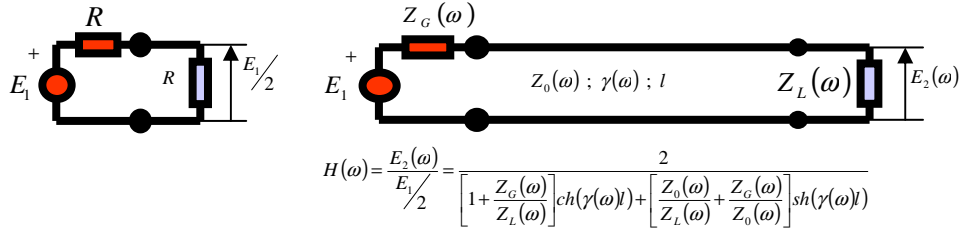
**1.0 - ESTUDOS E EXPERIÊNCIA EM CABOS SUBTERRÂNEOS DE ALTA TENSÃO (ZIV/DIMAT)**

**1.1 Linhas De Transmissão**

Na Figura 1 se mostra as relações para a resposta de frequência de uma linha de transmissão homogênea de impedância característica “ $Z_0$ ”, constante de propagação “ $\gamma$ ” e comprimento “ $L$ ”. A situação de referência é a que corresponde a um gerador de tensão carregado idealmente sem intervir nenhuma linha de transmissão.

Foi considerado quatro casos:

- Caso Geral. Valor arbitrário das impedâncias do gerador e carga em relação a impedância característica da linha.
- Caso Ideal. As impedâncias do gerador e carga, ambas coincidem com a impedância característica da linha.
- Caso Particular 1. Só a impedância do gerador coincide com a impedância característica da linha.
- Caso Particular 2. Só a impedância da carga coincide com a impedância característica da linha.



Si  $Z_L(\omega) = Z_G(\omega) = Z_0(\omega)$

$$H(\omega) = \frac{E_2(\omega)}{E_1/2} = \frac{2}{\left[1 + \frac{Z_0(\omega)}{Z_0(\omega)}\right] \text{ch}(\gamma(\omega)l) + \left[\frac{Z_0(\omega)}{Z_0(\omega)} + \frac{Z_0(\omega)}{Z_0(\omega)}\right] \text{sh}(\gamma(\omega)l)} = \frac{1}{\text{ch}[\gamma(\omega)l] + \text{sh}[\gamma(\omega)l]} = \frac{1}{e^{\gamma(\omega)l}} = e^{-\gamma(\omega)l} = e^{-\alpha(\omega)l} e^{-j\beta(\omega)l}$$

Si  $Z_G(\omega) = Z_0(\omega)$  pero  $Z_L(\omega) \neq Z_0(\omega)$

$$H(\omega) = \frac{2}{\left[1 + \frac{Z_0(\omega)}{Z_L(\omega)}\right] \text{ch}(\gamma(\omega)l) + \left[\frac{Z_0(\omega)}{Z_L(\omega)} + \frac{Z_0(\omega)}{Z_0(\omega)}\right] \text{sh}(\gamma(\omega)l)} = \frac{2Z_L(\omega)}{Z_0(\omega) + Z_L(\omega)} \frac{1}{\text{ch}[\gamma(\omega)l] + \text{sh}[\gamma(\omega)l]} = \frac{2Z_L(\omega)}{Z_0(\omega) + Z_L(\omega)} e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{2Z_L(\omega)}{Z_0(\omega) + Z_L(\omega)} e^{-\alpha(\omega)l} e^{-j\beta(\omega)l}$$

Si  $Z_L(\omega) = Z_0(\omega)$  pero  $Z_G(\omega) \neq Z_0(\omega)$

$$H(\omega) = \frac{2}{\left[1 + \frac{Z_G(\omega)}{Z_0(\omega)}\right] \text{ch}(\gamma(\omega)l) + \left[\frac{Z_0(\omega)}{Z_0(\omega)} + \frac{Z_G(\omega)}{Z_0(\omega)}\right] \text{sh}(\gamma(\omega)l)} = \frac{2Z_0(\omega)}{Z_0(\omega) + Z_G(\omega)} \frac{1}{\text{ch}[\gamma(\omega)l] + \text{sh}[\gamma(\omega)l]} = \frac{2Z_0(\omega)}{Z_0(\omega) + Z_G(\omega)} e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{2Z_0(\omega)}{Z_0(\omega) + Z_G(\omega)} e^{-\alpha(\omega)l} e^{-j\beta(\omega)l}$$

FIGURA 1- Resposta de Freqüência de Uma Linha de Transmissão

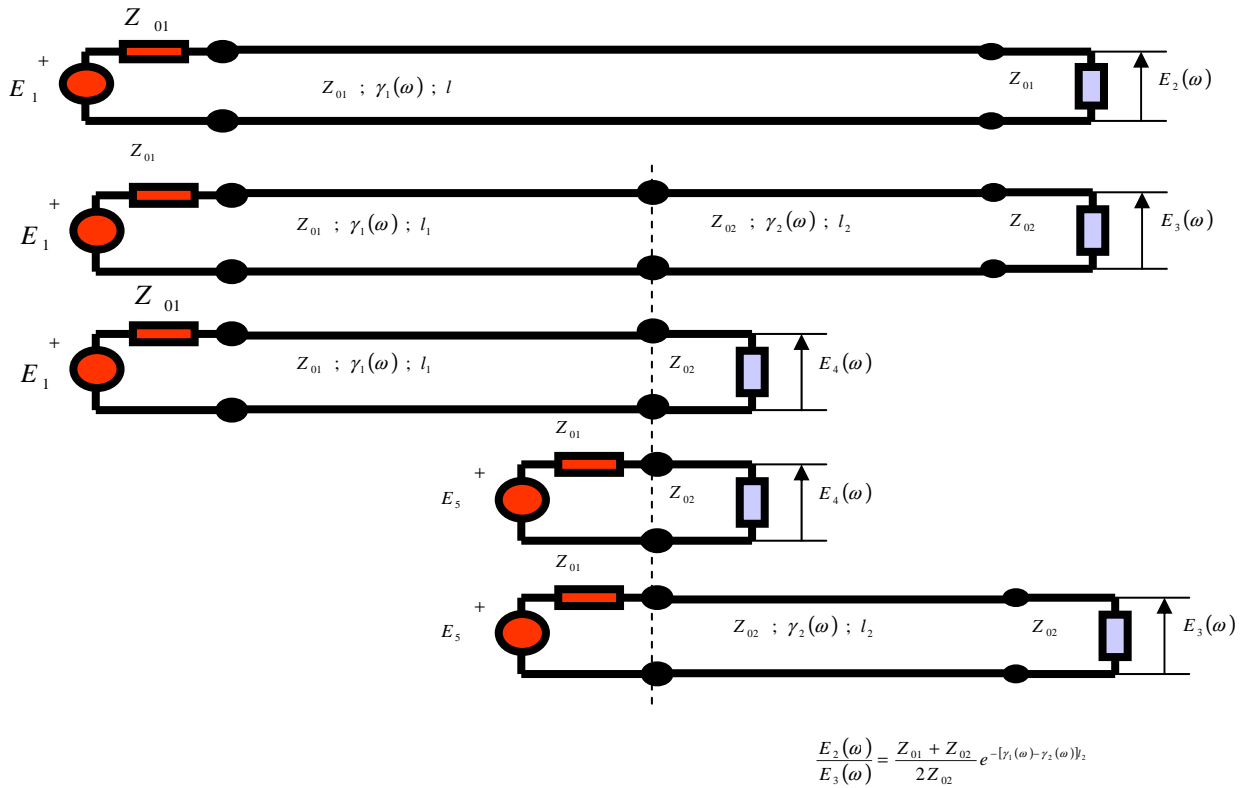
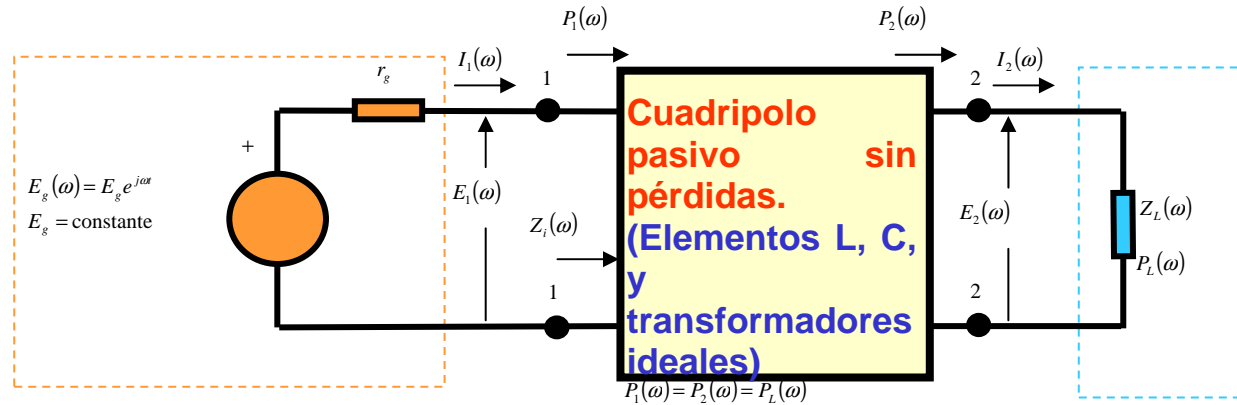


FIGURA 2 - Comparação da Resposta de Freqüência do Caso Analisado para Linha Homogênea

### 1.2 Atenuação Composta E Atenuação De Reflexão

Na Figura 3 está resumido os conceitos básicos envolvidos nas redes de acoplamento para sistemas de onda portadora em linhas de A.T. Os conceitos se referem a um acoplamento fase-terra, porém, uma vez que os acoplamentos fase-fase se podem analisar como combinação dos acoplamentos fase-terra, todas as definições seguem sendo válidas.



$P_{\max}$ Potencia máxima (es un número de referencia)  $P_L(\omega)$ Potencia realmente transmitida (es función de la frecuencia)  Definimos "Potencia reflejada" como $P_{ref}(\omega) = P_{\max} - P_L(\omega)$ (que también depende de la frecuencia)	
La atenuación compuesta se define como $\alpha_c(\omega) = 10 \log \frac{P_{\max}}{P_L(\omega)}$	La atenuación de reflexión se define como $\alpha_r(\omega) = 10 \log \frac{P_{\max}}{P_{ref}(\omega)}$

la relación entre ambas es  $10^{-\alpha_c(\omega)/10} + 10^{-\alpha_r(\omega)/10} = 1$

FIGURA 3

### 1.3 Descrição Das Simulações Realizadas

Foi analisado mediante simulação o comportamento de duas linhas de A.T. aéreas com um trecho de cabo subterrâneo em um dos extremos com os seguintes dados e hipóteses.

Linha 1: Comprimento total 9910 m dos quais 745 m são subterrâneos

Linha 2: Comprimento total 56075 m dos quais 745 m são subterrâneos

Impedância característica dos trechos aéreos: 300  $\Omega$

Impedância característica dos trechos subterrâneos: 30  $\Omega$

Capacidade dos capacitores de acoplamento: 6600 pF

As unidades de acoplamento estão ajustadas para adaptação a 300  $\Omega$  no lado aéreo e 30  $\Omega$  no lado subterrâneo.

Linha 1: 412-416kHz e 428-432kHz ; atenuação 14dB

Linha 2: 432-436kHz e 436-440kHz ; atenuação 20dB

A Figura 4 mostra o gráfico da atenuação de reflexão, de um sistema de acoplamento formado por um capacitor de acoplamento de 6600pF, uma carga de linha de 300 $\Omega$  e uma unidade de acoplamento ajustada para operar corretamente com os valores indicados. A Figura 5 mostra o resultado da mesma configuração, com impedância de linha de 30 $\Omega$ . Neste caso o ajuste da unidade de acoplamento está otimizado para estes valores. Em ambas as figuras se indicou, como referência, a linha correspondente a 12 dB de atenuação de reflexão.

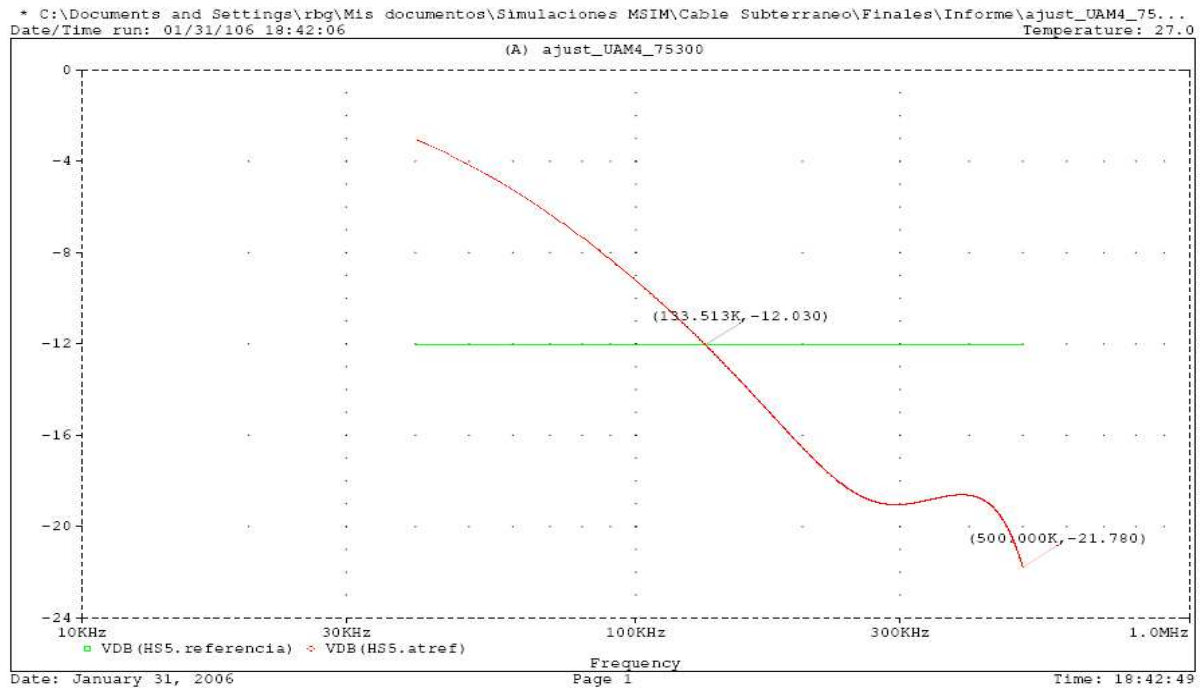


FIGURA 4

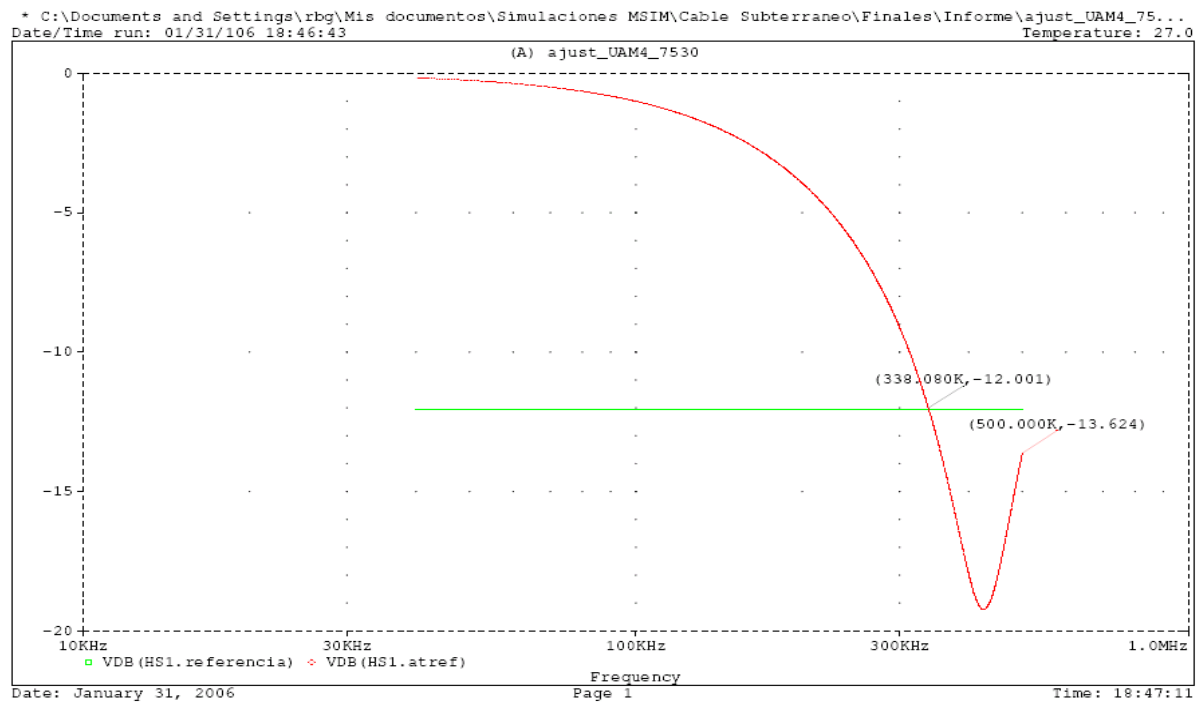


FIGURA 5

O seguinte passo é simular a atenuação de reflexão dos enlaces na situação em que já se considera incluído o trecho de cabo subterrâneo. Tal análise considerou a banda de frequências útil segundo as considerações efetuadas nos parágrafos anteriores, ou seja, a limitação de banda devida ao efeito da menor impedância apresentada pelos cabos subterrâneos. Os resultados estão indicados na Figura 6.

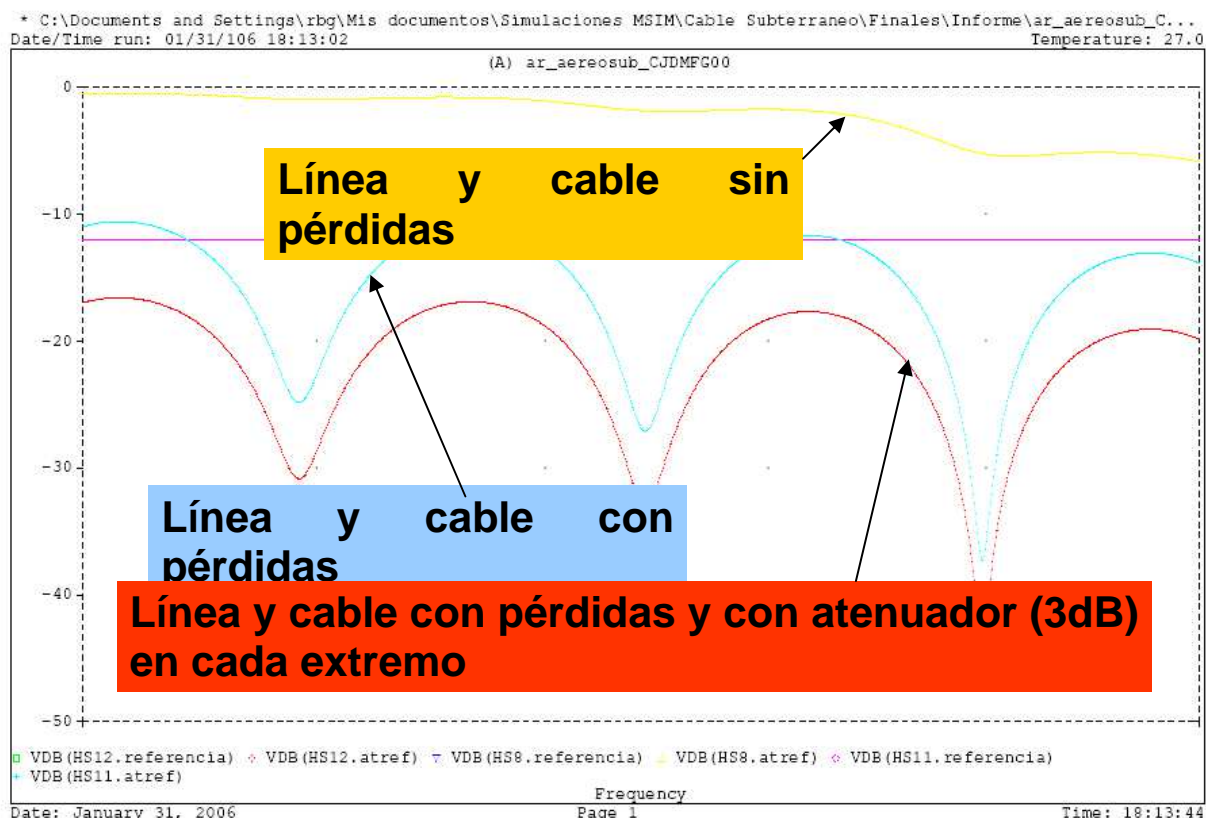


FIGURA 6

## 2.0 - AVALIAÇÃO DE SISTEMAS OPLAT – CABOS SUBTERRÂNEOS CHESF

A CHESF tem hoje dois trechos de cabos subterrâneos trifásicos de alta tensão em operação em cada uma das subestações de 230 KV de Angelim (em Pernambuco) e de Delmiro Gouveia (no Ceará). A seguir mostraremos resultados numéricos, referentes às medições e simulações (através de software desenvolvido pela FUSP especificamente para a CHESF) de transmissão de sinais Carrier em cabos subterrâneos de alta tensão idênticos aos em operação na SE Angelim. Ver Figura 7.

SE TAC	230 KV	SE AGL	SE FZD	230 KV	SE DMG
	LT 04M4			LT 04F4	
CA = 64 KM		CS = 380 M		CA = 7,1 KM	CS = 390 M
	LT 04M5			LT 04F5	
CA = 64 KM		CS = 400 M		CA = 7,1 KM	CS = 390 M
	LT 04M6				
CA = 65,7 KM		CS = 310 M			

FIGURA 7 – Circuitos Mistos da CHESF – Cabos de Alta Tensão Aéreos + Subterrâneos

### 2.1 Impedância Característica da Linha de Alta Tensão Aérea (230 KV)

Tabela 1 – Caracterização da Linha Aérea Utilizada Nas Simulações

Zcaracterística (Zsurto) 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

Zcaracterística (Zsurto) correspondente à fase do meio

Tabela 2 – Caracterização da Linha Subterrânea Utilizada Nas Simulações

Zcaracterística (Zsurto) Domínio da Fase (em ohms) em Função da Frequência					
30 kHz	100 kHz	200 kHz	300 kHz	400 kHz	500 kHz
44.5	44.2	44.1	44.1	44.1	44.1

Zcaracterística (Zsurto) correspondente à fase do meio

## 2.2 Sistema de Transmissão: Linha Aérea + Cabo Subterrâneo Sem Acoplamento Na Derivação

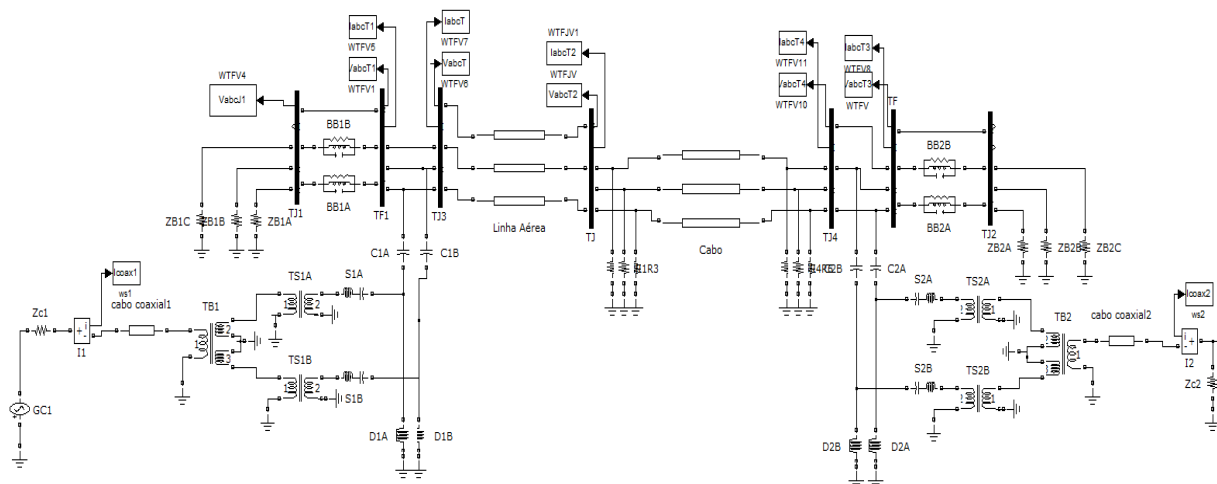


FIGURA 8 – Circuito Misto de Simulação de Cálculos Para Sistemas Fase-Fase

## 2.3. Acoplamento Do Sinal De Onda Portadora Entre Duas Fases Só Numa Linha Aérea

Tabela 3 – Simulação Para Linha Aérea de 100 Km Sem Transposições

Frequência carrier	Potência saída do Tx	Potência saída circuito acoplamento	Potência entrada da linha aérea	Potência na saída da linha aérea	Pot. entrada circuito acoplamento	Potência na entrada Rx
kHz	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm
30	39,92	38,09	36,05	35,32	31,98	29,96
100	39,72	37,22	35,85	32,83	29,36	27,34
200	39,66	36,99	35,67	31,78	28,30	26,28
300	39,71	37,19	35,72	30,59	27,11	25,09
400	39,78	37,44	35,97	29,59	26,10	24,08
500	39,87	37,87	35,91	29,78	26,29	24,27

Tabela 4 – Perdas Na Linha Aérea E Nos Acoplamentos Em Função Do Comprimento Da Linha

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

Tabela 5 – Simulação Para Linha Aérea de 100 Km Com Transposições

Frequência carrier	Potência saída do Tx	Potência saída circuito acoplamento	Potência entrada da linha aérea	Potência na saída da linha aérea	Potência na saída da linha subterrânea	Potência entrada circuito acoplamento	Potência na entrada Rx
kHz	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm
30	39,26	35,16	34,53	29,92	29,86	26,48	24,46
100	39,35	35,68	34,60	27,98	27,55	24,07	22,05
200	39,94	38,18	35,87	29,34	29,07	25,59	23,57
300	39,82	37,63	35,98	25,41	24,83	21,35	19,33
400	39,52	36,33	35,41	26,21	25,82	22,33	20,32
500	39,87	37,85	35,94	23,97	23,31	19,83	17,81

Tabela 6 – Perdas Na Linha Aérea E Nos Acoplamentos Em Função Do Comprimento Da Linha

Frequência carrier	Perda total (dB) em função do comprimento da linha aérea			
kHz	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

2.4. Acoplamento Do Sinal De Onda Portadora Entre Duas Fases Numa Linha Mista Aérea + Cabo Subterrâneo  
(Sem acoplamento na conexão Linha Aérea – Cabo Subterrâneo)

Tabela 7 – Simulação Para Linha Aérea de 100 Km + Cabo Subterrâneo de 0,5 Km

Frequência carrier	Potência saída do Tx	Potência saída circuito acoplamento	Potência entrada da linha aérea	Potência na saída da linha aérea	Potência na saída da linha subterrânea	Potência entrada circuito acoplamento	Potência na entrada Rx
kHz	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm	dBm
30	39,26	35,16	34,53	29,92	29,86	26,48	24,46
100	39,35	35,68	34,60	27,98	27,55	24,07	22,05
200	39,94	38,18	35,87	29,34	29,07	25,59	23,57
300	39,82	37,63	35,98	25,41	24,83	21,35	19,33
400	39,52	36,33	35,41	26,21	25,82	22,33	20,32
500	39,87	37,85	35,94	23,97	23,31	19,83	17,81

Tabela 8 – Quadro Resumido Das Perdas Em Função Do Comprimento Do Cabo Subterrâneo

Frequência carrier	Comprimento do cabo subterrâneo											
	0.5 km			2 km			5 km			10 km		
kHz	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	-4,61	-0,06	-14,81	-5,26	-0,34	-15,97	-5,30	-0,70	-16,38	-4,95	-1,47	-16,63
100	-6,62	-0,43	-17,29	-5,11	-0,53	-15,66	-6,12	-1,61	-17,95	-6,16	-3,17	-19,53
200	-6,53	-0,27	-16,37	-7,28	-0,95	-17,86	-7,88	-2,84	-20,31	-7,84	-4,80	-22,26
300	-10,57	-0,58	-20,49	-10,08	-1,56	-21,00	-8,90	-2,95	-21,19	-9,18	-5,88	-24,41
400	-9,19	-0,39	-19,20	-8,82	-3,58	-22,04	-10,18	-4,03	-23,87	-9,69	-7,76	-27,08
500	-11,97	-0,66	-22,06	-10,93	-3,09	-23,46	-10,66	-5,74	-25,83	-12,28	-8,78	-30,51

Tabela 9 – Quadro Resumido Das Perdas Para Vários Comprimentos De LT Aéreas + CS De 2 Km

Frequência carrier	Comprimento da linha aérea											
	50 km			100 km			150 km			200 km		
kHz	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	-3,46	-0,32	-15,13	-5,26	-0,34	-15,97	-6,39	-0,39	-16,70	-7,25	-0,41	-17,33
100	-2,70	-0,52	-13,47	-5,11	-0,53	-15,66	-7,83	-0,54	-17,71	-8,16	-0,56	-18,21
200	-4,73	-0,90	-16,02	-7,28	-0,95	-17,86	-10,77	-1,04	-21,16	-11,85	-1,08	-22,39
300	-7,39	-1,25	-18,33	-10,08	-1,56	-21,00	-11,72	-1,76	-22,89	-13,20	-1,81	-24,45
400	-6,17	-2,39	-18,34	-8,82	-3,58	-22,04	-10,61	-4,26	-24,31	-12,82	-4,21	-26,49
500	-7,42	-2,35	-19,78	-10,93	-3,09	-23,46	-12,70	-3,39	-25,51	-14,48	-2,90	-26,87

### 3.0 - CONCLUSÃO

#### 3.1 ZIV - Espanha

Quando em linhas de transmissão aéreas se inserirem trechos de cabos subterrâneos, se produzem descontinuidades devido ao diferente valor das impedâncias características de cada trecho. Em termos relativos, a impedância característica dos cabos é da ordem da décima parte da impedância correspondente às linhas aéreas. Estas descontinuidades dão lugar a que o sistema deixe de se comportar como uma linha homogênea, com o que as reflexões que se produzem nos pontos de descontinuidade dão lugar a que a resposta de frequência se afaste do comportamento original piorando a qualidade de transmissão.

Outro ponto relevante tem lugar se as unidades de acoplamento não estão preparadas para poder se ajustar para trabalhar com valores baixos de impedância característica (caso dos cabos). Este último ponto pode se melhorar não apenas com a utilização de unidades de acoplamento adequadas como também quando seja possível utilizando capacitores de acoplamento de maior capacidade, assim como tentar operar nas zonas de frequência mais altas da faixa de onda portadora.

No subitem 1.3 foi mostrado o resultado de simulações onde a atenuação de reflexão, que inicialmente piora pelo efeito da falta de adaptação nos pontos de descontinuidade, pode melhorar mediante a inclusão de atenuadores resistivos. Este último pode ser aplicado sempre e quando a atenuação inicial do enlace não seja elevada e que o valor da relação sinal-ruído se mantenha melhor que o valor esperado para a boa ou aceitável qualidade do enlace.

#### 3.2 CHESF - Brasil

Os principais parâmetros obtidos para o cabo subterrâneo em estudo, tanto pelo software simulador quanto pelos ensaios realizados com amostras reais do mesmo, são sua impedância característica, cujo valor médio calculado foi 44,2  $\Omega$ , e a constante de atenuação, que variou entre 0,21 e 0,47 dB/km para frequências de Ondas Portadoras na faixa de 30 a 500 kHz.

Do exposto anteriormente, pode-se concluir que é viável realizar a conexão direta entre linha aérea e cabo isolado. Caso não haja margem disponível de potência no sistema carrier de comunicação instalado para suportar a atenuação prevista, uma alternativa para reduzir a perda total e viabilizar a operação do enlace é a utilização de acoplamento adicional na conexão linha aérea-cabo subterrâneo.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Sanders, M. P.; Ray, R. E. Power Line Carrier Channel & Application considerations for transmission line relaying, Pulsar document number C045-P0597.
- (2) IEEE Std. 643-1980, IEEE Guide for Power-Line Carrier Application.
- (3) Apuntes de teoría de campos electromagnéticos y líneas de transmisión de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya).
- (4) Trabajos técnicos en Dimat para análisis y diseño de unidades de acoplamiento.
- (5) Sesión técnica de Octubre 2006 en Madrid con motivo del evento Matelec 2006.

### 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Hélder de França Costa é Engenheiro Eletricista (Telecomunicações) pela UFPB (Universidade Federal da Paraíba). Nascido em 10.03.1960 em Campina Grande – PB. Desde 1987 trabalha na CHESF, empresa do grupo Eletrobrás. Nesta empresa tem realizado trabalhos de planejamento, projetos e implantação de sistemas de Teleproteção, bem como acompanhamento em Testes de Tipo dos equipamentos pertinentes a essa área. Também participa em grupos de trabalho do COBEI - ABNT em temas relacionados com os sistemas de Teleproteção.

Miquel Serra Aguilera é Engenheiro de Telecomunicações pela UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), na qual também deu aulas de projeto de filtros e processamento de sinais durante 13 cursos. Também deu aulas de propagação eletromagnética durante 2 cursos na URL (Universitat Ramón Llull). Desde o ano 1976 trabalha na empresa DIMAT, que desde o ano 2003 está integrada ao grupo ZIV. Nesta empresa tem realizado trabalhos de investigação e desenvolvimento, comerciais e de direção. Atualmente faz parte do Comitê de Direção. Participa regularmente em grupos de trabalho do IEC e CIGRE em temas relacionados com os sistemas de transmissão por onda portadora.