

FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA

ESTUDO DA COMPENSAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dissertação apresentada à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : Processamento da Energia

ORIENTADOR : Dr. - Engº HANS DIETER SCHYMROCH

CAMPINA GRANDE

MARÇO - 1982

Handwritten:
F. das Chagas Fernandes Guerra
69314



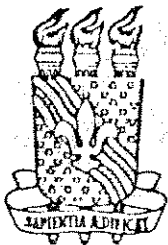


G934e Guerra, Francisco das Chagas Fernandes.
Estudo da compensação de linhas de transmissão /
Francisco das Chagas Fernandes Guerra. - Campina Grande,
1982.
101 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
Engenharia Elétrica e Informática, 1982.
"Orientação : Prof. Dr. Hans Dieter Schymroch".
Referências.

1. Linhas de Transmissão. 2. Transmissão - Energia
Elétrica. 3. Tensão Elétrica. 4. Engenharia Elétrica -
Dissertação. I. Schymroch, Hans Dieter . II. Universidade
Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). III.
Título

CDU 621.372.2(043)



CPgEE/CCT-UEPB

COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

FRANCISCO DAS CHAGAS FERNANDES GUERRA

TÍTULO: "Estudo da Compensação de Linhas de Transmissão Extra-Longas"

CONCEITO:

Aprovado

COMISSÃO EXAMINADORA:

PROF. HANS DIETER SCHYMROCH - Dr. Ing.
- Presidente -

PROF. WELLINGTON SANTOS MOTA - Ph.D

PROF. DAGOBERTO LOURENÇO RIBEIRO - M.Sc

Campina Grande, 22 de março de 1982.

Aos meus pais e irmãos, à minha
esposa Fátima e às minhas filhas
Sibele, Lígia e Andrea, dedico
este trabalho.

ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>PÁGINA</u>
FIGURA 1.1 - Arranjo básico de um sistema de transmissão em corrente contínua.....	9
FIGURA 1.2 - Linha em C.A. compensada através de compensadores síncronos.....	9
FIGURA 1.3 - Esquema e característica de um compensador estático.....	9
FIGURA 1.4 - Linha eletricamente encurtada.....	10
FIGURA 1.5 - Linha compensada em meia onda - modelo π ..	10
FIGURA 1.6 - Linha compensada em meia onda - modelo T..	10
FIGURA 1.7 - Linha compensada em meia onda - capacitores em derivação.....	10

FIGURA 2.1 - (a) - Diagrama unifilar da linha sem perdas considerada.....	15
(b) - Circuito equivalente.....	15
FIGURA 2.2 - Esquema de compensação em derivação.....	15
FIGURA 2.3 - Efeito da localização e do comprimento da linha na eficiência da compensação usando-se um só banco de capacitores.....	19
FIGURA 2.4 - Esquema de compensação série mais usual....	19
FIGURA 2.5 - Esquema simplificado da proteção de capacitores série.....	23
FIGURA 2.6 - Esquema de proteção de capacitores série desenvolvido pela BPA.....	23
FIGURA 2.7 - Característica tensão versus corrente do resistor não-linear.....	23
FIGURA 2.8 - (a) - Bancos de compensação instalados no centro da linha.....	25
(b) - Efeito das compensações série e shunt	

na capacidade de transmissão da linha	25
FIGURA 2.9 - Perfil de tensões - linha ideal de meia on da aberta no receptor.....	28
FIGURA 2.10 - Perfil de tensões - linha ideal de meia on da curtocircuitada no receptor.....	28
FIGURA 2.11 - Perfil de tensões para $FP = 1$	28
FIGURA 2.12 - Seções em T instaladas no lado de baixa ten são dos transformadores.....	34
FIGURA 3.1 - Seção de linha compensada - capacitor no ponto central.....	39
FIGURA 3.2 - Seção de linha compensada - capacitores em ambas as extremidades.....	39
FIGURA 3.3 - Esquema geral da análise efetuada.....	41
FIGURA 3.4 - (a) - Circuito de linha artificial.....	44
(b) - Simulação da linha por uma associação de quadripolos ligados em cascata....	44

FIGURA 3.5 - Compensação feita apenas nas extremidades da linha.....	47
FIGURA 3.6 - Compensação realizada em pontos intermediários da linha.....	47
FIGURA 4.1 - Perfis de tensão - linha em carga e em vazio	59
FIGURA 4.2 - Perfis de tensão - linha em carga e em vazio	61
FIGURA 4.3 - Perfis de tensão - linha em carga e em vazio	63
FIGURA 4.4 - Perfis de tensão - linha em carga e em vazio	65
FIGURA 4.5 - Perfis de tensão - linha em carga e em vazio	68
FIGURA 4.6 - Perfis de tensão - linha em carga e em vazio	72
FIGURA 4.7 - Perfil de tensões - modelo π	78
FIGURA 4.8 - Perfil de tensões - modelo π	79
FIGURA 4.9 - Perfil de tensões - capacitor shunt.....	80
FIGURA 4.10 - Perfil de tensões - capacitor shunt.....	81

FIGURA 4.11 - Perfil de tensões - modelo π	82
FIGURA 4.12 - Perfil de tensões - modelo π	83
FIGURA 4.13 - Perfil de tensões - capacitor shunt.....	84
FIGURA 4.14 - Perfil de tensões - capacitor shunt.....	85
FIGURA 4.15 - Rendimento da transmissão versus potência no receptor - $S = 1000$ Km.....	86
FIGURA 4.16 - Rendimento da transmissão versus potência no receptor - $S = 1800$ Km.....	86

RESUMO

O presente trabalho objetiva efetuar uma análise e comparação de alguns métodos de compensação de linhas extralongas. Para duas linhas de comprimentos iguais a 1000 Km e 1800 Km, são empregadas três formas distintas de compensação: na primeira, as linhas são eletricamente encurtadas pelo uso de capacitores em série e de reatores indutivos em derivação. Na segunda, as linhas são artificialmente alongadas para cerca de meio comprimento de onda por reatores em série e capacitores em paralelo, constituindo seções em π instaladas em seus extremos. O terceiro método também prolonga as linhas para pouco mais de meia onda, sendo isto realizado pela instalação de capacitores ao longo das mesmas, em intervalos regulares.

ABSTRACT

The present work intends to accomplish an analysis and comparison of some methods of compensation of long lines. For two lines of lengths equal to 1000 Km and 1800 Km, are used three distinct ways of compensation: first, the lines are electrically shortened by use of series capacitors and shunt reactors. Second, the lines are artificially prolonged to one half wavelength with series reactors and shunt capacitors at the end of the line. Third, the lines are also prolonged to one half wavelength by shunt capacitors, in regular intervals along the line.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A, B, C, D - Constantes generalizadas da linha não-compensada.
- A_T, B_T, C_T, D_T - Constantes generalizadas da linha compensada.
- C - Capacitância em derivação da linha por unidade de comprimento.
- C_c - Capacitância por unidade de comprimento da linha compensada em meia onda.
- C_{cap} - Capacitância total dos capacitores a serem instalados ao longo da linha de meia onda.
- D - Grau de compensação em derivação.
- E - Tensão fase-neutro em um ponto intermediário da linha.
- E_r - Tensão fase-neutro na barra receptora em carga.
- E_{ro} - Tensão fase-neutro na barra receptora em vazio.
- E_s - Tensão fase-neutro.
- f - Frequência de operação do sistema.

I_s	- Corrente no extremo emissor da linha.
I_r	- Corrente no extremo receptor da linha.
L	- Indutância em série da linha por unidade de comprimento.
L_c	- Indutância total em série a ser acrescentada nas extremidades da linha para compensação em meia onda.
L_R	- Indutância total em série da linha real não-compensada.
L_T	- Indutância total em série da linha de meia onda compensada por seções em π ou em T nos extremos.
P	- Potência transmitida pela linha.
P_m	- Potência máxima transmissível através da linha.
P_0	- Potência característica da linha.
S	- Comprimento real da linha.
S	- Grau de compensação série.
S_T	- Comprimento de uma linha hipotética de meia onda não-compensada.
X	- Reatância.
Y	- Admitância.
Z	- Impedância do indutor instalado em série na extremidade da linha.
Z_0	- Impedância característica da linha.
Z_r	- Impedância da carga no receptor.
β	- Constante de fase da linha.
λ	- Comprimento de onda da linha não compensada.

λ_c

- Comprimento de onda da linha compensada.

ω

- Frequência angular de operação.

ÍNDICE

<u>CAPÍTULO</u>		<u>PÁGINA</u>
I	INTRODUÇÃO	1
	1.1 - DIFICULDADES NA OPERAÇÃO DAS LINHAS EX TRALONGAS	1
	1.2 - MEIOS DE VIABILIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE ENERGIA A GRANDES DISTÂNCIAS	3
	1.2.1 - Operação corrente contínua.	3
	1.2.2 - Uso de compensadores síncronos e estáticos.	5
	1.2.3 - Variação artificial do comprimen to elétrico das linhas.	7
II	VARIAÇÃO ARTIFICIAL DO COMPRIMENTO ELÉTRICO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO	11
	2.1 - ENCURTAMENTO DO COMPRIMENTO DAS LINHAS	

CAPÍTULOPÁGINA

DE TRANSMISSÃO	11
2.1.1 - Generalidades.	11
2.1.2 - Compensação em derivação.	14
2.1.3 - Compensação em série.	17
2.1.4 - Efeito da compensação em derivação na compensação série.	24
2.2 - ALONGAMENTO ARTIFICIAL DO COMPRIMENTO ELÉTRICO DAS LINHAS	26
2.2.1 - Generalidades.	26
2.2.2 - Primeiro processo: instalação de seções em T ou em π nos extremos.	29
2.2.3 - Segundo processo: instalação de capacitores ao longo da linha.	31
2.2.4 - Considerações adicionais.	32
III DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS E MODELOS UTILIZADOS	35
3.1 - INTRODUÇÃO	35
3.2 - COMPENSAÇÃO POR CAPACITORES EM SÉRIE E REATORES INDUTIVOS EM PARALELO	36
3.2.1 - Critérios relativos ao carregamento	

CAPÍTULO

PÁGINA

	mento da linha.	36
	3.2.2 - Critérios relativos à forma de compensação da linha.	37
	3.2.3 - Restrições impostas ao funcionamento em permanente da linha.	40
	3.3 - COMPENSAÇÃO PARA TRANSMISSÃO EM MEIA ONDA	42
	3.4 - MÉTODO DE CÁLCULO DAS TENSÕES AO LONGO DA LINHA	43
	3.5 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO COMPUTACIONAL	45
	3.6 - DESCRIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO ESTUDADAS	45
IV	RESULTADOS	48
	4.1 - COMPENSAÇÃO POR CAPACITORES EM SÉRIE E REATORES INDUTIVOS EM DERIVAÇÃO	48
	4.1.1 - Estudo da linha de 1000 Km de extensão.	48
	4.1.2 - Estudo da linha de 1800 Km de extensão.	53
	4.2 - COMPENSAÇÃO EM MEIA ONDA	55

<u>CAPÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
V CONCLUSÕES	87
ANEXO	89
1 - DEFINIÇÃO DE UM QUADRIPOLO	90
2 - IMPEDÂNCIAS DE CIRCUITO ABERTO E DE <u>CUR</u> TO-CIRCUITO	90
3 - IMPEDÂNCIA DE IMAGEM DE UM QUADRIPOLO	92
4 - IMPEDÂNCIA DE IMAGEM DE UMA SEÇÃO EM π	93
BIBLIOGRAFIA	99

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - DIFICULDADES NA OPERAÇÃO DAS LINHAS EXTRALONGAS

A crescente atenção dada às interligações de grandes sistemas e à exploração de fontes de energia de baixo custo de produção situadas em locais distantes dos grandes centros consumidores têm motivado a construção de linhas de transmissão cada vez mais longas. Nos últimos anos, muitas pesquisas foram destinadas a superar os problemas técnicos associados à operação de linhas extralongas, bem como a diminuir os altos investimentos dispendidos na construção das mesmas.

No passado, com o transporte da energia elétrica sendo feito através de linhas de transmissão em corrente alternada relativamente curtas, a restrição mais importante feita à capacidade de transporte de potência nas mesmas consistia, básica-

mente, nos limites térmicos dos condutores. Com o gradativo aumento das distâncias de transmissão ao longo dos anos, surgiram diversos fatores de ordem técnica que começaram a dificultar a operação dessas linhas.

O conceito de comprimento de onda, muito usado em engenharia de comunicações, é relativamente pouco usado pelos engenheiros de potência, face às baixas frequências utilizadas (50 ou 60 Hz). No entanto, se a linha é muito longa, esse aspecto torna-se significativo. A 60 Hz, uma linha de 1250 Km de extensão é dita de um quarto de comprimento de onda. A esta distância, a transmissão em corrente alternada, sem compensação, torna-se inviável, face aos altos valores da reatância indutiva em série, a qual limita a capacidade de transporte de potência através da linha. Também os altos valores da capacitância em derivação fazem com que surjam tensões muito altas ao longo da linha quando na operação em regime de carga reduzida. Este fenômeno é conhecido como *efeito Ferranti* e assume intensidade máxima com a ausência de carga no receptor. Para se ter uma idéia, a relação entre a tensão no emissor e a tensão no receptor de uma linha ideal em vazio é:

$$\frac{E_{ro}}{E_s} = \frac{1}{A} = \frac{1}{\cos(2\pi s/\lambda)} \quad (1.1)$$

Podemos ver que quando o comprimento S da linha aproxima-se de $\lambda/4$ (ou 1250 Km), a tensão no receptor tende a infinito.

1.2 - MEIOS DE VIABILIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE ENERGIA A GRANDES DISTÂNCIAS

A fim de viabilizar a operação das linhas extralongs, várias soluções foram encontradas nos últimos anos. Porém, se sob os aspectos técnicos elas são satisfatórias, nem sempre o são se se leva em conta os aspectos relativos ao custo dos equipamentos empregados, os quais representam uma apreciável parcela do investimento total da linha. Assim, a escolha de uma ou de outra solução depende de uma análise técnico-econômica bastante apurada.

Basicamente, os recursos empregados na viabilização da operação das linhas extralongs consistem em:

- Operação em corrente contínua.
- Uso de compensadores síncronos ou estáticos.
- Variação artificial do comprimento elétrico da linha.

A seguir, são feitas algumas considerações sobre cada um desses métodos.

1.2.1 - Operação em corrente contínua

A primeira linha importante, em corrente contínua surgiu na Suécia, em 1954. Hoje, mais de uma dezena dessas linhas encontram-se em operação, no mundo inteiro. O esquema básico de um sistema em corrente contínua encontra-se representado na Fig. 1.1. Nele, um gerador síncrono gera uma tensão trifásica

na faixa de 6 KV a 27 KV, a 50 ou 60 Hz. Esta tensão é elevada a um valor conveniente para a retificação, feita por pontes retificadoras tiristorizadas. De acordo com o comprimento da linha, a tensão contínua de transmissão pode assumir um valor situado na faixa de 100 KV a 750 KV. No local de consumo, esta tensão é convertida em tensão alternada através dos inversores e reduzida a níveis de distribuição.

Estudos econômicos demonstram a viabilidade da corrente contínua para distância superiores a 500 Km, no caso de linhas aéreas. Esse limite se reduz para 80 Km nas linhas subterâneas e para 30 Km nas linhas submarinas.

Como vantagens da transmissão por corrente contínua, pode-se enumerar os seguintes fatos:

- Não ocorre nenhum problema de estabilidade na transmissão.
- Os perfis ao longo da linha não constituem problema.
- Pode servir como elo de interligação entre sistemas de 50 Hz e 60 Hz.
- Menores perdas por efeito corona, o que resulta menores níveis de rádio-interferência.
- Se ocorre um defeito em um condutor, pode-se assegurar fornecimento de metade da potência anteriormente conduzida pela linha através do condutor remanescente. O retorno de corrente passa a ser feito através do solo.

Como desvantagens, tem-se:

- Alto custo dos equipamentos terminais (conversores e

filtros).

- Os conversores consomem potência reativa, a qual deve ser fornecida *in loco* por capacitores e/ou compensadores síncronos.
- A sobrecarga deve ser a mínima possível.

1.2.2 - Uso de compensadores síncronos e estáticos

Um compensador síncrono consiste em um motor síncrono funcionando em vazio e, de acordo com a corrente de excitação, pode gerar ou absorver reativos. A sua aplicação pode ser feita em pontos intermediários da linha e equidistantes entre si, conforme mostra a Fig. 1.2. Com isto, pode-se controlar o nível das tensões ao longo da linha, aumentar a capacidade de transporte de potência bem como melhorar a estabilidade transitória do sistema.

A utilização de compensadores síncronos para essas finalidades não é um fato novo. CRARY (1945) considerou várias dessas máquinas colocadas em pontos intermediários de uma linha de 600 milhas, obtendo resultados satisfatórios.

Os compensadores síncronos, além do mais, apresentam as seguintes vantagens:

- Compensação contínua de reativos.
- Suportam sobrecargas de curta duração.
- Não geram harmônicos.

Contudo, apresentam os seguintes inconvenientes:

- Perdas elevadas.
- Tempo de resposta longo.
- Possibilidade de perdas de sincronismo durante perturbações no sistema.
- Necessidade de instalação abrigada e fundações especiais.
- Custo de manutenção e operação elevados.
- Complexos equipamentos de partida e proteção.
- Contribui para o aumento do nível de curto-circuito.

Os compensadores estáticos consistem na associação em paralelo de um reator com núcleo de ferro saturável e um banco de capacitores, conforme mostra a Fig. 1.3. Na mesma figura, acha-se indicada a sua característica V versus I .

O indutor é saturado por corrente contínua, sendo o seu nível de saturação controlado pela polarização DC aplicada. Assim, se a tensão da linha tende a subir a níveis inaceitáveis, o circuito tiristorizado comanda a saturação no reator e o compensador estático absorve reativos da linha. Caso contrário, se a tensão cai, o reator é de-saturado e o compensador passa a injetar reativos no sistema, restabelecendo o nível de tensão normal.

A aplicação de reatores saturáveis em linhas longas foi estudado por FRIEDLANDER (1976). Através do emprego de três compensadores ao longo de uma linha, mostrou que era possível efetuar o transporte de potências superiores ao SIL da mesma, melhorando também a estabilidade transitória do sistema.

As vantagens dos compensadores estáticos consistem em:

- Resposta rápida (de 0.5 a 2 ciclos).
- Alta confiabilidade.
- Tecnologia testada e aprovada.
- Sistema de controle simples.
- Manutenção reduzida.
- Proporcionam um controle contínuo de reativos.

Suas desvantagens são:

- Perdas relativamente elevadas.
- Nível de ruído elevado.
- Devido às características não-lineares dos materiais magnéticos, há o aparecimento de harmônicos. Isso exige equipamento auxiliar de filtragem, aumentando os custos.

1.2.3 - Variação artificial do comprimento elétrico das linhas

Neste caso, a compensação pode ser feita através de dois métodos:

- Encurtamento do comprimento elétrico da linha.
- Aumento do comprimento elétrico da linha, aproximando-o de metade do comprimento de onda.

O primeiro método é o mais utilizado de todos os que foram citados. Através de reatores indutivos instalados em derivação ao longo da linha, obtém-se uma compensação parcial da capacitância própria da mesma. Isto melhora os perfis de tensão,

eliminando-se o efeito Ferranti. Por outro lado, geralmente ocorrem ainda maiores limitações na capacidade de transporte de potência. A solução para este problema consiste em compensar-se parcialmente a reatância indutiva própria da linha através da instalação de capacitores em série. A Fig. 1.4 mostra uma linha com este tipo de compensação.

Em relação ao segundo método, as linhas podem ser artificialmente alongadas através dos seguintes modos:

- Pela adição de seções em π às suas extremidades (Fig. 1.5).
- Pela adição de seções em T às suas extremidades (Fig. 1.6).
- Pela instalação de capacitores em paralelo, ao longo da linha, equidistantes entre si (Fig. 1.7).

Essas três formas de compensação serão analisadas ao longo do próximo capítulo, sendo suas vantagens e desvantagens enumeradas e discutidas.

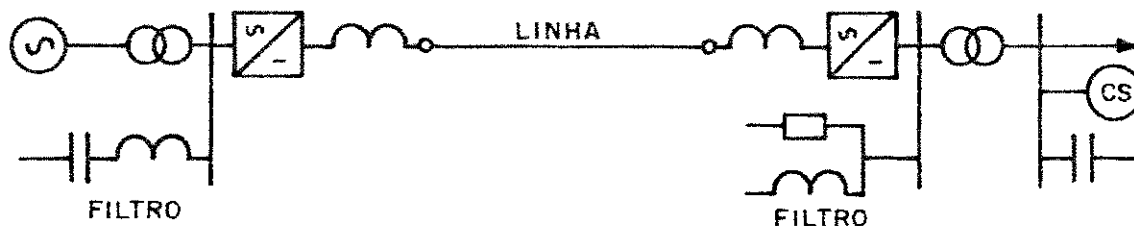


Fig. 1.1 - Arranjo básico de um sistema de transmissão em corrente contínua.

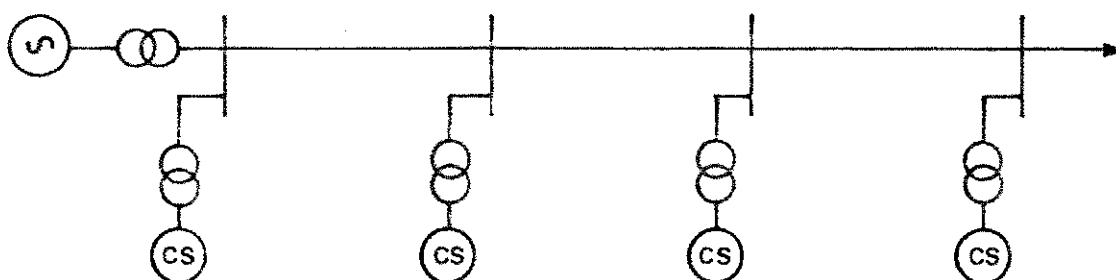


Fig. 1.2 - Linha em C.A. compensada através de compensadores síncronos.

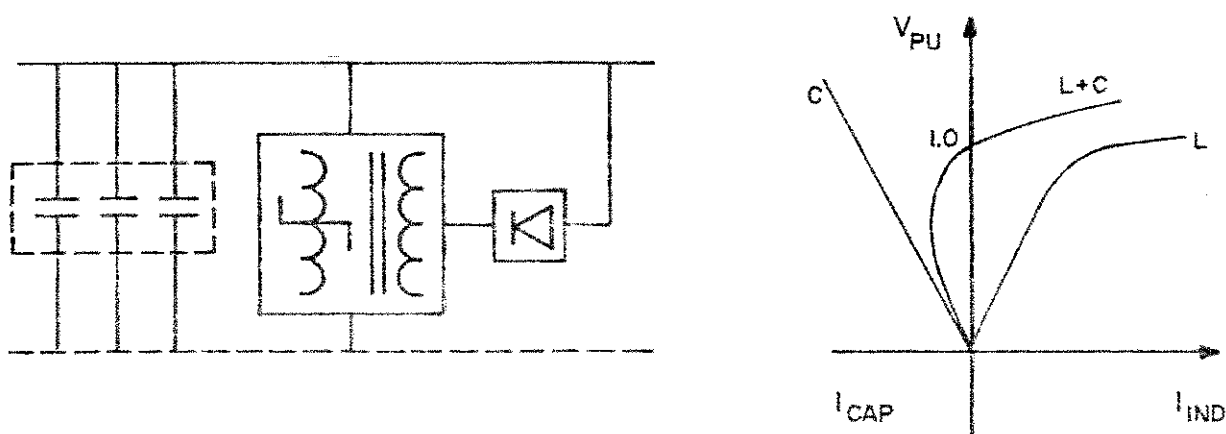


Fig. 1.3 - Esquema e característica de um compensador estático.

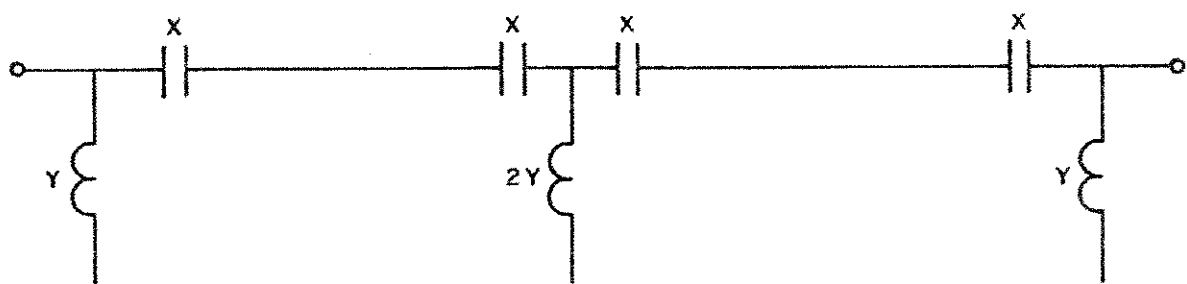


Fig. 1.4 - Linha eletricamente encurtada.

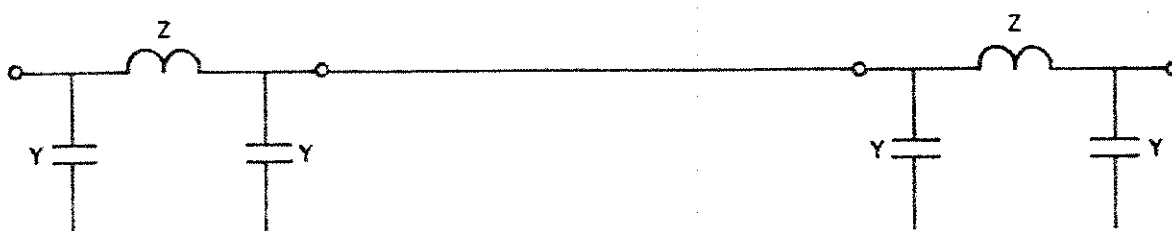


Fig. 1.5 - Linha compensada em meia onda - Modelo n.

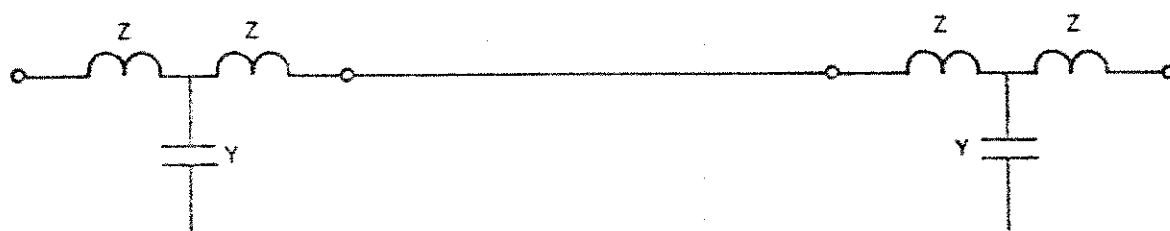


Fig. 1.6 - Linha compensada em meia onda - Modelo T.

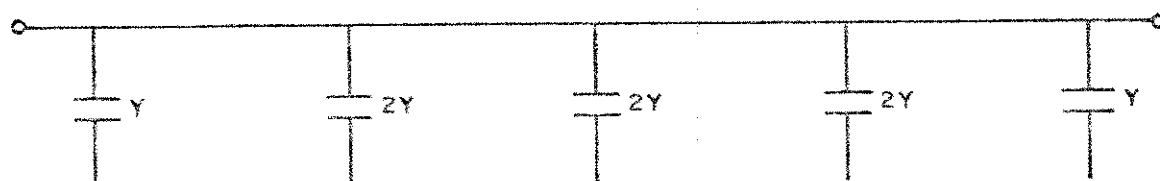


Fig. 1.7 - Linha compensada em meia onda - Capacitores em derivação.

CAPTÍTULO II

VARIAÇÃO ARTIFICIAL DO COMPRIMENTO ELÉTRICO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1 - ENCURTAMENTO DO COMPRIMENTO ELÉTRICO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

2.1.1 - Generalidades

A potência transmitida ao longo de uma linha sem perdas, representada nas figuras 2.1 (a) e (b), é dada por:

$$P = \frac{E_s E_r}{X} \operatorname{sen} \phi \quad (2.1)$$

E_s e E_r são as tensões terminais da linha, ϕ é a diferença de fase entre essas tensões e X é a reatância in

ductiva em série do circuito π equivalente. Este valor é muito próximo da soma das reatâncias internas das duas máquinas, da linha de transmissão e dos transformadores.

Através desta relação, vê-se que a máxima potência transferida ocorre para $\theta = 90^\circ$. Assim:

$$P_m = \frac{E_s \cdot E_r}{X} \quad (2.2)$$

P_m é denominado *limite de estabilidade estática*. No caso de linhas muito longas, a contribuição dos geradores e transformadores na determinação do valor da reatância equivalente, X , é pequena. Assim, para uma mesma tensão de operação, são os comprimentos das linhas que impõem a mais severa restrição na capacidade de transporte das mesmas.

O limite de estabilidade transitória é inferior ao limite de estabilidade estática. KIMBARK (1971) admite como aproximação preliminar tornar-se o primeiro como sendo metade do segundo, o que corresponde a um ângulo de $\sin^{-1} 0.5 = 30^\circ$ em regime permanente. Assim, para não comprometer a estabilidade transitória do sistema, recomenda-se que a diferença de fase das tensões terminais não ultrapasse 30° .

No caso da linha sem perdas, o comprimento de onda é dado por:

$$\lambda = (1/f) (1/\sqrt{LC}) \quad (2.3)$$

L e C são os valores por Km da indutância e da capaci

tância da linha.

Para $f = 60$ Hz, o comprimento de onda, λ , é de 5000 Km, correspondendo a um deslocamento angular, em SIL, de 360° . O valor $\lambda/12$ (aproximadamente 417 Km) corresponde a 30° . Assim, segundo o critério relativo ao ângulo de potência, linhas de comprimento superior a $\lambda/12$ não podem transportar potências iguais ou superiores ao SIL. Isto sugere que uma forma de viabilizar a operação de uma linha extralonga consiste no encurtamento artificial do seu comprimento elétrico.

Encurtar eletricamente uma linha significa aumentar seu comprimento de onda. Se se mantém f constante, a única forma de fazê-lo consiste em alterar o radicando da eq. (2.3). Isto é feito instalando-se reatores indutivos em paralelo e capacitores em série. Assim, obtém-se redução nos valores líquidos de L e C , aumentando-se λ .

Define-se *grau de compensação em derivação*, D , o fator através do qual a indutância em série da linha é reduzida de L para $(1-D)L$. Analogamente, o *grau de compensação série*, S , reduz a capacitância C para $(1-S)C$. Na prática, esses valores de S e D são sempre menores que a unidade.

Após uma compensação série-paralelo conjunta, o novo valor do comprimento de onda, λ_c , será:

$$\begin{aligned}\lambda_c &= (1/f) \cdot (1/\sqrt{(1-D)L, (1-S)C}) \\ &= (1/f) \cdot (1/\sqrt{LC}) \cdot (1/\sqrt{(1-D)(1-S)}) \\ \lambda_c &= \lambda (1/\sqrt{(1-D)(1-S)})\end{aligned}\quad (2.4)$$

Admitindo $S = D = 0.70$, o novo comprimento de onda a

60 Hz será:

$$\lambda_c = 5000\sqrt{(1-0.70)(1-0.70)} = 16667 \text{ Km}$$

Feito isto, a potência natural pode ser transmitida de forma estável por linhas de até 1400 Km (valor resultante aproximado de $\lambda/12$).

2.1.2 - Compensação em derivação

A principal finalidade da compensação em derivação, conforme foi dito, consiste em anular o efeito Ferranti. Em carga reduzida, o excesso de potência reativa gerado pela linha faz com que o perfil de tensões ao longo da mesma apresente valores acima do admissível. Além da excessiva solicitação do isolamento da própria linha e dos equipamentos terminais, isso provoca altas perdas por corona, uma vez que estas crescem com o quadrado da tensão. Em decorrência dessas perdas elevadas, os níveis de radiointerferência e os ruídos audíveis crescem ainda mais, ocasionando prejuízos ao meio ambiente e à radiorecepção.

Uma das formas mais usuais de compensação em derivação consiste na instalação de reatores indutivos idênticos em ambas as extremidades da seção da linha, como é ilustrado na Fig. 2.2. O sistema apresenta-se como três quadripolos associados em cascata. As constantes ABCD do quadripolo resultante serão:

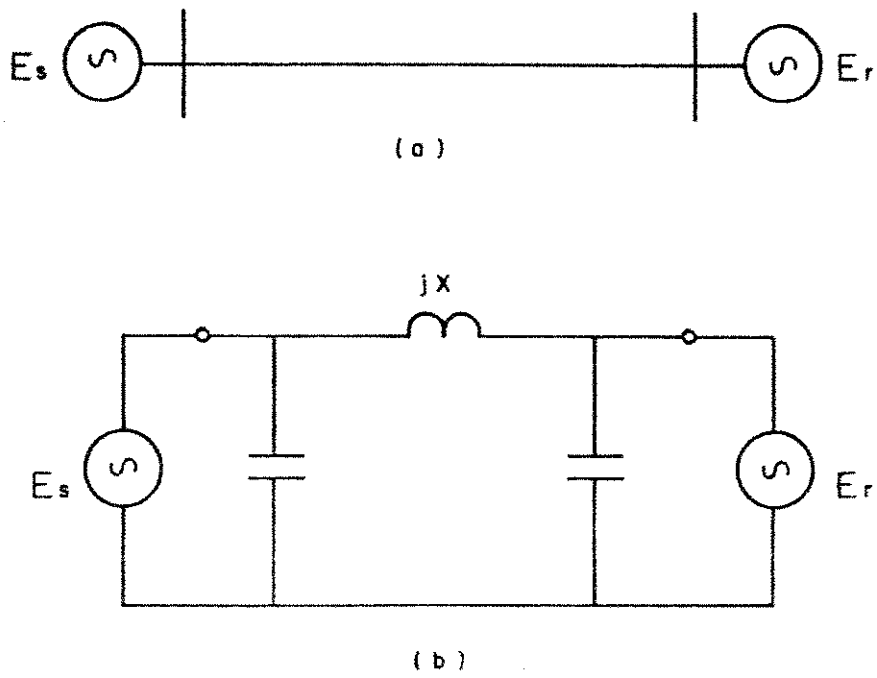


Fig. 2.1 - (a) Diagrama unifilar da linha sem perdas considerada.
(b) Circuito equivalente.

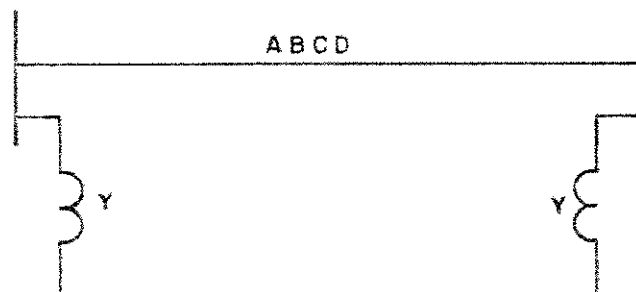


Fig. 2.2 - Esquema de compensação em derivação.

$$\begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dai, tira-se para a constante A_T o seguinte valor:

$$A_T = A + BY$$

Lembrando que A_T representa a relação em módulo e fase, entre as tensões E_s e E_r quando a linha opera em vazio, é necessário fazer $A_T = 1$ a fim de obter-se uma compensação total. Assim, tirando o valor de Y :

$$Y = \frac{1-A}{B}$$

Desenvolvendo, tem-se

$$\begin{aligned} y - jy' &= \frac{1 - (a + ja')}{B \underline{E}} = \\ &= (1/B) \left[(1-a) \cos \beta - j(1-a) \sin \beta - a' \sin \beta - ja' \cos \beta \right] \end{aligned}$$

Em face da condutância em paralelo da linha ser desprezível, compensa-se apenas a componente da expressão do segundo membro. Além do mais, a resistência dos enrolamentos do reator é muito menor que a sua reatância indutiva. Assim:

$$Y = -jy' = -j(1/B) \left[(1-a) \sin \beta + a' \cos \beta \right] \quad (2.7)$$

Esse reator fará uma compensação de 100% na linha. Caso se queira uma compensação de, por exemplo, 30%, a admitância do reator será:

$$Y' = 0.30Y$$

Para qualquer grau de compensação em derivação, ter-se-á:

$$Y' = DY \tag{2.8}$$

A instalação dos reatores é geralmente feita ligando-os diretamente aos barramentos de alta tensão das linhas. Use-se também instalá-los em enrolamentos terciários de transformadores. Os aspectos mais adversos na aplicação desses dispositivos consistem no custo bastante alto bem como no aparecimento de sobretensões transitórias decorrentes de operações de chaveamento, o que exige, em vários casos a utilização de circuitos destinados a amortecer esses surtos de tensão.

2.1.3 - Compensação em série

Conforme será visto adiante, além de melhorar a estabilidade do sistema e aumentar a capacidade de transporte das linhas, os capacitores instalados em série também melhoram os perfis de tensão das mesmas. O desempenho ideal seria obtido

distribuindo-os ao longo de toda a linha. Porém, por motivos operacionais e econômicos, prefere-se concentrá-los em alguns pontos do sistema. Isto faz com que haja uma discrepância entre a redução da reatância de transferência da linha (parte imaginária da constante B) e a reatância equivalente dos capacitores empregados na compensação. No sentido de determinar a localização ótima do banco de capacitores, alguns autores definem *eficiência da compensação* como sendo a relação entre essas duas quantidades.

KUMAR *et alii* (1969) fizeram um estudo no qual a posição de um único banco de capacitores era variada ao longo de várias linhas de diferentes comprimentos, calculando para cada um dos casos a eficiência. O resultado acha-se mostrado na Fig. 2.3. Através da mesma, vê-se que a localização ideal do banco é no meio da linha.

Contudo, a compensação feita em um ponto intermediário implica na construção de uma subestação a mais. Geralmente, por motivos econômicos, opta-se por instalar um banco de capacitores em cada extremidade da linha, conforme acha-se mostrado na Fig. 2.4.

A escolha deste esquema também é motivada por questões relativas à proteção da linha, quando são empregados relés direcionais e de distância. Neste caso, MASON (1956) recomenda que ao usar-se graus de compensação superiores a 50%, deve-se colocar os capacitores em ambas as extremidades da linha.

Sendo A, B, C e D as constantes generalizadas da linha não-compensada, as constantes A_T , B_T , C_T e D_T resultantes

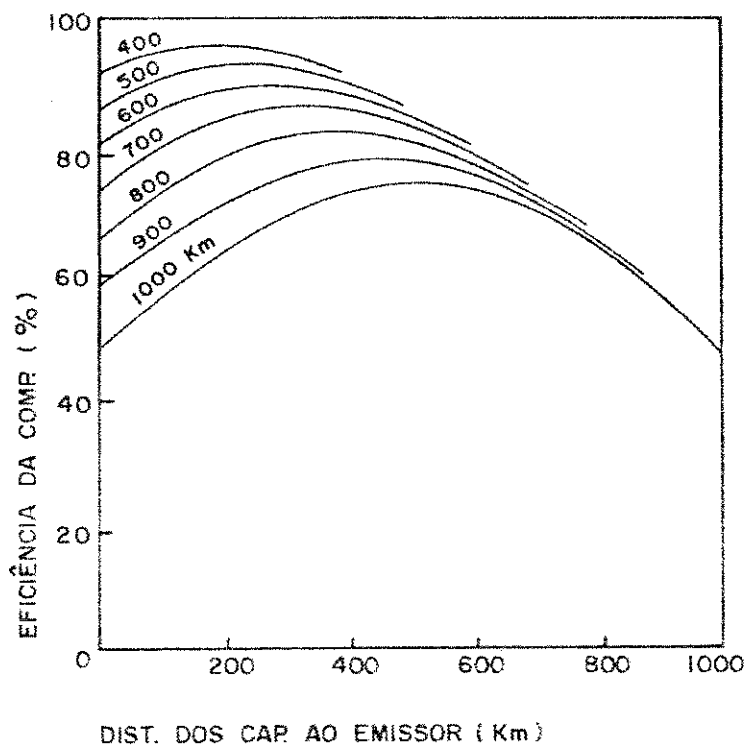


Fig. 2.3 - Efeito da localização e do comprimento da linha na eficiência da compensação, usando-se um só banco de capacitores.



Fig. 2.4 - Esquema de compensação série mais usual.

da associação em cascata dos três quadripolos são dadas pela seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} A_T & B_T \\ C_T & D_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & X \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Pode-se tirar para B_T a seguinte expressão:

$$B_T = B + AX + DX + CX^2$$

Desenvolvendo, tem-se:

$$b_T + jb_T' = b + jb' + 2(a + ja')(jX) + (c + jc')(jX)^2$$

Igualando as partes imaginárias, resulta:

$$b_T' = b' + 2aX + c'X^2$$

Para uma compensação total, $b_T = 0$. Logo:

$$X = \frac{2a \pm \sqrt{(2a)^2 - 4c'b'}}{2c'}$$

$$X = jX = j \frac{a \pm \sqrt{a^2 + c'b'}}{c'} \quad (2.10)$$

Das duas raízes, deve-se escolher a de sinal negativo, por tratar-se de reatância capacitiva.

Caso não se deseje uma compensação integral (100%), e sim, parcial, basta que se multiplique o valor da reatância calculada pelo grau de compensação série considerado. Assim:

$$X' = SX \quad (2.11)$$

A aplicação de capacitores série, contudo, exige várias precauções. Na ocorrência de curto-circuitos, as correntes alcançam valores muito altos, provocando diferenças de potencial muito elevadas nos terminais dos capacitores. Não sendo econômico superdimensionar o isolamento com vistas a estas sobretensões, encontrou-se uma solução que vem sendo empregada com bastante sucesso. A mesma acha-se esquematizada na Fig. 2.5.

Neste esquema, em operação normal, a chave S acha-se aberta, circulando a corrente através dos capacitores. Ocorrendo uma falta na linha, a sobretensão no capacitor pode atingir valores que resultam na ignição do *gap* de proteção, calibrado para disparar em um nível pré-estabelecido. Nestas condições, a corrente passa a circular através do *gap* e da indutância de amortecimento, destinada a limitar a corrente de descarga.

O passo seguinte é o fechamento da chave, permitindo assim desionização do *gap* bem como o completo alívio do banco de capacitores. Um benefício adicional decorrente da saída de serviço dos capacitores consiste no aumento da reatância da linha, o que tende a diminuir a corrente de curto-circuito. Quanto à reinserção dos capacitores, a mesma só é realizada quando a corrente está abaixo de um valor previamente fixado.

O esquema visto é o mais tradicional dos esquemas de proteção de capacitores em série. Existem vários outros, os quais diferem tanto em relação à eficiência quanto à complexidade. Um tipo mais novo, recentemente desenvolvido pelo BPA, acha-se mostrado na Fig. 2.6.

O resistor não-linear indicado é geralmente feito de carboneto de silício, possuindo acentuado grau de não-linearidade e alta capacidade de dissipação de energia. A sua característica tensão versus corrente possui o aspecto indicado na Fig. 2.7.

Supondo a ocorrência de um defeito na linha, a tensão nos terminais do capacitor sobe até o valor de ionização do *gap*. Assim, o resistor não-linear é inserido no circuito, limitando a tensão a um valor abaixo da máxima sobretensão de curta duração suportável do capacitor. A chave S_1 é fechada e o *gap* é desionizado. Após a remoção do defeito, a tensão no resistor cai, passando o mesmo a ter pequena influência no módulo e no ângulo das tensões sobre o capacitor, permitindo o restabelecimento do nível de compensação imediatamente após a falta. O resistor pode ainda contribuir para o amortecimento dos transitórios que resultam após a eliminação da falta.

Entre 5 e 12 ciclos após a eliminação do defeito, com o *gap* perfeitamente recuperado, a chave S_1 abre, interrompendo a corrente residual no resistor.

A finalidade da chave S_2 é permitir o desvio da corrente em condições de emergência, tais como defeito em S_1 e excessiva dissipação de energia no resistor.

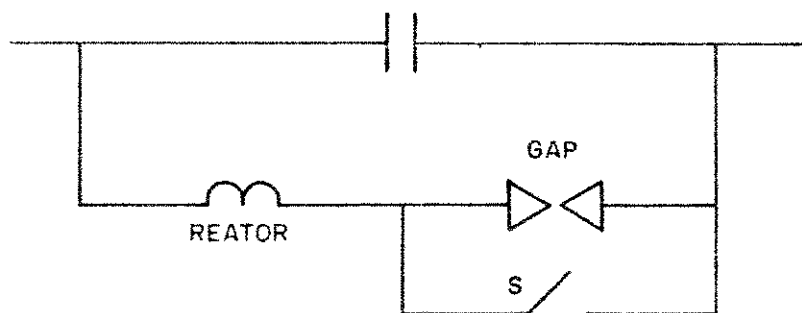


Fig. 2.5 - Esquema simplificado da proteção de capacitores sêrie.

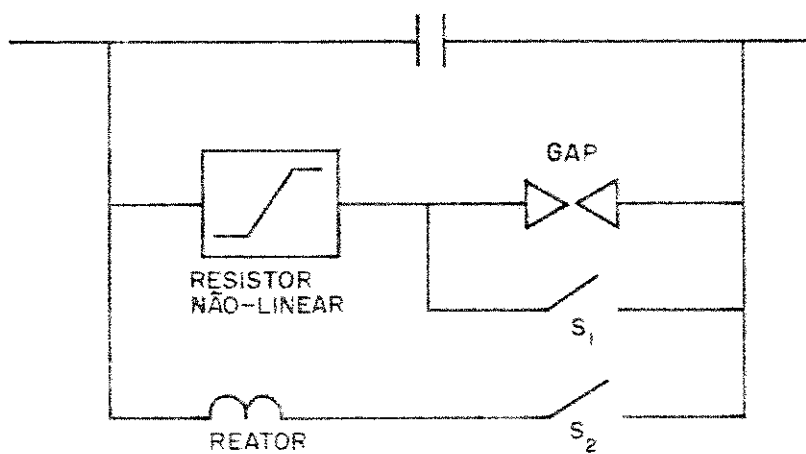


Fig. 2.6 - Esquema de proteção de capacitores sêrie desenvolvido pelo BPA.

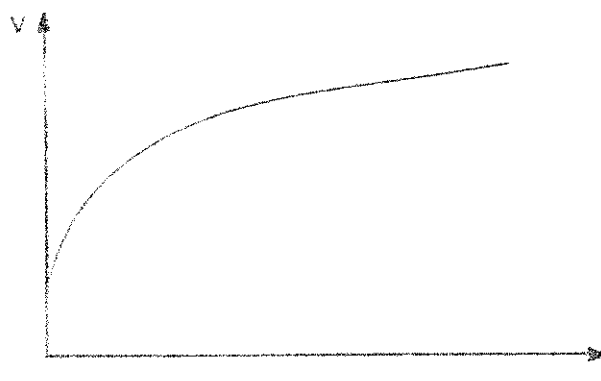


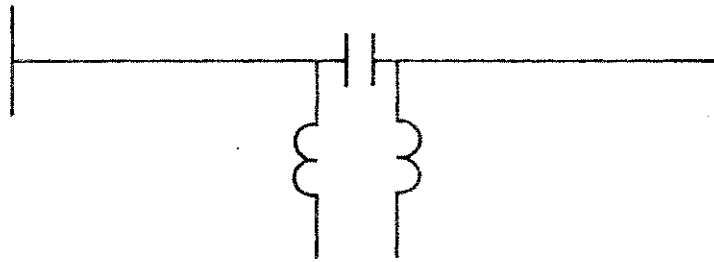
Fig. 2.7 - Característica tensão versus corrente do resistor não-linear.

2.1.4 - Efeito da compensação em derivação na compensação série

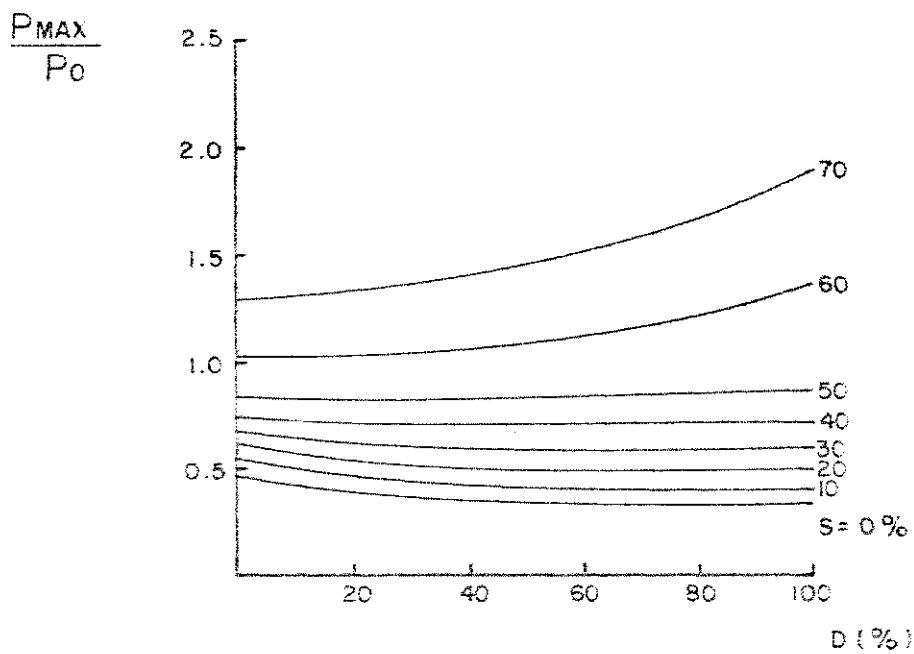
Quando se definiu eficiência da compensação série, ficou patente que a mesma dependia da localização do banco de capacitores bem como da extensão do trecho de linha a ser compensado. Além desses fatores, pode-se mostrar que o grau de compensação em derivação também afeta o citado parâmetro.

Um estudo realizado por KUMAR *et alii* (1969) mostra que, em uma linha de 1000 Km, 500 KV, com os capacitores e reatores instalados conforme mostra a Fig. 2.8 (a), para valores do grau de compensação série, S , inferiores a 50%, observa-se um decréscimo na capacidade de transmissão à medida que o grau de compensação em derivação, D , é aumentado. Para $S = 50%$, a máxima potência transmissível praticamente independe de D . Porém, para valores de S superiores a 50%, a compensação em derivação passa a exercer influência positiva na capacidade de transporte da linha (V. Fig. 2.8 (b)).

Esta observação apenas visa chamar a atenção para a importância que se deve dar à análise do comportamento das compensações, a fim de que se possa evitar as situações desvantajosas, utilizando as formas que mais benefícios trouxerem à transmissão, tanto sob o ponto de vista técnico como econômico.



(a)



(b)

Fig. 2.8 - (a) Bancos de compensação instalado no centro da linha.
 (b) Efeito das compensações série e shunt na capacidade de transmissão da linha.

2.2 - ALONGAMENTO ARTIFICIAL DO COMPRIMENTO ELÉTRICO DAS LINHAS

2.2.1 - Generalidades

Conforme foi anteriormente citado, as linhas de transmissão apresentam o pior desempenho quando seus comprimentos atingem o valor de $\lambda/4$, ou 1250 Km, a 60 Hz. Entretanto, a teoria de linhas de transmissão prevê que quando esses comprimentos crescem, aproximando-se de meia onda (2500 Km, a 60 Hz), as mesmas passam a apresentar um bom comportamento. Considerando uma linha de meia onda, sem perdas, pode-se ressaltar os seguintes fatos:

- As constantes generalizadas são: $A = D = -1$, $B = C = 0$. Isso significa que as impedâncias em série e em derivação próprias da linha são nulas.
- As tensões terminais da linha de meia onda são extremamente estáveis ($E_s = -E_r$). Também verifica-se que $I_s = -I_r$.
- A linha de meia onda não produz nem absorve reativos ($E_s I_s^* = E_r I_r^*$).
- Não há efeito Ferranti. Com ausência de carga na extremidade receptora, o perfil de tensões ao longo da linha acha-se mostrado na Fig. 2.9. Com o receptor em curto-circuito, o perfil de tensões é mostrado na Fig. 2.10.
- A tensão ao longo da linha varia com a carga e com o

fator de potência desta. Se a linha acha-se carregada com a impedância característica Z_0 (fator de potência aproximadamente unitário), verifica-se que a tensão no ponto intermediário da mesma é igual à tensão na ex tremidade receptora. Caso esteja carregada com uma impedância Z_r qualquer, a tensão no seu ponto médio é proporcional a Z_0/Z_r , conforme mostra a Fig. 2.11.

Além de todos esses itens favoráveis ao desempenho das linhas de meia onda, ocorre um fato bastante curioso: para as linhas de comprimento elétrico situado entre 180° e 210° , o sistema apresenta-se igualmente estável a um outro que opera entre 0° e 30° . Por exemplo, se a tensão nos terminais do gerador acha-se defasada de 190° em relação à carga, a situação é equi valente a ter-se essas mesmas tensões defasadas de 10° entre si.

Conforme foi dito anteriormente, as linhas só apresen tam desempenho satisfatório ao transportar potências próximas do SIL quando seus comprimentos elétricos situam-se no interva lo compreendido entre 0° e 30° . Entre 30° e 180° , a operaçã o mostra-se inviável com a ausência de compensação. De modo análo go à operação entre 0° e 30° , as linhas mostram bom funcionamento no caso em que θ situa-se entre 180° e 210° . Acima disso, o sistema apresenta problemas relativos à estabilidade transitô ria.

Baseando-se no que foi exposto, pode-se sugerir o alon gamento artificial do comprimento elétrico de uma linha extra longa, no sentido de meia onda, como forma de viabilizar o fun

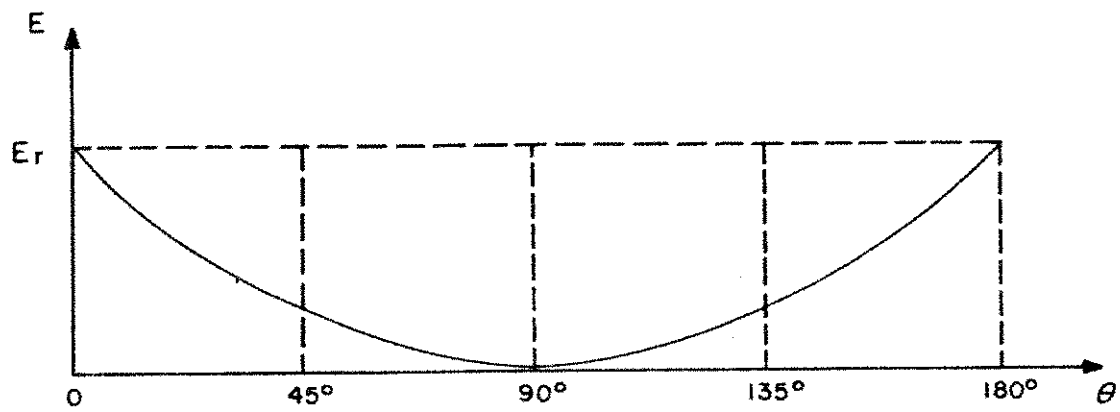


Fig. 2.9 - Perfil de tensões - Linha ideal de meia onda aberta no receptor.

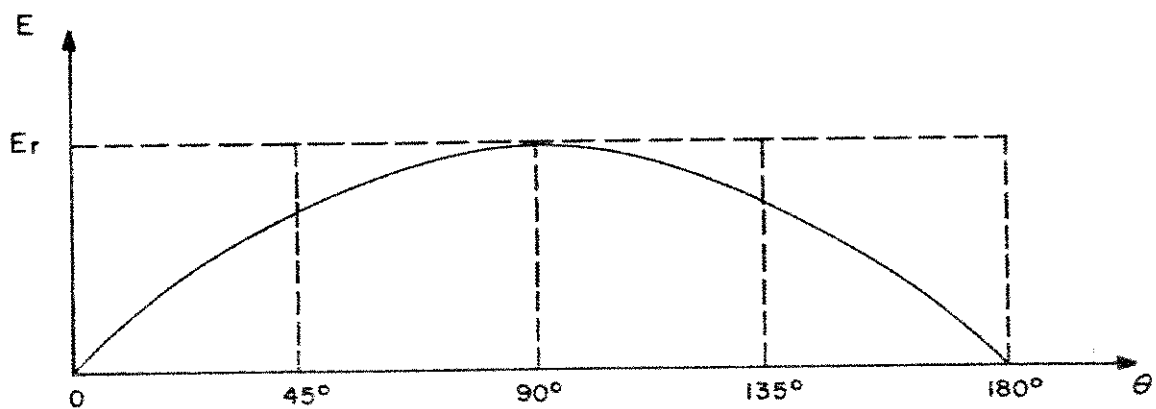


Fig. 2.10 - Perfil de tensões - Linha ideal de meia onda curto-circuitada no receptor.

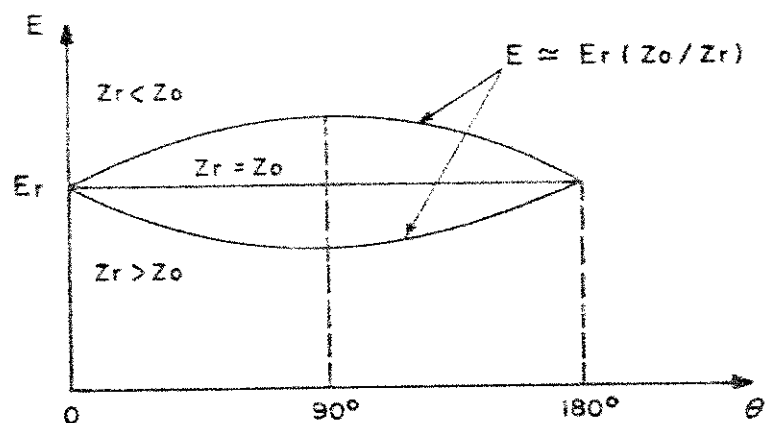


Fig. 2.11 - Perfil de tensões para $FP = 1$.

cionamento da mesma. Esse alongamento levaria a linha a operar na citada faixa de 180° a 210° . Tal como no caso do encurtamento, isso é obtido através da alteração dos termos contidos no radicando da eq. (2.3).

Aumentar o comprimento elétrico de uma linha equivale a diminuir o seu comprimento de onda. Assim, dois métodos são sugeridos visando esse objetivo. Os mesmos são analisados e discutidos nos itens seguintes.

2.2.2 - Primeiro processo: instalação de seções em T ou π nos extremos

Consiste no aumento tanto dos termos em série como dos termos em derivação, através da instalação de reatores indutivos em série e capacitores em paralelo em ambos os extremos da linha, constituindo seções em T ou em π , conforme é mostrado nas Figs. 1.5 e 1.6. Assim, L e C são artificialmente aumentadas, diminuindo λ (ver eq. (2.3)). Neste caso, a impedância característica, e portanto, a potência natural, ficam praticamente inalteradas.

Para calcular a compensação necessária, fixa-se inicialmente o valor do comprimento elétrico da linha em um valor compreendido entre 180° e 210° . A seguir, calcula-se o comprimento físico de uma linha hipotética não-compensada de comprimento elétrico igual ao estabelecido. HUBERT & GENT (1964) recomendam tomar para θ o valor 190° . Assim, ficará:

$$S_T = \frac{190}{57.3 \beta} \quad (2.12)$$

A indutância total da linha hipotética será:

$$L_T = S_T \cdot L$$

L é o valor por Km da indutância própria da linha. O valor da indutância total a ser acrescida nas extremidades será:

$$L_C = L_T - L_R$$

L_R é o valor da indutância total da linha real não-compensada.

No caso das seções em π (ver Fig. 1.5), Z será dada por:

$$Z = j\omega L_C / 2$$

Para que a linha seja uniforme, as seções em π deverão apresentar impedância de imagem iguais à impedância característica da linha, como um circuito sintonizado de telecomunicações. Assim, da eq. (9) do ANEXO, pode-se tirar para a admitância capacitiva

$$Y = \frac{1}{Z} \pm \sqrt{\frac{1}{Z^2} + \frac{1}{Z_0^2}} \quad (2.13)$$

2.2.3 - Segundo processo: instalação de capacitores ao longo da linha

Neste caso, apenas a susceptância capacitiva da linha é aumentada. Além do acréscimo no comprimento elétrico, obtém-se um aumento na potência natural, uma vez que a impedância característica é diminuída.

A capacitância total dos capacitores é facilmente calculada. Desprezando as perdas, tem-se:

$$\beta = \theta/s = \omega\sqrt{LC} \quad , \quad \text{ou}$$

$$C_c = \frac{1}{L} \left[\frac{\theta}{\omega s} \right]^2 \quad (2.14)$$

- C_c é o valor da capacitância por unidade de comprimento da linha compensada.
- L é o valor da indutância por unidade de comprimento da linha.
- θ é o comprimento elétrico da linha, fixado em 190° ou 3.316 radianos.
- s é o comprimento da linha, em Km.
- ω é a frequência angular.

O valor da capacitância total dos capacitores a serem instalados ao longo da linha será de:

$$C_{\text{cap}} = (C_c - C)s \quad (2.15)$$

C é o valor da capacitância própria por Km da linha

não-compensada.

As admitâncias Y (ver Fig. 1.7) são dadas por:

$$Y = j\omega C_{\text{cap}}/n \quad (2.16)$$

n é o número de instalações ao longo da linha, incluindo as extremidades.

Em relação ao espaçamento dos capacitores ao longo da linha, por razões práticas e econômicas, deve-se uma forma de concentrá-los no menor número, possível de pontos intermediários. PRABHAKARA *et alii* (1968) aplicaram esse tipo de compensação em uma linha de 1000 milhas, 700 KV, 50 Hz, fazendo o espaçamento entre capacitores igual a 100 milhas.

2.2.4 - Considerações adicionais

HUBERT & GENT (1964) realizaram um extenso estudo acerca de linhas de meia onda sintonizadas, chegando às seguintes conclusões:

- Em linhas de comprimento superior a 1500 Km, operando a 60 Hz, a compensação em meia onda mostra-se mais econômica que o encurtamento do comprimento elétrico por capacitores em série e reatores indutivos em paralelo. À medida que as distâncias crescem além desse limite, os investimentos nos equipamentos de compensação tendem a diminuir.

- Para todas as configurações, o sistema se mantém estável sob severas condições de falta.
- A colocação de T's ou π 's no lado de baixa tensão dos transformadores terminais, conforme o indicado na Fig. 2.12, permite o uso de equipamento de compensação com isolamento projetado para tensões baixas. Porém, há a possibilidade do surgimento de sobretensões face a fenômenos de ferroressonância.



Fig. 2.12 - Seções em T instaladas no lado de baixa tensão dos transformadores.

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS E MODELOS UTILIZADOS

3.1 - INTRODUÇÃO

O presente estudo consiste em uma otimização, análise e comparação dos métodos de variação dos comprimentos elétricos das linhas extralongas, anteriormente vistos. São tomadas duas linhas de 500 KV, 60 Hz, sendo uma de comprimento igual a 1000 Km e a outra de 1800 Km de extensão. A geometria e os parâmetros das mesmas são dados no item 3.6, mais adiante.

Para cada uma das linhas, realizou-se um estudo dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu em uma otimização da compensação por capacitores em série e reatores indutivos em paralelo. Várias situações foram analisadas, variando-se a carga no extremo receptor bem como o fator de potência da mesma. Outro aspecto observado foi o número de trechos no qual se

subdividiu a linha, a fim de realizar a compensação. Além do mais, foram tomados vários graus de compensação em série e em paralelo. Para cada uma das combinações entre a potência ativa da carga no receptor e o fator de potência da mesma, selecionou-se a melhor combinação dos graus de compensação em série e em derivação.

A segunda etapa consistiu na análise da compensação em meia onda, realizada tanto pela instalação de reatores indutivos em série e capacitores em paralelo em ambos os extremos da linha, constituindo seções em π , como pela instalação de capacitores em derivação ao longo da linha. Como no caso anterior, para cada situação, a potência ativa da carga e o fator de potência da mesma foram variados.

Por fim, realizou-se uma análise comparativa entre esses métodos, tomando-se como base os dados da carga ligada ao extremo receptor (potência ativa e fator de potência).

3.2 - COMPENSAÇÃO POR CAPACITORES EM SÉRIE E REATORES INDUTIVOS EM PARALELO

3.2.1 - Critérios relativos ao carregamento da linha

Conforme foi citado anteriormente, quando as linhas longas operam em regime de carga reduzida, seus perfis de tensão podem apresentar picos cujos valores ultrapassam os limites

máximos de tensão impostos pelas condições de isolamento e pelas perdas por corona. Deste modo, é necessário investigar essas ocorrências, dimensionando o equipamento de compensação de forma a eliminá-las. A situação mais grave consiste na ausência de carga no receptor, sendo este, portanto, um dos casos aqui analisados.

De igual importância é a análise do comportamento da linha quando carregada com o seu SIL e também com potências superiores a esse valor. Geralmente, os carregamentos mais econômicos das linhas ocorrem para potências algo maiores que as suas potências naturais. Assim, as cargas serão analisadas em três etapas:

- $P_r = 0$
- $P_r = 0.80P_0$
- $P_r = 1.00P_0$
- $P_r = 1.20P_0$

Quanto ao fator de potência das cargas, serão analisados os seguintes casos:

$$FP = 1.00$$

$$FP = 0.95 \text{ INDUTIVO.}$$

3.2.2 - Critérios relativos à forma de compensação de linha

DuBOIS *et alii* (1962) realizaram trabalho onde várias formas de instalação dos capacitores e reatores indutivos foram

estudadas. Algumas de suas conclusões foram as seguintes:

- Ao dividir-se a linha em seções de igual comprimento, obtêm-se melhores perfis de tensões bem como certa economia no equipamento de compensação.
- O modelo de compensação que apresentou melhor desempenho consiste no indicado na Fig. 3.1.

Este segundo ponto condiz com o que se afirmou no item 2.1.3. Neste item, indicou-se o centro da linha como o ponto onde a compensação sêrie alcança eficiência máxima. Entretanto por razões econômicas e técnicas (relativas à proteção do sistema), optou-se por instalar os capacitores em ambas as extremidades da seção de linha. Assim, o modelo adotado neste trabalho é o indicado na Fig. 3.2.

Uma outra investigação feita no presente trabalho consiste em dividir as linhas em um número variável de seções intermediárias, aplicando em cada uma destas o esquema de compensação da Fig. 3.2. Assim, o número de seções intermediárias foi feito igual a:

$$NS = 1$$

$$NS = 2$$

$$NS = 3$$

Finalmente, os graus de compensação em sêrie e em paralelo foram variados do seguinte modo:

$$S = 0, 20, 40, 60, 80\%$$

$$D = 0, 20, 40, 60, 80\%$$

O esquema apresentado na Fig. 3.3 dá uma idéia geral daquilo que será analisado. Através do mesmo, pode-se ver que

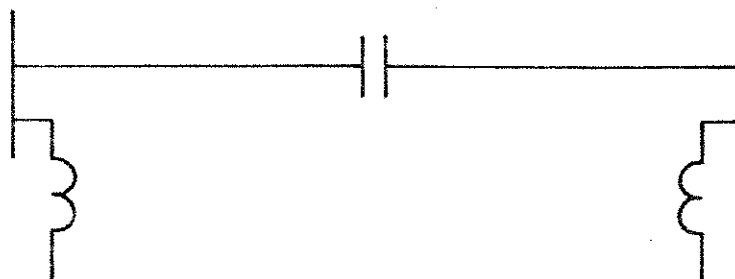


Fig. 3.1 - Seção de linha compensada - Capacitor no ponto central.

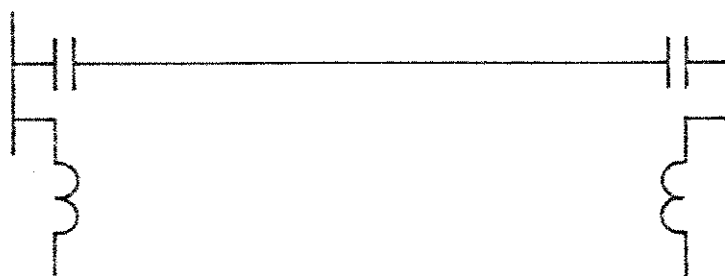


Fig. 3.2 - Seção de linha compensada - Capacitores em ambas as extremidades.

o número de casos estudados é:

$$2 \times 3 \times 2 \times 3 \times 5 \times 5 + 2 \times 1 \times 3 \times 5 \times 5 = 1050$$

Para cada valor das combinações entre o carregamento das linhas e o fator de potência das cargas, são selecionadas as melhores condições de operação, ou seja, as combinações entre S e D e o número de trechos que proporcionam melhor desempenho das linhas. Feito isto, é realizado um refinamento na solução encontrada. Por exemplo, se a combinação ótima entre S e D foi de 80% e 60%, respectivamente, pode ocorrer que para S = 75% e D = 55% a linha opere de forma igualmente satisfatória, dentro dos requisitos estipulados. Assim, obtém-se alguma economia no investimento em capacitores e reatores.

3.2.3 - Restrições impostas ao funcionamento em regime permanente de linha

Para que as linhas de transmissão apresentem um bom desempenho, é essencial que possuam alguns aspectos técnicos dentro de certos limites, simultaneamente. Conforme foi anteriormente visto, os perfis de tensão constituem uma preocupação quando se trata do projeto de linhas muito longas, havendo a necessidade de manter as tensões terminais dentro de limites pré-estabelecidos bem como de evitar que as tensões intermediárias não ultrapassem determinado valor. Por outro lado, por questões relativas à estabilidade transitória, recomenda-se um limite superior para o ângulo de potência de linha. Assim, os limites im

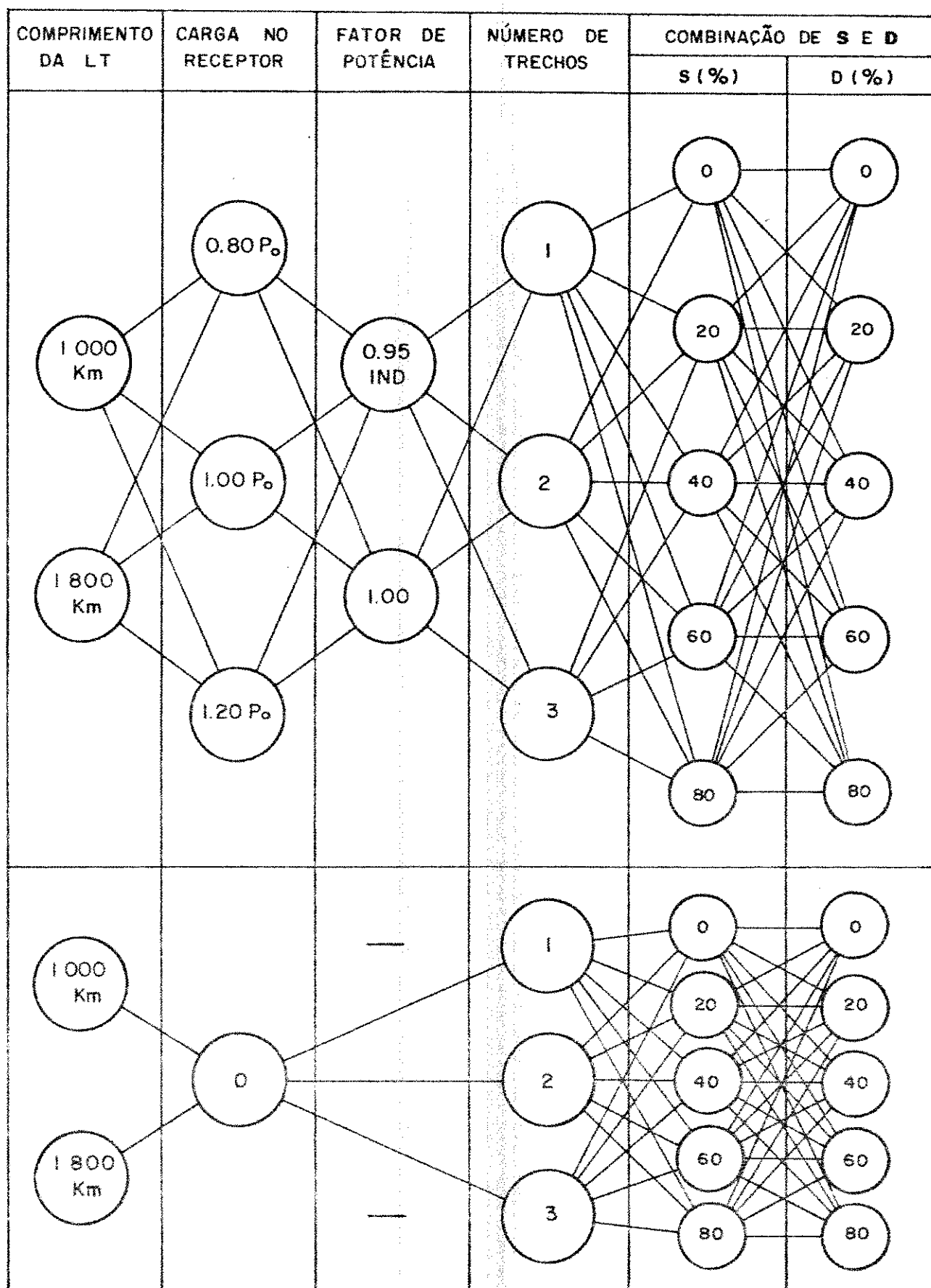


Fig. 3.3 - Esquema geral da análise efetuada.

postos às tensões terminais, à tensão máxima ao longo da linha e ao ângulo de potência são:

$$0.90 \text{ pu} \leq E_s, E_r \leq 1.10 \text{ pu}$$

$$E_{\max} \leq 1.15 \text{ pu}$$

$$\theta \leq 30^\circ$$

Estes valores referem-se à linha em carga. Porém, é desejável prever o desempenho da mesma com o receptor em aberto. Contudo, vale fazer aqui uma ressalva em relação a essa afirmativa: o funcionamento de uma linha longa em vazio é bastante improvável. Geralmente, toda a linha é seccionada em caso de acionamento do disjuntor junto ao extremo receptor. Assim, a operação sem carga, sendo a pior condição de operação da linha face ao efeito Ferranti alcançar máxima intensidade, constitui-se em uma suposição pessimista. Baseando-se nisso, resolveu-se adotar a seguinte restrição em relação à tensão máxima ao longo da linha quando na operação em vazio:

$$E_{0,\max} = 1.15 \text{ pu}$$

3.3 - COMPENSAÇÃO PARA TRANSMISSÃO EM MEIA ONDA

Neste caso, analisou-se o desempenho das duas linhas estudadas no item anterior, utilizando-se dois métodos de alongamento artificial de linhas, quais sejam:

- Instalação de seções π nas extremidades.
- Instalação de capacitores em derivação ao longo da linha, dividindo-a em dez seções de igual comprimento.

Inicialmente, considerou-se as seguintes condições de carregamento:

$$P_r = 0.80P_0$$

$$P_r = 1.00P_0$$

$$P_r = 1.20P_0$$

Os fatores de potência foram tomados os mesmos do item anterior, ou seja:

$$FP = 0.95 \text{ INDUTIVO}$$

$$FP = 1.00$$

Assim, o número de casos analisados foi de:

$$2 \times 2 \times 3 \times 2 = 24$$

A seguir, cada um desses casos foram confrontados com os casos otimizados de encurtamento do comprimento elétrico das linhas, determinados no item anterior. Feito isto, ter-se-á, para cada situação, a forma de compensação mais conveniente.

3.4 - MÉTODO DE CÁLCULO DAS TENSÕES AO LONGO DA LINHA

Para efeito de cálculo da compensação necessária e dos valores das tensões intermediárias, utilizou-se o modelo equivalente monofásico indicado nas Figs. 3.4 (a) e (b). Este modelo, denominado *linha artificial*, consiste em um número relativamente grande de células em π , ligadas em cascata, as quais representam trechos de linha de 20 Km de extensão.

Nos casos em que a compensação só é realizada nos extremos da linha, as configurações resultantes consistem nos mo

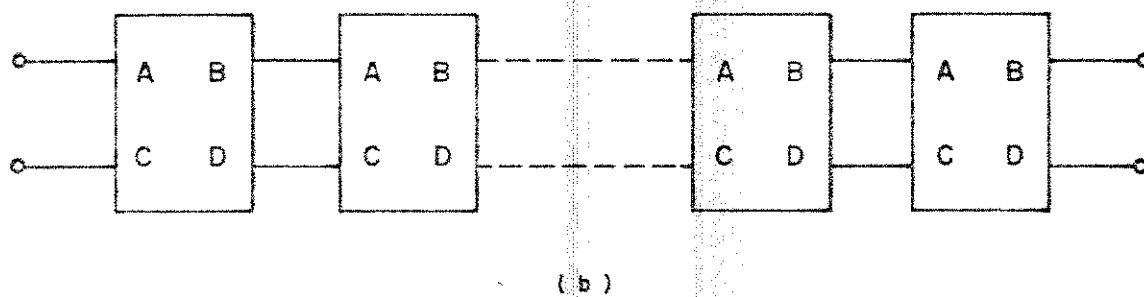
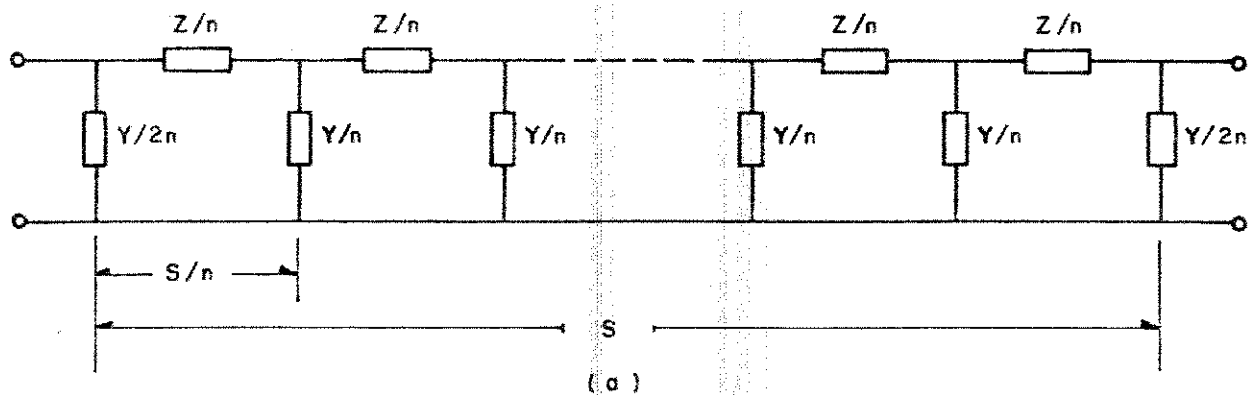


Fig. 3.4 - (a) Circuito de linha artificial.

(b) Simulação da linha por uma associação de quadripolos ligados em cascata.

delos mostrados nas Figs. 3.5 (a) e (b). Caso se realize a com
pensação em vários trechos da linha, as Figs. 3.6 (a) e (b) in
dicam os circuitos a serem resolvidos.

O cálculo das tensões e correntes ao longo da linha é
realizado a partir do conhecimento da tensão e corrente no ex
tremo receptor, bem como das constantes generalizadas das se
ções de linha elementares e dos quadripolos constituídos pelo
equipamento de compensação. Assim, o processo de cálculo é rea
lizado de ponto a ponto, até alcançar-se o extremo emissor.

3.5 - DESCRIÇÃO DO PROCESSO COMPUTACIONAL

A fim de efetuar os cálculos necessários, foram fei
tos três programas escritos na linguagem WATFIV, versão do
FORTRAN. O computador empregado foi IBM/370-145, do CCT-UFPPb.

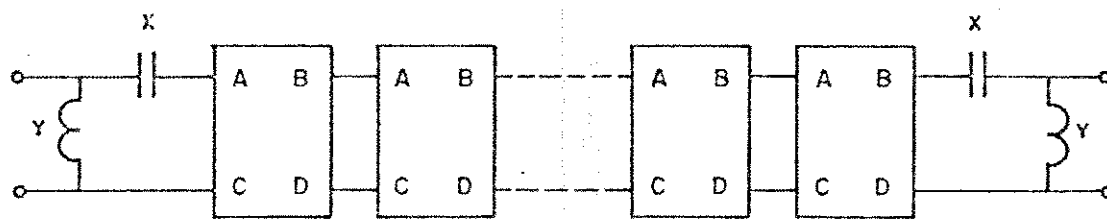
As Figs. 3, 4 e 5 do ANEXO mostram os fluxogramas cor
respondentes aos três métodos de compensação estudados.

3.6 - DESCRIÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO ESTUDADAS

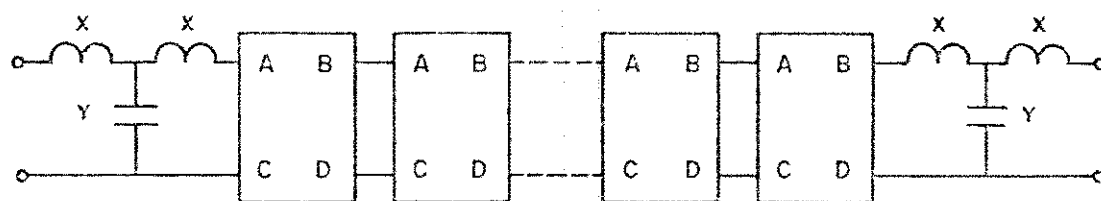
As linhas de transmissão consideradas foram as mesmas
estudadas por PAVEL (1979). As mesmas possuem as seguintes ca
racterísticas:

- Tensão nominal de operação - 500 KV
- Nº de cabos p/fase - 4

- Tipo de cabo - 636 MCM (Grossbeack)
- Disposição de fases - horizontal
- Espaçamento entre fases adjacentes - 10.5 m
- Espaçamento entre subcondutores - 40 cm
- Distância mínima ao solo - 9.5 m
- Reatância indutiva - 0.327 ohms/Km
- Susceptância capacitiva - 0.502×10^{-5} mhos/Km
- Resistência - 0.025 ohms/Km.

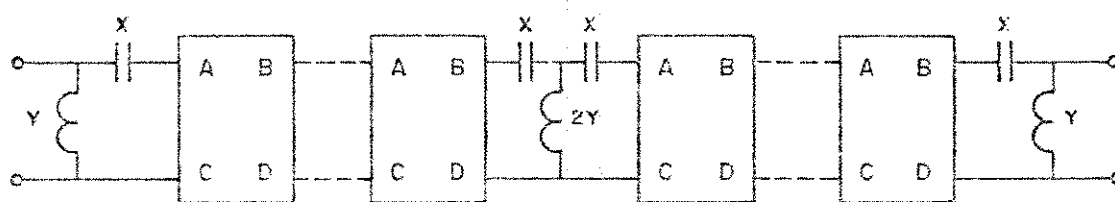


(a)

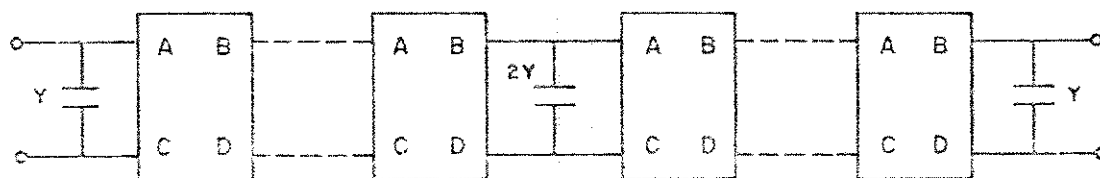


(b)

Fig. 3.5 - Compensação feita apenas nas extremidades da linha.



(a)



(b)

Fig. 3.6 - Compensação realizada em pontos intermediários da linha.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 - COMPENSAÇÃO POR CAPACITORES EM SÉRIE E REATORES INDUTIVOS EM DERIVAÇÃO

4.1.1 - Estudo da linha de 1000 Km de extensão

a) 1º caso: $P_r = 0$

Conforme mostra a Tab. IV.1, somente em 18 casos não ocorreram transgressões ao limite superior de tensão ao longo da linha em vazio, estabelecido em 1.15 pu.

b) 2º caso: $P_r = 0.80 P_0$ - FP = 0.95 IND.

Examinando as tabelas IV.1 e IV.2, observa-se que

as combinações de S, D e NS segundo as quais a linha opera de forma satisfatória, em plena carga e em vazio, são:

- S = 80%, D = 20%, NS = 1
- S = 80%, D = 40%, NS = 1, 2, 3
- S = 80%, D = 60%, NS = 2, 3

Obviamente, a combinação mais conveniente é a primeira, face à economia obtida nos MVAR indutivos. Porém, pesquisando-se os valores de S e D inferiores aos determinados, pode-se obter ainda uma certa economia no investimento dispendido no equipamento de compensação. Assim, chega-se ao seguinte resultado:

$$S = 80\%, D = 10\%, NS = 1$$

Isto proporciona:

$$E_{\max} = 1.00 \text{ pu}$$

$$E_{0,\max} = 1.15 \text{ pu}$$

$$E_S = 1.06 \text{ pu}$$

$$\theta = 13.4^\circ$$

$$\text{REND} = 90.02\%$$

$$\text{QSER} = 747.23 \text{ MVAR}$$

$$\text{QSHT} = 101.11 \text{ MVAR}$$

As Figs. 4.1 (a) e (b) mostram os perfis de tensão da linha compensada, em carga e em vazio, respectivamente.

$$c) 3^\circ \text{ caso: } P_r = 0.80 P_0 - FP = 1.00$$

Pelas tabelas IV.1 e IV.3, tem-se como soluções:

$$- S = 60\%, D = 60\%, NS = 1, 2$$

- S = 60%, D = 60%, NS = 1, 2
- S = 60%, D = 80%, NS = 1, 2, 3
- S = 80%, D = 20%, NS = 1
- S = 80%, D = 60%, NS = 1, 2, 3
- S = 80%, D = 80%, NS = 1, 2, 3

Demodo análogo ao caso anterior, escolhe-se a combinação em que $S = 80\%$, $D = 20\%$, $NS = 1$.

Buscando uma solução mais econômica, tomou-se valores de S e D intermediários, inferiores aos escolhidos. Isto resultou em:

$$S = 80\%, D = 10\%, NS = 1$$

Para este caso, tem-se:

$$E_{\max} = 1.07 \text{ pu}$$

$$E_{0,\max} = 1.15 \text{ pu}$$

$$E_S = 1.00 \text{ pu}$$

$$\theta = 16^\circ$$

$$\text{REND} = 88.09\%$$

$$\text{QSER} = 747.23 \text{ MVAR}$$

$$\text{QSHT} = 101.11 \text{ MVAR}$$

Os perfis de tensão da linha em carga e em vazio acham-se mostrados nas Figs. 4.2 (a) e (b).

d) 4º caso: $P_r = 1.00$ - FP = 0.95 IND.

Pelas tabelas IV.1 e IV.4, nenhum caso preenche simultaneamente todas as restrições impostas ao funcionamento da linha em regime de plena carga e em vazio. Diversos valores

intermediários de S e D foram tentados, com NS variando de 1 a 3. No final, a melhor combinação que satisfaz plenamente aos requisitos preestabelecidos foi:

$$S = 85\%, D = 30\%, NS = 3$$

Neste caso, ter-se-á:

$$E_{\max} = 1.11 \text{ pu}$$

$$E_{0,\max} = 1.15 \text{ pu}$$

$$E_0 = 1.09 \text{ pu}$$

$$\theta = 10.9^\circ$$

$$\text{REND} = 90.34\%$$

$$\text{QSER} = 1103.12 \text{ MVar}$$

$$\text{QSHT} = 375.00 \text{ MVar}$$

As Figs. 4.3 (a) e (b) mostram os perfis de tensão da linha assim compensada, em carga e em vazio, respectivamente.

$$e) 5^\circ \text{ caso: } P_r = 1.00 \text{ } P_0 - \text{FP} = 1.00$$

Através das tabelas IV.1 e IV.5, vê-se que os casos considerados aceitáveis são:

$$- S = 80\%, D = 20\%, NS = 1$$

$$- S = 80\%, D = 40\%, NS = 1, 2, 3$$

$$- S = 80\%, D = 60\%, NS = 2, 3$$

$$- S = 80\%, D = 80\%, NS = 3$$

Novamente, verificou-se que o primeiro caso é o mais adequado de todos. Após o refinamento da solução, chegou-se ao seguinte resultado:

$$S = 80\%, D = 10\%, NS = 1$$

Isto resulta em:

$$E_{\max} = 1.13 \text{ pu}$$

$$E_{0,\max} = 1.15 \text{ pu}$$

$$E_S = 1.04 \text{ pu}$$

$$\theta = 18.6^\circ$$

$$\text{REND} = 86.96\%$$

$$\text{QSER} = 1167.66 \text{ MVar}$$

$$\text{QSHT} = 101.11 \text{ MVar}$$

Os perfis de tensão da linha em carga e em vazio acham-se indicados nas Figs. 4.4 (a) e (b).

$$f) 6^\circ \text{ caso: } P_r = 1.20 P_0 - \text{FP} = 0.95 \text{ IND.}$$

As tabelas IV.1 e IV.6 mostram que em nenhum caso a linha operará com as tensões internas e terminais bem como com os ângulos de potência dentro dos limites impostos, considerando-se as operações em plena carga e em vazio. Mesmo tentando soluções com graus de compensação mais elevados, as dificuldades permaneceram, notadamente no tocante às altas tensões nas imediações do extremo emissor.

Uma sugestão para a solução deste impasse seria estudar a viabilidade do melhoramento do fator de potência no receptor, antes de se tentar transmitir esta carga indutiva. Conforme será visto no próximo item, a linha operará de forma bem menos problemática com cargas de fator de potência unitário.

$$g) 7^{\circ} \text{ caso: } P_r = 1.20 P_0 - FP = 1.00$$

Pelas tabelas IV.1 e IV.7, os casos que satisfazem às restrições impostas ao funcionamento da linha em vazio e a plena carga são:

$$- S = 80\%, D = 40\%, NS = 2, 3$$

$$- S = 80\%, D = 60\%, NS = 3$$

Assim, a forma de compensação escolhida será:

$$S = 80\%, D = 40\%, NS = 2$$

Isto resulta em:

$$E_{\max} = 1.10 \text{ pu}$$

$$E_{0,\max} = 1.15 \text{ pu}$$

$$E_S = 1.08 \text{ pu}$$

$$\theta = 18.5^{\circ}$$

$$\text{REND} = 88.28\%$$

$$\text{QSER} = 1494.39 \text{ MVAR}$$

$$\text{QSHT} = 478.28 \text{ MVAR}$$

Não efetuou-se refinamento da solução em face de se operar com $E_{0,\max} = 1.15 \text{ pu}$.

Os perfis de tensão da linha compensada, em carga e em vazio, acham-se mostrados nas Figs. 4.5 (a) e (b).

4.1.2 - Estudo da linha de 1800 Km de extensão

$$a) 1^{\circ} \text{ caso: } P_r = 0$$

De acordo com a Tab. IV.8, em apenas 9 casos o li

mite de tensão de 1.15 pu ao longo da linha em vazio não foi excedido. Assim, nessa condição, a linha de 1800 Km apresenta-se ainda mais problemática que a de 1000 Km de extensão.

$$b) 2^{\circ} \text{ caso: } P_r = 0.80 P_0 - FP = 0,95 \text{ IND.}$$

Nesta condição de operação, pelas tabelas IV.8 e IV.9, não encontrou-se nenhuma forma de compensação que fizesse a linha operar dentro dos limites impostos para as tensões e ângulo de potência, em situação de plena carga e em vazio. Assim, recomenda-se analisar a viabilidade do melhoramento do fator de potência da carga, tornando-o unitário. Conforme será visto no próximo caso, com $FP = 1$, a linha pode transportar 80% do seu SIL sem problemas.

$$c) 3^{\circ} \text{ caso: } P_r = 0.80 P_0 - FP = 1.00$$

Peias tabelas IV.8 e IV.10, nenhuma forma de compensação é satisfatória. Pesquisando-se outras possibilidades, chega-se a:

$$S = 85\%, D = 65\%, NS = 2$$

Isto proporciona:

$$E_{\max} = 1.09 \text{ pu}$$

$$E_{0\max} = 1.14 \text{ pu}$$

$$E_S = 1.09 \text{ pu}$$

$$\theta = 19.3^{\circ}$$

$$\text{REND} = 82,39\%$$

$$QSER = 1384.48 \text{ MVar}$$

$$QSHT = 1218.70 \text{ MVar}$$

As Figs. 4.6 (a) e (b) mostram os perfis de tensão quando a linha encontra-se a plena carga e em vazio.

$$d) 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ \text{ e } 7^\circ \text{ casos: } P_r = 1.00 - FP = 0.95 \text{ IND.}$$

$$P_r = 1.00 - FP = 1.00$$

$$P_r = 1.20 - FP = 0.95 \text{ IND.}$$

$$P_r = 1.20 - FP = 1.00$$

A operação da linha nesses regimes de carga mostra-se inviável, mesmo para graus de compensação mais elevados.

4.2 - COMPENSAÇÃO EM MEIA ONDA

De acordo com o item 3.3, efetuou-se o estudo de cada linha, considerando-se os mesmos valores de carga e de fator de potência no receptor que foram tomados no caso do encurtamento do seu comprimento elétrico. A Tab. IV.15 mostra os resultados obtidos nesse estudo, considerando-se a compensação realizada por seções em π instaladas em ambos os extremos das duas linhas bem como através de capacitores em derivação, dispostos ao longo das mesmas. Conforme mostra a Fig. 2.9, as tensões ao longo de uma linha de meia onda em vazio não constituem problema. Assim, os valores do $E_{0, \max}$ não foram investigados nessa análise.

A Tab. IV.16 indica os valores das reatâncias dos in

dutores e admitâncias dos capacitores usados na compensação, assim como suas potências nominais.

A seguir, nas Figs. 4.7 a 4.10 são apresentados os perfis de tensões de ambas as linhas operando com fator de potência unitário no receptor, para diversos valores de carga, incluindo o caso de operação em vazio, considerando-se ambos os modelos de compensação.

As Figs. 4.11 a 4.14 mostram os perfis de tensão das duas linhas operando com $P_r = SIL$, para diferentes fatores de potência no receptor, considerando-se também os dois modelos de compensação.

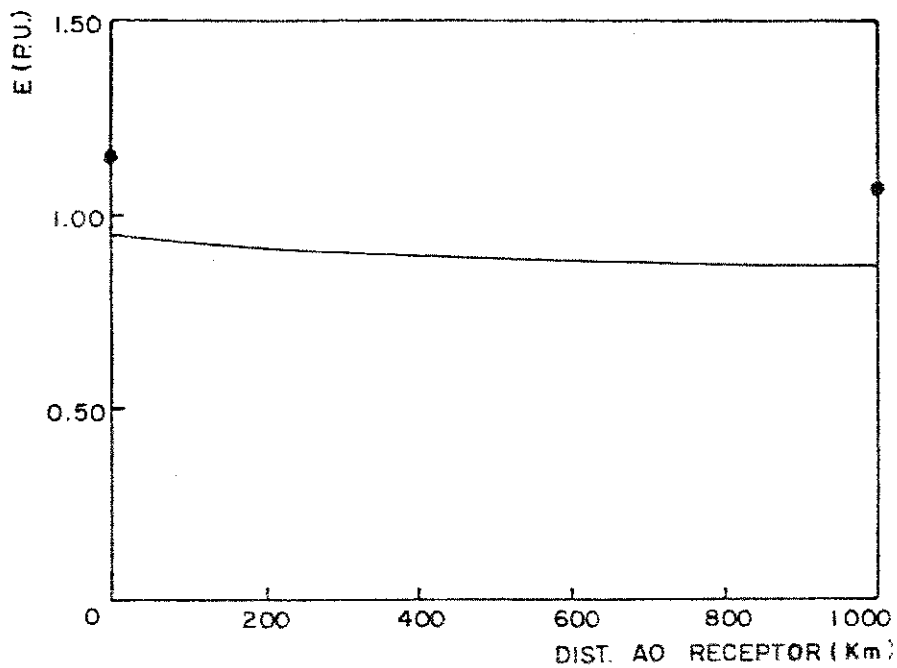
Nas Figs. 4.15 e 4.16 são mostradas as variações dos rendimentos das linhas quando varia-se o valor da carga no extremo receptor, para $FP = 1$.

D (%)	0			20			40			60			80		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	Nº DE SEÇÕES														
20	E*, MAX ≤ 1,15														
40															
60															
80															

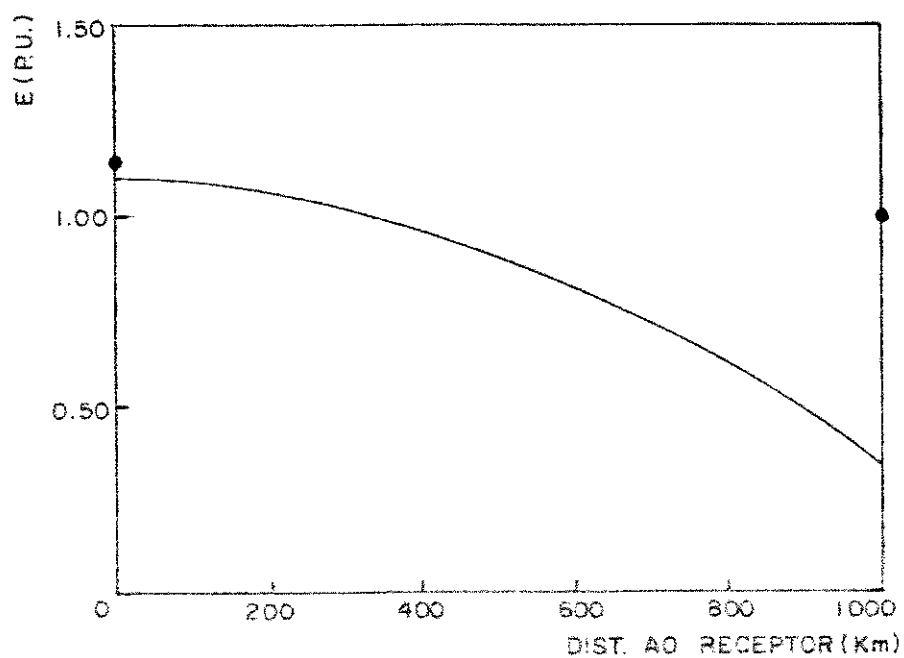
TAB. IV.1 - $S_L = 1000 \text{ Km}$; $P_r = 0$.

S (%)	D (%)	0			20			40			60			80		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	Nº DE SEÇÕES															
0	EMAX < 1,15	X	X	X												
	0,90 < E < 1,10	X	X	X	X	X										
	0 < 30°	X	X	X	X	X	X									
20	EMAX < 1,15	X	X	X												
	0,90 < E < 1,10	X	X	X	X	X										
	0 < 30°	X	X	X	X	X	X									
40	EMAX < 1,15	X	X	X				X	X							
	0,90 < E < 1,10	X	X	X	X	X										
	0 < 30°	X	X	X	X	X	X	X	X							
60	EMAX < 1,15	X	X	X				X	X	X						
	0,90 < E < 1,10	X	X	X	X	X		X	X	X						
	0 < 30°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
80	EMAX < 1,15	X	X	X				X	X	X	X					
	0,90 < E < 1,10	X	X	X	X	X		X	X	X	X					
	0 < 30°	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

TAB. IV.2 - $S_L = 1000$ Km; $P_r = 0.80 P_0$; $FP = 0.95$ IND.



(a)

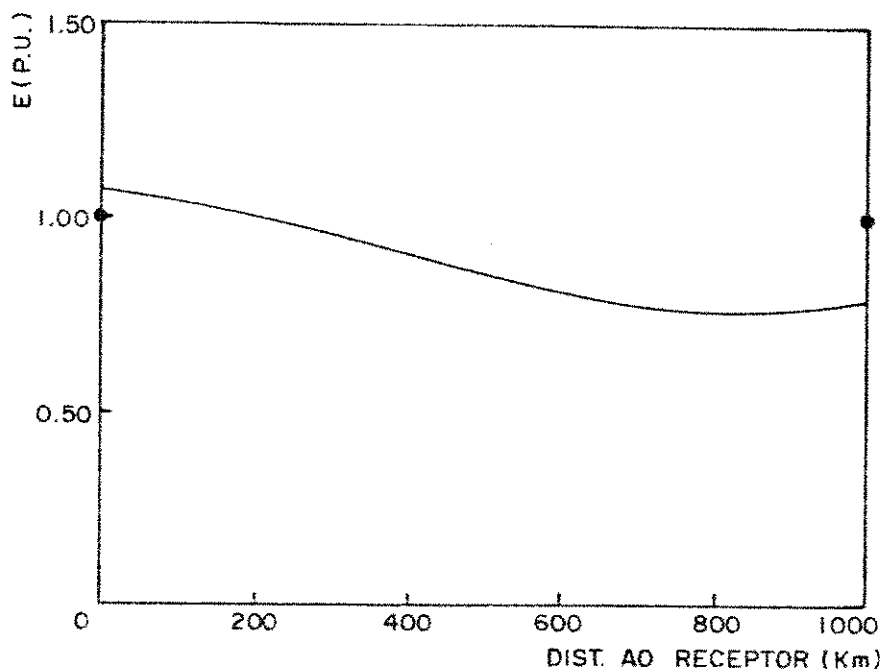


(b)

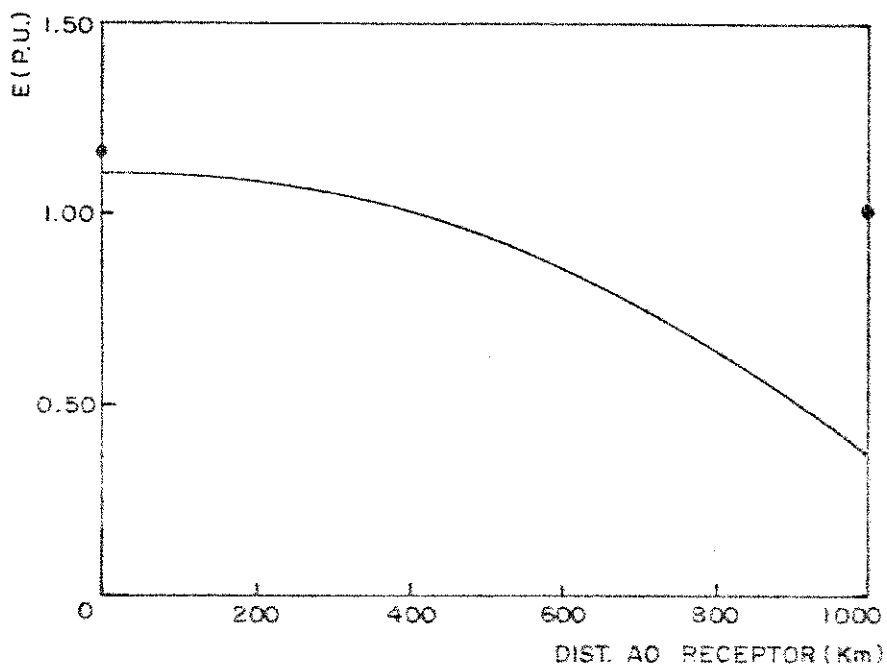
Fig. 4.1 - Perfis de tensão - Linha em carga e em vazio
 $S_L = 1000$ Km; $P_r = 0.80 P_0$; $FP = 0.95$ IND.;
 $S = 80\%$, $D = 10\%$; $NS = 1$.

D (%)	0			20			40			60			80		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nº DE SEÇÕES															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ Es ≤ 1,10															
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ Es ≤ 1,10															
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ Es ≤ 1,10															
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ Es ≤ 1,10															
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ Es ≤ 1,10															
θ ≤ 30°															

TAB. IV.3 - $S_L = 1000$ Km; $P_r = 0.80 P_0$; $FP = 1.00$.



(a)

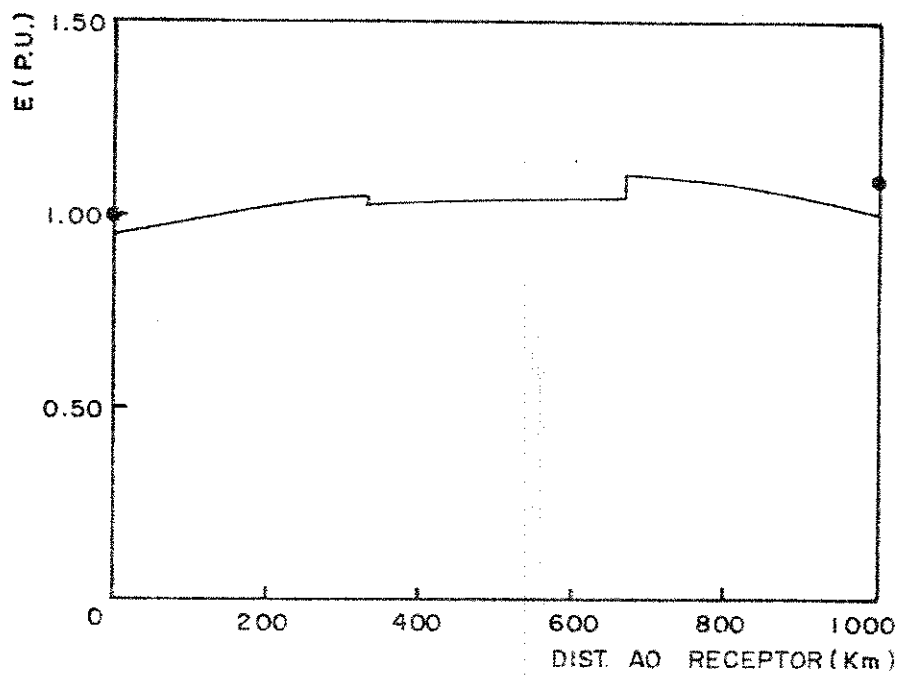


(b)

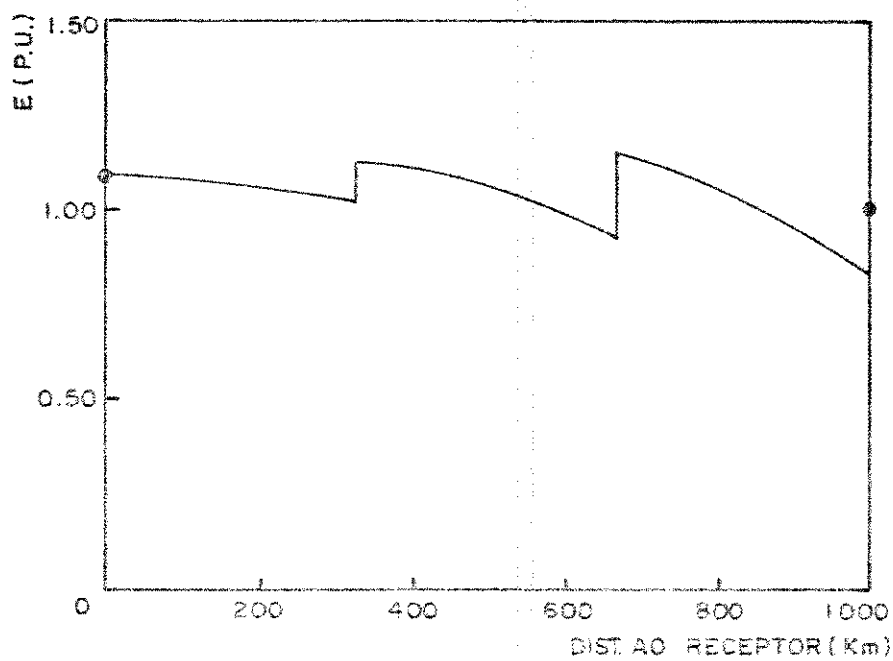
Fig. 4.2 - Perfis de tensão - Linha em carga e em vazio
 $S_L = 1000$ Km; $P_r = 0.80 P_0$; $FP = 1.00$; $S = 80\%$,
 $D = 10\%$; $NS = 1$.

S (%)	D (%)	0			20			40			60			80		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	$E_{MAX} \leq 1.15$															
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$															
	$\theta \leq 30^\circ$															
20	$E_{MAX} \leq 1.15$	X														
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$															
	$\theta \leq 30^\circ$															
40	$E_{MAX} \leq 1.15$	X	X	X		X										
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$		X	X		X									X	
	$\theta \leq 30^\circ$															
60	$E_{MAX} \leq 1.15$	X	X	X	X	X	X		X	X						
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X
	$\theta \leq 30^\circ$	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X
80	$E_{MAX} \leq 1.15$	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X			
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
	$\theta \leq 30^\circ$	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X

TAB. IV.4 - $S_L = 1000 \text{ Km}$; $P_r = 1.00 P_0$; $FP = 0.95 \text{ IND.}$

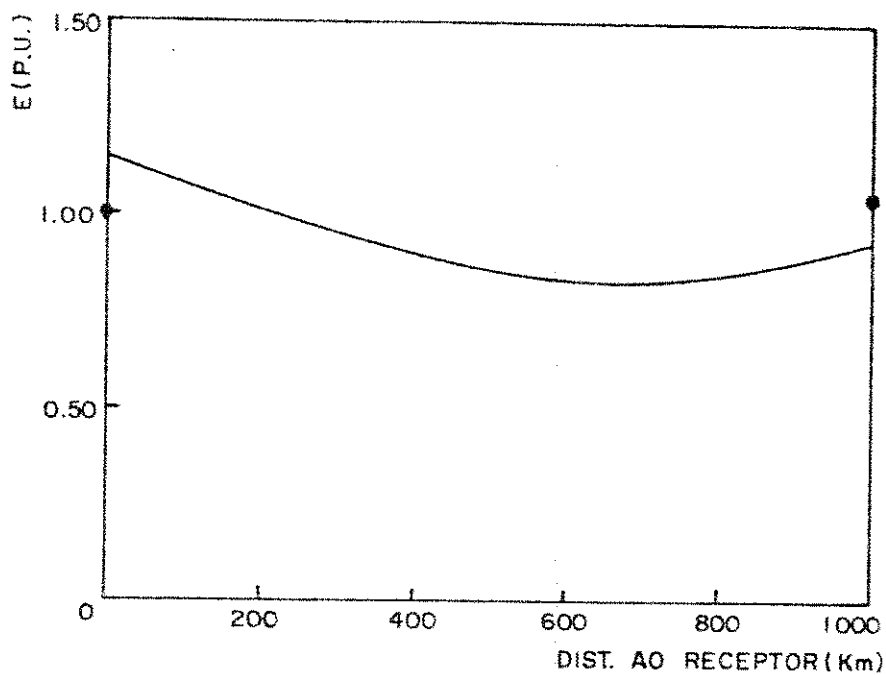


(a)

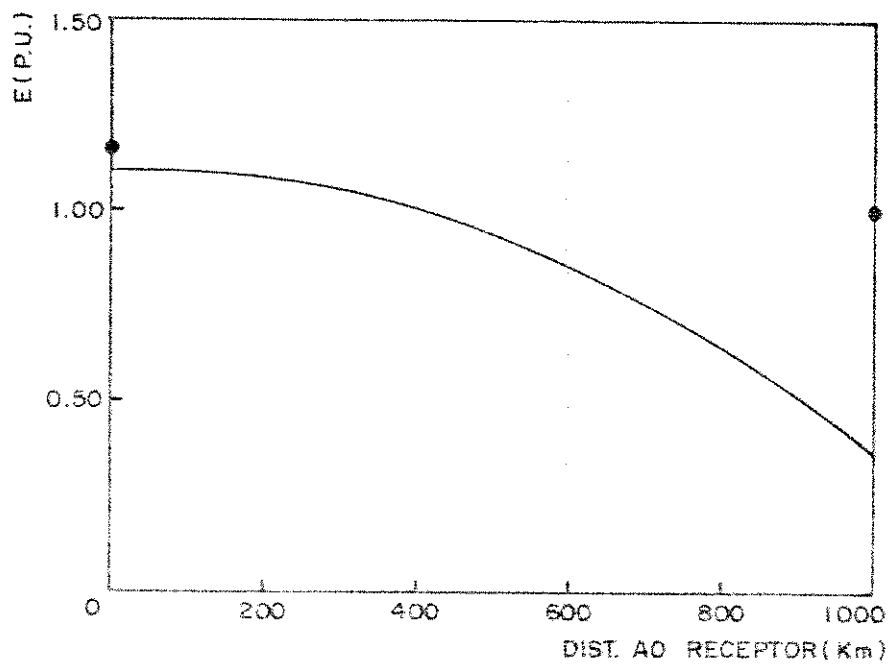


(b)

Fig. 4.3 - Perfis de tensão - Linha em carga e em vazio.
 $S_L = 1000$ Km; $P_r = 1.00 P_0$; $FP = 0.95$ IND; $S = 85\%$; $D = 30\%$; $NS = 3$.



(a)



(b)

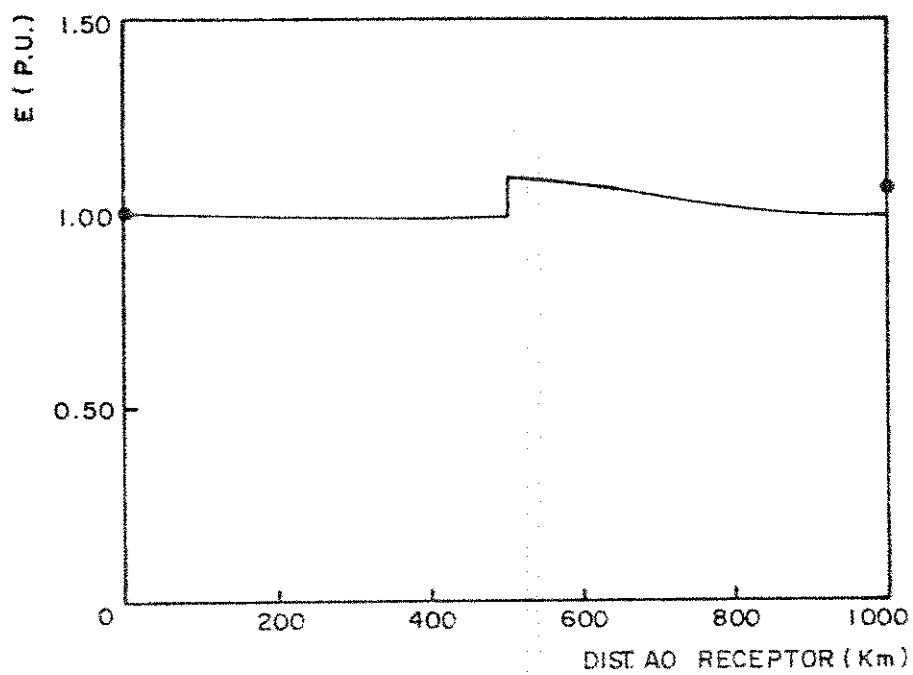
Fig. 4.4 - Perfis de tensão - Linha em carga e em vazio
 $S = 1000$ Km; $P_r = 1.00 P_0$; $FP = 1.00$; $S = 80\%$;
 $D = 10\%$ $NS = 1$.

D (%)	0			20			40			60			80		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	Nº DE SEÇÕES EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ Es ≤ 1,10 θ ≤ 30°														
20	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ Es ≤ 1,10 θ ≤ 30°														
40	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ Es ≤ 1,10 θ ≤ 30°														
60	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ Es ≤ 1,10 θ ≤ 30°														
80	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ Es ≤ 1,10 θ ≤ 30°														

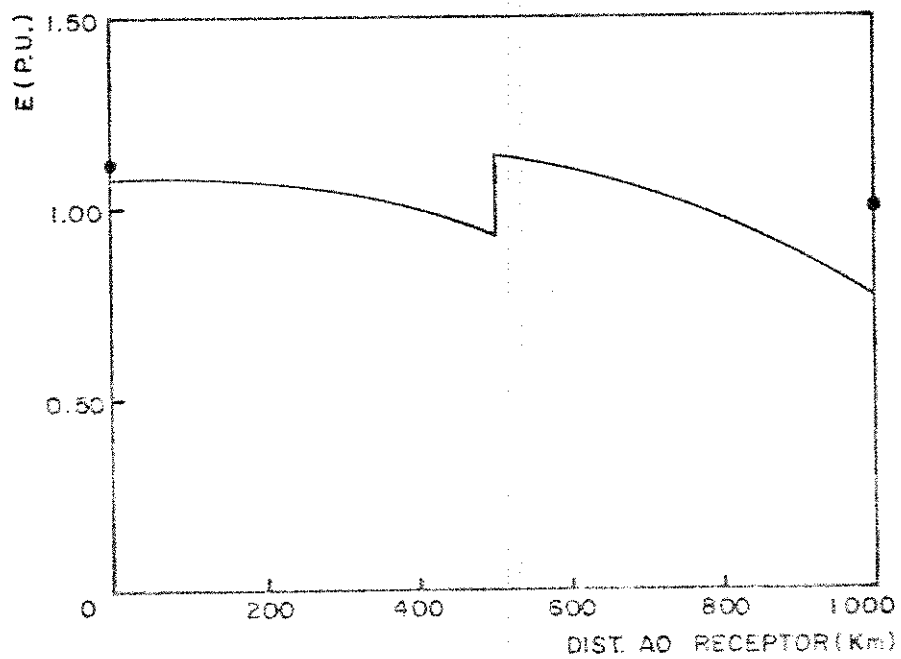
TAB. IV.6 - $S_L = 1000 \text{ Km}$; $P_r = 1.20 P_0$; $FP = 0.95 \text{ IND.}$

S (%)	D (%)	0			20			40			60			80		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	Nº DE SEÇÕES EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ E ₅ ≤ 1,10 θ ≤ 30°															
20	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ E ₅ ≤ 1,10 θ ≤ 30°															
40	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ E ₅ ≤ 1,10 θ ≤ 30°															
60	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ E ₅ ≤ 1,10 θ ≤ 30°															
80	EMAX ≤ 1,15 0,90 ≤ E ₅ ≤ 1,10 θ ≤ 30°															

TAB. IV.7 - S_L = 1000 Km; P_r = 1.20 P₀; FP = 1.00.



(a)



(b)

Fig. 4.5 - Perfis de tensão - Linha em carga e em vazio.
 $S_L = 1000$ Km; $P_r = 1.20 P_0$; $FP = 1.00$; $S = 80\%$;
 $D = 40\%$; $MS = 2$.

S (%)	D (%)	0			20			40			60			80		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	Eo. MAX 4.13				X			X				X				
20	"															
40	"															
60	"													X		
80	"										X			X	X	X

TAB. IV.8 - $S_L = 1800$ Km; $P_r = 0$.

S (%)	D (%)	0			20			40			60			80		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	$E_{MAX} \leq 1.15$	X	X	X	X	X										
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$	X			X				X	X						
	$\theta \leq 30^\circ$															
20	$E_{MAX} \leq 1.15$	X	X	X	X	X										
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$	X			X				X	X						
	$\theta \leq 30^\circ$															
40	$E_{MAX} \leq 1.15$		X	X	X	X										
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$				X				X	X						
	$\theta \leq 30^\circ$															
60	$E_{MAX} \leq 1.15$			X		X	X					X				
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$								X	X			X			
	$\theta \leq 30^\circ$															
80	$E_{MAX} \leq 1.15$		X			X	X					X	X		X	
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$								X	X			X		X	
	$\theta \leq 30^\circ$	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

TAB. IV.9 - $S_L = 1800 \text{ Km}$; $P_r = 0.80 P_0$; $FP = 0.95 \text{ IND.}$

D (%)	0			20			40			60			80		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nº DE SEÇÕES															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₀ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0 ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₀ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0 ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₀ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0 ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₀ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0 ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₀ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0 ≤ 30°															

TAB. IV.10 - S_L = 1800 Km; P_r = 0.80 P₀; FP = 1.00.

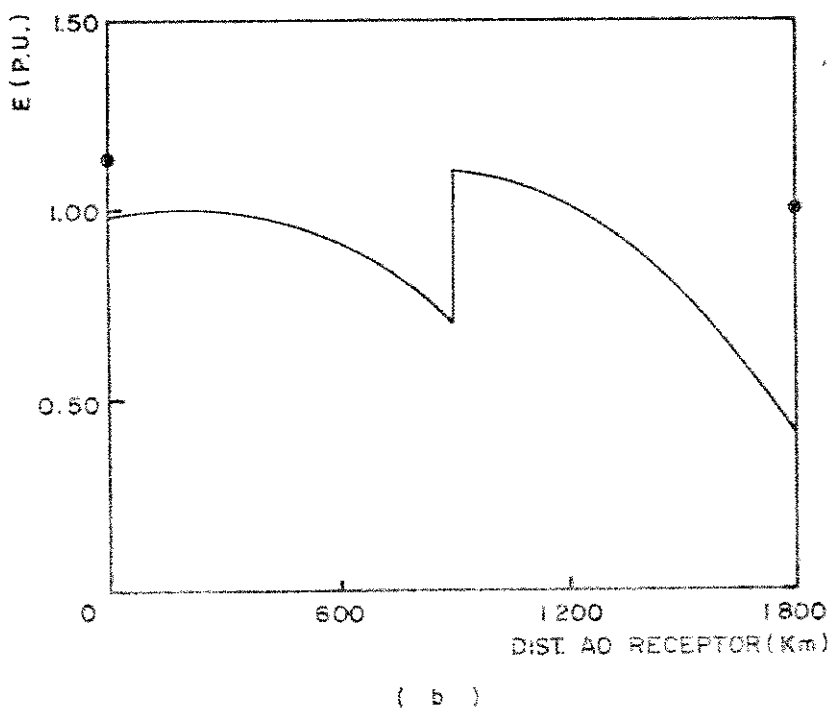
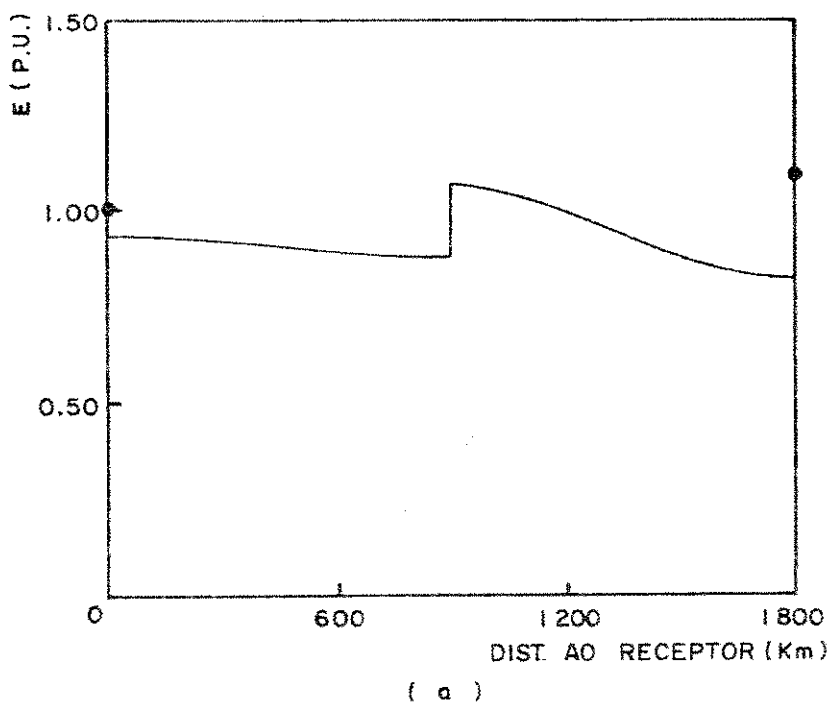


Fig. 4.6 - Perfis de tensão - Linha em carga e em vazio.
 $S_L = 1800 \text{ Km}$; $P_r = 0.80 P_0$; $FP = 1.00$; $S = 85\%$;
 $D = 65\%$; $NS = 2$.

D (%)	0			20			40			60			80		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Nº DE SEÇÕES															
EMAX ≤ 1,15				X											
0,90 ≤ Es ≤ 1,10	X				X			X			X			X	
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15															
0,90 ≤ Es ≤ 1,10					X			X			X			X	
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15															
0,90 ≤ Es ≤ 1,10					X			X			X			X	
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15															
0,90 ≤ Es ≤ 1,10					X			X			X			X	
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15															
0,90 ≤ Es ≤ 1,10					X			X			X			X	
θ ≤ 30°															

TAB. IV.11 - $S_L = 1800$ Km; $P_r = 1.00 P_0$; $FP = 0.95$ IND.

D (%)	0			20			40			60			80		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
(%) S															
Nº DE SEÇÕES															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₃ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₃ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₃ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
θ ≤ 30°															
EMAX ≤ 1,15	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
0,90 ≤ E ₃ ≤ 1,10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
θ ≤ 30°															

TAB. IV.12 - S_L = 1800 Km; P_r = 1.00 P₀; FP = 1.00.

S (%)	D (%)	0			20			40			60			80		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	$E_{MAX} \leq 1.15$															
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$	X	X	X												
	$\theta \leq 30^\circ$															
20	$E_{MAX} \leq 1.15$															
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$		X	X												
	$\theta \leq 30^\circ$															
40	$E_{MAX} \leq 1.15$															
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$			X												
	$\theta \leq 30^\circ$															
60	$E_{MAX} \leq 1.15$															
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$		X	X												
	$\theta \leq 30^\circ$															
80	$E_{MAX} \leq 1.15$															
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$		X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
	$\theta \leq 30^\circ$				X			X	X	X	X	X	X	X	X	X

TAB. IV.13 - $S_L = 1800 \text{ Km}$; $P_r = 1.20 P_0$; $FP = 0.95 \text{ IND.}$

S (%)	D (%)	0			20			40			60			80			
		Nº DE SEÇÕES	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0	$E_{MAX} \leq 1.15$																
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$																
	$\theta \leq 30^\circ$																
20	$E_{MAX} \leq 1.15$																
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$																
	$\theta \leq 30^\circ$																
40	$E_{MAX} \leq 1.15$		X	X													
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$		X	X													
	$\theta \leq 30^\circ$		X	X													
60	$E_{MAX} \leq 1.15$		X	X		X	X		X								
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$		X	X		X	X		X								
	$\theta \leq 30^\circ$		X	X		X	X		X								
80	$E_{MAX} \leq 1.15$		X	X		X	X		X						X	X	
	$0.90 \leq E_s \leq 1.10$		X	X		X	X		X						X	X	
	$\theta \leq 30^\circ$		X	X		X	X		X						X	X	

TAB. IV.14 - $S_L = 1800 \text{ Km}$; $P_r = 1.20 P_0$; $FP = 1.00$.

S (Km)	Pr (x Po)	FP	EMAX (PU)		ES (PU)		REND (%)	
			π	CAP.	π	CAP.	π	CAP.
1 000	0.80	0.95	1.00	1.05	1.05	1.01	88.9	66.4
		1.00	0.95	1.00	1.00	0.97	89.4	66.4
	1.00	0.95	1.17	1.06	1.07	1.03	90.4	69.7
		1.00	1.06	1.05	1.01	0.99	90.9	69.8
	1.20	0.95	1.35	1.07	1.09	1.06	91.4	71.9
		1.00	1.24	1.06	1.02	1.01	91.9	72.0
1 800	0.80	0.95	1.08	1.08	1.10	1.10	82.1	75.1
		1.00	1.03	1.07	1.04	1.07	82.8	75.5
	1.00	0.95	1.20	1.11	1.13	1.13	83.2	76.4
		1.00	1.07	1.09	1.06	1.09	84.0	76.9
	1.20	0.95	1.40	1.13	1.17	1.16	83.6	76.8
		1.00	1.26	1.11	1.09	1.12	84.5	77.5

TAB. IV.15 - Linha compensada em meia onda.

S (Km)	MODELO DE COMP.	X SER (Ω)	Y SHT (Ω)	Q SER (MVar)	Q SHT (MVar)
1 000	π	217.15	0.00218	1662.7	2182.3
	CAP.	-	0.00168	-	8406.6
1 800	π	129.28	0.00106	989.9	1060.0
	CAP.	-	0.00535	-	2407.5

TAB. IV.16 - Linha compensada em meia onda
- Valores dos reatores e capacitores.

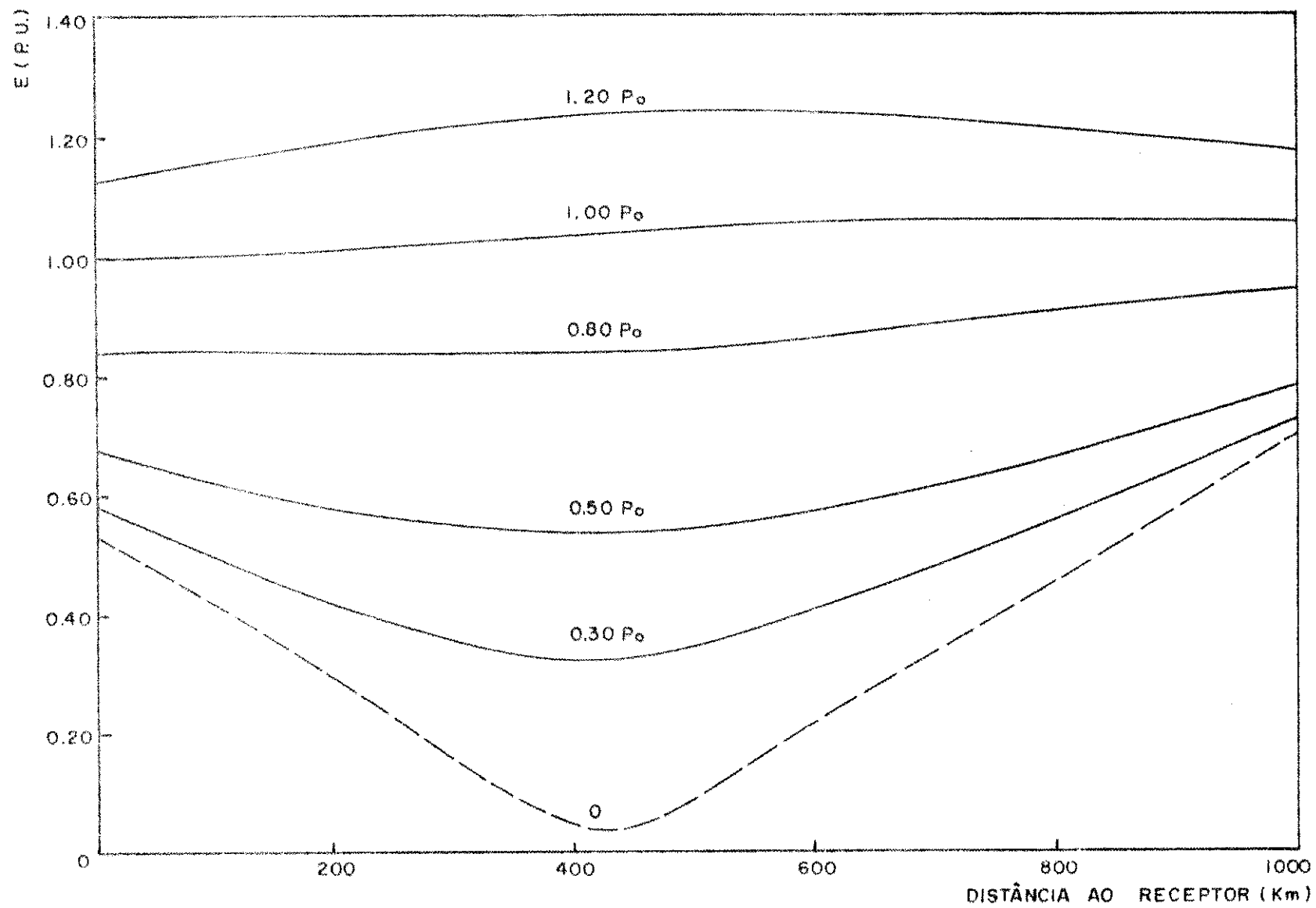


Fig. 4.7 - Perfil de tensões - Modelo π ; $FP = 1.00$; $S = 1000$ Km.

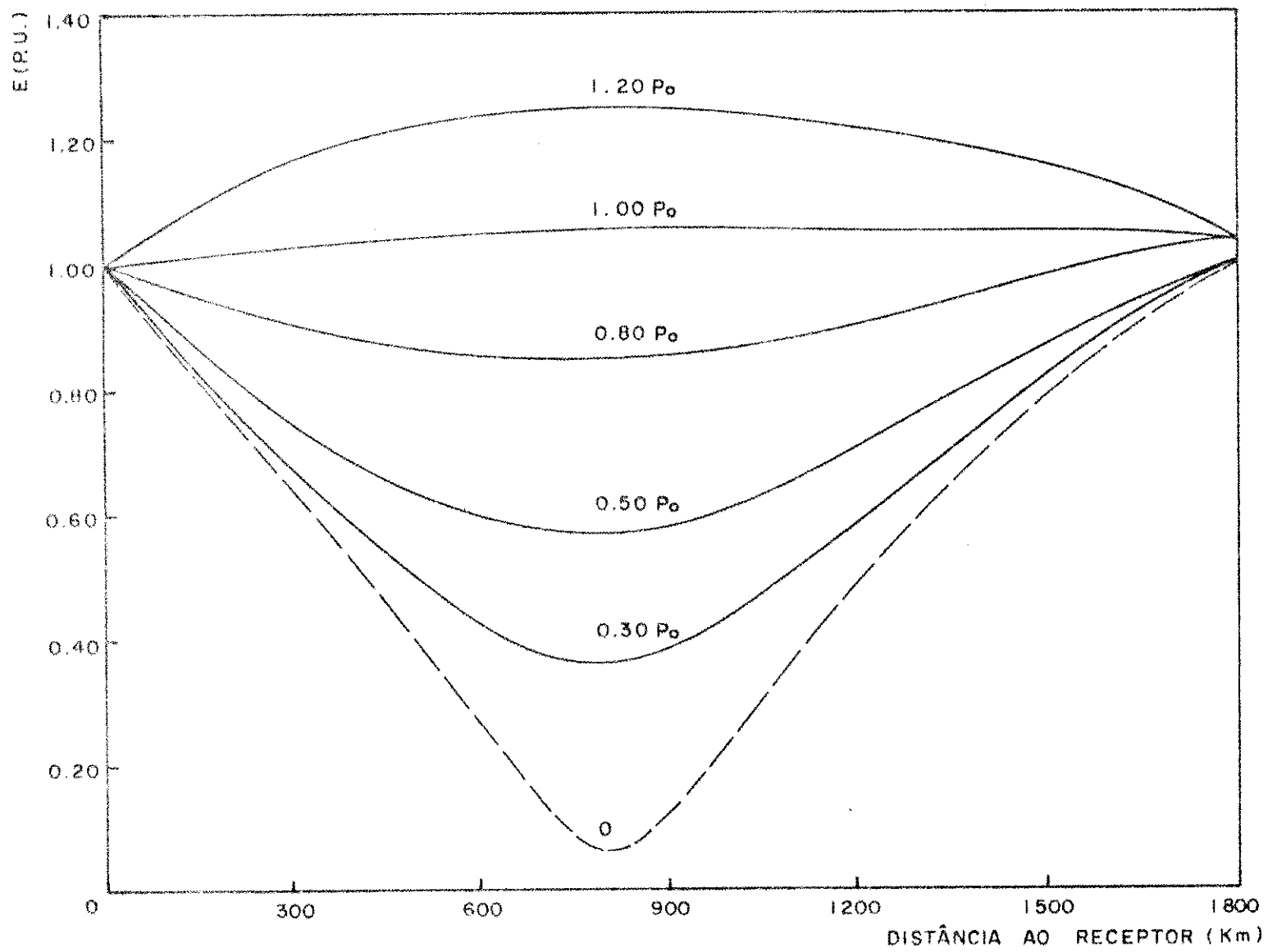


Fig. 4.8 - Perfil de tensões - Modelo n; FP = 1.00; S = 1800 Km.

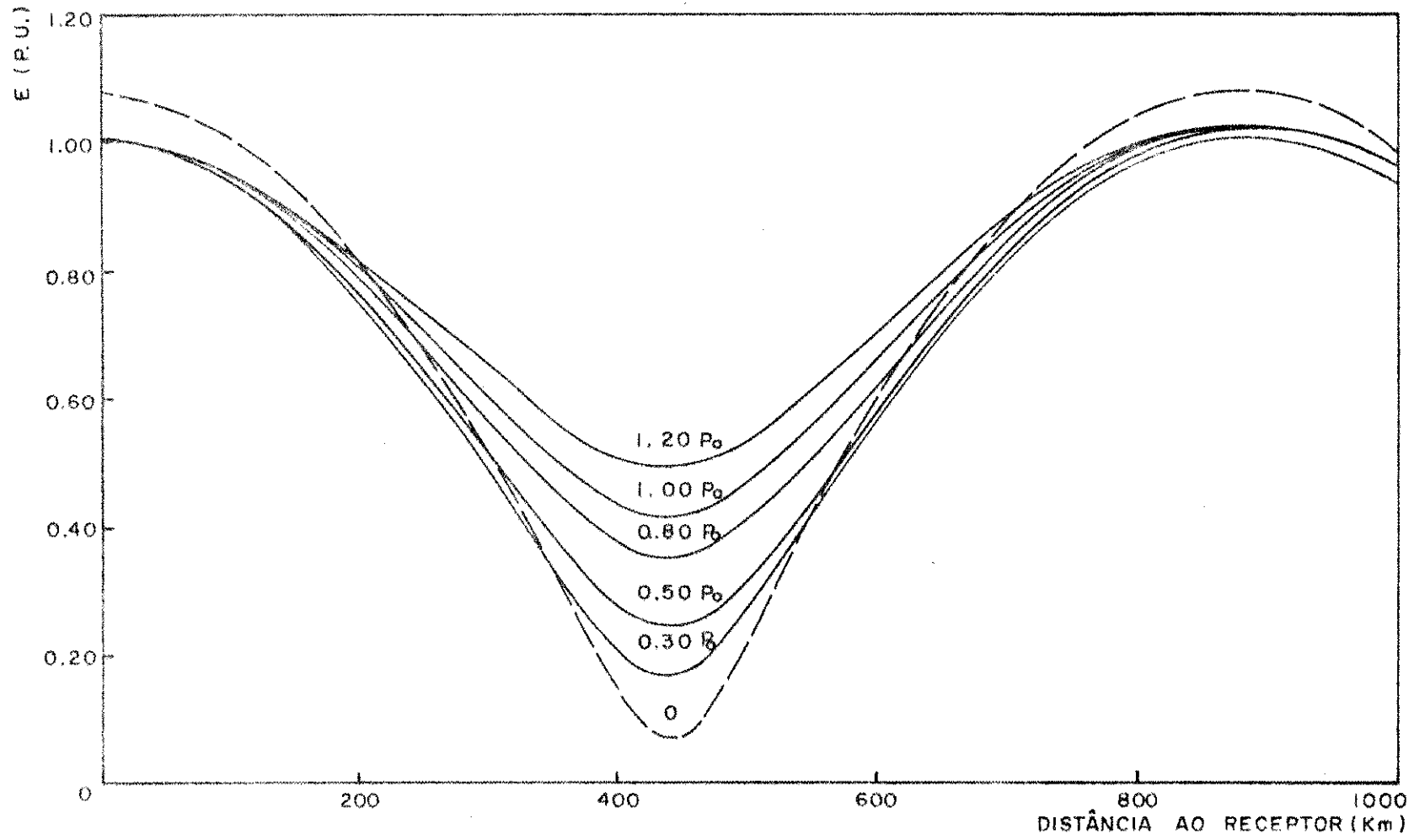


Fig. 4.9 - Perfil de tensões - Capacitor Shunt; $\Gamma P = 1.00$; $S = 1000$ Km.

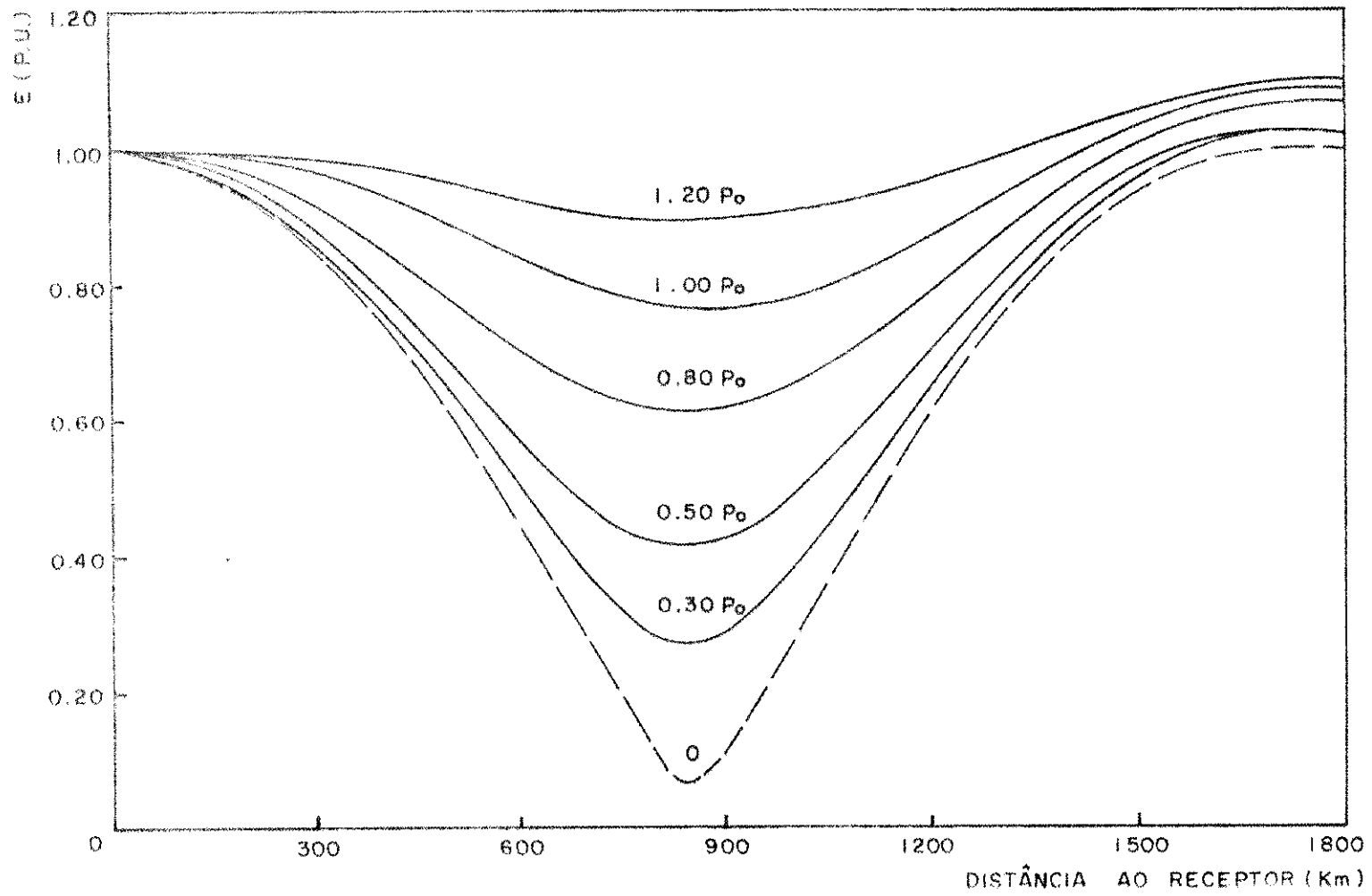


Fig. 4.10 - Perfil de tensões - Capacitor Shunt; FP = 1.00; S = 1800 Km.

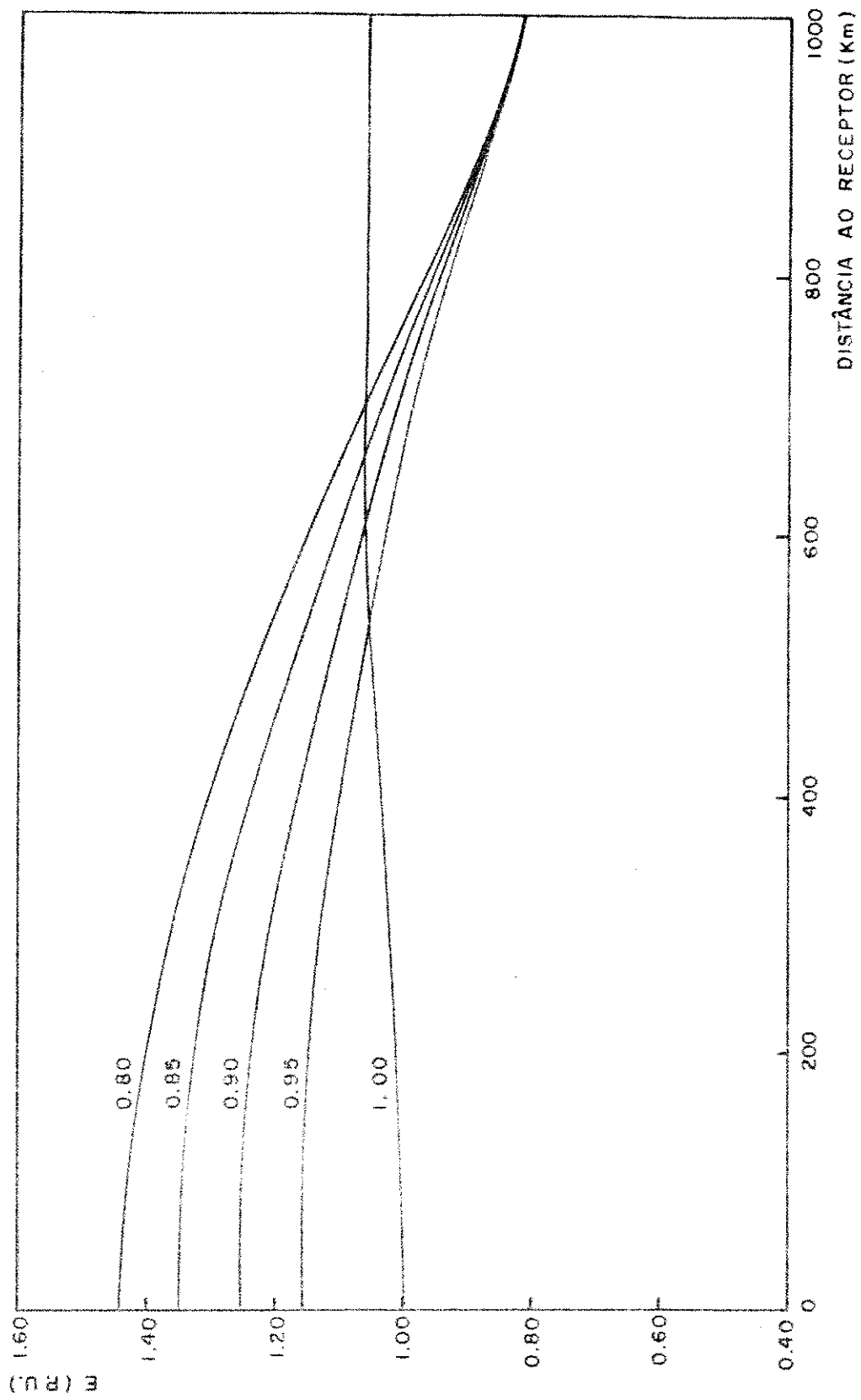


Fig. 4.11 - Perfil de tensões - Modelo II; $P_r = 1.00 P_0$, $S = 1000$ Km.

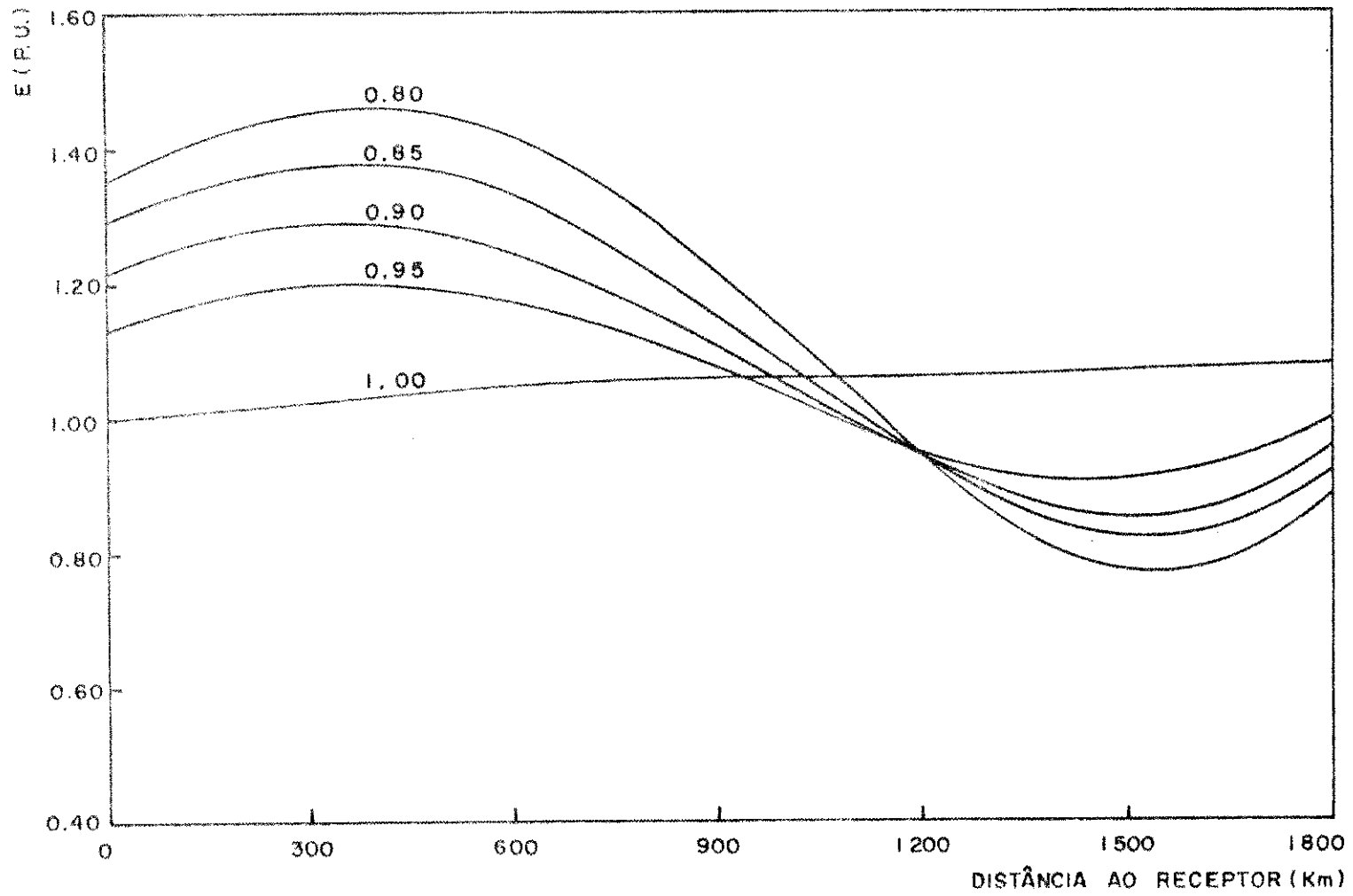


Fig. 4.12 - Perfil de tensões - Modelo II; $P_r = 1.00 P_0$; $S = 1800$ Km.

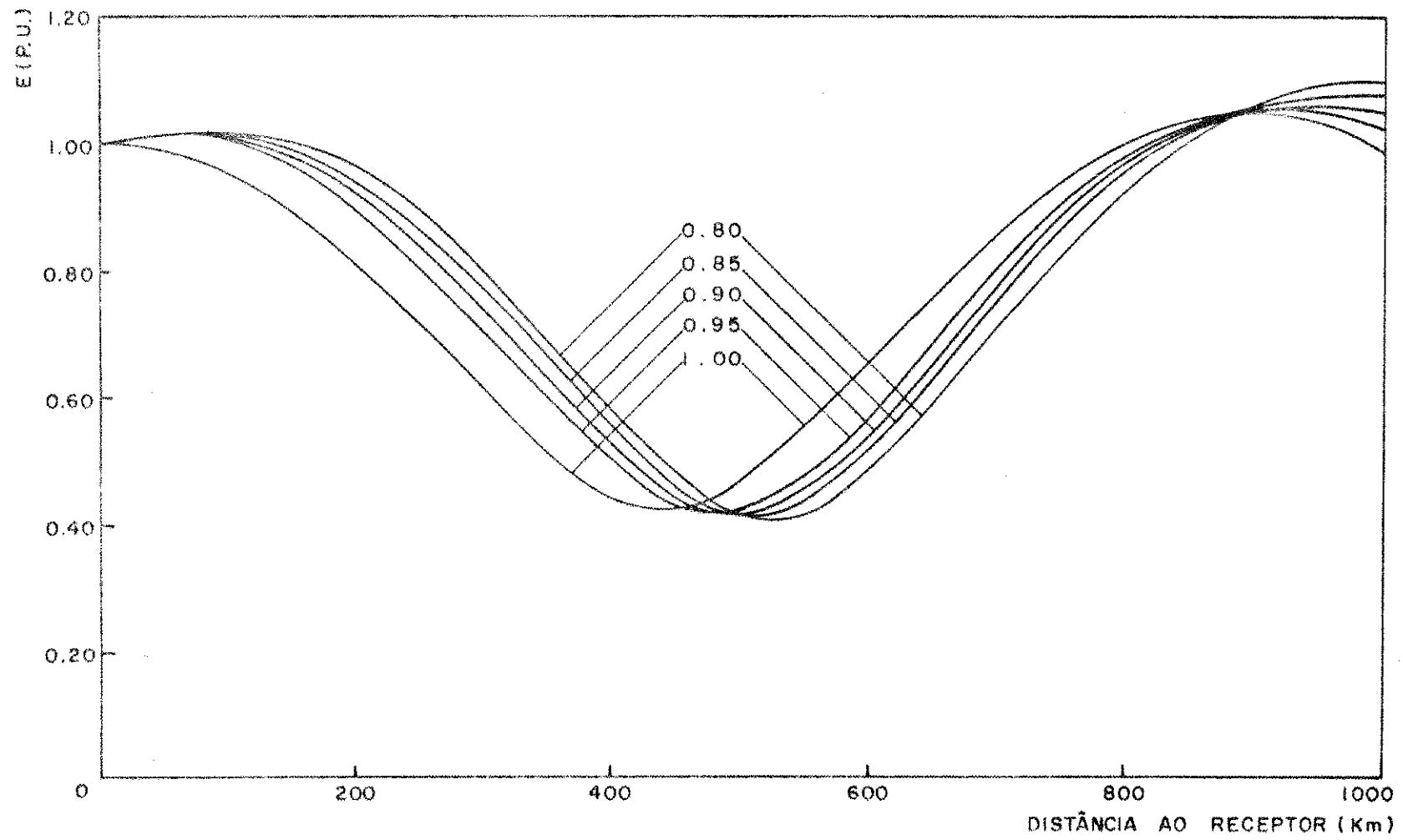


Fig. 4.13 - Perfil de tensões - Capacitor Shunt; $P_r = 1.00 P_0$; $S = 1000$ Km.

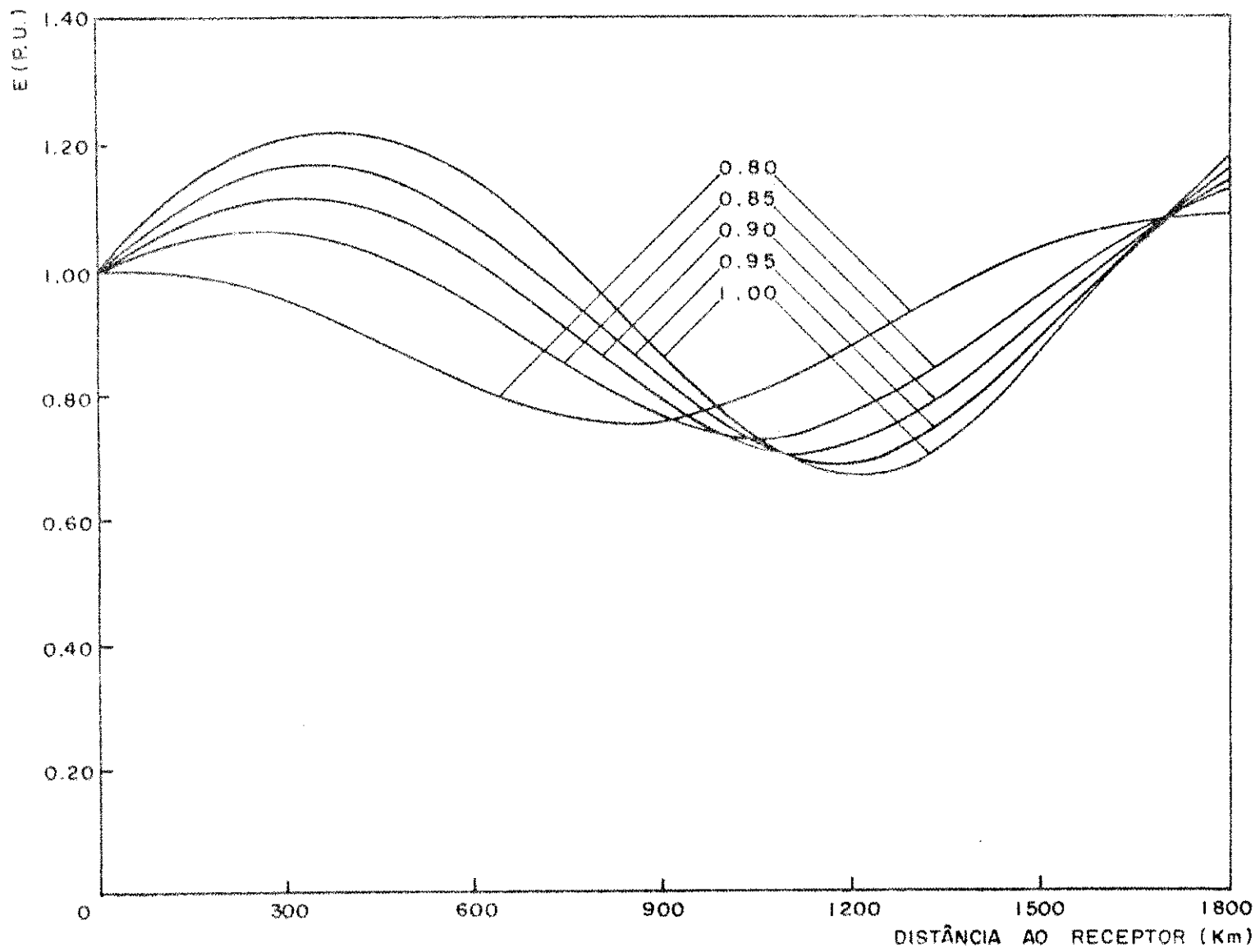


Fig. 4.14 - Perfil de tensões - Capacitor Shunt; $P_r = 1.00 P_0$; $S = 1800$ Km.

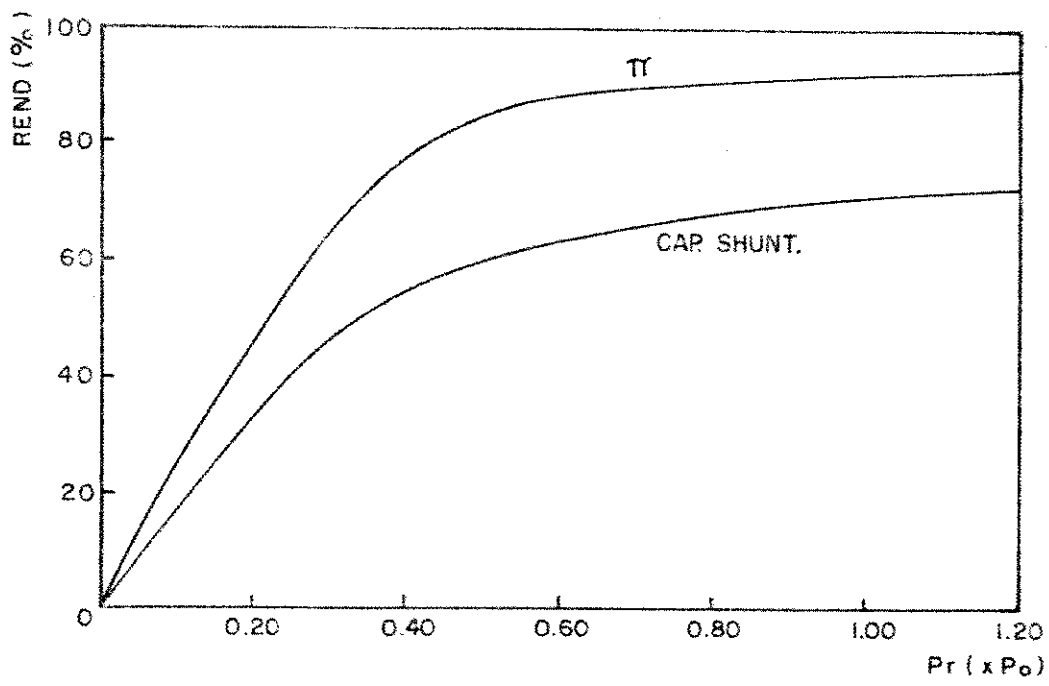


Fig. 4.15 - Rendimento da transmissão versus potência receptor_S = 1000 Km.

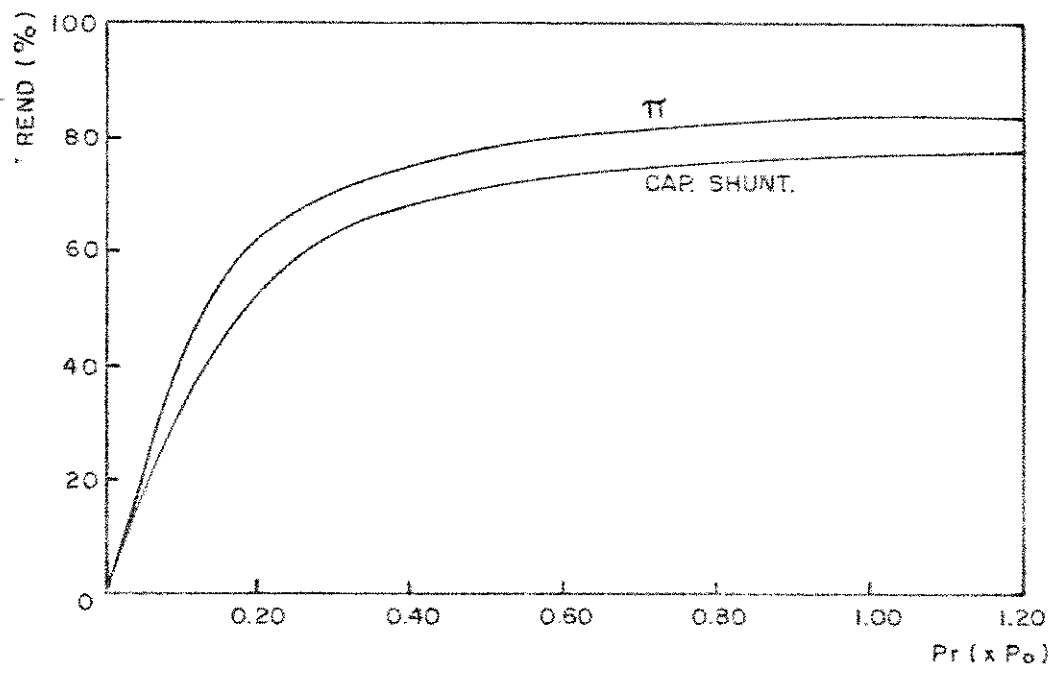


Fig. 4.16 - Rendimento da transmissão versus potência no receptor - S = 1800 Km.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados apresentados no capítulo anterior, pode-se tirar as seguintes conclusões:

- No caso da linha de 1000 Km, a forma de compensação mais conveniente consiste no encurtamento do seu comprimento elétrico. Isto deve-se à substancial economia obtida nos MVAR dos capacitores e indutores, face aos outros métodos de compensação. Por outro lado, a compensação em meia onda mostra-se mais vantajosa no caso da linha de 1800 Km de extensão
- Considerando-se o encurtamento elétrico da linha, os graus de compensação série mais convenientes foram iguais ou pouco superiores a 80%. Já os graus de compensação em derivação escolhidos mostraram-se relativamente mais baixos.

- Em relação à compensação em meia onda realizada pela instalação de seções em π nas extremidades da linha, transmissão de potências superiores ao SIL através da mesma apresenta problemas relativos aos perfis de tensão, face aos altos valores das tensões intermediárias. No caso da compensação feita por capacitores em derivação, isto não constitui problema.
- Os perfis de tensão das linhas de meia onda são bastante alterados quando varia-se o fator de potência no receptor. Este efeito é mais pronunciado no caso da compensação feita por seções em π nas extremidades.
- Os rendimentos da transmissão nas linhas de meia onda são bastante baixos em regime de carga leve, aumentando com a potência transmitida. No caso das linhas compensadas por capacitores em derivação, uma vantagem consiste no aumento do SIL das mesmas, resultando em uma maior capacidade de transporte de potência elétrica. Em contrapartida, os rendimentos apresentam-se muito baixos.

ANEXO

CONSIDERAÇÕES ACERCA DE QUADRIPOLOS

FLUXOGRAMAS

1 - DEFINIÇÃO DE UM QUADRIPOLO

Define-se um quadripolo como sendo uma parte de um sistema elétrico, possuindo dois pares de terminais destinados à conexão de fontes e cargas. Esta definição é restringida pelo requisito de que a corrente em um terminal de um par deve ser, em cada instante, igual e oposta à corrente no outro terminal do mesmo par. A Fig. 1 mostra a sua representação usual.

O desenvolvimento que se segue é feito considerando-se os quadripolos compostos exclusivamente por elementos passivos, lineares e bilaterais. Assim, uma linha de transmissão de potência elétrica enquadra-se perfeitamente nesses requisitos.

O problema mais comum consiste em conhecer-se a corrente e a tensão em um extremo e calcular-se a corrente e a tensão no outro extremo. Para este fim, usa-se o seguinte par de equações:

$$E_s = AE_r + BI_r \quad (1)$$

$$I_s = CE_r + DI_r \quad (2)$$

As constantes A, B, C e D são as conhecidas constantes generalizadas do quadripolo.

2 - IMPEDÂNCIAS DE CIRCUITO ABERTO E DE CURTO-CIRCUITO

Se os terminais RR' (Fig. 1) forem postos em aberto,

as eqs. (1) e (2) tornar-se-ão:

$$E_s = AE_r$$

$$I_s = CE_r$$

Então:

$$\frac{E_s}{I_s} = \frac{A}{C}$$

Denomina-se *impedância de circuito aberto*, abreviada $Z_{1,ca}$, a relação entre E_s e I_s com RR' em aberto.

$$Z_{1,ca} = \frac{A}{C} \quad (3)$$

Pondo-se os terminais RR' em curto-circuito, tem-se:

$$E_s = BI_r$$

$$I_s = DI_r$$

Logo:

$$\frac{E_s}{I_s} = \frac{B}{D}$$

Denomina-se *impedância de curto-circuito*, abreviada

$Z_{1,cc}$, a relação entre E_s e I_s , com RR' curto-circuitados. Assim:

$$Z_{1,cc} = \frac{B}{D} \quad (4)$$

3 - IMPEDÂNCIA DE IMAGEM DE UM QUADRIPOLO

Neste item, considerar-se-á uma fonte ligada aos terminais SS' e uma carga nos terminais RR' do quadripolo da Fig. 1. Desta forma denomina-se *impedância de entrada*, Z_1 , a relação:

$$Z_1 = \frac{E_s}{I_s} \quad (5)$$

A impedância da carga ligada a RR' é denominada *impedância externa* e é anotada por Z_2 . Assim:

$$Z_2 = \frac{E_r}{I_r} \quad (6)$$

Evidentemente, Z_1 depende de Z_2 . Ajustando-se Z_2 , pode-se chegar a uma situação em que $Z_1 = Z_2$. Este valor é denominado *impedância de imagem* ou *impedância característica*, comumente anotado por Z_0 .

Substituindo (1) e (2) em (5), resulta:

$$Z_1 = \frac{AE_r + BI_r}{CE_r + DI_r}$$

Usando-se a eq. (6) e o fato de que $Z_1 = Z_2 = Z_0$:

$$Z_1 = Z_0 = \frac{AZ_2 I_r + BI_r}{CZ_2 I_r + AI_r} = \frac{AZ_0 + B}{CZ_0 + A}$$

Tira-se, então:

$$Z_0 = \sqrt{B/C} \quad (7)$$

Multiplicando (3) e (4) membro-a-membro:

$$Z_{1'ca} \cdot Z_{1'cc} = \frac{AB}{CD}$$

Para quadripolos simétricos, demonstra-se que $A = D$.

Então:

$$Z_{1'ca} \cdot Z_{1'cc} = \frac{B}{C}$$

Logo, conclui-se que:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{1'ca} \cdot Z_{1'cc}} \quad (8)$$

4 - IMPEDÂNCIA DE IMAGEM DE UMA SEÇÃO EM π

De acordo com a Fig. 2, a impedância de circuito aberto de uma seção em π será:

$$Z_{1'ca} = \frac{(Z + 1/Y)(1/Y)}{Z + 2/Y}$$

Em relação à impedância de curto-circuito, tem-se:

$$Z_{1'cc} = \frac{Z \cdot (1/Y)}{Z + 1/Y}$$

Daí:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{1'ca} \cdot Z_{1'cc}} = \sqrt{\frac{(Z + 1/Y)(1/Y)}{Z + 2/Y} \cdot \frac{Z \cdot (1/Y)}{Z + 1/Y}}$$

Logo:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{ZY^2 + 2Y}} \quad (9)$$

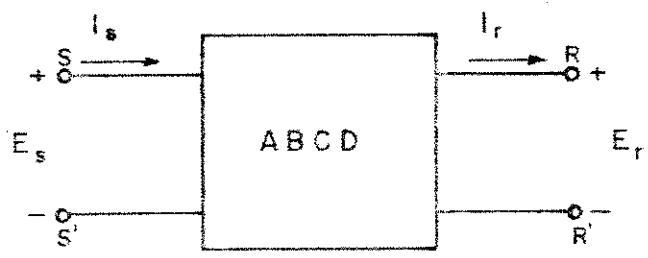


Fig. 1 - Representação de um quadripolo.

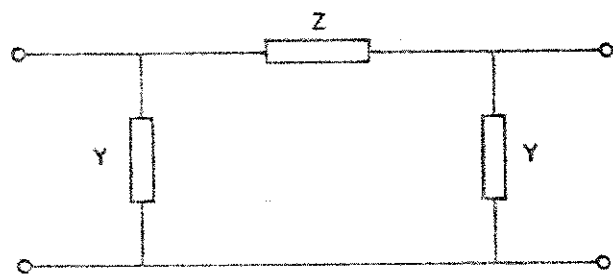


Fig. 2 - Seção em π simétrica.



Fig. 3 - Fluxograma referente ao método de encurtamento da linha.

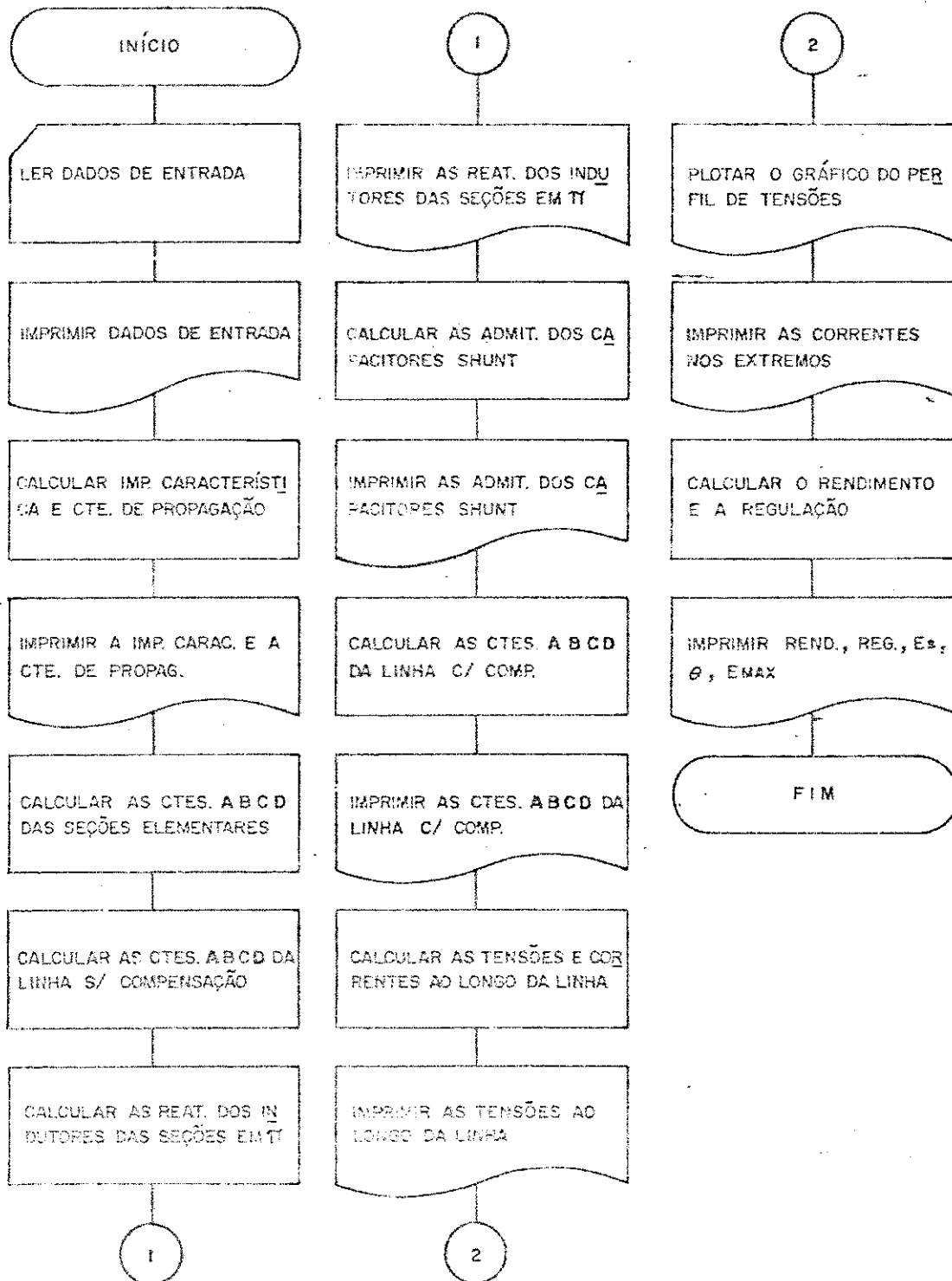


Fig. 4 - Fluxograma correspondente à compensação em meia onda por seções em π .

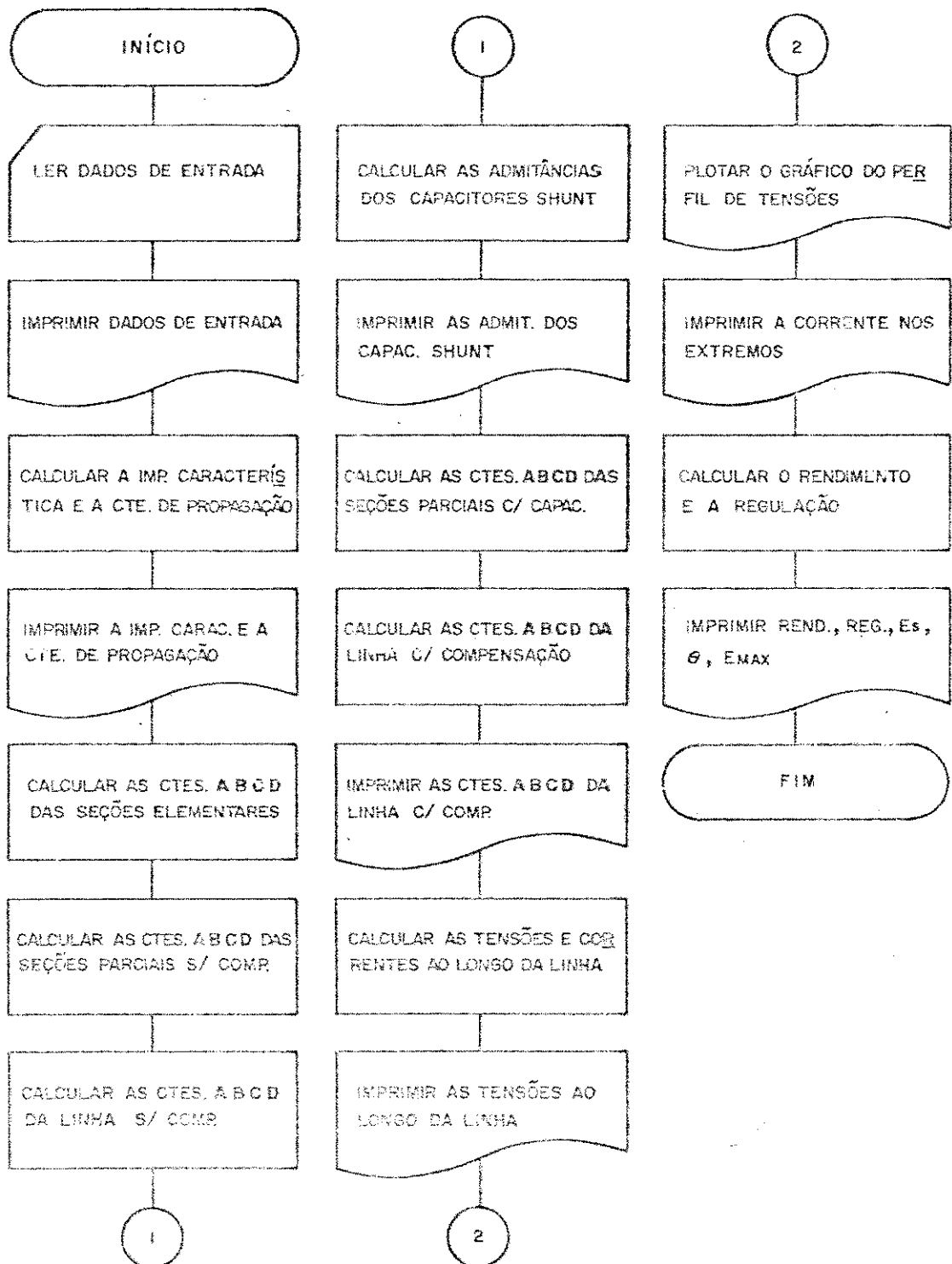


Fig. 5 - Fluxograma correspondente à compensação em meia onda por capacitores shunt.

BIBLIOGRAFIA

01. COURTS, A. L.; HINGORANI, N. G.; STEMLER, G. E. - "A New Series Capacitor Protection Scheme Using Nonlinear Resistors" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, N° 4, 1978, pp. 1042-1052.
02. CINIERI, E.; ILICETO, F. - "Ottimizzazione della Compensazione Serie e Derivata nella Trasmissione dell'energia a Grande Distanza" - Revista L'Energia Elettrica, N° 2, 1976, páginas 77-85.
03. Crary, S. B. - "Power System Stability", vol. 1, cap. 7 - John Wiley & Sons, New York, 1945.
04. DuBOIS, E. W.; FAIRMAN, JR, J. F.; MARTIN, D. E.; MURPHY, G. M.; WARD, J. B. - "Extra-Long-Distance-Transmission" - A IEE TRANSACTIONS - vol. 80, 1962, pp. 1108-1116.
05. FRIEDLANDER, E. - "Transient Reactance Effects in Static Shunt Reactive Compensators for Long AC Lines - IEEE Tran

- sactions. "Paper" F76164-4 apresentado na conferência de inverno do P.E.S., 1976.
06. FUCHS, R. D. - "Transmissão de Energia Elétrica - Linhas Aéreas", vol. 1 - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1977.
07. GUILLE, A.E; PATERSON, W. - "Electrical Power Systems". 2ª edição, vol. 1, cap. 1 - Pergamon Press, Londres, 1979.
08. HUBERT, F. J.; GENT, M. R. - "Half-Wavelength Power Transmission Lines" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-84, Nº 10, 1965, pp. 965-974.
09. KIMBARK, E. W. - "Direct Current Transmission, vol. 1, cap. 1 - Wiley - Interscience, New York, 1971.
10. KUMAR, B. S. A.; PARTHASARATHY, K.; PRABHAKARA, F.S.; KHINCHA, H. P. - "Effectiveness of Series Capacitors in Long Distance Transmission Lines" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, 1970, pp. 941-951.
11. MASON, G. R. - "The Art and Science of Protective Relaying" - John Wiley Sons, New York, 1956.
12. PAVEL, C. O. - "Linhas de Transmissão de Meia Onda" - BC/GSP/15 - VI Seminário Nacional da Produção e Transmissão de

Energia Elétrica - Balneário Camboriú-SC, 1981.

13. PRABHAKARA, F. S.; PARTHASARATHY, K; RAO, H. N. R. - "Analysis of Natural Half-Wave-Length Power Transmission Lines" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, Nº 12, 1969, pp. 1787-1794.
14. PRABHAKARA, F. S.; PARTHASARATHY, K; RAO, H. N. R. - "Performance of Tuned Half-Wave-Length Power Transmission Lines" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, Nº 12, 1969, pp. 1975-1802.
15. RESENDE, F. M.; ROSS, R. P. D.; BRESSANE, J. M.; FERREIRA, S. T. - "Sistema de Transmissão de Itaipu CA/CC - Aplicação de Capacitores Série no Tronco de 750 KV de Itaipu" - BC/GSP/32 - VI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - Balneário Camboriú-SC, 1981.
16. RESENDE, J. W. - "Otimização das Compensações Série e em Derivação nas Linhas Aéreas de Transmissão de Energia" - Tese de Mestrado - Itajubá, MG, 1979.
17. SKILLING, H. H. - "Circuitos em Ingeniería Electrica", cap. 18 - C.E.C.S.A, Cidade do México, 1966.
18. ZABORSZKY, J.; RITTENHOUSE, J. W. - "Electric Power Transmission", vol. 1, cap. 7 - The Rensselaer Bookstore, New York, 1969.