

TESE

239

- JOSÉ WILSON RESENDE -

**OTIMIZAÇÃO DAS COMPENSAÇÕES
SÉRIE E EM DERIVAÇÃO NAS
LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA**

ORIENTADOR: PROF. RUBENS DARIO FUCHS

Tese apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, como parte dos requisitos para a obtenção do título de "MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA".

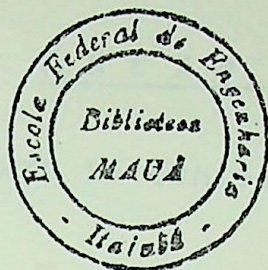
ITAJUBÁ

Estado de Minas Gerais - Brasil

- 1979 -

T:239

- JOSÉ WILSON RESENDE -



OTIMIZAÇÃO DAS COMPENSAÇÕES
SÉRIE E EM DERIVAÇÃO NAS
LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA

ORIENTADOR: PROF. RUBENS DARIO FUCHS

*Tese apresentada à Comissão de Pós-Graduação da
Escola Federal de Engenharia de Itajubá, como parte dos requi-
sitos para a obtenção do título de "MESTRE EM ENGENHARIA ELE-
TRICA".*

Itajubá

Estado de Minas Gerais - Brasil

- 1979 -

CLASS. 621.315.1:519.863:621.319.4 (643.2)

CUTT. R. R. 4330

TOMBO. 239



OTIMIZAÇÃO DAS COMPENSACÕES

SÉRIE E EM DERIVAÇÃO DAS

LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

DE ENERGIA

ORIENTADOR: PROF. RUBENS DARIO FUCHS

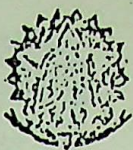
Esta dissertação é dedicada à Comissão de Pós-Graduação da
Faculdade de Engenharia de São Carlos, como parte dos estudos
para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE

ELÉTRICA

São Carlos

Estado de São Paulo - Brasil

- 1978 -



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

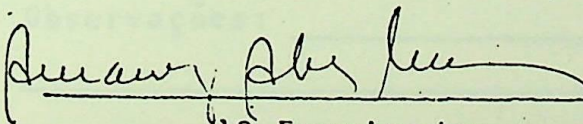
A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 205 de 06/12/79, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "OTIMIZAÇÃO DAS COMPENSAÇÕES SÉRIE E EM DERIVAÇÃO NAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA"

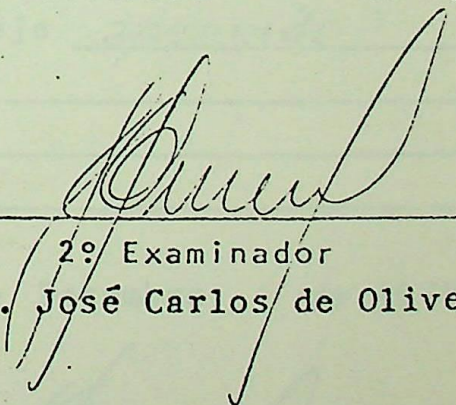
apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à JOSE WILSON RESENDE.

Itajubá, 11 de Dezembro de 1979.



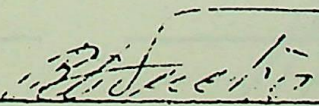
1º Examinador

Engº Amaury Alves Menezes



2º Examinador

Prof. José Carlos de Oliveira



3º Examinador

Prof. Rubens Dario Fuchs (Orientador)



Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação: "OTIMIZAÇÃO DAS COMPENSAÇÕES SÉRIE E EM DERIVAÇÃO NAS LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA"

Autor: JOSE WILSON RESENDE

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A+	<i>Alves</i>
2º	A+	<i>[Assinatura]</i>
3º	A+	<i>[Assinatura]</i>

Resultado médio: Conceito A+, ou seja aprovado
sem distinção

Observações: _____

Itajubá, 11 de Dezembro de 1979.

[Assinatura]

1º Examinador

Engº Amaury Alves Menezes

[Assinatura]

2º Examinador

Prof. José Carlos de Oliveira

[Assinatura]

3º Examinador

Prof. Rubens Dario Fuchs (Orientador)

R E S U M O

São apresentados os principais problemas elétricos na operação das linhas aéreas de transmissão. Visando diminuir esses incômodos, o encurtamento elétrico da linha, mediante a instalação de capacitores em série e de reatores em derivação é apresnetado e estudado.

Analisa-se uma linha de 1000 km de extensão sem nenhuma compensação e com as compensações série e "shunt". Em seguida, determinam-se as condições mais favoráveis de operação, do ponto de vista técnico, para várias condições de carga. Faz-se também uma análise econômica, visando apontar as melhores opções financeiras de funcionamento da linha, quando da presença dos reatores e capacitores.

Esta otimização também inclue a determinação do melhor modelo elétrico e do número de subestações ao longo da linha, para a instalação racional dos capacitores e reatores.

A B S T R A C T

THE PRINCIPAL ELECTRICAL PROBLEMS FOUND IN THE OPERATION OF THE TRANSMISSION LINES ARE DELT WITH HERE. TRYING TO DIMINISH THESE DIFFICULTIES, THE ELECTRICAL SHORTENING OF THE LINE, THROUGH THE INSTALLING OF CAPACITORS IN SERIES AND OF REACTORS IN PARALLEL, IS PRESENTED AND STUDIED.

THE ANALYSIS IS ACCOMPLISHED IN A LINE OF 1000 KM OF EXTENSION WITHOUT ANY COMPENSATION AND WITH THE SERIES AND SHUNT COMPENSATION. THEN, IT IS DETERMINED THE MOST FAVORABLE CONDITIONS OF OPERATIONS FROM THE TECHNICAL POINT OF VIEW FOR MANY CONDITIONS OF CHARGE. IT IS ALSO CARRIED AND ECONOMICAL ANALYSIS TRYING TO POINT OUT THE BEST FINANCIAL OPTIONS OF THE FUNCTIONING OF THE LINE WHEN THE PRESENCE OF THE REACTORS AND CAPACITORS.

THE IMPROVEMENT ALSO INCLUDES THE DETERMINATION OF THE BEST ELECTRICAL MODEL AND OF THE NUMBER OF SUBSTATIONS ALONGSIDE THE LINE FOR THE RATIONAL INSTALLING OF THE CAPACITORS AND REACTORS.

SUMÁRIO

I - PROBLEMAS ELÉTRICOS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA POR LONGAS DISTÂNCIAS,	1
1.1 - INTRODUÇÃO,	1
II - A TRANSFERENCIA DE POTENCIA EM LINHAS AEREAS DE TRANSMISSAO,	4
2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS,	4
2.2 - INSTABILIDADE DINÂMICA,	5
2.3 - INSTABILIDADE TRANSITÓRIA,	6
2.4 - MÁXIMA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL,	6
2.4.1 - <i>Uso de linhas de transmissão em paralelo,</i>	9
2.4.2 - <i>Operação em corrente contínua,</i>	9
2.4.3 - <i>Compensação da reatância da linha,</i>	11
III - OS EFEITOS DA COMPENSAÇÃO SHUNT NA COMPENSAÇÃO POR CAPACITORES EM SÉRIE,	13
3.1 - INTRODUÇÃO,	13
3.2 - ALTERAÇÃO DA "EFICIÊNCIA DE COMPENSAÇÃO" VARIANDO O LOCAL DA COMPENSAÇÃO SÉRIE,	14

3.3 - INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE REATORES INDUTIVOS NA COMPENSAÇÃO SÉRIE,	20
IV - DESCRIÇÃO DA ANÁLISE E DOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA A ES COLHA DAS MELHORES OPÇÕES DE OPERAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPENSADAS,	
4.1 - INTRODUÇÃO,	26
4.2 - APRESENTAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS,	29
4.3 - MODELO DE COMPENSAÇÃO TIPO "A",	31
4.3.1 - Compensação série - Cálculo dos capacitores do trecho,	32
4.3.2 - Compensação shunt - Cálculo dos reatores indutivos,	35
4.3.3 - Cálculo das tensões e correntes,	37
4.4 - MODELO DE COMPENSAÇÃO TIPO "B",	43
4.4.1 - Compensação shunt - Cálculos dos reatores de um trecho de linha "Nt",	46
4.4.2 - Compensação série - Cálculo dos capacitores,	47
4.4.3 - Cálculo das tensões e correntes,	48
4.5 - MODELO DE COMPENSAÇÃO TIPO "C",	51
4.5.1 - Compensação série - Cálculo do capacitor,	51
4.5.2 - Compensação shunt - Cálculo dos reatores,	53
4.5.3 - Cálculo das tensões e correntes,	54
4.6 - O PROGRAMA PARA COMPUTADOR DIGITAL: FLUXOGRAMAS,	57

V - ANÁLISES E CONCLUSÕES TÉCNICAS RELATIVAS AS COMPENSAÇÕES SÉRIE E EM DERIVAÇÃO, EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA,	61
5.1 - INTRODUÇÃO,	61
5.2 - TENSÕES NO TRANSMISSOR,	61
5.3 - TENSÃO MÁXIMA AO LONGO DA LINHA,	62
5.4 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA,	63
5.5 - PERDAS DE POTÊNCIA-FLUXOS DE REATIVOS,	63
5.7 - ESTUDO DE $P_2 = 0,75P_0(620,546MW)$,	65
5.7.1 - <i>Fator de potência unitário,</i>	65
5.7.1.1 - Tensão no transmissor,	65
5.7.1.2 - Tensões máximas ao longo da linha,	69
5.7.1.3 - Ângulos de potência,	69
5.7.1.4 - Perdas de potência-Fluxo de reativos,	72
5.7.1.5 - Escolha das melhores condições de operação,	76
5.7.2 - <i>Fator de potência=0,95 capacitivo,</i>	79
5.7.2.1 - Tensão no transmissor,	79
5.7.2.2 - Tensões máximas ao longo da linha,	82
5.7.2.3 - Ângulos de potência,	88
5.7.2.4 - Perdas de potência-Fluxo de reativos,	88
5.7.2.5 - Escolha das melhores condições de operação,	92

5.7.3 - <i>Fator de potência=0,95 indutivo,</i>	95
5.7.3.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	95
5.7.3.2 - <i>Tensões máximas ao longo da linha,</i>	97
5.7.3.3 - <i>Ângulos de potência,</i>	107
5.7.3.4 - <i>Pêrdas de potência-fluxo de reativos,</i>	109
5.7.3.5 - <i>Escolha das melhores condi- ções de operação,</i>	112
5.8 - <i>ESTUDO DE $P_2 = 1,00P_0$ (814,00 MW),</i>	114
5.8.1 - <i>Fator de potência unitário,</i>	114
5.8.1.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	114
5.8.1.2 - <i>Tensões máximas ao longo da linha,</i>	118
5.8.1.3 - <i>Ângulos de potência,</i>	122
5.8.1.4 - <i>Pêrdas de potência-fluxo de reativos,</i>	122
5.8.1.5 - <i>Escolha das melhores condi- ções de operação,</i>	126
5.8.2 - <i>Fator de potência=0,95 capacitivo,</i>	128
5.8.2.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	128
5.8.2.2 - <i>Tensões máximas ao longo da linha,</i>	128
5.8.2.3 - <i>Ângulos de potência,</i>	132
5.8.2.4 - <i>Pêrdas de potência-fluxo de reativos,</i>	134
5.8.2.5 - <i>Escolha das melhores condi- ções de operação,</i>	134

5.8.3 - <i>Fator de potência=0,95 indutivo,</i>	138
5.8.3.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	138
5.8.3.2 - <i>Tensões máximas ao longo da linha,</i>	141
5.8.3.3 - <i>Ângulos de potência,</i>	141
5.8.3.4 - <i>Pêrdas de potência-fluxo de reativos,</i>	144
5.8.3.5 - <i>Escolhas das melhores condições de operação,</i>	147
5.9 - <i>ESTUDO DE $P_2 = 1,25P_0(1.017,58 MW),$</i>	151
5.9.1 - <i>Fator de potência unitário,</i>	151
5.9.1.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	151
5.9.1.2 - <i>Tensões máximas ao longo da linha,</i>	151
5.9.1.3 - <i>Ângulos de potência,</i>	155
5.9.1.4 - <i>Pêrdas de potência-fluxo de reativos,</i>	155
5.9.1.5 - <i>Escolha das melhores condi- ções de operação,</i>	157
5.9.2 - <i>Fator de potência=0,95 capacitivo,</i>	164
5.9.2.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	164
5.9.2.2 - <i>Tensões máximas ao longo da linha,</i>	167
5.9.2.3 - <i>Ângulos de potência,</i>	167
5.9.2.4 - <i>Pêrdas de potência-fluxo de reativos,</i>	170
5.9.2.5 - <i>Escolha das melhores condi- ções de operação,</i>	173

5.9.3 - <i>Fator de potência=0,95 indutivo,</i>	175
5.9.3.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	175
5.9.3.2 - <i>Tensões máximas ao longo da linha,</i>	179
5.9.3.3 - <i>Ângulos de potência,</i>	182
5.9.3.4 - <i>Pêrdas de potência-fluxo de reativos,</i>	184
5.9.3.5 - <i>Escolha das melhores condi- ções de operação,</i>	188
5.10 - <i>ESTUDO DA LINHA A VAZIO,</i>	189
5.10.1 - <i>Tensão no transmissor,</i>	189
5.10.2 - <i>Fluxos de reativos,</i>	193
5.10.3 - <i>Escolha das melhores condições de o- peração,</i>	193
VI - <i>ASPECTOS ECONÔMICOS DAS COMPENSAÇÕES SÉRIE E EM DERIVA- ÇÃO. CONCLUSÕES FINAIS,</i>	197
6.1 - <i>CONSIDERAÇÕES,</i>	197
6.2 - <i>CUSTO DOS REATORES E CAPACITORES,</i>	198
6.3 - <i>ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO. CON- CLUSÕES FINAIS,</i>	207
6.3.1 - <i>Carga $P_2 = 0,75P_0,$</i>	207
6.3.2 - <i>Carga $P_2 = 1,00P_0,$</i>	209
6.3.3 - <i>Carga $P_2 = 1,25P_0,$</i>	211
6.3.4 - <i>Linha a vazio,</i>	214

APÊNDICES

A - ESTUDO DAS COMPENSAÇÕES SÉRIE EM MODELO ELETRICO DE LINHA DE TRANSMISSÃO,

- A.1 - INTRODUÇÃO, Apêndice 1
- A.2 - LINHA SEM COMPENSAÇÃO, Apêndice 3
- A.2.1 - Com a carga $P_2 = P_0$, Apêndice 3
- A.2.2 - Linha a vazio, Apêndice 5
- A.3 - LINHA COM COMPENSAÇÃO SÉRIE NAS EXTREMIDADES. $K_{série} = 71,50\%$, Apêndice 6
- A.3.1 - Com a carga $P_2 = P_0$, Apêndice 6
- A.3.2 - Linha a vazio, Apêndice 6
- A.4 - LINHA COM COMPENSAÇÃO SÉRIE NO MEIO DA LINHA. $K_{série} = 71,50\%$, Apêndice 8
- A.4.1 - Linha com a carga $P_2 = P_0$, Apêndice 8
- A.4.2 - Linha a vazio, Apêndice 10
- A.5 - CONCLUSÕES, Apêndice 11

B - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, Apêndice 12

CAPITULO I - PROBLEMAS ELÉTRICOS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR LONGAS DISTÂNCIAS

1.1 - INTRODUÇÃO

Nas linhas de transmissão em corrente alternada de grandes comprimentos (em torno de 800 a 1.000 Km ou mais), a transmissão de energia elétrica pode se tornar impraticável devido a problemas de estabilidade, de fluxos de reativos, rendimentos, excessivas quedas de tensão ou efeito ferranti. Pode ser desejável também transportar por uma linha já existente, um valor de potência maior que aquele para a qual a linha foi construída, sem que as características acima citadas sofram alterações substanciais com relação às aquelas pré-definidas, quando do transporte da sua potência original.

Nestes casos, dever-se-á alterar as características elétricas das linhas, visando diminuir os efeitos indutivos e capacitivos naturais, que são os causadores diretos dos problemas citados. Já é de uso comum os reatores em derivação, que atenuam os efeitos negativos da capacitância natural das linhas. Mais recentemente, na Europa e Estados Unidos, o emprego de capacitores em série tem sido bastante observado também. Estes capacitores reduzem a indutância série natural. O uso conjunto destes equipamentos, fará com que a linha opere tal como uma linha curta, possuindo, portanto, pequenas impedâncias e admitâncias. Em decorrência, teremos melhorias consideráveis na estabilidade e na regulação da transmissão, facilitando a obtenção de níveis de tensão compatíveis, reduzindo as sobreten-

sões temporárias e transitórias.

Como se sabe, tanto a indutância como a capacitância da linha a ser compensada, estão uniformemente distribuídas. No entanto, por razões práticas e econômicas, a compensação deve estar, inevitavelmente, concentrada em poucos pontos da linha.

Quando do projeto de uma transmissão a longa distância, será necessário que determine, além dos graus de compensação, a posição, o número ótimo dos bancos de compensação e o esquema de ligação dos condensadores em série e reatores em derivação (*shunt*). Estas medidas devem ser tomadas, já que a potência transmissível ao limite de estabilidade, a regulação de tensão e o rendimento dependem grandemente destas informações, conforme será mostrado no presente estudo.

O objetivo deste trabalho é aquele de analisar e apontar os graus de compensação série e em derivação melhores para cada valôr e tipo de carga a ser transportada e entregue ao receptor, bem como indicar quais os modelos e o número de bancos de compensação mais vantajosos. As conclusões por nós obtidas, de um modo geral, valem para todas as linhas de transmissão com comprimentos em torno de mil quilômetros. O método utilizado nos permite observar o comportamento de linhas menores também, porque os cálculos partem do receptor rumo ao transmissor.

Foi tomada uma linha de mil quilômetros, tensão de quinhentos mil volts e procedida sua análise. Justifica-se o estudo efetuado para a linha acima, pelo fato de que visou-se a realidade brasileira em primeiro lugar. Em futuro próximo acredita-se no aproveitamento hidráulico amazônico em larga escala e, linhas com estas dimensões serão certamen

te utilizadas. Caso se queira analisar uma linha maior em tensão ou extensão, nosso trabalho também será útil, já que todos os métodos usados estão explicados claramente. Desta forma, o estudioso poderá analisar o seu caso específico usando nosso procedimento.

Para nosso estudo tomamos a linha de transmissão mencionada em (5), cujos parâmetros elétricos se assemelham aos das linhas de 500 KV que partem da Usina de São Simão, de propriedade da CEMIG.

Os modelos elétricos de compensação são os da Fig. 1.1, os quais são citados como os mais indicados para as compensações série e shunt, no artigo (2). Eles permitem que a linha continue simétrica, mesmo após as compensações.

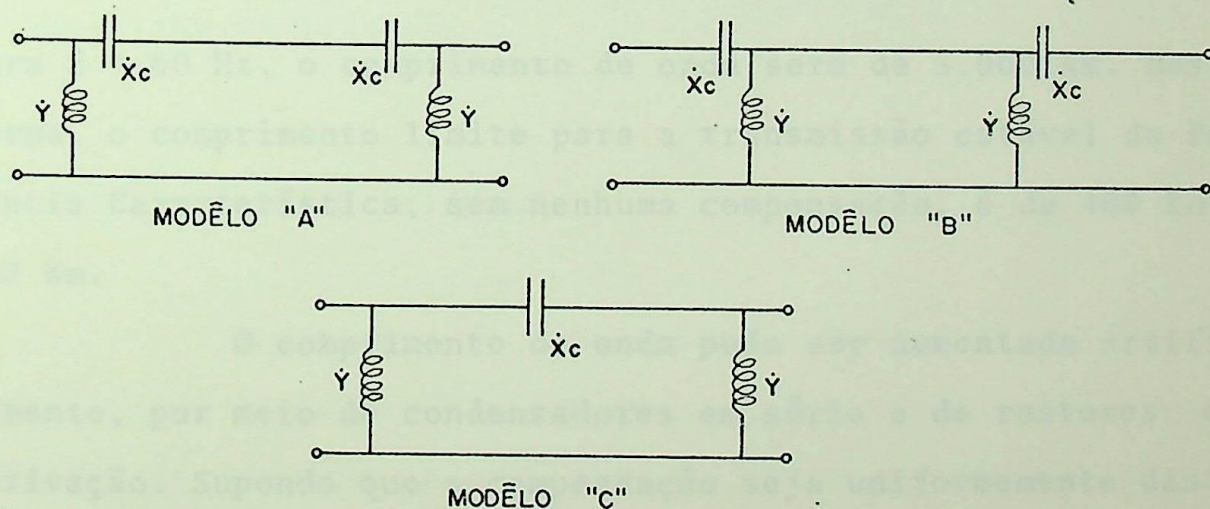


Fig. 1.1 - Modêlos de compensação série-shunt que não tiram a simetria das linhas.

CAPITULO II - A TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO.

2.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A transmissão estável de uma potência próxima da Potência Característica é possível quando o ângulo de potência está por volta de 30°. Isto é normalmente conseguido quando a linha possui um comprimento em torno de 1/12 do seu comprimento de onda λ .

O comprimento de onda, λ , pode ser obtido pela expressão (2.1), onde "f" é a frequência da transmissão, "L" é a indutância de serviço e "C" é a capacitância de serviço:

$$\lambda = (1/f) \cdot (1/\sqrt{L \cdot C}) \quad (2.1)$$

Para $f = 60$ Hz, o comprimento de onda será de 5.000 Km. Desta forma, o comprimento limite para a transmissão estável da Potência Característica, sem nenhuma compensação, é de 400 Km a 500 Km.

O comprimento de onda pode ser aumentado artificialmente, por meio de condensadores em série e de reatores em derivação. Supondo que a compensação seja uniformemente distribuída ao longo da linha, esta permanecerá homogênea mesmo após as compensações.

Os graus de compensação série ($K_{série}$) e em derivação ou *shunt* (K_{shunt}), variarão de 0% a 100%. Após uma compensação conjunta série-shunt, o novo comprimento de onda será:

$$\begin{aligned} \lambda_c &= (1/f) \cdot (1/\sqrt{(1-K_{\text{série}}) \cdot L \cdot (1-K_{\text{shunt}}) \cdot C}) = \\ &= (1/f \sqrt{L \cdot C} \cdot \sqrt{(1-K_{\text{shunt}}) \cdot (1-K_{\text{série}})}) = \\ &= \lambda (1/\sqrt{(1-K_{\text{shunt}}) \cdot (1-K_{\text{série}})}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Admitindo graus de compensação série e shunt iguais a 70%, teremos $K_{\text{série}} = K_{\text{shunt}} = 0,70$. Introduzindo estes valores na expressão (2.2), o novo comprimento de onda λ_c será:

$$\lambda_c = 5.000 / (\sqrt{(1-0,70) \cdot (1-0,70)}) = 16.667 \text{ Km}$$

Portanto, após a compensação acima, a potência característica poderá ser transmissível estavelmente por uma linha de 1.400' Km (valor resultante de $\lambda_c/12$).

Para o caso real, onde as compensações são concentradas em poucos pontos, a conclusão acima não será substancialmente modificada.

2.2 - INSTABILIDADE DINÂMICA

Nas linhas de transmissão a longas distâncias, podem surgir variações bruscas nas tensões, provocadas por oscilações de potência. A este tipo de alteração denominamos de "Instabilidade Dinâmica". Esta Instabilidade é combatida com a coordenação das regulações automáticas das tensões e cargas dos geradores.

2.3 - INSTABILIDADE TRANSITÓRIA

É causada por uma falta ou pelo desligamento de uma linha do sistema, ou ainda pela combinação de uma falta com seu subsequente isolamento por desligamento de parte do sistema. O limite de estabilidade transitória é um fator muito importante para o sucesso de uma transmissão de energia. Ele se refere ao máximo fluxo de potência possível em um ponto particular, sem perda de estabilidade, quando ocorre uma perturbação súbita.

2.4 - MÁXIMA POTÊNCIA TRANSMISSÍVEL

Uma linha de transmissão, associada com os transformadores elevadores e abaixadores, constituem um "link" de impedância finita entre a geração e a carga ou entre dois sistemas elétricos. Esta impedância será denominada $\dot{Z} = Z \angle \phi^\circ$ e as tensões, respectivamente, no transmissor e receptor, de \dot{U}_1 e \dot{U}_2 , sendo: $\dot{U}_1 = U_1 \angle \theta^\circ$ e $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$. Como se pode perceber, o ângulo de potência será dado por " θ ". A potência entregue ao receptor poderá agora ser obtida. A figura 2.1 mostra o modelo ora estudado. Podemos escrever então:

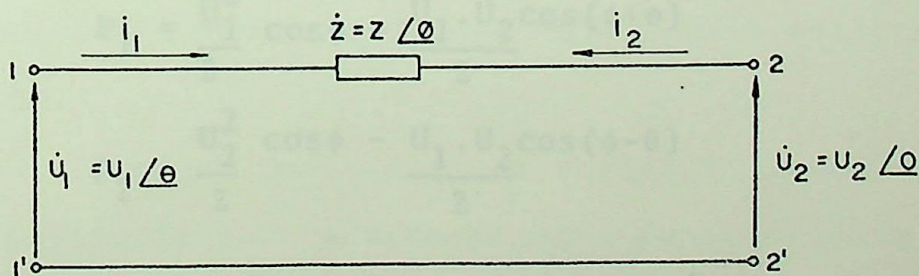


Figura 2.1 - Linha de transmissão simplificada, para o estudo da Potência transmissível.

$$\dot{N}_1 = \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1^* \quad (2.1)$$

$$\dot{N}_2 = \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2^* \quad (2.2)$$

Da figura 2.1 podemos ainda observar que:

$$\dot{I}_1 = \frac{U_1 \angle \theta - U_2 \angle 0}{Z \angle \phi} = \frac{U_1 \angle \theta - \phi}{Z} - \frac{U_2 \angle -\phi}{Z} \quad (2.3)$$

Levando (2.3) em (2.1):

$$\begin{aligned} \dot{N}_1 &= U_1 \angle \theta \left[\frac{U_1 \angle \theta - \phi}{Z} - \frac{U_2 \angle -\phi}{Z} \right]^* = \\ &= \frac{U_1^2 \angle \phi}{Z} - \frac{U_1 \cdot U_2 \angle \phi + \theta}{Z} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Considerando que $\dot{I}_2 = -\dot{I}_1$, levaremos (2.3) com o sinal trocado em (2.2):

$$\begin{aligned} \dot{N}_2 &= \dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2^* = U_2 \angle 0 \left[\frac{U_2 \angle 0}{Z \angle \phi} - \frac{U_1 \angle \theta}{Z \angle \phi} \right]^* = \\ &= \frac{U_2^2 \angle \phi}{Z} - \frac{U_2 \cdot U_1 \angle \phi - \theta}{Z} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Tirando as potências ativas em (2.4) e (2.5):

$$P_1 = \frac{U_1^2}{Z} \cos \phi - \frac{U_1 \cdot U_2 \cos(\phi + \theta)}{Z} \quad (2.6)$$

$$P_2 = \frac{U_2^2}{Z} \cos \phi - \frac{U_1 \cdot U_2 \cos(\phi - \theta)}{Z} \quad (2.7)$$

Em linhas longas, podemos desprezar o valôr da resistênciã em relação ao valôr da reatância. Assim, faremos:

$$Z \angle \phi = X_L \angle 90^\circ \quad (2.8)$$

Substituindo assim (2.8) em (2.6) e (2.7):

$$P_1 = \frac{U_1^2}{X_L} \cos 90 - \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(90+\theta)}{X_L} \quad (2.9)$$

$$P_2 = \frac{U_2^2}{X_L} \cos 90 - \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \cos(90-\theta)}{X_L} \quad (2.10)$$

Da trigonometria:

$$\cos(90+\theta) = -\text{sen } \theta \quad (2.11)$$

$$\cos(90-\theta) = \text{sen } \theta \quad (2.12)$$

Introduzindo (2.11) em (2.9) e (2.12) em (2.10):

$$P_1 = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \text{sen } \theta}{X_L} \quad (2.13)$$

$$P_2 = -\frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \text{sen } \theta}{X_L} \quad (2.14)$$

Das duas últimas expressões acima, constata-se que a potência transferida do transmissor ao receptor de uma linha de transmissão, é uma função do produto dos módulos das tensões no transmissor e receptor, bem como do defasamento angular entre estas tensões e é uma função inversa da reatância indutiva X_L do circuito equivalente que interliga o receptor e o transmissor.

Como se pode notar, a reatância indutiva é de grande importância para a determinação da quantidade de potência que a linha pode transmitir. Com o aumento do comprimento da linha, a reatância do sistema crescerá, fazendo com que o valor a ser entregue diminua.

Para a redução desta reatância, temos a princípio, alguns caminhos a escolher. Vamos analisá-los em seguida.

2.4.1 - USO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO EM PARALELO

O uso de duas ou mais linhas de transmissão, decresce a impedância de transferência, conseqüentemente aumentando a potência transmissível. Considerável melhoramento nas características de carga e nos limites de estabilidade transitória, podem ser obtidos quando cada circuito é múltiplo e seccionado em um ou mais pontos. Isto porque as faltas que porventura surgirem nas secções individuais, poderão ser detectadas e isoladas em poucos ciclos, não afetando o restante da linha.

Por outro lado, o custo de uma linha de transmissão como acima descrito e pretendido é muito alto e pouco se ganharia no aspecto econômico caso se queira aumentar a potência transmissível com êste arranjo.

2.4.2 - OPERAÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

Com a redução da frequência a zero, a transferência de potência se fará devido à diferença de potencial entre os terminais, evidentemente. Para fins comparativos, vamos supor que a transmissão em corrente contínua se fizesse em uma linha de transmissão, que tivesse em cada condutor uma resistência de valôr igual ao do módulo da impedância de uma linha de corrente alternada. Admitindo que ambas possuem também o mesmo nível de isolamento, poderemos aplicar na linha de corrente contínua uma tensão:

$$U_{cc} = \sqrt{2} U_{RMS} = U_{pico} \quad (2.15)$$

A igualdade da expressão anterior é válida, pois o isolamento, nas linhas de corrente alternada é feito para o valor de pico conforme a figura 2.2 indica.

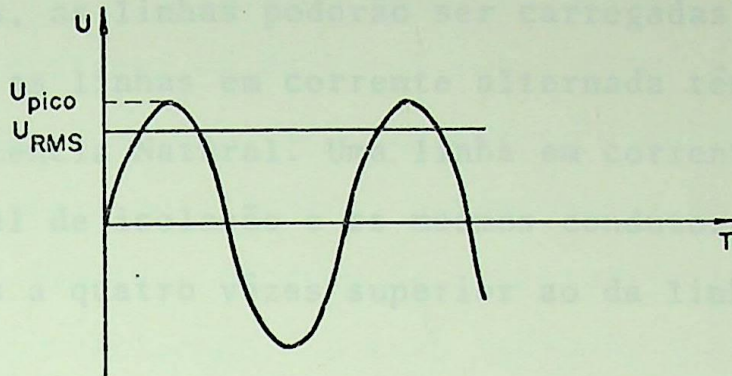


Figura 2.2 - Comparação entre as tensões eficaz e de Pico.

Em decorrência, a potência transmissível em corrente contínua será o dobro daquele em corrente alternada:

$$P_{cc} = \frac{U_{pico}^2}{R} = \frac{U^2}{R} \quad (2.16)$$

$$P_{ca} = \frac{U_{pico}/\sqrt{2}}{Z}^2 = \frac{U^2}{2 \cdot Z} \quad (2.17)$$

Dividindo (2.16) por (2.17) e lembrando que $R = Z$:

$$P_{cc} / P_{ca} = 2 \quad (2.18)$$

Pela expressão (2.18) percebe-se claramente a vantagem da transmissão em corrente contínua, no aspecto de potência transmissível. Esta vantagem na realidade é maior ainda que o dobro, na prática. Isto porque, na realidade, a resistência da linha de corrente contínua é menor que a impedância da linha em corrente alternada:

$$Z_{cc} = R_{cc} \quad e \quad Z_{ca} = R_{ca} + jX_L \quad (2.19)$$

Além disto, deve ser lembrado que : $R_{ca} > R_{cc}$

Com relação à transmissão em corrente contínua , vale ainda acrescentar que nela inexistem limites de estabilidade síncrona. Caso se instalem equipamentos adequados nos seus terminais, as linhas poderão ser carregadas até seu limite térmico. Já as linhas em corrente alternada têm seu limite em torno da Potência Natural. Uma linha em corrente contínua com o mesmo nível de isolamento e os mesmos condutores, terá um limite de três a quatro vezes superior ao da linha em corrente alternada.

Por outro lado, o sistema de corrente contínua tem seu grande inimigo no importante aspecto "Custo". Seus equipamentos terminais, em geral, custam o dobro daqueles de corrente alternada. Este inconveniente será maior ainda naqueles sistemas que requererem várias ramificações. Outro ponto desvantajoso é o fato de não se poder utilizar os transformadores de potencial neste tipo de transmissão.

2.4.3 - COMPENSAÇÃO DA REATÂNCIA DA LINHA

É uma alternativa bastante poderosa. Compete com as demais tanto no campo técnico como no econômico. É obtida através do uso de capacitores estáticos em série com a linha. Alguns aspectos básicos devem ser observados quando se opta por este método: os tipos de capacitores, sua locação em linhas individuais ou em barramentos comuns, o método de uso do capacitor (se normalmente no circuito também quando da ocorrência de faltas ou, quando de uma falta ele é retirado do circuito e recolocado imediatamente após a isolamento da falta).

Na ocasião da ocorrência de uma falta em uma linha compensada por capacitores em série, altas quedas de ten-

são são produzidas entre os terminais dos capacitores, devido aos altos valores das correntes de curto. Assim, dois tipos de capacitores podem ser escolhidos para as linhas. Um deles é o capacitor para ilimitado valor de tensão, cuja isolação suporta as condições de falta. O outro tipo, é aquele capacitor com tensão limitada. Seu isolamento é suficiente para as condições normais do circuito, porém possui um equipamento de proteção que limita o excesso de voltagem. Evidentemente, o primeiro tipo mencionado é o mais indicado a primeira vista. Entretanto, seu alto custo, devido ao seu alto nível de isolação, o descarta dos objetivos de economia financeira. Assim, prefere-se aqueles de tensão limitada. O equipamento de proteção destes últimos, curto-circuita os terminais do capacitor durante o curto, protegendo-o e retornando com o capacitor após o desaparecimento da falta. Outra vantagem surgirá ainda: com a saída do capacitor, a corrente de curto diminuirá, já que a impedância da linha aumentou. Um bom equipamento de proteção deve retirar o capacitor no primeiro meio ciclo de sobre-tensão e recolocá-lo no circuito dois ciclos após o isolamento da falta.

A quantidade de compensação será controlada pela estabilidade e pelas condições econômicas.

CAPITULO III - OS EFEITOS DA COMPENSAÇÃO SHUNT NA COMPENSAÇÃO POR CAPACITORES EM SÉRIE

3.1 - INTRODUÇÃO

Inevitavelmente, uma linha longa que requerer uma compensação série, de há muito estará também com reatores instalados. Estes reatores, em derivação, eliminam os conhecidos problemas de Efeito Ferranti, presentes principalmente quando a linha está em vazio ou com pequenas cargas. Linhas bem menores que aquelas de mil quilômetros já apresentam Efeito Ferranti.

Por outro lado, já foi constatado em várias pesquisas, que as impedâncias das linhas, após compensação série, não eram simplesmente igual à diferença entre a reatância indutiva inicial natural da linha e a reatância capacitiva dos capacitores em série ((2), (5)). Este fenômeno é mais acentuado quando a linha está também compensada por reatores em derivação.

Em vista disto, criou-se o termo "Eficiência de Compensação", que significa a relação entre a efetiva reatância capacitiva (X_c') e a reatância capacitiva instalada (X_c):

$$K = \frac{X_c'}{X_c} \quad (3.1)$$

onde "K" é a EFICIÊNCIA DE COMPENSAÇÃO.

Pela expressão (3.1) nota-se que somente para $K = 1,00$ é que o capacitor produz exatamente aquilo que se pretendia dele. Em determinadas condições, "K" poderá ser menor ou maior que a

unidade. Os principais fatores que influenciam na Eficiência' de Compensação, são:

- local ao longo da linha em que o capacitor é colocado.
- comprimento do trecho a ser compensado.
- Grau de compensação Shunt presente na linha, ao lado da compensação série.

3.2 - ALTERAÇÃO DA "EFICIÊNCIA DE COMPENSAÇÃO" VARIANDO O LOCAL DA COMPENSAÇÃO SÉRIE

Vamos tomar a fig. 3.1, na qual temos a mesma linha em três hipóteses: (a)-Linha sem compensação série, (b) -

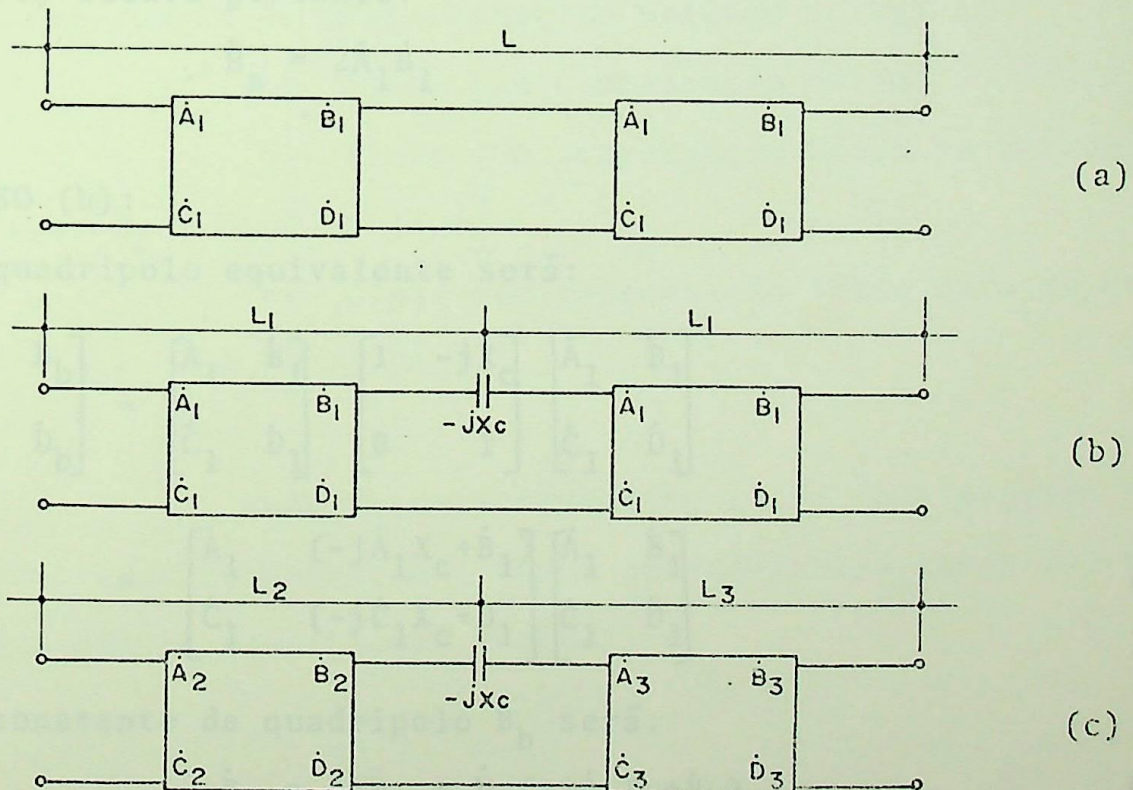


Figura 3.1 - (a): Linha sem compensação

(b): Linha com compensação série no meio.

(c): Linha com compensação série fora do centro.

Linha com a compensação série exatamente no meio da linha e ,
 (c)-Linha com compensação série fora do centro da linha.

Nas três hipóteses, inicialmente vamos determinar a constante de quadripolo "B", que é a efetiva impedância de transferência da linha.

CASO (a):

O quadripolo equivalente será dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_a & \dot{B}_a \\ \dot{C}_a & \dot{D}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Tirando a constante \dot{B}_a da equação matricial acima:

$$\dot{B}_a = \dot{A}_1 \dot{B}_1 + \dot{B}_1 \dot{D}_1 \quad (3.3)$$

Considerando que a linha é simétrica: $\dot{A}_1 = \dot{D}_1$. A expressão (3.3) ficará portanto:

$$\dot{B}_a = 2\dot{A}_1 \dot{B}_1 \quad (3.4)$$

CASO (b):

O quadripolo equivalente será:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{A}_b & \dot{B}_b \\ \dot{C}_b & \dot{D}_b \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & (-j\dot{A}_1 X_c + \dot{B}_1) \\ \dot{C}_1 & (-j\dot{C}_1 X_c + \dot{D}_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.5)$$

A constante de quadripolo \dot{B}_b será:

$$\dot{B}_b = \dot{A}_1 \dot{B}_1 + \dot{D}_1 (-j\dot{A}_1 X_c + \dot{B}_1) \quad (3.6)$$

A linha sendo simétrica: $\dot{A}_1 = \dot{D}_1$. A impedância de transferência será obtida pela expressão (3.7):

$$\dot{B}_b = 2\dot{A}_1 \dot{B}_1 - jX_c \dot{A}_1^2 \quad (3.7)$$

CASO (c):

Vamos determinar o quadripolo resultante desta associação:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_c & \dot{B}_c \\ \dot{C}_c & \dot{D}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_3 & \dot{B}_3 \\ \dot{C}_3 & \dot{D}_3 \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & (-jX_c \dot{A}_2 + \dot{B}_2) \\ \dot{C}_2 & (-jX_c \dot{C}_2 + \dot{D}_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_3 & \dot{B}_3 \\ \dot{C}_3 & \dot{D}_3 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

A constante generalizada B_c é:

$$\dot{B}_c = \dot{A}_2 \dot{B}_3 + \dot{D}_3 (-jX_c \dot{A}_2 + \dot{B}_2) \quad (3.9)$$

Novamente, admitindo simetria, $\dot{A}_3 = \dot{D}_3$. A impedância de transferência ficará:

$$\dot{B}_c = \dot{A}_2 \dot{B}_3 + \dot{A}_3 \dot{B}_2 - jX_c \dot{A}_3 \dot{A}_2 \quad (3.10)$$

A título de comparação, relacionaremos a seguir, as impedância de transferências obtidas acima:

(a)- Linha sem compensação série: $\dot{B}_a = 2\dot{A}_1 \dot{B}_1$ (3.4)

(b)- Linha com compensação série na metade da linha: $\dot{B}_b = 2\dot{A}_1 \dot{B}_1 - jX_c \dot{A}_1^2$ (3.7)

(c)- Linha com compensação série fora do centro: $\dot{B}_c = \dot{A}_2 \dot{B}_3 + \dot{A}_3 \dot{B}_2 - jX_c \dot{A}_3 \dot{A}_2$ (3.10)

Recordando a expressão (3.1), que exprime a "Eficiência de Compensação", vamos aplicá-la aos casos (b) e (c), onde existe compensação série:

$$K = \frac{\dot{X}'_c}{\dot{X}_c} \quad (3.1)$$

Para a compensação no meio da linha, a expressão (3.7) nos mostra que a interferência na impedância original

$\dot{B}_a = 2\dot{A}_1\dot{B}_1$ (sem compensação), foi uma redução desta do valor : $-jX_C\dot{A}_1^2$. Pois bem, notamos aĩ claramente que, ao colocarmos na linha um capacitor \dot{X}_C , a impedância de transferência se reduz não de " \dot{X}_C " como a primeira vista era de se esperar, mas sim de " $\dot{X}_C\dot{A}_1^2$ ". Assim sendo, levaremos à equação (3.1) a "Efetiva Reatância Capacitiva":

$$\dot{X}'_C = \dot{X}_C\dot{A}_1^2 \quad (3.11)$$

Levando agora (3.11) em (3.1), obteremos a "Eficiência de Compensação" para o CASO (b):

$$K = \frac{X_C\dot{A}_1^2}{X_C} = \text{Re}\{\dot{A}_1^2\} \quad (3.12)$$

Para a compensação em local diferente do meio da linha, a impedância de transferência inicial se reduz, segundo (3.10), de $-jX_C\dot{A}_3\dot{A}_2$. Ou seja, a redução obtida nesta hipótese foi diferente daquela anterior. Para esta compensação, a "Efetiva Reatância Capacitiva" será:

$$\dot{X}'_C = X_C\dot{A}_3\dot{A}_2 \quad (3.13)$$

Introcuzindo (3.13) em (3.1), a "Eficiência de Compensação" ficará:

$$K = \frac{X_C\dot{A}_3\dot{A}_2}{X_C} = \text{Re}\{\dot{A}_3\dot{A}_2\} \quad (3.14)$$

OBSERVAÇÃO: Por se tratar de uma relação entre duas grandezas reais, isto é, capacitores, toma-se apenas a parte real dos complexos.

Como pode ser observado, a colocação do mesmo capacitor na mesma linha, porém em locais diferentes, provocam efeitos resultantes desiguais na transmissão. Na figura 3.2

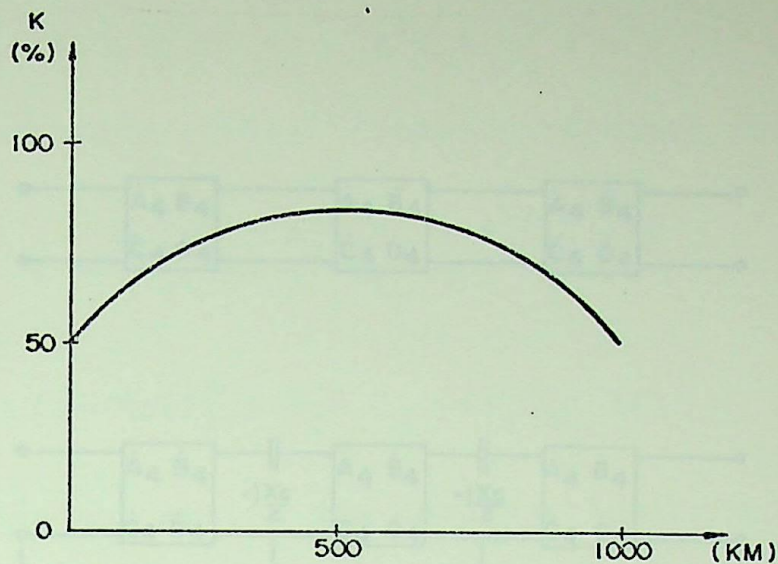


Figura 3.2 - Eficiência de compensação em função do local da instalação do capacitor série.

plotamos uma curva de variação de "K", em função do local da instalação dos capacitores ao longo da linha de mil quilômetros de extensão analisada neste trabalho. O gráfico é facilmente obtido, variando-se os valores de \dot{A}_2 e \dot{A}_3 na expressão (3.14).

Dêste estudo, se conclue inicialmente, que o melhor local para se instalar um banco de capacitores é o meio da linha. No entanto, esta não deve ser a última palavra com relação a esta escolha. Outros problemas técnicos poderão impedir que se faça a compensação no meio da linha: a presença de reatores, as máximas tensões permissíveis através dos capacitores, são alguns dos fatores que podem levar o capacitor para outro local.

Tomaremos em seguida a figura 3.3, na qual temos uma compensação série realizada em dois locais ao longo da linha: a um terço e a dois terços das extremidades da linha.

Denominando de "CASO (a)" aquele em que a linha

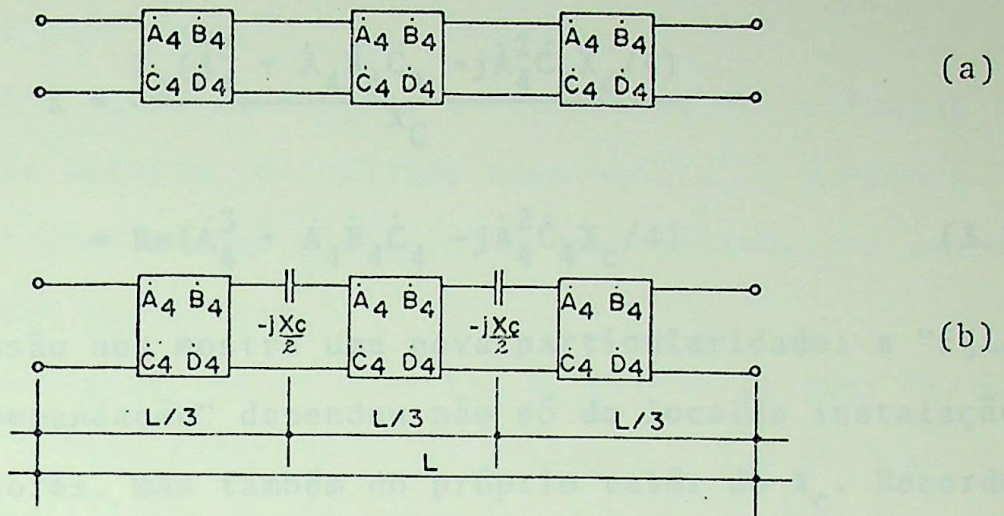


Figura 3.3 - (a): Linha sem compensação série.

(b): Linha compensada com capacitores série instalados a 1/3 e a 2/3 das extremidades.

não está ainda com capacitores, o quadripolo equivalente será obtido por:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_a & \dot{B}_a \\ \dot{C}_a & \dot{D}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

A impedância da linha sem compensação, já tomando $\dot{A}_4 = \dot{D}_4$ é

$$\dot{B}_a = 3\dot{A}_4^2 \dot{B}_4 + \dot{B}_4^2 \dot{C}_4 \quad (3.16)$$

O "CASO (b)" será aquele em que temos os capacitores. O quadripolo resultante é:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_b & \dot{B}_b \\ \dot{C}_b & \dot{D}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Obteremos a nova impedância de transferência (já tomando $\dot{A}_4 = \dot{D}_4$):

$$\dot{B}_b = 3\dot{A}_4^2\dot{B}_4 + \dot{B}_4^2\dot{C}_4 - jX_c(\dot{A}_4^3 + \dot{A}_4\dot{B}_4\dot{C}_4 - j\dot{A}_4^2\dot{C}_4X_c/4) \quad (3.18)$$

Aplicando a equação (3.1), teremos o seguinte resultado:

$$K = \frac{X_c(\dot{A}_4^3 + \dot{A}_4\dot{B}_4\dot{C}_4 - j\dot{A}_4^2\dot{C}_4X_c/4)}{X_c} =$$

$$= \text{Re}\{\dot{A}_4^3 + \dot{A}_4\dot{B}_4\dot{C}_4 - j\dot{A}_4^2\dot{C}_4X_c/4\} \quad (3.19)$$

Esta expressão nos mostra uma nova particularidade: a "Eficiência de Compensação" dependeu não só do local da instalação dos capacitores, mas também do próprio valor de X_c . Recorde-se que nos casos anteriores (compensação em dois trechos), "K" não depende do valor de X_c (vide expressões (3.12) e (3.14)). Assim é que, para uma variação de K série de 10% para 80%, o "K" varia do valor de 70% para 80%.

Por outro lado, constata-se que o "K" para a linha compensada por um só banco de capacitores (equações 3.12 e 3.14) é ligeiramente superior ao "K" para a linha compensada por bancos de capacitores (equação 3.19). Isto significa que se gasta-se mais MVAR para o mesmo grau de compensação série, se a compensação for efetuada em maior número de trechos.

3.3 - INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE REATORES INDUTIVOS NA COMPENSAÇÃO SÉRIE

A compensação com reatores indutivos é utilizada para a redução de sobretensões nas linhas de transmissão, causadas pelo Efeito Ferranti. Além desta função principal, quando os reatores são cuidadosamente locados, a potência transmis

sível poderá aumentar. Isto ocorre nas linhas que estão compensadas em série e em derivação, desde que os reatores estejam com seus graus de compensação e locais de instalação planejados para isto.

Por outro lado, caso as compensações conjuntas série-shunt não estejam escolhidas atentamente, a presença destas compensações poderá não atingir os objetivos previamente supostos pelo projetista.

A seguir, vamos observar as possibilidades destas hipóteses. Pela figura 3.4 observaremos o que pode acontecer com a "Eficiência de Compensação" quando da inclusão de reatores. Para simplicidade de raciocínio, faremos as compensações no meio da linha:

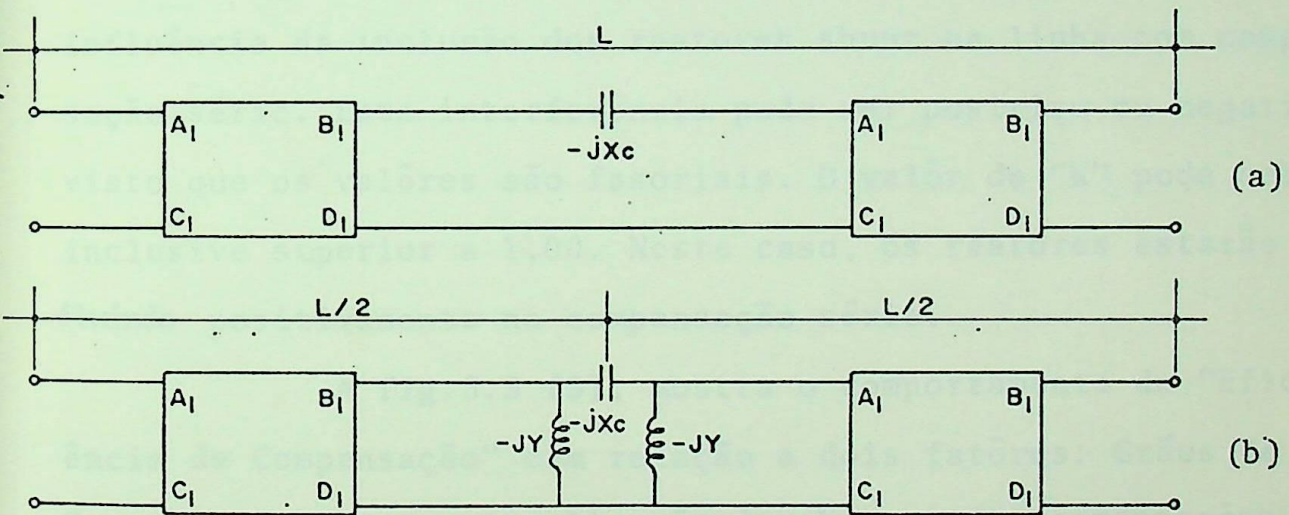


Figura 3.4 - Linha de transmissão com compensações:

- (a) Série.
- (b) Série-Shunt.

Para o CASO(a), a impedância de transferência já foi determinada pela equação (3.7) e a Eficiência de Compensação, pela equação (3.12):

$$\dot{B}_a = 2\dot{A}_1\dot{B}_1 - j\dot{X}_c\dot{A}_1^2 \quad (3.7)$$

$$K = \text{Re}\{\dot{A}_1^2\} \quad (3.12)$$

Para o CASO (b), o quadripolo resultante é determinado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_b & \dot{B}_b \\ \dot{C}_b & \dot{D}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jY & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -jY & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

A impedância de transferência, neste caso será:

$$\dot{B}_b = 2\dot{A}_1\dot{B}_1 - 2\dot{A}_1\dot{B}_1 \cdot Y \cdot X_c - 2\dot{B}_1^2 \cdot Y - jX_c(\dot{A}_1^2 - \dot{B}_1^2 Y^2) \quad (3.21)$$

Que nos fornecerá a seguinte "Eficiência de Compensação":

$$K = \frac{X_c'}{X_c} = \frac{X_c(\dot{A}_1^2 - \dot{B}_1^2 \cdot Y^2)}{X_c} = \text{Re}\{\dot{A}_1^2 - \dot{B}_1^2 \cdot Y^2\} \quad (3.22)$$

Pelo exame das equações 3.12 e 3.22, notamos a influência da inclusão dos reatores shunt na linha com compensação série. Esta interferência pode ser positiva ou negativa visto que os valores são fasoriais. O valor de "K" pode ser inclusive superior a 1,00. Neste caso, os reatores estarão influenciando positivamente na compensação série.

A fig.3.5 (5), mostra o comportamento da "Eficiência de Compensação" com relação a dois fatores: Grãos de Compensação Shunt e localização dos bancos de compensações. O grau de compensação série é fixado em 40%. O estudo se refere à linha de 1.000 Km referida anteriormente e que será usada para nossos estudos seguintes. Nesta figura observamos que, com a compensação realizada no meio da linha, o "K" decresce com o aumento de Kshunt. Entretanto, para Kshunt bastante alto (veja Kshunt=250%) "K" volta a ser grande. Outro destaque é o fato de que para Kshunt entre 0% e 20%, o melhor local é o centro da linha. Para Kshunt por volta de 40%, a posição do

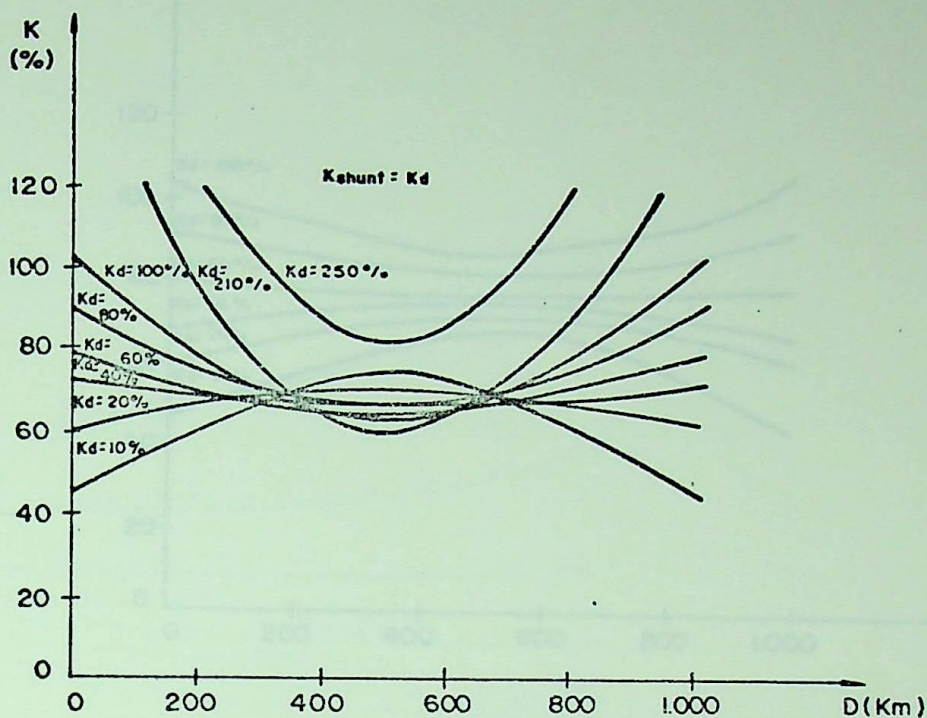


Figura 3.5 - Variação da "Eficiência de Compensação" com o (5) Grau de compensação Shunt (K_{shunt}) e com a localização do banco de compensação. Compens. Série: 40%
 D = distância entre o local das compensações e o transmissor.

K_{shunt} = Grau de compensação em derivação.

banco de compensação praticamente não influe em "K". Por outro lado, se agora alterarmos a compensação série para outro valor, toda a situação anteriormente descrita pode se alterar. Vejamos o que aconteceria para uma compensação série de 60%. Observemos a figura 3.6. Para o mesmo local de compensação, um aumento de K_{shunt} corresponderá sempre a um aumento de "K". Para o intervalo $0\% < K_{shunt} < 50\%$, o melhor local para compensação é o centro. Na região de $K_{shunt} \approx 60\%$, o local da compensação praticamente não altera "K". Acima desta região, a pior localização do banco de capacitores e reatores é o centro.

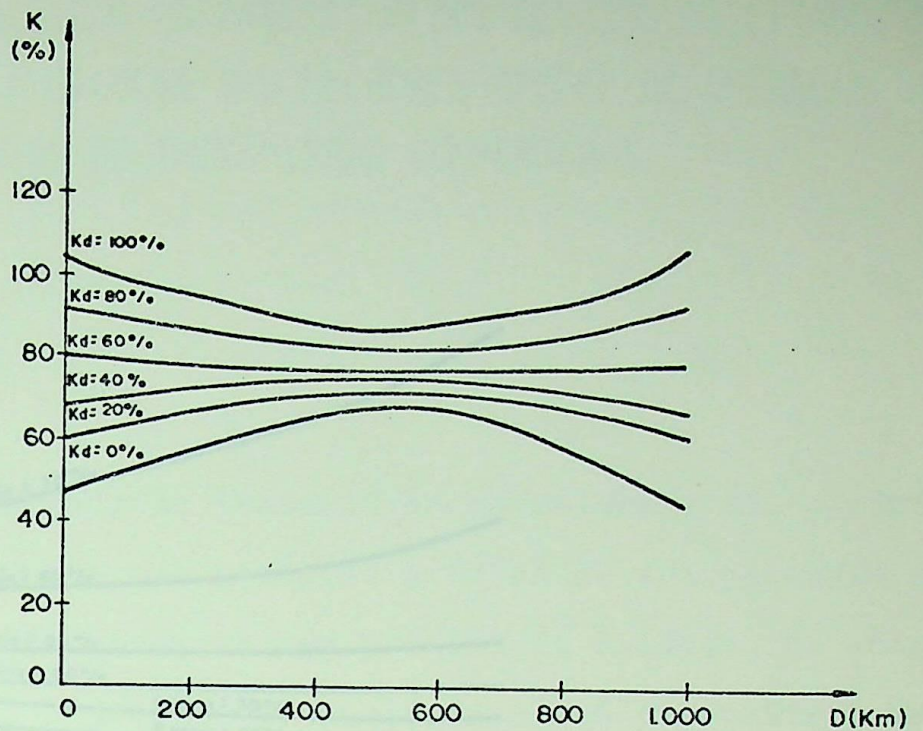


Figura 3.6 - Variação da "Eficiência de Compensação" com K_{shunt} e "D".

Compensação série fixada em 60%.

Em seguida vamos observar os efeitos das variações dos graus de compensação série e shunt na capacidade de transmissão. A figura 3.7, também de (5), se refere a um banco de compensação localizado no meio da linha. Observa-se que para pequenos graus de $K_{série}$ e altos valores de K_{shunt} , a potência transmissível decresce. Para $K_{série}$ em torno de 50%, a potência independe da compensação em derivação. Finalmente, para altos valores de $K_{série}$ (acima de 60%), nota-se a influência positiva da compensação shunt.

Até aqui foi dada uma visão do comportamento das compensações série e shunt, uma em relação à outra, com suas vantagens e desvantagens principais no que se relaciona às

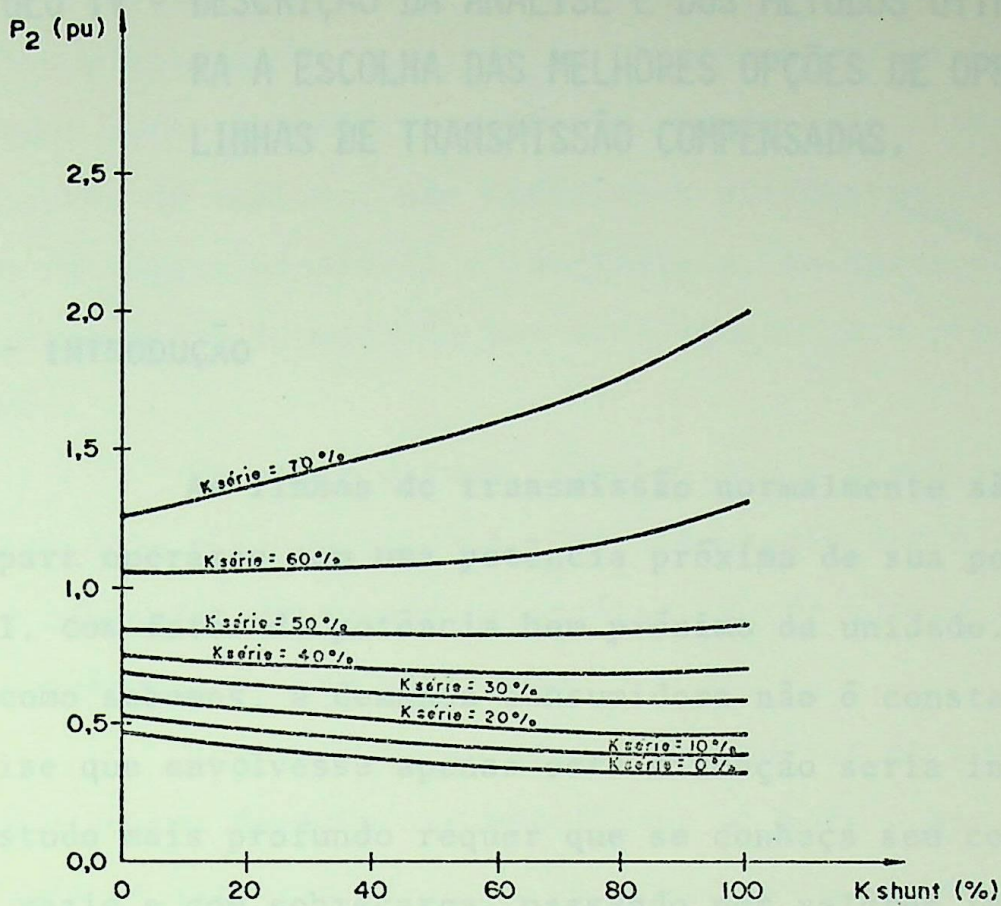


Figura 3.7 - Efeito das compensações série e shunt na potência transmissível. Local das compensações: centro da linha.

posições das compensações e aos graus de compensação. O que foi visto é simplesmente uma observação, visando chamar a atenção dos estudiosos das linhas de transmissão para esse tipo de problema. Nota-se a importância que se deve dar à análise do comportamento das compensações, para que se possa evitar aquelas situações desvantajosas e obviamente, utilizarmos aqueles pontos de compensações que mais benefícios trouxerem à transmissão, tanto do ponto de vista técnico como também econômico.

CAPITULO IV - DESCRIÇÃO DA ANÁLISE E DOS MÉTODOS UTILIZADOS PARA A ESCOLHA DAS MELHORES OPÇÕES DE OPERAÇÃO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPENSADAS.

4.1 - INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão normalmente são projetadas para operarem com uma potência próxima de sua potência natural, com fator de potência bem próximo da unidade. No entanto, como sabemos, a demanda consumidora não é constante. Uma análise que envolvesse apenas esta situação seria incompleta. Um estudo mais profundo requer que se conheça seu comportamento a vazio e com sobrecarga, passando por valores intermediários.

Outro fator a ser observado é o número de trechos em que a linha deve ser subdividida, para que se introduzam as compensações. Uma simples troca de posições entre os capacitores e reatores pode alterar substancialmente o desempenho da linha.

Em nosso trabalho, analisaremos a carga no receptor em quatro etapas:

$$1- P_2 = 0$$

$$2- P_2 = 0,75 P_0$$

$$3- P_2 = 1,00 P_0$$

$$4- P_2 = 1,25 P_0$$

Com relação ao fator de potência no receptor, tomaremos as três características possíveis: resistiva, indutiva e capacitiva. Nas duas últimas tomaremos o $fp_2 = "0,95"$.

Entretanto, qualquer outra carga e fator de potência poderão ser introduzidos nos dados de entrada do programa e seus resultados serão obtidos normalmente. Sendo este trabalho, a princípio, de análise, não poderíamos evidentemente, estudar todas as cargas possíveis e imagináveis. As situações acima mencionadas nos fornecerão uma visão geral, sem perda da realidade.

Em nosso estudo, supomos que a linha será compensada em dois e cinco trechos. Uma comparação entre os dois casos é efetuada sempre que necessário. Outro número intermediário poderá ser também analisado.

Com relação ao modelo ou modelos de compensação série e shunt, deverão ser escolhidos de modo a não tirar a condição de simetria da linha de transmissão. Os modelos apontados na figura 1.1 foram introduzidos na análise justamente porque são os únicos a preencherem este quesito. O programa para computador digital apresentado, apresentará resultados para os três modelos simultaneamente.

Em resumo, o presente trabalho analisa a linha inicialmente sem compensação alguma. Em seguida, tomando as inúmeras combinações série-shunt, faz-se uma análise técnica dos resultados, com a linha compensada. Em seguida, tomam-se as melhores condições técnicas e procede-se a uma análise econômica. A escolha da melhor opção ficará assim mais próxima.

Ainda que os graus de compensação série e shunt possam variar, teoricamente desde 0% até valores superiores a 100%, na prática isso não é efetivado por medidas econômicas e de proteção da linha. Assim sendo, iremos observar o comportamento da linha desde 0% até 80% de compensação.

O esquema apresenta a seguir, na figura 4.1 dá' uma idéia geral daquilo que será analisado. Todo o estudo aí citado resultará em 4.860 casos.

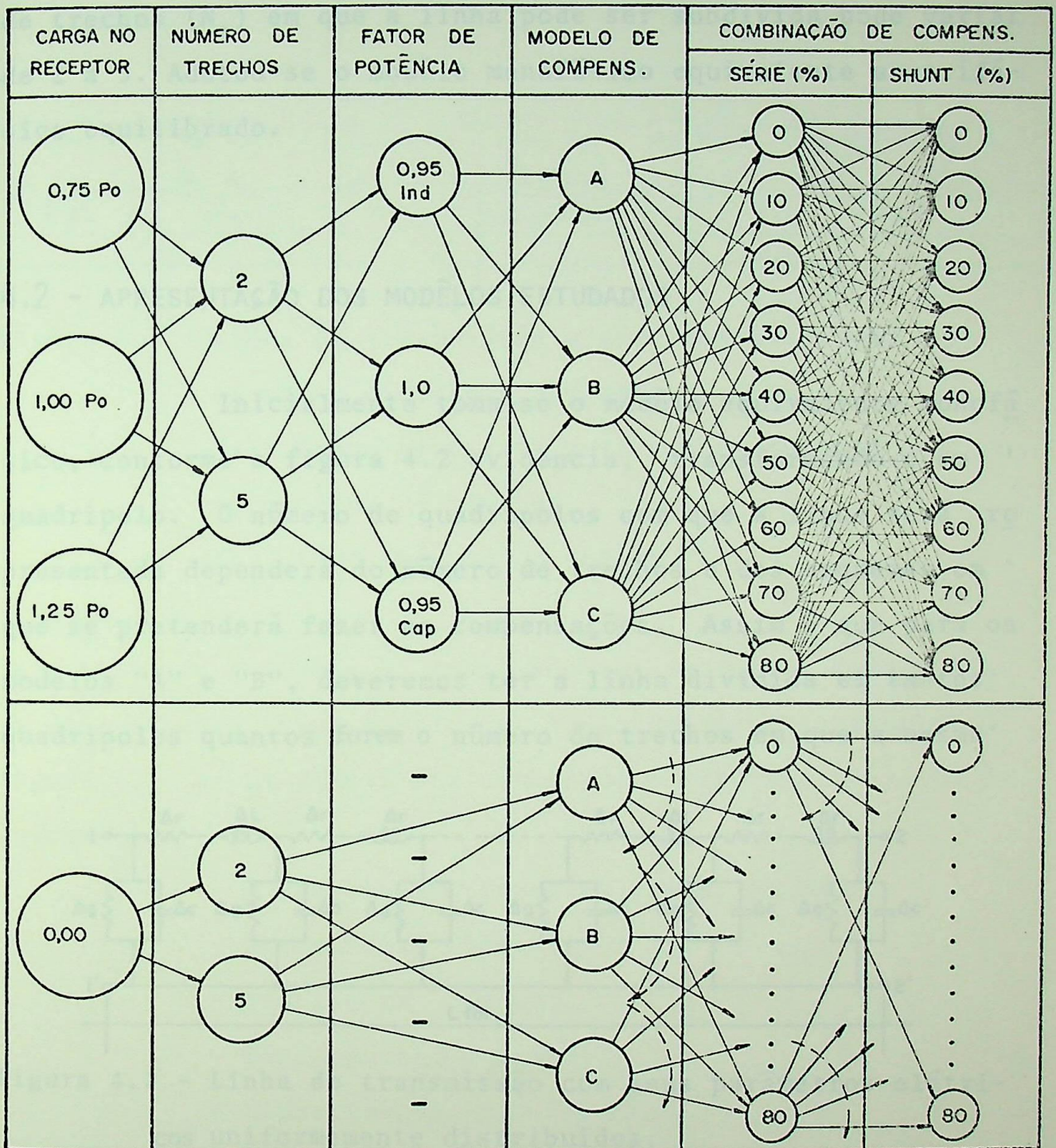


Figura 4.1 - Esquema geral da análise efetuada, que resultará em 4860 casos possíveis.

Todos os cálculos foram realizados através de um computador IBM-1130, da Universidade Federal de Uberlândia. O Programa permite que se estude qualquer carga inserida no receptor de qualquer linha de transmissão trifásica aérea. O n° de trechos (N_t) em que a linha pode ser subdividida pode variar de 2 a 5. Adotou-se o modelo monofásico equivalente ao trifásico equilibrado.

4.2 - APRESENTAÇÃO DOS MODELOS ESTUDADOS

Inicialmente toma-se o modelo equivalente monofásico, conforme a figura 4.2 evidencia, transformando-o em quadripolo. O número de quadripolos com que a linha será representada dependerá do número de trechos e dos esquemas em que se pretenderá fazer as compensações. Assim é que para os modelos "A" e "B", deveremos ter a linha dividida em tantos quadripolos quantos forem o número de trechos em que a mesma

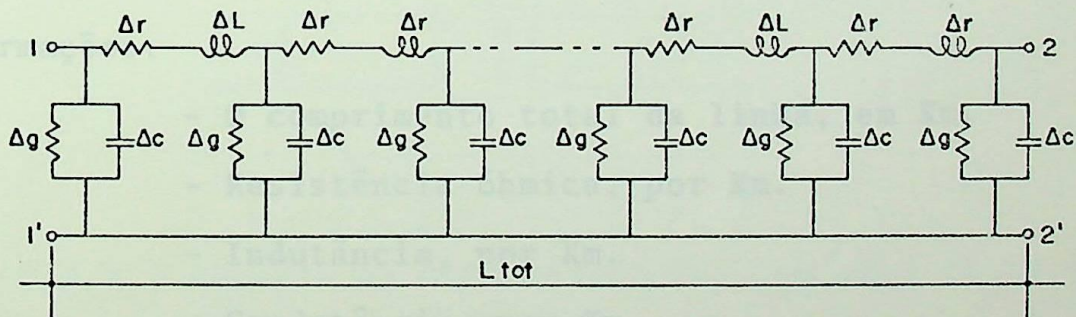
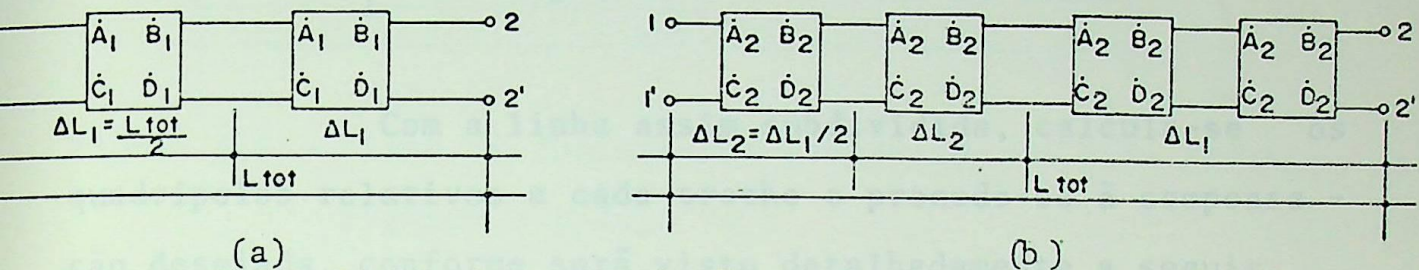


Figura 4.2 - Linha de transmissão com seus parâmetros elétricos uniformemente distribuídos.

fôr subdividida para compensações. Já para o modelo "C", para cada trecho a ser compensado, ter-se-ã dois quadripolos.

A figura 4.3 esclarece melhor a êste respeito. Se



(a) (b)
 Figura 4.3 - Linha de transmissão a ser compensada por três esquemas elétricos diferentes. $N_t = 2$.

(a): Linha preparada para ser compensada segundo os modelos "A" ou "B".

(b): Idem, segundo o modelo "C".

ja a linha da figura 4.2. Admitindo que se queira compensá-la em dois trechos, seus modelos em quadripolos serão aqueles da figura 4.3. Ainda deverá ser conhecido o seguinte conjunto de informações:

- O comprimento total da linha, em Km.
- Resistência ôhmica, por Km.
- Indutância, por Km.
- Condutância, por Km.
- Capacitância, por Km.
- Tensão e Potência Aparente a ser entregue no Receptor.

De posse destes dados, dividimos a linha em números de trechos iguais, cujos comprimentos serão dados por:

$$l_1 = \frac{L_{tot}}{N_t} \quad (4.1)$$

Onde:

L_{tot} = comprimento total da linha

N_t = Número de trechos em que a linha foi subdividida.

l_1 = Comprimento do trecho de linha.

Com a linha assim subdividida, calcula-se os quadripolos relativos a cada trecho e procede-se à compensação desejada, conforme será visto detalhadamente a seguir.

4.3 - MODELO DE COMPENSAÇÃO TIPO "A"

A figura 4.4 mostra um trecho típico de linha compensada segundo o tipo "A". Nota-se que os reatores são instalados externamente aos capacitores. o quadripolo $\dot{A}\dot{B}\dot{C}\dot{D}$ repre

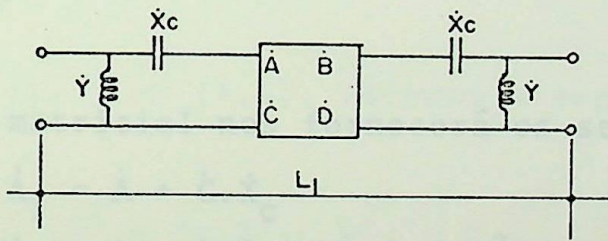


Figura 4.4 - Esquema de compensação "A", no qual os reatores se colocam na parte externa do trecho.

senta o trecho de linha ainda não compensado. " \dot{X}_c " é o valor de cada capacitor a ser instalado no trecho e " \dot{Y} " é o reator indutivo a ser inserido em cada extremidade do trecho. Caso a compensação pretendida seja em dois trechos, isto é, os capa-

capacitores e reatores instalados nos terminais e no meio da linha, esta ficará, após as compensações, conforme o modelo "A" com aspecto evidenciado na figura 4.5.

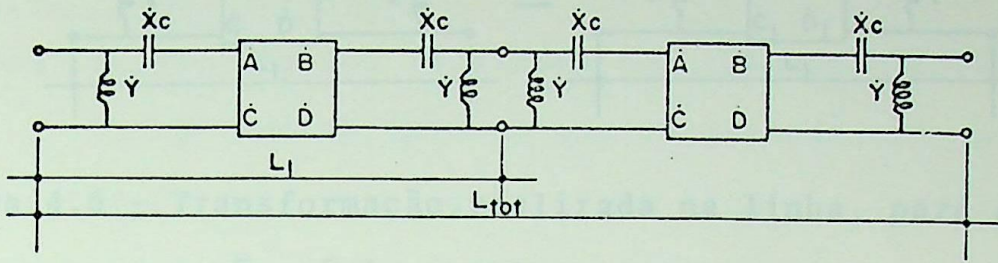


Figura 4.5 - Linha de transmissão compensada em dois trechos, segundo o modelo "A".

4.3.1 - COMPENSAÇÃO SÉRIE - CÁLCULO DOS CAPACITORES DO TRECHO

Inicialmente transforma-se em um só quadripolo os capacitores e o trecho de linha da figura 4.4. este quadripolo será dado por:

$$\begin{pmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \dot{X}_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \dot{X}_c \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Esta equação matricial nos fornecerá os seguintes valores:

$$\dot{A}_1 = \dot{A} + \dot{C} \cdot \dot{X}_c \quad (4.2a)$$

$$\dot{B}_1 = \dot{B} + 2 \cdot \dot{A} \cdot \dot{X}_c + \dot{C} (\dot{X}_c)^2 \quad (4.2b)$$

$$\dot{C}_1 = \dot{C} \quad (4.2c)$$

$$\dot{D}_1 = \dot{A} + \dot{C} \cdot \dot{X}_c \quad (4.2d)$$

Na figura 4.6 se vê o que foi obtido acima.

Para se obter uma compensação série total neste trecho, toda a reatância indutiva série será anulada. Em termos de quadripolo isto significará que a parte imaginária de \dot{B}_1 seja anulada. Tomando $\dot{B}_1 = b_1' + j b_1''$, a compensação série'

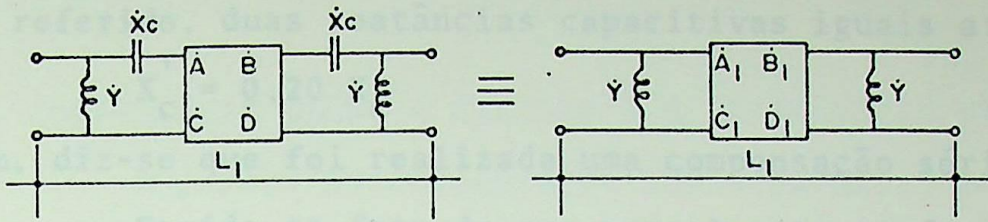


Figura 4.6 - Transformação realizada na linha, para a compensação série total.

total implicará, portanto em:

$$b_1'' = 0 \quad (4.3)$$

Reescrevendo (4.2b) em notação cartesiana, teremos:

$$\begin{aligned} \dot{B}_1 &= b_1' + jb_1'' = (b' + jb'') + 2(a' + ja'')X_c + (c' + jc'') \cdot (jX_c)^2 = \\ &= b' + jb'' + j2a'X_c - 2a''X_c - c'X_c^2 - jX_c^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Igualando imaginários em (4.4):

$$b_1'' = b'' + 2a'X_c - c'' \cdot X_c^2 \quad (4.5)$$

Substituindo (4.3) em (4.5), teremos a seguinte equação de segundo grau:

$$c'' \cdot X_c^2 - 2a'X_c - b'' = 0 \quad (4.6)$$

A resolução de (4.6) nos fornecerá:

$$X_c = \frac{2a' \pm \sqrt{(2a')^2 + 4 \cdot c'' \cdot b''}}{2c''} \quad (4.7)$$

-A solução aceitável será a raiz *negativa* de menor valor em módulo.

Caso não se queira uma compensação total(100%) ,

mas sim parcial, digamos de 20%, basta que se multiplique o resultado obtido em (4.7) por 0,20. Desta forma, teremos no trecho referido, duas reatâncias capacitivas iguais a:

$$X'_C = 0,20 X_C \quad (4.8)$$

E assim, diz-se que foi realizada uma compensação série de 20%.

Devido ao fato de que normalmente se faz mesmo é Compensação Parcial, vamos indicar na Figura 4.7 esta situação e em seguida efetuaremos a compensação shunt segundo esta figura e não conforme a figura 4.6, pois esta representa uma compensação de 100%.

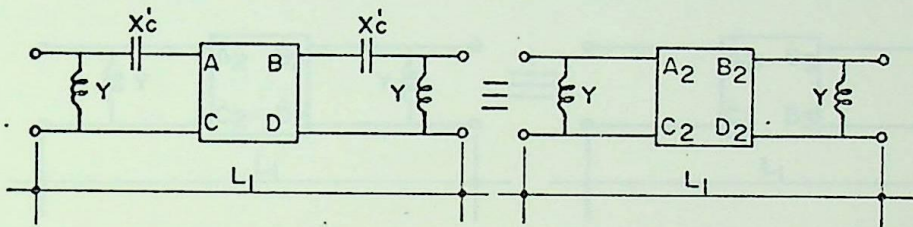


Figura 4.7 - Representação de uma linha de transmissão com o quadripolo considerando o efeito da compensação série parcial.

O quadripolo resultante da compensação série parcial será o seguinte:

$$\dot{A}_2 = \dot{A} + \dot{C} \cdot \dot{X}'_C \quad (4.9)$$

$$\dot{B}_2 = \dot{B} + 2 \cdot \dot{A} \cdot \dot{X}'_C + \dot{C} \cdot \dot{X}'_C{}^2 \quad (4.10)$$

$$\dot{C}_2 = \dot{C} \quad (4.11)$$

$$\dot{D}_2 = \dot{A}_2 \quad (4.12)$$

Observemos que as expressões (4.9), (4.10) e (4.11) podem agora ser determinadas, pois já conhecemos X'_C . Esta informação é interessante (apesar de parecer óbvia), visto que as expressões (4.2) não podiam ser determinadas quando foram apresenta

das, pois naquela etapa o capacitor não era ainda conhecido.

4.3.2 - COMPENSAÇÃO SHUNT - CÁLCULO DOS REATORES INDUTIVOS

A partir da compensação série parcial, mostrada na figura 4.7, vamos obter o quadripolo $\dot{A}_3 \dot{B}_3 \dot{C}_3 \dot{D}_3$. A sequência que se segue, embora tenha partido da compensação série parcial mencionada, poderia partir também da compensação série total, mencionada na figura 4.6, sem perda do objetivo principal do momento, qual seja, o de determinação dos reatores "Y".

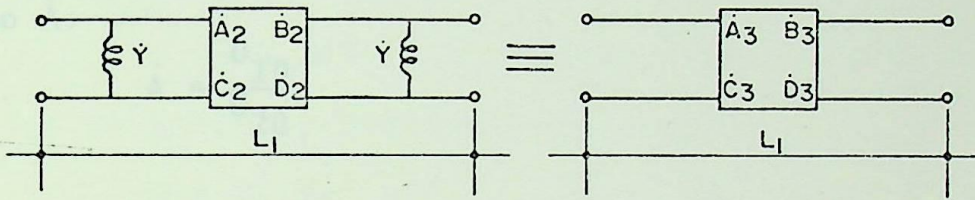


Figura 4.8 - Quadripolo resultante da associação de dois reatores com o quadripolo que já leva os efeitos dos capacitores em série.

A figura 4.8 mostra a transformação do quadripolo $\dot{A}_2 \dot{B}_2 \dot{C}_2 \dot{D}_2$ juntamente com os reatores "Y", em um quadripolo equivalente $\dot{A}_3 \dot{B}_3 \dot{C}_3 \dot{D}_3$. Este quadripolo nos permitirá calcular os reatores.

Escrevendo a equação matricial que representa a figura 4.8:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_3 & \dot{B}_3 \\ \dot{C}_3 & \dot{D}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Seus resultados serão:

$$\dot{A}_3 = \dot{A}_2 + \dot{B}_2 \cdot \dot{Y} \quad (4.13a)$$

$$\dot{B}_3 = \dot{B}_2 \quad (4.13b)$$

$$\dot{C}_3 = \dot{C}_2 = 2\dot{A}_2 \cdot \dot{Y} + \dot{B}_2 \cdot \dot{Y}^2 \quad (4.13c)$$

$$\dot{D}_3 = \dot{A}_3 \quad (4.13d)$$

Para uma compensação shunt total, isto é, para que a tensão ' no receptor seja igual aquela do transmissor, quando a linha' estiver a vazio, \dot{A}_3 deverá ser igual à unidade, conforme podemos constatar a seguir. Tomando a expressão (4.14) e nela fazendo $\dot{I}_2 = 0$:

$$\dot{U}_1 = \dot{A} \cdot \dot{U}_2 + \dot{B} \cdot \dot{I}_2 \quad (4.14)$$

Para $\dot{I}_2 = 0$:

$$\dot{U}_{10} = \dot{A} \cdot \dot{U}_{20} \quad (4.15)$$

Tirando \dot{A} :

$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{U}_{20}} \quad (4.16)$$

Para que se tenha $\dot{U}_{10} = \dot{U}_{20}$, o valôr de \dot{A} deve ser 1.

Fazendo, portanto, em (4.13a), $A_3 = 1$:

$$1 = \dot{A}_2 + \dot{B}_2 \cdot \dot{Y} \quad (4.17)$$

Tirando o valôr de Y nesta expressão:

$$\dot{Y} = \frac{1 - \dot{A}_2}{\dot{B}_2} \quad (4.18)$$

Tal como na compensação série, reescreve-se a expressão em notação cartesiana:

$$\begin{aligned} y' - jy'' &= \frac{1 - (a_2' + ja_2'')}{B_2 / \beta_2} = \frac{1 - a_2' / \beta_2 - ja_2'' / \beta_2}{B_2} = \\ &= \frac{1 - a_2' (\cos \beta_2 - j \operatorname{sen} \beta_2)}{B_2} - j \frac{a_2'' (\cos \beta_2 - j \operatorname{sen} \beta_2)}{B_2} = \\ &= \frac{(1 - a_2') \cos \beta_2 - j(1 - a_2') \operatorname{sen} \beta_2 - ja_2'' \cos \beta_2 - a_2'' \operatorname{sen} \beta_2}{B_2} \quad (4.19) \end{aligned}$$

Igualando os termos imaginários:

$$-jy'' = -j\left(\frac{1-a'_2}{B_2}\right)\text{sen}\beta_2 - j\frac{a''_2}{B_2}\text{cos}\beta_2 \quad (4.20)$$

O reator indutivo "Y" deverá ter o seguinte valor:

$$Y = -jy'' = -j\left(\frac{1-a'_2}{B_2}\right)\text{sen}\beta_2 + j\frac{a''_2}{B_2}\text{cos}\beta_2 \text{ (siemens)} \quad (4.21)$$

O reator acima determinado fará uma compensação de 100%. Caso se queira uma compensação parcial, por exemplo de 40%, o reator a ser inserido em cada extremidade do trecho será:

$$Y' = 0,30Y \quad (4.22)$$

Em termos de potência reativa:

$$Q = U^2 \cdot Y' \quad (4.23)$$

4.3.3 - CÁLCULO DAS TENSÕES E CORRENTES

É de grande interesse e importância que se conheça o maior número possível de tensões e correntes ao longo da linha. De posse destes perfis facilmente se constata o bom ou mal desempenho da linha. Com este propósito, cada trecho de linha foi dividido em dez quadripolos, a fim de que fosse possível obter, em cada trecho, dez valores de tensão e outros dez de corrente, em pontos equidistantes entre si da distância "D":

$$D = \frac{l_1}{10} = \frac{L_{\text{tot}}}{N_t \cdot 10} \quad (4.24)$$

As tensões e correntes serão obtidas a cada intervalo, pela equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

O quadripolo $\dot{A}_4 \dot{B}_4 \dot{C}_4 \dot{D}_4$ está indicado na figura 4.9, na qual se poderá observar a disposição com que cada trecho compensado segundo o modelo "A" se apresentará.

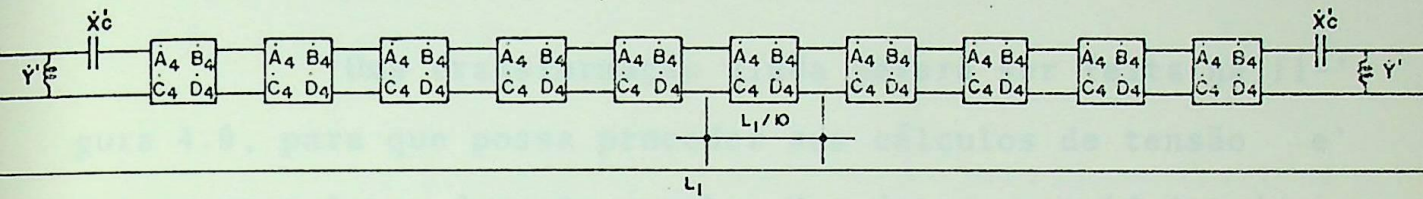


Figura 4.9 - Trecho de linha já compensado e preparado para que se proceda às leituras de tensões e correntes em dez pontos.

Conforme a expressão 4.25 evidencia, parte-se dos dados já conhecidos do receptor da linha, isto é, da tensão e da corrente naquele local. Em seguida o processo vai se repetindo ciclicamente, até que o transmissor seja atingido.

As constantes de quadripolo relativas à distância "D" são obtidas como se segue:

- A impedância por km pode ser obtida através dos dados de entrada e da equação (4.26):

$$\dot{z} = r + j\omega L \quad (4.26)$$

- A admitância por km, pela expressão (4.27):

$$\dot{y} = g + j\omega C \quad (4.27)$$

- A impedância total de cada trecho, bem como a admitância total são calculadas em seguida:

$$\dot{Z} = \dot{z} \cdot L_{\text{tot}} / N_t \quad (4.28)$$

$$\dot{Y} = \dot{y} \cdot L_{\text{tot}} / N_t \quad (4.29)$$

As constantes de quadripolo finalmente poderão ser obtidas:

$$\dot{A}_4 = 1 + (\dot{Z}/10) \cdot (\dot{Y}/10) \quad (4.30)$$

$$\dot{B}_4 = \dot{Z}/10 \quad (4.31)$$

$$\dot{C}_4 = (\dot{Y}/10) \cdot \left(1 + \frac{\dot{Z}/10 \cdot \dot{Y}/10}{4}\right) \quad (4.32)$$

$$\dot{D}_4 = \dot{A}_4 \quad (4.33)$$

Uma transformação ainda deverá ser feita na figura 4.9, para que possa proceder aos cálculos de tensão e corrente ao longo daquele trecho. Nas duas extremidades deve-se tomar o quadripolo $\dot{A}_4 \dot{B}_4 \dot{C}_4 \dot{D}_4$ e, juntamente com os reatores e capacitores ali instalados, associá-los em um quadripolo a penas. A figura 4.10 indica as transformações nos dois extremos.

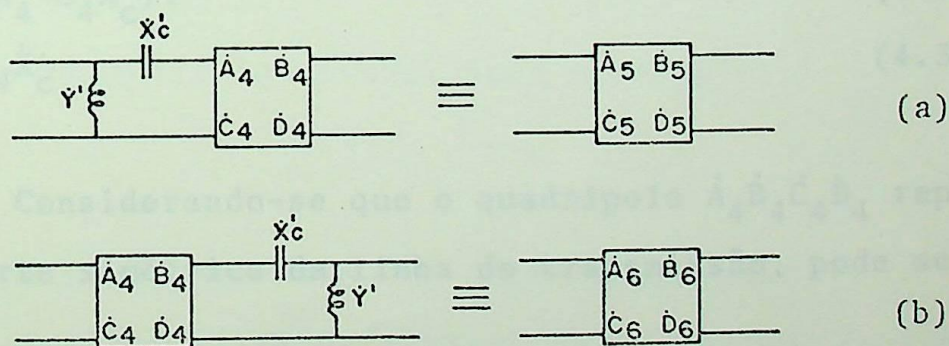


Figura 4.10 - Associação do quadripolo $\dot{A}_4 \dot{B}_4 \dot{C}_4 \dot{D}_4$ com os reatores e capacitores do trecho compensado.

(a)- extremidade transmissora.

(b)- extremidade receptora.

O quadripolo resultante, do lado *transmissor*, será obtido da seguinte expressão matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{D}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y}' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{X}'_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Seus resultados serão:

$$\dot{A}_5 = \dot{A}_4 + \dot{C}_4 \dot{X}'_C \quad (4.34a)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{B}_4 + \dot{D}_4 \dot{X}'_C \quad (4.34b)$$

$$\dot{C}_5 = \dot{C}_4 + (\dot{A}_4 + \dot{C}_4 \dot{X}'_C) \dot{Y}' \quad (4.34c)$$

$$\dot{D}_5 = \dot{A}_4 + (\dot{B}_4 + \dot{D}_4 \dot{X}'_C) \dot{Y}' \quad (4.34d)$$

Na extremidade *receptora*, o quadripolo final será dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_6 & \dot{B}_6 \\ \dot{C}_6 & \dot{D}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{X}'_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y}' & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Cujos resultados finais serão:

$$\dot{A}_6 = \dot{A}_4 + (\dot{B}_4 + \dot{A}_4 \dot{X}'_C) \dot{Y}' \quad (4.35a)$$

$$\dot{B}_6 = \dot{B}_4 + \dot{A}_4 \dot{X}'_C \quad (4.35b)$$

$$\dot{C}_6 = \dot{C}_4 + (\dot{A}_4 + \dot{C}_4 \dot{X}'_C) \dot{Y}' \quad (4.35c)$$

$$\dot{D}_6 = \dot{A}_4 + \dot{C}_4 \dot{X}'_C \quad (4.35d)$$

Considerando-se que o quadripolo $\dot{A}_4 \dot{B}_4 \dot{C}_4 \dot{D}_4$ representa uma parte simétrica da linha de transmissão, pode ser escrito que:

$$\dot{A}_4 = \dot{D}_4 \quad (4.36)$$

Desta forma, se observarmos as expressões (4.34) e (4.35), veremos que valem as seguintes igualdades:

$$\dot{A}_5 = \dot{D}_6 \quad (4.37)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{B}_6 \quad (4.38)$$

$$\dot{C}_5 = \dot{C}_6 \quad (4.39)$$

$$\dot{D}_5 = \dot{A}_6 \quad (4.40)$$

Agora já se consegue obter mais facilmente os valores de tensões e correntes, pois todo o trecho foi transformado em quadripolos apenas, não existindo mais reatores e capacitores isoladamente. A figura 4.11 mostra a nova situação:

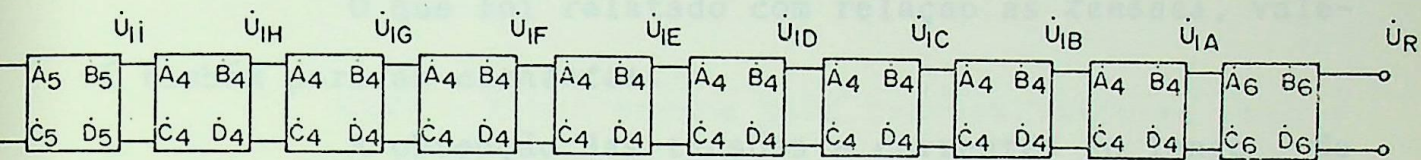


Figura 4.11 - Representação de um trecho de linha compensada' pelo modelo "A", finalmente pronto para cálculos de tensão e corrente.

Nesta figura temos, para o primeiro trecho:

\dot{U}_R : Tensão no receptor.

\dot{U}_{1A} : Tensão no primeiro intervalo, após o receptor.

⋮

\dot{U}_{1I} : Tensão no nono intervalo, do primeiro trecho.

\dot{U}_{11} : Tensão no décimo intervalo (Final do 1º trecho, de comprimento l_1).

Analogamente, para o segundo trecho (também de comprimento l_1):

\dot{U}_{11} : Tensão no início do segundo trecho, que é o décimo de toda a linha.

\dot{U}_{2A} : Tensão no primeiro intervalo do segundo trecho (décimo primeiro de toda a linha).

⋮

\dot{U}_{2I} : Tensão no nono intervalo do segundo trecho (décimo nono de toda a linha).

\dot{U}_{22} : Tensão no décimo intervalo do segundo trecho (vigésimo de toda a linha). Caso a linha tenha sido subdividida em apenas dois trechos, esta tensão obtida será a própria tensão no transmissor.

O que foi relatado com relação às tensões, valerá também para as correntes.

A obtenção das tensões e correntes ao longo de toda a linha, seguirá a seguinte sistemática de cálculo:

A) CÁLCULOS PARA O PRIMEIRO TRECHO:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1A} \\ \dot{I}_{1A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_6 & \dot{B}_6 \\ \dot{C}_6 & \dot{D}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{D}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{A}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} \quad 1^a \text{ leitura} \quad (4.41)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{1B} \\ \dot{I}_{1B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{1A} \\ \dot{I}_{1A} \end{bmatrix} \quad 2^a \text{ leitura} \quad (4.42)$$

⋮

(3^a, 4^a, 5^a, 6^a, 7^a, 8^a e 9^a leituras = 2^a leitura)

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{I}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{D}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{11I} \\ \dot{I}_{11I} \end{bmatrix} \quad 10^a \text{ leitura} \quad (4.43)$$

B) CÁLCULOS PARA O SEGUNDO TRECHO:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{2A} \\ \dot{i}_{2A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{D}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{D}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} \\ \dot{i}_{11} \end{bmatrix} \quad 11^a \text{ leitura} \quad (4.44)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{2B} \\ \dot{i}_{2B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{2A} \\ \dot{i}_{2A} \end{bmatrix} \quad 12^a \text{ leitura} \quad (4.45)$$

⋮
 ⋮ (13^a, 14^a, 15^a, 16^a, 17^a, 18^a e 19^a leituras = 12^a leitura)
 ⋮

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{22} \\ \dot{i}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{D}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{2I} \\ \dot{i}_{2I} \end{bmatrix} \quad 20^a \text{ leitura} \quad (4.46)$$

Caso a linha possua mais trechos, isto é, caso a linha tenha sido subdividida em um número superior a "2", o processo descrito também valerá. Ele se repetirá até que o transmissor tenha sido atingido. Para uma linha compensada em dois trechos, o processo de leitura é o próprio acima mostrado.

4.4 - MODELO DE COMPENSAÇÃO TIPO "B"

Em uma primeira observação, pode-se não perceber a diferença entre os modelos de compensação "A" e "B", pois a desigualdade mais evidente é uma simples troca de posições entre os reatores e capacitores. No modelo "A", os capacitores estão mais próximos do quadripolo e os reatores estão conectados externamente a esse arranjo. No modelo "B", conforme a figura 4.12 mostra, os capacitores é que estão acoplados ex

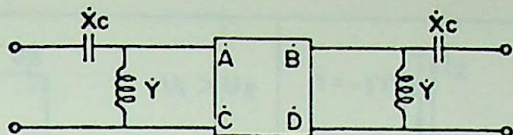


Figura 4.12 - Esquema de compensação "B", no qual os capacitores se colocam na parte externa do trecho.

ternamente. Embora possa não parecer, do ponto de vista elétrico as diferenças são marcantes, conforme será visto a seguir.

Tomando como ilustração os circuitos elétricos da figura 4.13, nota-se as suas semelhanças com as compensações ora em comparação (MODELOS "A" E "B").

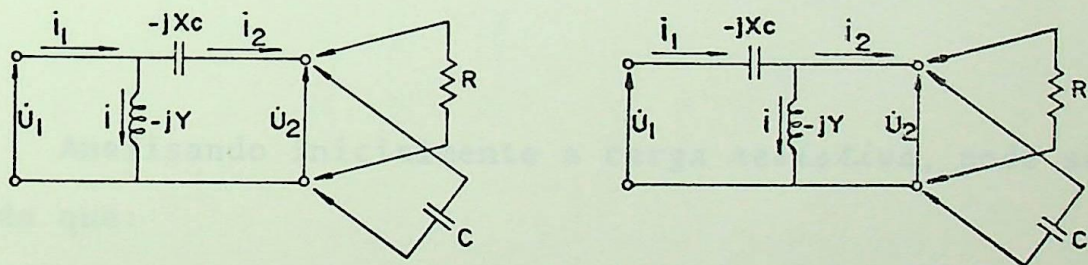


Figura 4.13 - Circuitos elétricos com elementos capacitivos e indutivos iguais, porém dispostos em posições diferentes.

Para uma análise mais ampla, serão construídos diagramas fasoriais para dois tipos de carga: um resistor R e um capacitor C . A figura 4.14 mostra os quatro diagramas.

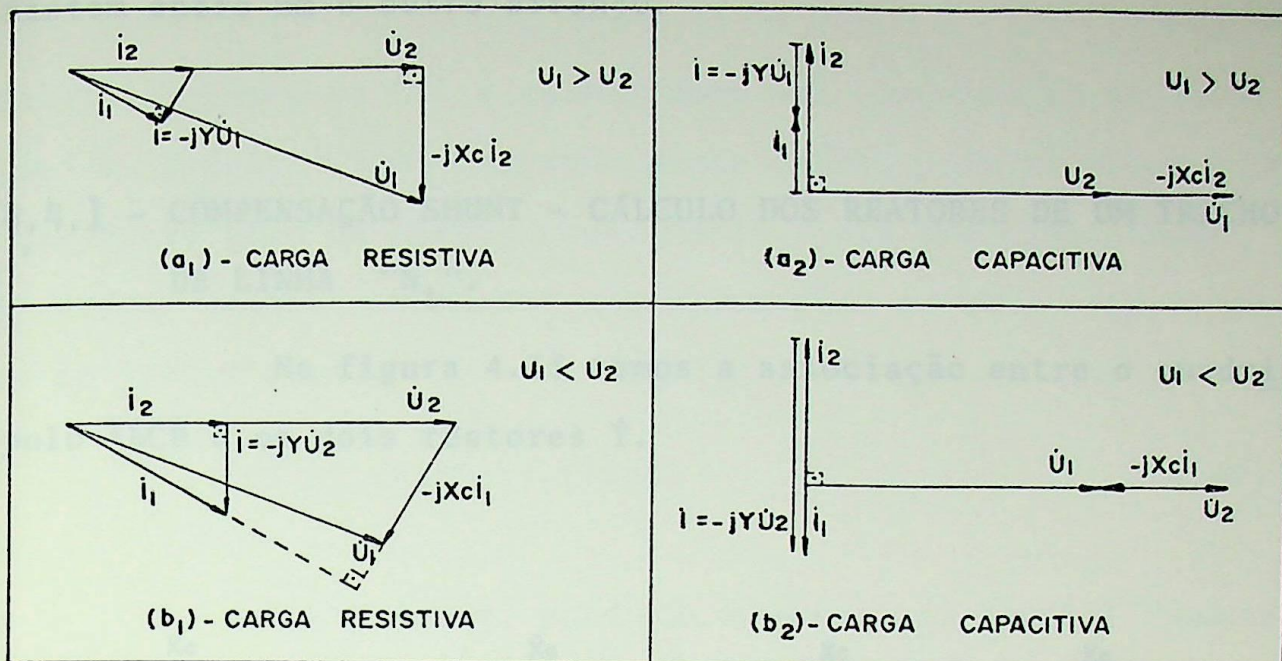


Figura 4.14 - Diagramas fasoriais para os circuitos da figura 4.13.

(a₁) e (a₂): se referem ao esquema (A).

(b₁) e (b₂): se referem ao esquema (B).

Os índices "1" e "2" são, respectivamente, relativos às cargas resistivas e capacitivas.

Analisando inicialmente a carga *resistiva*, pode ser observado que:

- No modelo "A", $U_1 > U_2$.

- No modelo "B", $U_1 < U_2$.

- A corrente I está atrasada de 90° de I_1 no modelo "A", porém no modelo "B" esta defasagem é menor que 90° .

Para o *capacitor* como carga:

- No modelo "A", $U_1 > U_2$.

- No modelo "B", $U_1 < U_2$.

Como se pode observar, importantes diferenças existem entre um e outro arranjo.

4.4.1 - COMPENSAÇÃO SHUNT - CÁLCULO DOS REATORES DE UM TRECHO DE LINHA "N_t".

Na figura 4.15 temos a associação entre o quadripolo $\dot{A}\dot{B}\dot{C}\dot{D}$ e os dois reatores \dot{Y} .

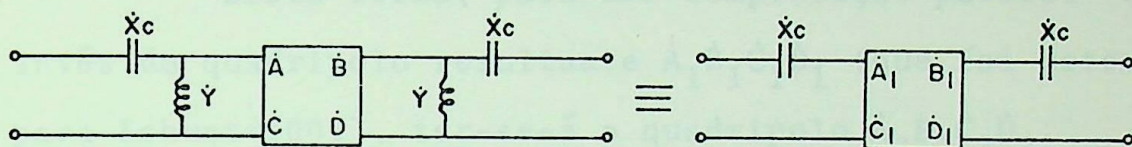


Figura 4.15 - Associação entre o quadripolo $\dot{A}\dot{B}\dot{C}\dot{D}$ e os reatores \dot{Y} .

O quadripolo resultante será $\dot{A}_1\dot{B}_1\dot{C}_1\dot{D}_1$:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} & \dot{B} \\ \dot{C} & \dot{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Isto é:

$$\dot{A}_1 = \dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{Y} \quad (4.47a)$$

$$\dot{B}_1 = \dot{B} \quad (4.47b)$$

$$\dot{C}_1 = \dot{C} + 2 \cdot \dot{A} \cdot \dot{Y} + \dot{B} \cdot \dot{Y}^2 \quad (4.47c)$$

$$\dot{D}_1 = \dot{A}_1 \quad (4.47d)$$

Procedendo como no item 4.3.2, onde foi feito $\dot{A}_2=1$, reescreve-se a equação 4.21, adaptando-a para o quadripolo $\dot{A}\dot{B}\dot{C}\dot{D}$ ora em análise:

$$\dot{Y} = -j \left(\frac{1-a'}{B} \text{sen}\beta + \frac{a''}{B} \text{cos}\beta \right) \quad (4.48)$$

O valôr acima para "Y" é aquele para uma compensação de 100%, isto é, Kshunt = 100%. Através dêste valôr, pode-se obter qual quer outrô gráu de compensação. Assim, para uma compensação genérica "Kshunt", o reator a ser inserido em cada extremidade do trecho será:

$$\dot{Y}' = (\text{Kshunt}) \cdot Y / 100\% \quad (4.49)$$

Desta forma, para uma compensação parcial "Kshunt", ao invés do quadripolo resultante $\dot{A}_1 \dot{B}_1 \dot{C}_1 \dot{D}_1$ (que foi determinado para Kshunt=100%), ter-se-á o quadripolo $\dot{A}_2 \dot{B}_2 \dot{C}_2 \dot{D}_2$:

$$\dot{A}_2 = \dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{Y}' \quad (4.50a)$$

$$\dot{B}_2 = \dot{B} \quad (4.50b)$$

$$\dot{C}_2 = \dot{C} + 2 \cdot \dot{A} \cdot \dot{Y}' + \dot{B} \cdot \dot{Y}'^2 \quad (4.50c)$$

$$\dot{D}_2 = \dot{A}_2 \quad (4.50d)$$

4.4.2 - CÁLCULO DE TENSÕES E CORRENTES

4.4.2 - COMPENSAÇÃO SÉRIE - CÁLCULO DOS CAPACITORES

Na figura 4.16 temos uma associação entre o qua-

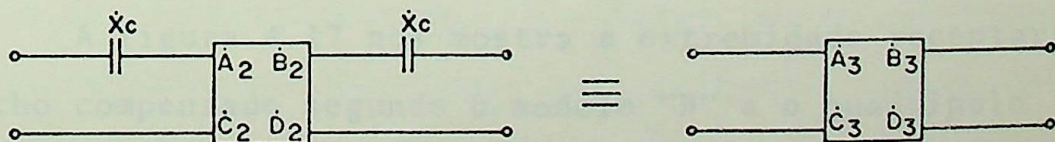


Figura 4.16 - Obtenção de quadripolo resultante de associação de dois capacitores e o quadripolo que leva os efeitos da compensação em derivação.

dripolo anterior $\dot{A}_2 \dot{B}_2 \dot{C}_2 \dot{D}_2$ e os capacitores " X_c ". Os referidos capacitores são para uma compensação total, isto é, $K_{série} = 100\%$. Posteriormente, a exemplo do que foi feito no item anterior, será feita a generalização, isto é, a compensação série parcial.

Procedendo como no item 4.3.1, vamos tomar a equação 4.7 e adaptá-la ao caso atual, aplicando-a ao quadripolo $\dot{A}_2 \dot{B}_2 \dot{C}_2 \dot{D}_2$:

$$X_c = \frac{2a_2' + \sqrt{(2a_2')^2 + 4 \cdot c_2'' \cdot b''}}{2c_2''} \quad (4.51)$$

Para uma compensação parcial de valor " $K_{série}$ ", os capacitores serão:

$$X_c' = (K_{série}) \cdot X_c' / 100\% \quad (4.52)$$

4.4.3 - CÁLCULO DE TENSÕES E CORRENTES

O procedimento é semelhante àquele do modelo "A", item 4.3.3. O trecho compensado é subdividido em dez quadripolos iguais. Esses quadripolos são os mesmos do item 4.3.3 ($\dot{A}_4 \dot{B}_4 \dot{C}_4 \dot{D}_4$). Entretanto as extremidades deverão ser alteradas, já que os reatores e capacitores foram trocados de posição.

A figura 4.17 nos mostra a extremidade receptora de um trecho compensado segundo o modelo "B" e o quadripolo resultante. As constantes de quadripolo $\dot{A}_6 \dot{B}_6 \dot{C}_6 \dot{D}_6$ ora mostradas nesta figura não são as mesmas da figura 4.10, entretanto. Isto decorre justamente do fato da inversão de posições entre

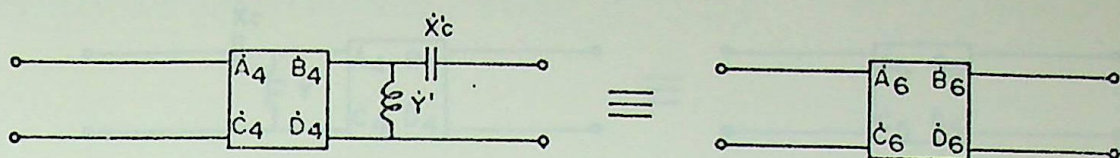


Figura 4.17 - Quadripolo resultante na extremidade receptora' do trecho de linha compensada segundo o modelo "B'".

o capacitor e o reator. O motivo da colocação dos mesmos índices da figura 4.10 no quadripolo resultante, decorre do fato' de se poder, com isto, usar a mesma rotina de obtenção de tensões e correntes já montada para o modelo "A".

O quadripolo resultante, na figura 4.17 será dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_6 & \dot{B}_6 \\ \dot{C}_6 & \dot{D}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y}' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{X}'_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Ou seja:

$$\dot{A}_6 = \dot{A}_4 + \dot{B}_4 \cdot \dot{Y}' \quad (4.53a)$$

$$\dot{B}_6 = \dot{B}_4 + (\dot{A}_4 + \dot{B}_4 \cdot \dot{Y}') \dot{X}'_c \quad (4.53b)$$

$$\dot{C}_6 = \dot{C}_4 + \dot{A}_4 \cdot \dot{Y}' \quad (4.53c)$$

$$\dot{D}_6 = \dot{A}_4 + (\dot{C}_4 + \dot{A}_4 \cdot \dot{Y}') \dot{X}'_c \quad (4.53d)$$

A figura 4.18 apresenta a extremidade transmissora do trecho de linha compensado. Nela, tem-se as transformações processadas no quadripolo ali existente. Novamente' deve ser ressaltado que o quadripolo resultante $\dot{A}_5 \dot{B}_5 \dot{C}_5 \dot{D}_5$, não é o mesmo da figura 4.10 (quando do modelo "A"), pelos mesmos motivos expostos acima.

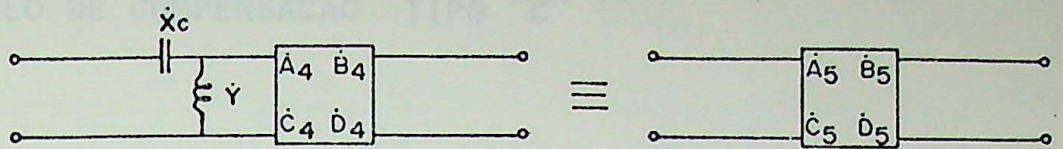


Figura 4.18 - Quadripolo resultante na extremidade transmissora do trecho compensado segundo o modelo "B",

O quadripolo resultante pode ser obtido de:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{D}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{X}'_C \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y}' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Que fornece os seguintes resultados:

$$\dot{A}_5 = \dot{A}_4 + (\dot{C}_4 + \dot{A}_4 \dot{Y}') \cdot \dot{X}'_C \quad (4.54a)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{B}_4 + (\dot{A}_4 + \dot{B}_4 \dot{Y}') \cdot \dot{X}'_C \quad (4.54b)$$

$$\dot{C}_5 = \dot{C}_4 + \dot{A}_4 \dot{Y}' \quad (4.54c)$$

$$\dot{D}_5 = \dot{A}_4 + \dot{B}_4 \dot{Y}' \quad (4.54d)$$

Finalmente todos os quadripolos estão prontos para os cálculos de tensão e corrente. O aspecto final deles pode ser visto na figura 4.11. Ressalte-se uma vez mais que os quadripolos das *extremidades*, na referida figura, para o caso "B" são aqueles agora definidos pelas equações (4.53) e (4.54).

Os cálculos seguintes seguem a mesma rotina já delineada e explicada no item 4.3.3. Inclusive o exemplo ali mostrado é válido para o caso "B".

4.5 - MODÉLO DE COMPENSAÇÃO TIPO "C"

Este modelo é caracterizado pela instalação do capacitor no meio do trecho. Este capacitor deverá anular, totalmente ou parcialmente, a reatância indutiva do trecho. A figura 4.19 nos mostra este esquema elétrico. O capacitor X_c ,

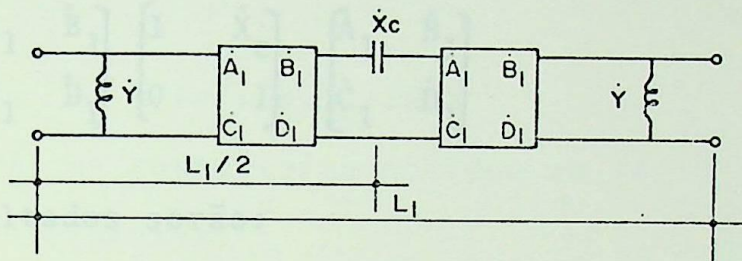


Figura 4.19 - Modelo de compensação de linhas de transmissão tipo "C", onde o capacitor é instalado no centro do trecho.

mostrado na figura, deverá equivaler à soma dos dois capacitores que estão nas figuras 4.4 e 4.12, respectivamente, relativas aos modelos "A" e "B".

4.5.1 - COMPENSAÇÃO SÉRIE - CÁLCULO DO CAPACITOR

Na figura 4.20, tem-se o quadripolo equivalente à associação do capacitor com o trecho de linha, com os reatores inseridos externamente ao quadripolo equivalente.

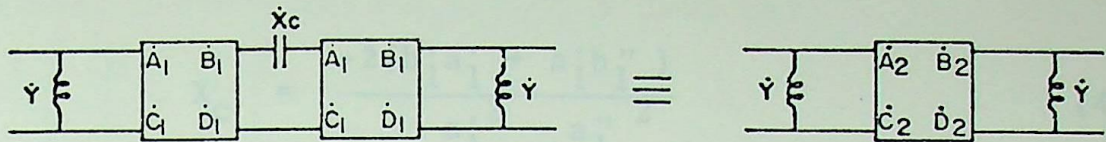


Figura 4.20 - Associação do capacitor do trecho de linha com a referida linha, ou trecho de linha.

O quadripolo resultante será:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_2 & \dot{B}_2 \\ \dot{C}_2 & \dot{D}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \dot{X}_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_1 & \dot{B}_1 \\ \dot{C}_1 & \dot{D}_1 \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Cujos resultados serão:

$$\dot{A}_2 = \dot{A}_1^2 + \dot{B}_1 \dot{C}_1 + \dot{A}_1 \dot{C}_1 \dot{X}_c \quad (4.55a)$$

$$\dot{B}_2 = 2\dot{A}_1 \dot{B}_1 + \dot{A}_1^2 \dot{X}_c \quad (4.55b)$$

$$\dot{C}_2 = 2\dot{A}_1 \dot{C}_1 + \dot{C}_1^2 \dot{X}_c \quad (4.55c)$$

$$\dot{D}_2 = \dot{B}_1 \dot{C}_1 + \dot{A}_1^2 + \dot{A}_1 \dot{C}_1 \dot{X}_c \quad (4.55d)$$

Conforme nos casos anteriores, para uma compensação de 100% da reatância indutiva, a parte imaginária da constante B_2 deverá ser anulada. Retomaremos, assim, a equação 4.55b, em notação cartesiana, desta vez:

$$b_2'' + jb_2'' = 2(a_1' + ja_1'')(b_1' + jb_1'') + (a_1' + ja_1'')^2 \cdot (jX_c) \quad (4.56)$$

Desenvolvendo esta expressão e igualando imaginários:

$$b_2'' = 2(b_1' a_1'' + a_1' b_1'') + (a_1'^2 - a_1''^2) X_c \quad (4.57)$$

Na expressão anterior pode-se obter o valor do capacitor " X_c "

necessário à realização da compensação série total. Basta que se faça $b_2'' = 0$. Assim procedendo, o capacitor será:

$$X_C = \frac{-2(b_1' a_1' + a_1' b_1'')}{a_1'^2 - a_1''^2} \quad (4.58)$$

A reatância capacitiva acima normalmente não é usada pois significaria uma compensação total ($K_{\text{série}}=100\%$). O caso mais genérico é uma compensação parcial. Nestas condições, a reatância capacitiva a ser inserida no trecho será dada por:

$$X_C' = K_{\text{série}} \cdot X_C / 100\% \quad (4.59)$$

Desta forma, os capacitores obtidos em (4.55) serão modificados para os seguintes:

$$A_3 = A_1^2 + B_1 C_1 + A_1 C_1 X_C' \quad (4.60a)$$

$$B_3 = 2(A_1 B_1) + A_1^2 \cdot X_C' \quad (4.60b)$$

$$C_3 = 2(A_1 C_1) + C_1^2 \cdot X_C' \quad (4.60c)$$

$$D_3 = B_1 C_1 + A_1^2 + A_1 C_1 X_C' \quad (4.60d)$$

4.5.2 - COMPENSAÇÃO SHUNT - CÁLCULO DOS REATORES

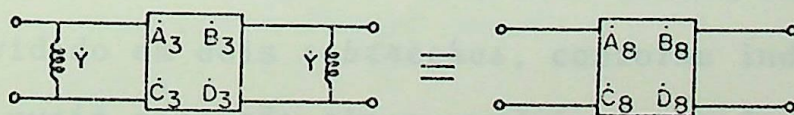


Figura 4.20 - Quadripolo equivalente que inclui os reatores indutivos.

A figura 4.20 mostra o quadripolo resultante da

anexação dos reatores. Como anteriormente em "A" e "B", os reatores compensam totalmente a capacitância natural do trecho de linha. o quadripolo $\dot{A}_8 \dot{B}_8 \dot{C}_8 \dot{D}_8$ é dado por:

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_8 & \dot{B}_8 \\ \dot{C}_8 & \dot{D}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_3 & \dot{B}_3 \\ \dot{C}_3 & \dot{D}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \dot{Y} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

Que nos fornecem:

$$\dot{A}_8 = \dot{A}_3 + \dot{B}_3 \cdot \dot{Y} \quad (4.61a)$$

$$\dot{B}_8 = \dot{B}_3 \quad (4.61b)$$

$$\dot{C}_8 = \dot{C}_3 + 2\dot{A}_3 \cdot \dot{Y} + \dot{B}_3 \cdot \dot{Y}^2 \quad (4.61c)$$

$$\dot{D}_8 = \dot{A}_8 \quad (4.61d)$$

Os reatores "Y", serão dados pela expressão abaixo, 4.62, tirada da equação 4.21, obtida inicialmente no item 4.3.2:

$$Y = -j \left(\frac{1-a'_3}{B_3} \cdot \text{sen} \beta_3 + \frac{a''_3}{B_3} \cdot \text{cos} \beta_3 \right) \quad (4.62)$$

Para uma compensação parcial de Kshunt(%), os reatores serão:

$$Y' = \text{Kshunt} \cdot Y / 100\% \quad (4.63)$$

4.5.3 - CÁLCULO DAS TENSÕES E CORRENTES

No caso do modelo "C", cada trecho compensado de verá ser dividido em dois *subtrechos*, conforme indica a figura 4.21, os quais conterão cinco quadripolos cada. Isto se faz necessário devido à presença do capacitor no centro do trecho, que impede que se use diretamente o sistema de leituras empregado nos modelos "A" e "B".

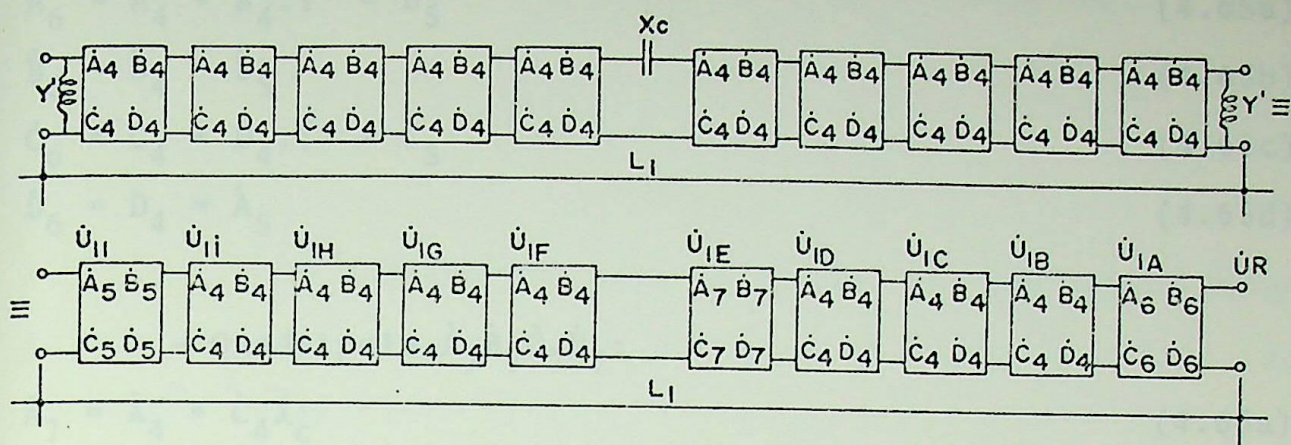


Figura 4.21 - Representação de um trecho de linha compensada' segundo o modelo "C", antes e depois de prepara do para cálculos de tensão e corrente.

Como pode ser observado na figura 4.21, foram ne cessárias três associações de quadripolos. Duas associações ' nas extremidades, as quais incluem os dois reatores aí insta- lados e uma associação no meio do trecho, que envolve a inclu são do capacitor instalado no meio do trecho. Os quadripolos' $\dot{A}_4 \dot{B}_4 \dot{C}_4 \dot{D}_4$ são os mesmos já definidos e identificados no item ' 4.3.3, pelas equações 4.30 a 4.33.

Os três quadripolos equivalentes das três asso - ciações referidas no parágrafo anterior, são obtidos pelo mes mo método das equações matriciais, já fartamente mostrado nê s trabalho. Seus resultados finais serão:

- Quadripolo $\dot{A}_5 \dot{B}_5 \dot{C}_5 \dot{D}_5$:

$$\dot{A}_5 = \dot{A}_4 \quad (4.64a)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{B}_4 \quad (4.64b)$$

$$\dot{C}_5 = \dot{C}_4 + \dot{A}_4 \cdot \dot{Y}' \quad (4.64c)$$

$$\dot{D}_5 = \dot{D}_4 + \dot{B}_4 \cdot \dot{Y}' \quad (4.64d)$$

- Quadripolo $\dot{A}_6 \dot{B}_6 \dot{C}_6 \dot{D}_6$:

$$\dot{A}_6 = \dot{A}_4 + \dot{B}_4 \cdot \dot{Y}' = \dot{D}_5 \quad (4.65a)$$

$$\dot{B}_6 = \dot{B}_4 = \dot{B}_5 \quad (4.65b)$$

$$\dot{C}_6 = \dot{C}_4 + \dot{D}_4 \cdot \dot{Y}' = \dot{C}_5 \quad (4.65c)$$

$$\dot{D}_6 = \dot{D}_4 = \dot{A}_5 \quad (4.65d)$$

- Quadripolo $\dot{A}_7 \dot{B}_7 \dot{C}_7 \dot{D}_7$:

$$\dot{A}_7 = \dot{A}_4 + \dot{C}_4 \dot{X}'_C \quad (4.66a)$$

$$\dot{B}_7 = \dot{B}_4 + \dot{D}_4 \dot{X}'_C \quad (4.66b)$$

$$\dot{C}_7 = \dot{C}_4 \quad (4.66c)$$

$$\dot{D}_7 = \dot{D}_4 \quad (4.66d)$$

Após estas modificações, os cálculos das tensões e correntes segundo o modelo "C" seguem processo análogo ao descrito no item 4.3.3 para o modelo "A". Apenas deve ser considerado que, agora, no meio de cada trecho temos um quadripolo diferente: $\dot{A}_7 \dot{B}_7 \dot{C}_7 \dot{D}_7$.

4.6 - O PROGRAMA PARA COMPUTADOR DIGITAL: FLUXOGRAMAS

A análise que será efetuada, por ser muito longa no que se refere à quantidade de cálculos, exige o auxílio do computador digital.

Em seguida se seguem dois fluxogramas. O primeiro deles apresenta um caminhamento geral do procedimento. O segundo fluxograma é específico para a programação em Linguagem Fortran.

No capítulo seguinte será mostrada toda a pesquisa, todos os resultados. O computador usado para a obtenção desses dados conclusivos, é o IBM 1130, da Universidade Federal de Uberlândia.

INÍCIO

DADOS DE ENTRADA
 R (Ω/Km), L (Henrys/Km), f (Hz),
 g (Siemens/Km), C (Farads/Km),
 L_{total} (Km), U_r (KV), N_r (Mw)
 N , K_s , K_d

$\Delta L = L_{\text{total}}/N$ (Km)
 $\dot{Z} = (R + j2\pi fL)\Delta L$ (Ω)
 $\dot{Y} = (g + j2\pi fC)\Delta L$ (S)
 $z = \dot{Z}/10$ (Ω)
 $y = \dot{Y}/10$ (S)
 $I_r = \frac{N_r \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_r}$ (A)
 $\dot{A}_4 = 1 + z y/2$
 $\dot{B}_4 = z(1 + z y/6)$
 $\dot{C}_4 = y(1 + z y/6)$
 $\dot{D}_4 = \dot{A}_4$

CÁLCULO DO CAPACITOR
 $X_c = jX_c \cdot K_c$

$$X_c = \frac{2a' \sqrt{(2a')^2 + 4c' b'}}{2c'}$$

TIPO DE LINHA
 (A)

$\dot{A} = 1 + \dot{Z}\dot{Y}/2$
 $\dot{B} = \dot{Z}(1 + \dot{Z}\dot{Y}/6)$
 $\dot{C} = \dot{Y}(1 + \dot{Z}\dot{Y}/6)$
 $\dot{D} = \dot{A}$

TIPO DE LINHA
 (C)

$\dot{A}_1 = 1 + (\dot{Z}/2)(\dot{Y}/2)/2$
 $\dot{B}_1 = \dot{Z}/2(1 + \dot{Z}\dot{Y}/24)$
 $\dot{C}_1 = \dot{Y}/2(1 + \dot{Z}\dot{Y}/24)$
 $\dot{D}_1 = \dot{A}_1$

$$X_c = \frac{2(b_1 a_1 + a_1 b_1)}{(a_1)^2 + (c_1)^2}$$

CÁLCULO DO CAPACITOR
 $X_c = jX_c \cdot K_c$

$\dot{A}_2 = \dot{A} + \dot{C}X_c$
 $\dot{B}_2 = \dot{B} + 2\dot{A}X_c + \dot{C}(X_c)^2$
 $\dot{C}_2 = \dot{C}$
 $\dot{D}_2 = \dot{A}_2$

$$Y' = -j \left(\frac{1 - a'}{B} \sin \beta B + \frac{a'}{B} \cos \beta B \right)$$

CÁLCULO DO REATOR
 $\dot{Y} = Y' \cdot K_d$

$$Y' = -j \left(\frac{1 - a_2'}{B_2} \sin \beta B_2 + \frac{a_2'}{B_2} \cos \beta B_2 \right)$$

$\dot{A}_2 = \dot{A} + \dot{B}Y'$
 $\dot{B}_2 = \dot{B}$
 $\dot{C}_2 = \dot{C} + 2\dot{A}Y' + \dot{B}(Y')^2$
 $\dot{D}_2 = \dot{A}_2$

CÁLCULO DO REATOR
 $\dot{Y} = Y' \cdot K_d$

$$Y' = -j \left(\frac{1 - a_3'}{B_3} \sin \beta B_3 + \frac{a_3'}{B_3} \cos \beta B_3 \right)$$

CÁLCULO DO REATOR
 $\dot{Y} = Y' \cdot K_d$

$\dot{A}_6 = \dot{A}_4 + (\dot{B}_4 + \dot{A}_4 X_c)Y'$
 $\dot{B}_6 = \dot{B}_4 + \dot{A}_4 X_c$
 $\dot{C}_6 = \dot{C}_4 + (\dot{A}_4 + \dot{C}_4 X_c)Y'$
 $\dot{D}_6 = \dot{A}_4 + \dot{C}_4 X_c$
 $\dot{A}_5 = \dot{D}_6$
 $\dot{B}_5 = \dot{B}_6$
 $\dot{C}_5 = \dot{C}_6$
 $\dot{D}_5 = \dot{A}_6$

$$X_c = \frac{2a_2' \sqrt{(2a_2')^2 + 4c_2' b_2'}}{2c_2'}$$

CÁLCULO DO CAPACITOR
 $X_c = jX_c \cdot K_c$

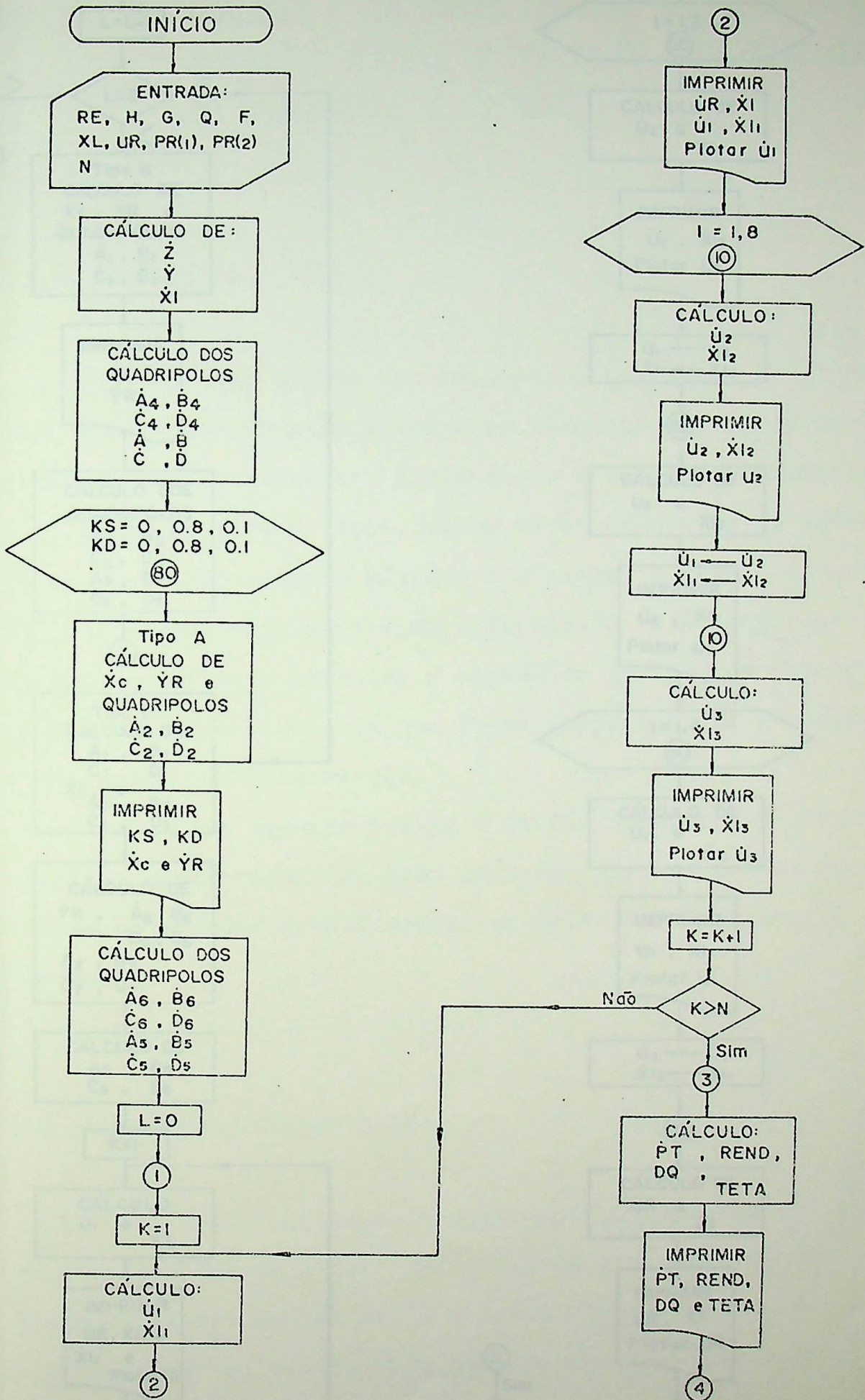
$\dot{A}_6 = \dot{A}_4 + \dot{B}_4 Y'$
 $\dot{B}_6 = \dot{B}_4 + \dot{A}_4 X_c$
 $\dot{C}_6 = \dot{C}_4 + \dot{A}_4 Y'$
 $\dot{D}_6 = \dot{D}_4 + \dot{C}_4 X_c$
 $\dot{A}_5 = \dot{D}_6$
 $\dot{B}_5 = \dot{B}_6$
 $\dot{C}_5 = \dot{C}_6$
 $\dot{D}_5 = \dot{A}_6$

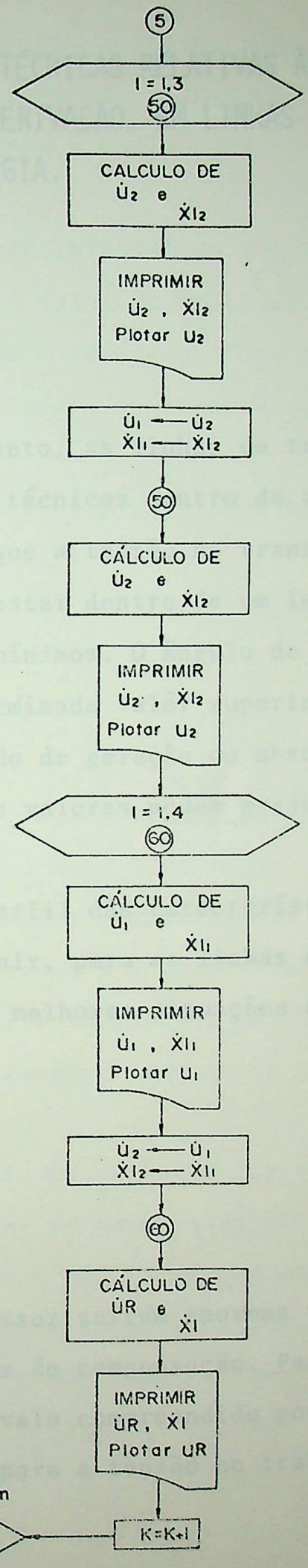
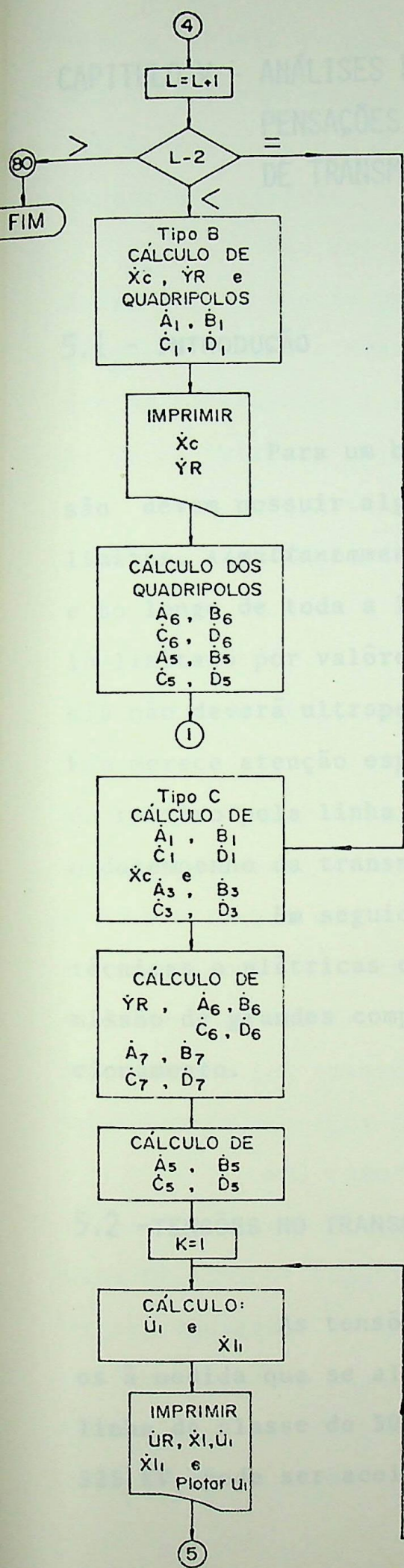
$\dot{A}_6 = \dot{A}_4 + \dot{B}_4 Y'$
 $\dot{B}_6 = \dot{B}_4$
 $\dot{C}_6 = \dot{C}_4 + \dot{D}_4 Y'$
 $\dot{D}_6 = \dot{D}_4$
 $\dot{A}_7 = \dot{A}_4 + \dot{C}_4 X_c$
 $\dot{B}_7 = \dot{B}_4 + \dot{D}_4 X_c$
 $\dot{C}_7 = \dot{C}_4$
 $\dot{D}_7 = \dot{D}_4$
 $\dot{A}_5 = \dot{D}_6$
 $\dot{B}_5 = \dot{B}_6$
 $\dot{C}_5 = \dot{C}_6$
 $\dot{D}_5 = \dot{D}_6$

1º Trecho $\begin{bmatrix} U_{1A} \\ I_{1A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_6 & \dot{B}_6 \\ \dot{C}_6 & \dot{D}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_r \\ I_r \end{bmatrix}$; $\begin{bmatrix} U_{1B} \\ I_{1B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1A} \\ I_{1A} \end{bmatrix}$... $\begin{bmatrix} U_{11} \\ I_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{D}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} \\ I_{11} \end{bmatrix}$

2º Trecho $\begin{bmatrix} U_{2A} \\ I_{2A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_6 & \dot{B}_6 \\ \dot{C}_6 & \dot{D}_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} \\ I_{11} \end{bmatrix}$; $\begin{bmatrix} U_{2B} \\ I_{2B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_4 & \dot{B}_4 \\ \dot{C}_4 & \dot{D}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2A} \\ I_{2A} \end{bmatrix}$... $\begin{bmatrix} U_{21} \\ I_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A}_5 & \dot{B}_5 \\ \dot{C}_5 & \dot{D}_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{21} \\ I_{21} \end{bmatrix}$

PARA CÁLCULO DAS TENSÕES E CORRENTES DA LINHA "C", PROCEDEMOS IDENTICAMENTE AOS CÁLCULOS PARA AS LINHAS "A" E "B", SOMENTE LEVANDO-SE EM CONTA QUE, AGORA, TEMOS NO MEIO DE CADA TRECHO UM QUADRÍPOLO DE CONSTANTES GENERALIZADAS $\dot{A}_7, \dot{B}_7, \dot{C}_7$ e \dot{D}_7 .





CAPITULO V - ANÁLISES E CONCLUSÕES TÉCNICAS RELATIVAS ÀS COMPENSAÇÕES SÉRIE E EM DERIVAÇÃO, EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA.

5.1 - INTRODUÇÃO

Para um bom funcionamento, as linhas de transmissão devem possuir alguns aspectos técnicos dentro de certos limites, *simultaneamente*. Assim é que a tensão no transmissor e ao longo de toda a linha, devem estar dentro de um intervalo limitado por valores máximos e mínimos. O ângulo de potência não deverá ultrapassar um determinado valor superior. Também merece atenção especial o estudo de geração ou absorção de reativo pela linha, já que estes valores podem prejudicar o desempenho da transmissão.

Em seguida tem-se o perfil das características técnicas e elétricas que irão definir, para as linhas de transmissão de grandes comprimentos, as melhores situações de funcionamento.

5.2 - TENSÕES NO TRANSMISSOR

As tensões no transmissor sofrem enormes variações à medida que se alteram os graus de compensação. Para uma linha da classe de 500 KV, o intervalo compreendido por 490 e 525 KV pode ser aceito como bom, para a tensão no transmissor.

Isto é, admite-se uma sobretensão de 5%. O limite inferior de 490 KV foi adotado para que seja assegurada a ausência de Efeito Ferranti, que surgirá para a linha a vazio ou mesmo para cargas capacitivas.

Não foi adotado o limite inferior de 475 KV, que daria para a tensão no transmissor a faixa de variação de $\pm 5\%$. Já que o presente trabalho busca uma otimização. Caso as faixas de tolerâncias fossem muito extensas, o presente estudo perderia muito em objetivo.

Doravante, a tensão no transmissor será também denominada de " U_1 ".

5.3 - TENSÃO MÁXIMA AO LONGO DA LINHA

Entendendo-se que, ao longo da linha as condições de isolamento poderão ser um pouco mais flexíveis, já que ali normalmente não existem equipamentos e instalações tão sensíveis como no transmissor, adotar-se-á o limite superior tolerável de 530 KV, como sendo aquele admissível para a linha, exceto seu transmissor e seu receptor, nos quais prevalece o limite superior de 525 KV.

Nos resultados apresentados, nota-se que certas cargas indutivas não teriam condições de serem transportadas, caso os limites superiores de 525 KV e 530 KV fossem mantidos. Nestas ocasiões, ao invés de serem apresentados os pontos ótimos (que portanto não existiam), foram mostrados e comentados os pontos menos problemáticos, isto é, aquelas regiões que menor número de problemas apresentavam.

A tensão máxima ao longo da linha será expressida, de maneira abreviada, por $U_{\text{máx}}$.

5.4 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

A determinação dos limites de estabilidade dinâmica, em sistemas de energia elétrica, será tanto mais complexo quanto maior fôr o número de centrais e linhas de transmissão dêsse sistema.

Vários autores admitem que um sistema está em condição boa de estabilidade, quando o ângulo de potência da transmissão está abaixo de 30° .

Este valôr será o limite máximo superior admitido neste estudo de otimização.

O ângulo de potência será também escrito como $\text{sen } \theta$.

5.5 - PERDAS DE POTÊNCIA - FLUXOS DE REATIVOS

Nêste ítem, observa-se a energia reativa que a linha necessita ou gera para a manutenção de seus campos elétricos e magnéticos. Será analisada a variação de reativo $\Delta Q = Q_2 - Q_1$. Assim sendo, quando $\Delta Q > 0$, a linha estará gerando reativo, pois $Q_2 > Q_1$. Para $\Delta Q < 0$, ocorrerá o inverso, isto é, $Q_1 > Q_2$, significando que a produção de reativo apenas pela linha não está sendo suficiente para que a mesma conduza a grande potência requerida no receptor. Nêste último caso, quem

supre esse "deficit" é o transmissor.

A principal implicação dos altos fluxos de reativos é o possível abaixamento do rendimento da transmissão, ou elevações de tensões ao longo da linha.

Será ainda observado no presente estudo, que quase sempre não se poderá transmitir nas faixas de altos rendimentos. É que nessas ocasiões, normalmente as tensões no transmissor estarão acima do limite superior admitido de 525 KV.

5.6 - A LINHA ANALISADA

Conforme comentários do início deste trabalho, será estudada uma linha de comprimento total de 1000 KM, com a tensão nominal de 500 KV no receptor. As características desta linha foram tiradas do artigo (5), e são apresentadas a seguir:

- Resistência: 0,021 (Ohms/Km)
- Indutância : $0,8655 \cdot 10^{-3}$ (Henrys/Km)
- Capacitância: $0,9177 \cdot 10^{-8}$ (Farads/Km)
- Condutância : 0
- Tipo de condutor: 1590 MCM - ACSR - geminados, espaçados entre si de 46,0 centímetros.
- Espaçamento entre fases: 12,0 metros.
- Impedância Natural: 307,10 Ohms.
- Potência Natural, em 500 KV: 814 MW.

Nos itens seguintes serão apresentados os resultados obtidos em cada tipo de carga. Inicialmente será mostrada a análise para a potência no receptor: $P_2 = 0,75 P_0$. Em seguida virá $P_2 = P_0$ e $P_2 = 1,25 P_0$, sempre variando o fator de potência do receptor (fp_2) por três pontos: Unitário, 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo. Finalmente, será visto o caso da linha em vazio, ou seja, $P_2 = 0$.

A apresentação dos estudos seguirá uma sequência: inicialmente serão determinadas as condições que satisfazem aos limites de tensões e de estabilidade estabelecidos nos itens 5.2, 5.3 e 5.4. Em seguida, dentre estas condições, tomam-se aquelas que possuem maiores rendimentos e que apresentem variações de reativos entre 100MVAR e -100MVAR. Com relação a este último, deve ser dito que, sempre que tivermos um caso fora desta faixa de variação de reativo, caso ele preencha as demais condições (inclusive aquela de bom rendimento), ele poderá ser indicado também como opção válida.

5.7 - ESTUDO DE $P_2 = 0,75 P_0$ (610,546 MW)

5.7.1 - FATÔR DE POTÊNCIA UNITÁRIO ($Q_2 = 0$)

5.7.1.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

Observando a figura 5.1 nota-se que, caso a linha opere sem nenhuma compensação, a tensão no transmissor será de 430 KV. Caso se faça somente compensação Shunt, a tensão U_1

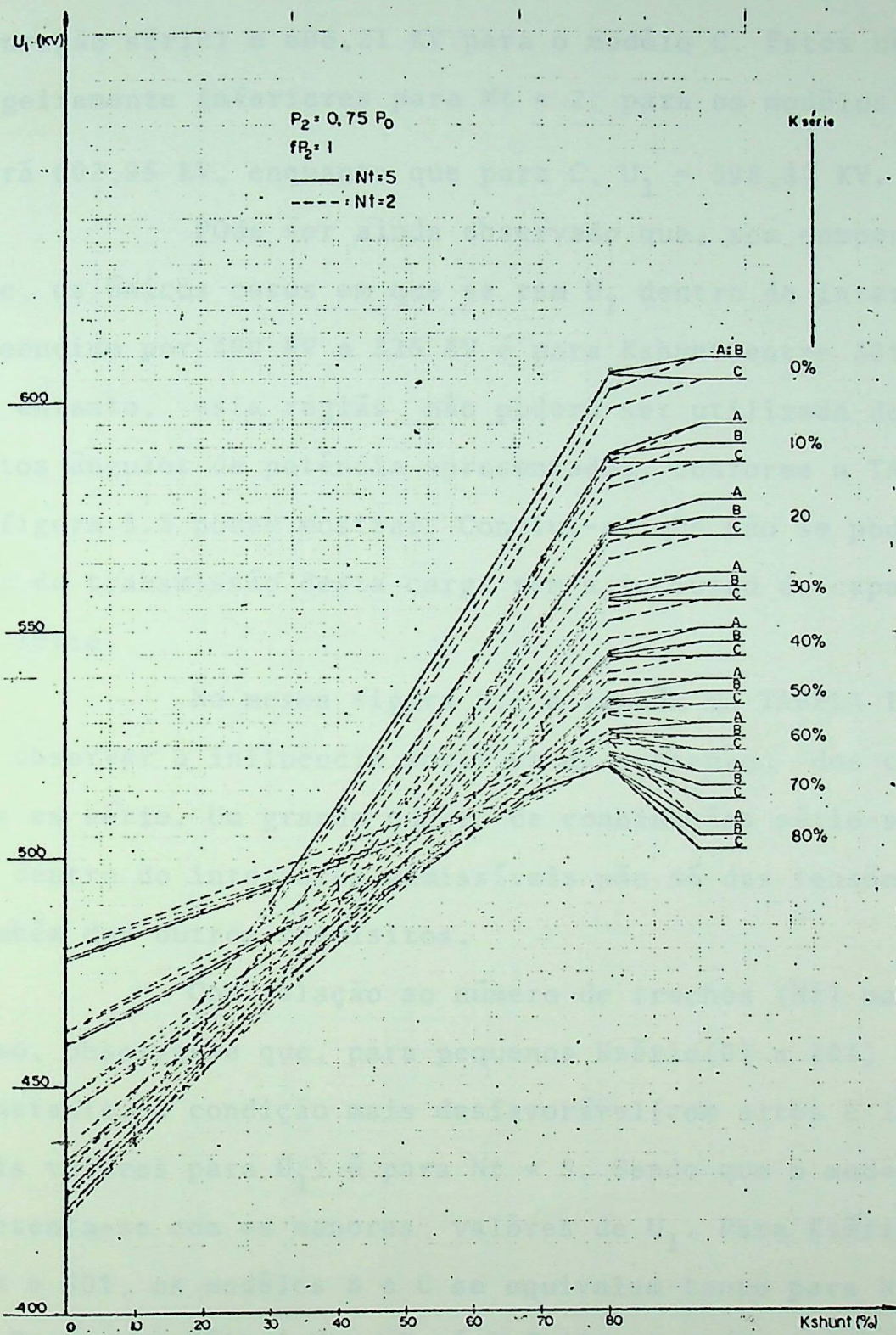


Figura 5.1 - Tensões no Transmissor x Kshunt e Ksérie.

poderá atingir valores superiores a 600 KV. Isto ocorre para $K_{shunt} = 80\%$ e $N_t = 5$, onde a tensão U_1 atinge 606,88 KV para os modelos A e B (que neste caso são iguais, pois não há compensação série) e 606,21 KV para o modelo C. Estes números são ligeiramente inferiores para $N_t = 2$: para os modelos A e B, U_1 será 602,95 KV, enquanto que para C, $U_1 = 598,87$ KV.

Pode ser ainda observado que, sem compensação série, os únicos casos em que se tem U_1 dentro do intervalo compreendido por 490 KV e 525 KV é para K_{shunt} entre 30% e 40%. No entanto, esta região não poderá ser utilizada devido aos altos ângulos de potência apresentados, conforme a TABELA I e a figura 5.3 podem mostrar. Conclui-se que não se poderá cogitar da transmissão desta carga sem a inclusão de capacitores em série.

Na mesma figura 5.1 e também na TABELA I, pode-se observar a influência positiva da presença dos capacitores em série. Um grande número de combinações série-shunt caem dentro do intervalos admissíveis não só das tensões, mas também dos outros requisitos.

Com relação ao número de trechos (N_t) mais vantajoso, observa-se que, para pequenos $K_{série}$ (0% a 20%) e K_{shunt} constante, a condição mais desfavorável (com altos e indesejáveis valores para U_1) é para $N_t = 5$. Sendo que o modelo C apresenta-se com os menores valores de U_1 . Para $K_{série}$ entre 30% e 50%, os modelos B e C se equivalem tanto para $N_t = 2$ ou 5. Porém o modelo A, $N_t = 2$, é inferior ao seu similar, para $N_t = 5$. Para altos valores de $K_{série}$, acentua-se a desvantagem do modelo A, $N_t = 2$, que terá U_1 com cerca de 4 KV acima do seu análogo, $N_t = 5$. Para os modelos B e C temos uma ligei

TABELA I - ÁREAS HACHURIADAS: SAO CASOS DENTRO DOS REQUISITOS

Kshunt (%)		0		10		20		30		40		50		60		70		80	
		2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5
0	nº de trechos	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
10	tipo de linha	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
20	nº de trechos	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
30	tipo de linha	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
40	nº de trechos	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
50	tipo de linha	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
60	nº de trechos	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
70	tipo de linha	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	
80	nº de trechos	Um < 530KV																	
		490 < U ₁ < 525																	

ra vantagem para $N_t = 2$, com relação a $N_t = 5$.

5.7.1.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

A condição de $U_{\text{máx}} \leq 530 \text{ KV}$ é obtida na maioria dos casos. Somente não será possível esta condição para pequenos graus de compensação "Ksérie" combinados a altos valores de K_{shunt} e para o modelo C, $N_t = 2$, quando de altos graus de compensação série combinados a pequenos graus de compensação em derivação. Nesta última hipótese, surgirão grandes sobretensões nos terminais dos capacitores inseridos nos meios dos trechos de linha compensados segundo o modelo C. Este problema surgirá também em outros casos, ou seja, com outras cargas, justamente pelo fato de que o modelo C possui capacitores maiores (precisamente o dobro) que aqueles dos modelos A e B. O fenômeno se agrava ainda mais quando de $N_t = 2$, pois assim teremos maiores capacitores ainda, já que ocorrerá a concentração de compensação série em poucos pontos. A figura 5.2 mostra o que foi dito com mais detalhes.

5.7.1.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

Pela figura 5.3 nota-se que sem a presença de capacitores, a transmissão se processaria com altos valores para o ângulo de potência: 53° para $K_{\text{shunt}} = 0\%$, até 38° para $K_{\text{shunt}} = 80$. Estes altos valores para θ comprometem bastante a estabilidade da transmissão.

Por outro lado, vemos que a compensação em menor número de trechos é mais vantajosa para a redução dos ângulos

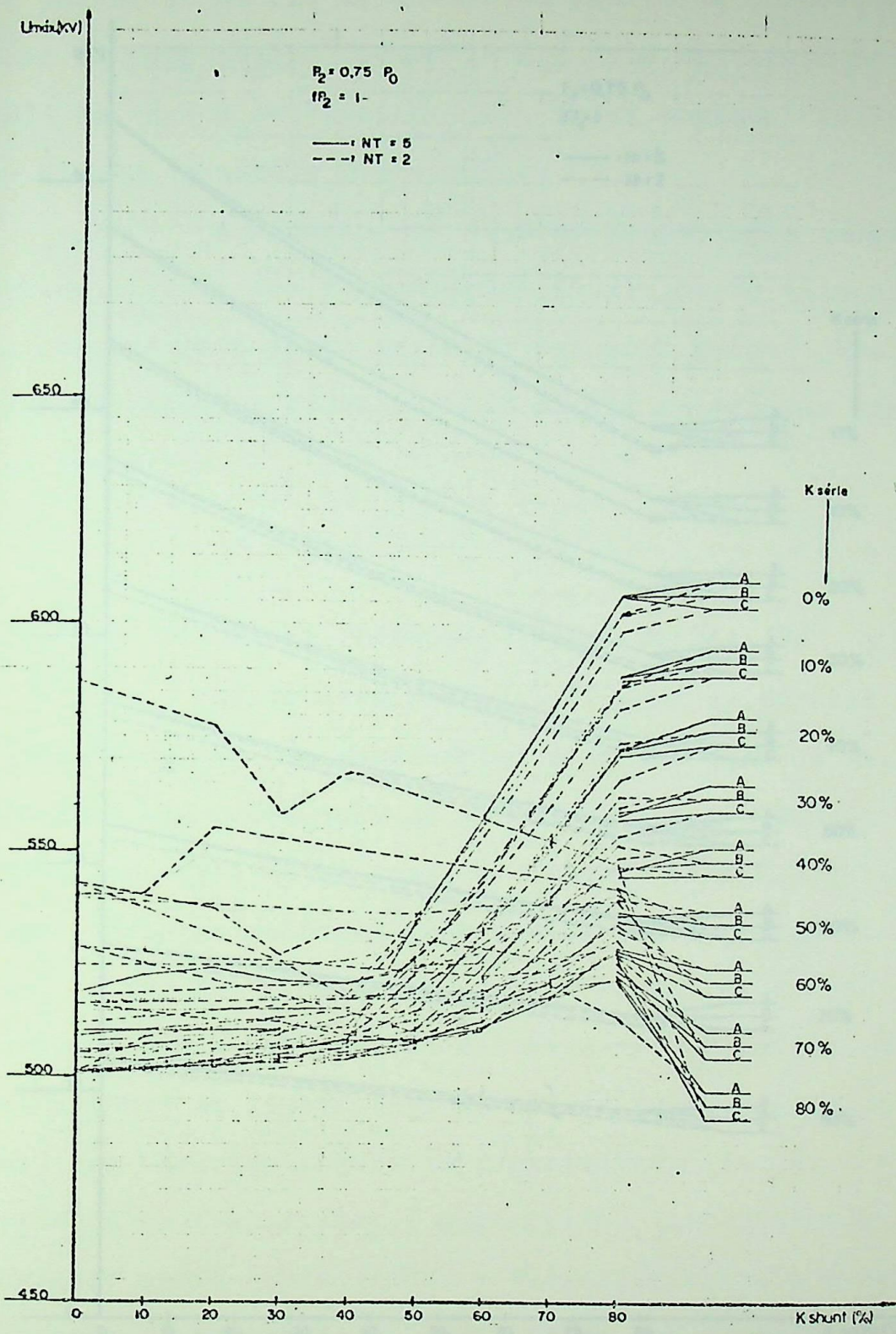


Figura 5.2 - Tensões máximas x Kshunt e Ksérie.

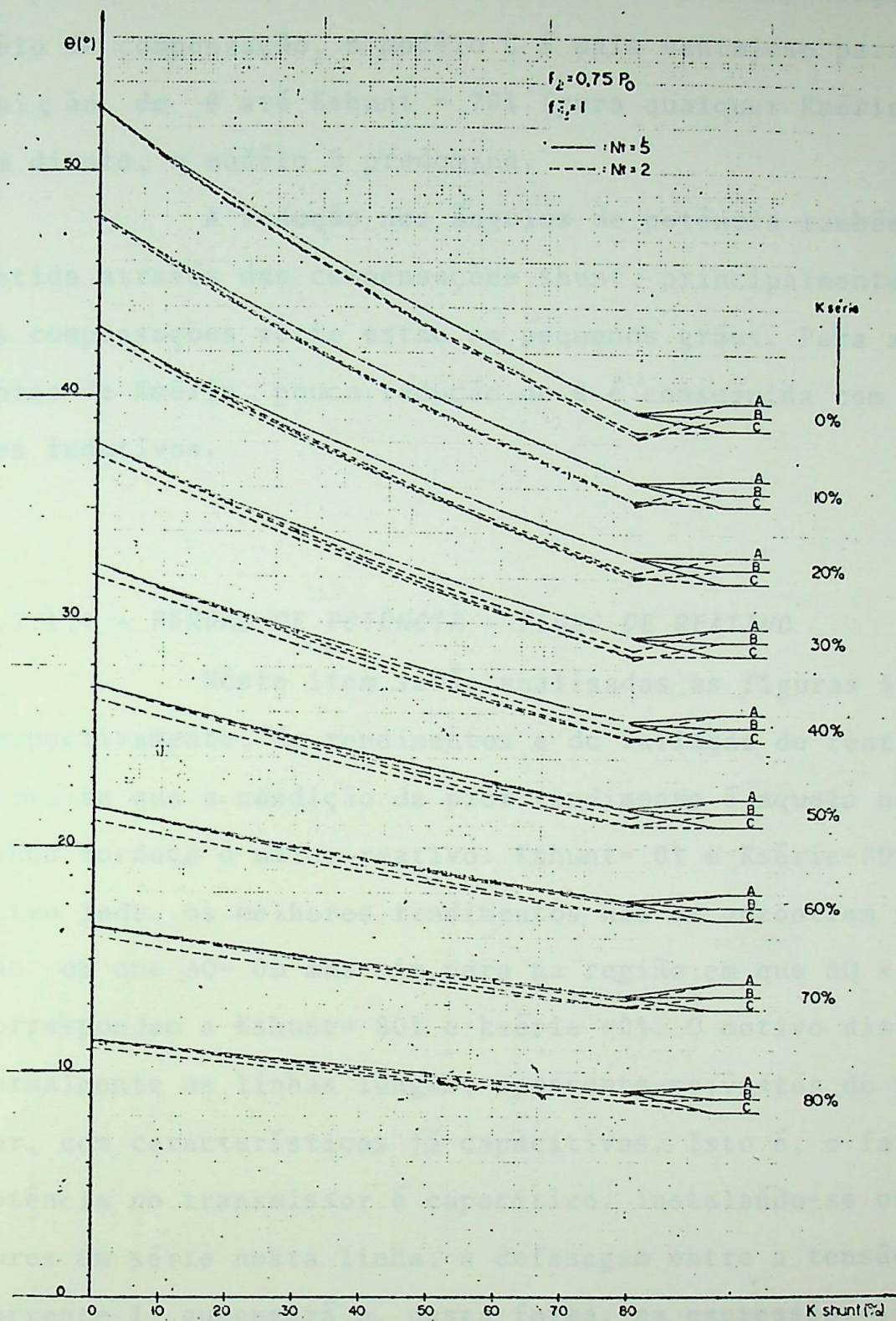


Figura 5.3 - Ângulos de Potência x Kshunt e Ksérie.

de potência. No que se refere ao modelo de compensação, o modelo de compensação, o modelo C é mais vantajoso para a diminuição de θ até $K_{shunt} = 70\%$ (para qualquer $K_{série}$). Daí em diante, o modelo B predomina.

A redução nos ângulos de potência também pode ser obtida através das compensações shunt, principalmente quando as compensações série estão em pequenos graus. Para altos valores de $K_{série}$, pouca redução de θ é conseguida com os reatores indutivos.

5.7.1.4 - PERDAS DE POTÊNCIA - FLUXO DE REATIVO

Nêste item serão analisadas as figuras 5.4 e 5.5, respectivamente, de rendimentos e de variação de reativo. Observa-se que a condição de pior rendimento é aquela na qual a linha fornece o maior reativo: $K_{shunt} = 0\%$ e $K_{série} = 80\%$. Por outro lado, os melhores rendimentos não se encontram na região em que $\Delta Q = 0$ mas sim para na região em que $\Delta Q < 0$, que correspondem a $K_{shunt} = 80\%$ e $K_{série} = 0\%$. O motivo disto é que normalmente as linhas longas, apresenta-se, vistas do transmissor, com características já capacitivas. Isto é, o fator de potência no transmissor é capacitivo. Instalando-se os capacitores em série nesta linha, a defasagem entre a tensão U_1 e a corrente I_1 aumentará e, desta forma, na expressão:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\theta_1 \quad (5.1)$$

o termo " $\cos\theta$ " decrescerá. Em decorrência, quem deverá aumentar é a corrente I_1 porque U_1 também tenderá a decrescer, já

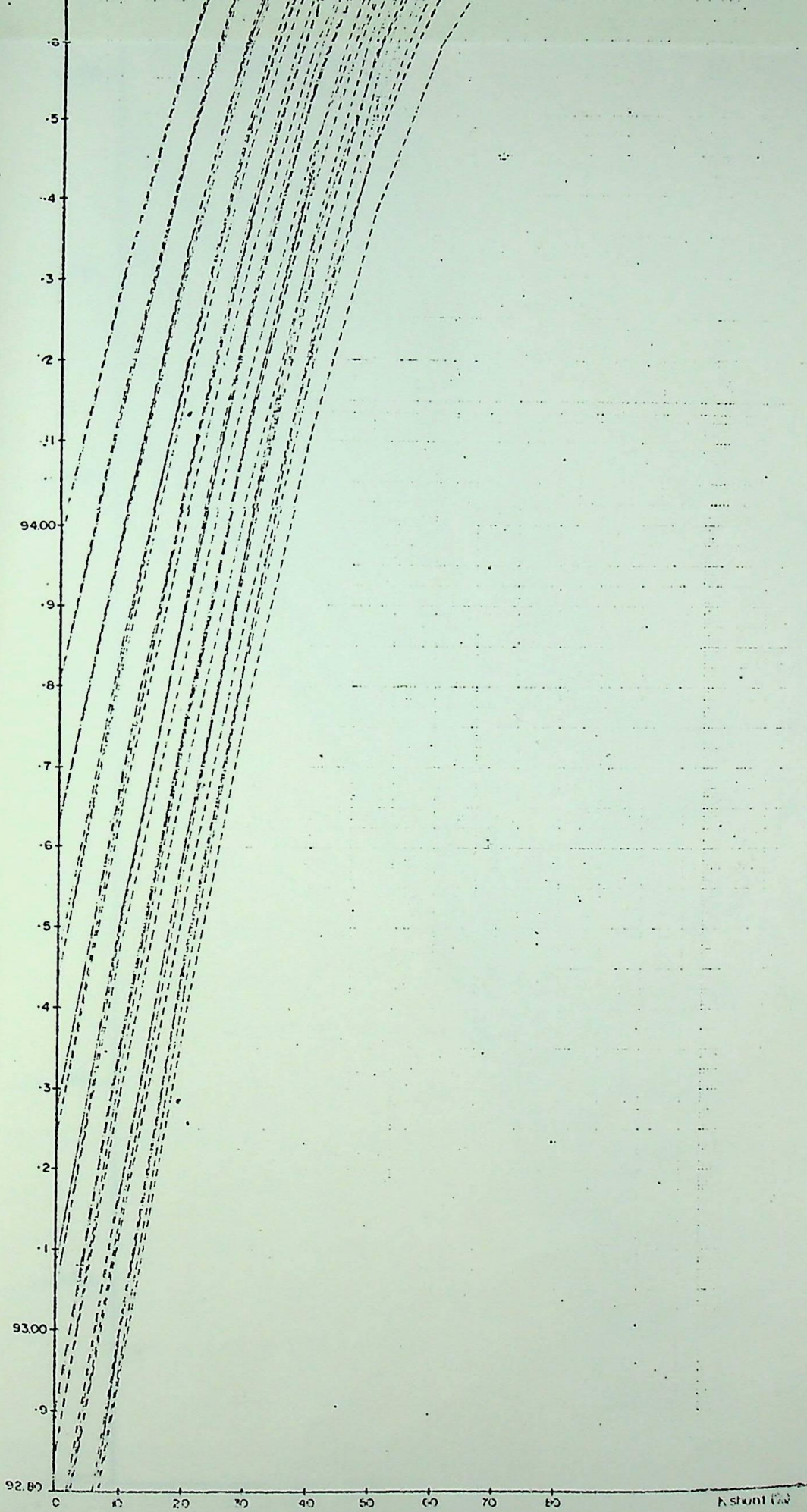


Figura 5.4 - Rendimentos x Kshunt e Ksérie.

que a reatância indutiva da linha foi diminuída e, em decor -

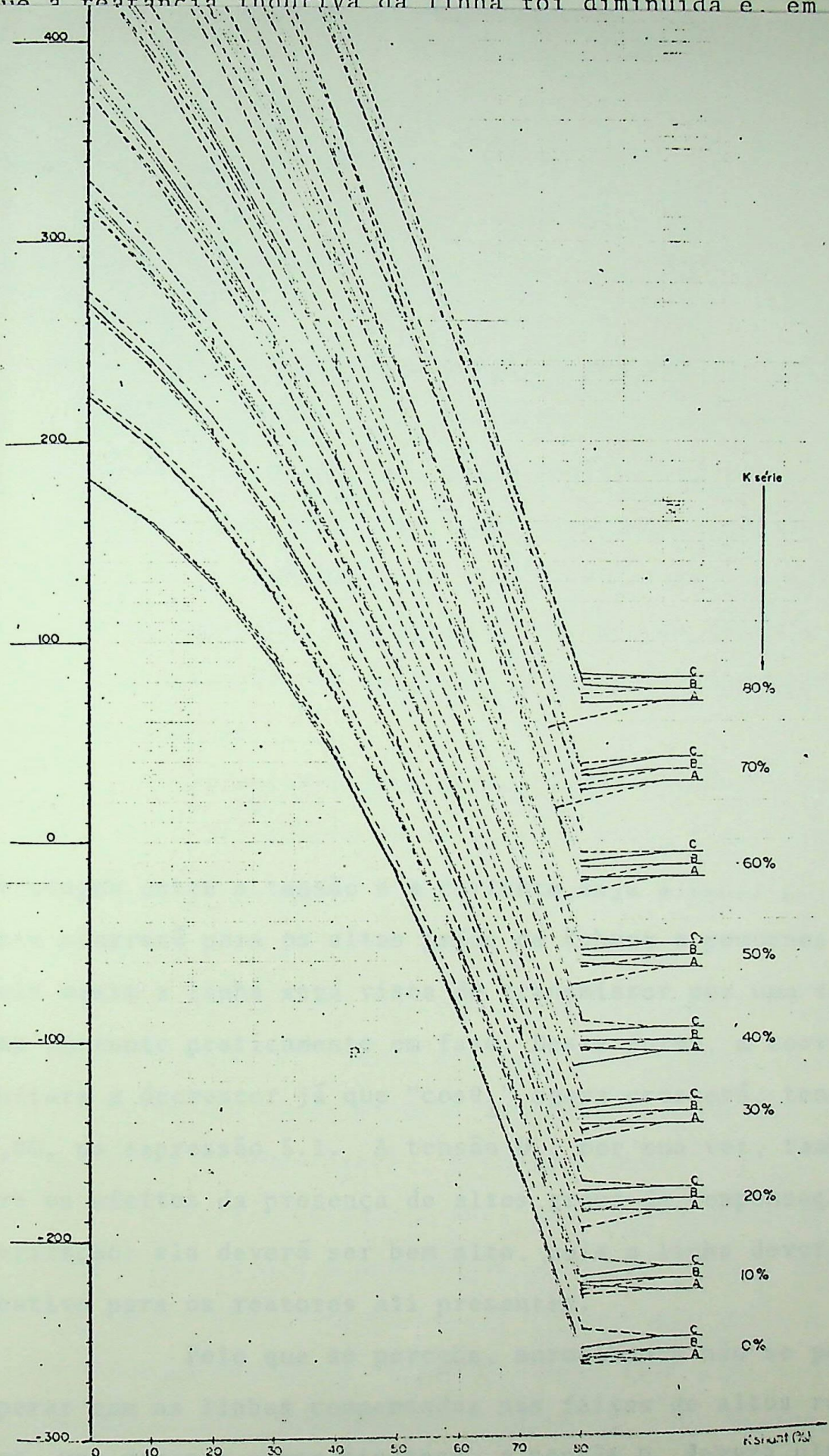


Figura 5.5 - Variações dos reativos x Kshunt e Kserie.

que a reatância indutiva da linha foi diminuída e, em decorrência, a queda de tensão ao longo da linha decresce. Ora, se U_2 está fixo em 500 KV e a queda de tensão ao longo da linha diminui, a tensão U_1 deverá decrescer.

Por outro lado, se I_1 aumenta, o rendimento da transmissão decresce, pois as perdas joulicas crescem ao quadrado da corrente.

NO APÊNDICE A é mostrada uma análise realizada em um modelo equivalente de uma linha de transmissão. A conclusão anterior é comprovada neste modelo, medindo-se os valores de tensão, corrente, fator de potência e rendimentos, antes e depois da instalação de capacitores série. Estes capacitores foram colocados inicialmente no meio da linha e, em seguida, nas extremidades da linha, e os resultados conclusivos foram semelhantes.

Os maiores rendimentos serão obtidos exatamente para quando a impedância de entrada da linha fizer com que a defasagem entre a tensão e a corrente seja a menor possível. Isto ocorrerá para os altos graus de K_{shunt} e pequenos $K_{série}$, pois assim a linha será vista do transmissor por uma tensão e uma corrente praticamente em fase. Desta forma, a corrente I_1 voltará a decrescer já que " $\cos\theta_1$ " agora crescerá, tendendo a 1,00, na expressão 5.1. A tensão U_1 , por sua vez, também sofre os efeitos da presença de altos graus de compensação em derivação: ela deverá ser bem alta, pois a linha deverá gerar reativo para os reatores ali presentes.

Pelo que se percebe, normalmente não se poderá operar com as linhas compensadas nas faixas de altos rendimentos, uma vez que nesta hipótese, a tensão U_1 deverá ultrapassar

sar o limite superior de 525 KV. Assim é que, para a carga ora analisada, o máximo rendimento acontece para a tensão U_1 por volta dos 600 KV, conforme a figura 5.1. É um valor de tensão totalmente inviável técnica e economicamente.

5.7.1.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Esta escolha se baseará fundamentalmente em observações efetuadas na TABELA I. Esta tabela apresenta todas as combinações série-shunt estudadas, relacionadas com os modelos A, B e C, bem como com os números de trechos (N_t) em que a linha foi analisada: 2 e 5. Os casos que estão dentro dos intervalos hachuriados, satisfazem às condições preliminarmente admitidas como boas. Recordando, êsses intervalos são:

$$- 490 \text{ KV} \leq U_1 \leq 525 \text{ KV}$$

$$- U_{\text{máx}} \leq 530 \text{ KV}$$

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

$$- 100 \text{ MVar} \leq \Delta Q \leq +100 \text{ MVar}$$

Aquêles casos que estiverem dentro dos intervalos acima simultaneamente, serão *aceitos*. Dentre êstes, a escolha será feita dentre os de maiores rendimentos e os que requerem menores graus de compensação, evidentemente.

Para a carga ora analisada ($P_2=0,75P_0$; $fp_2=1,00$), a TABELA I indica que a combinação mais econômica é $K_{\text{série}} = 40\%$ e $K_{\text{shunt}} = 60\%$. A mesma tabela informa que qualquer tipo de compensação ou número de trechos (N_t), de 2 a 5, satisfaz, para a combinação referida. Com relação aos rendimentos, a TABELA Ib indica que, de um modo geral, os rendimentos se equi-

TABELA 1b

n_f	Modelo	Rendimento(%)
2	A	94,96
	B	95,09
	C	95,06
5	A	95,02
	B	95,04
	C	95,03

valem. Entretanto, há uma ligeira vantagem para os modelos de compensação tipo "B".

Conforme será mostrado no capítulo 6, as compensações efetuadas em menores números de trechos custarão menos pois o menor número de subestações trará menos gastos. Além disso, os capacitores e reatores de maiores potências têm seu custo de MVAR menor que aqueles de menores potências,

Pelo exposto e analisado, indica-se como melhor opção técnica e econômica o seguinte caso:

$K_{série}=40\%$; $K_{shunt}=60\%$; $N_t= 2$; Modelo= B.

A figura 5.6 apresenta o perfil de tensão e de demais características elétricas da linha, para o caso escolhido.

5.7.2 - FATÔR DE POTÊNCIA = 0,95 CAPACITIVO ($Q_2 = -200,66 \text{ MVar}$)

5.7.2.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

A variação das tensões U_1 com esta carga poderá ser observada na figura 5.7. Nota-se a grande gama de variação dos valores de U_1 desde 372 KV (para $K_{\text{série}}=10\%$ e $K_{\text{shunt}}=0\%$) até o máximo de 520 KV (para $K_{\text{série}}=0\%$ e $K_{\text{shunt}}=80\%$).

A transmissão desta carga capacitiva faz com que o perfil das tensões no transmissor se assemelhe ao da linha operando em vazio. Assim é que para $K_{\text{série}} = K_{\text{shunt}} = 0\%$, a tensão no transmissor não poderá ultrapassar 380 KV para que se tenha no receptor os 500 KV pré-fixados. Já com $K_{\text{shunt}}=80\%$ e $K_{\text{série}} = 0\%$, U_1 terá valores satisfatórios: 521,89 KV(A e B) e 521,33 KV (C) para $N_t= 5$ e 518,3 KV(A e B) e 514,80KV(C), para $N_t= 2$.

Outra informação interessante: ao contrário do que será observado para a linha em vazio, onde tanto as compensações Série e Shunt eliminam o Efeito Ferranti (conforme será mostrado no item 5.10), para esta carga capacitiva as compensações série não eliminam o problema com a mesma intensidade da compensação shunt:

- para $K_{\text{série}} = 80\%$ e $K_{\text{shunt}} = 0\%$, as tensões no transmissor são insatisfatórias: 454,91 KV(A e B) e 454,91 KV (C), para $N_t= 5$ e, 454,17 KV(A e B) e 455,52 KV(C), para $N_t = 2$.

- para $K_{\text{shunt}} = 80\%$ e $K_{\text{série}} = 0\%$, os resultados são bons, conforme já relatado no parágrafo anterior.

A TABELA II e a Figura 5.7 mostram que são poucos casos que se enquadram no intervalo $490 \text{ KV} \leq U_1 \leq 525 \text{ KV}$.

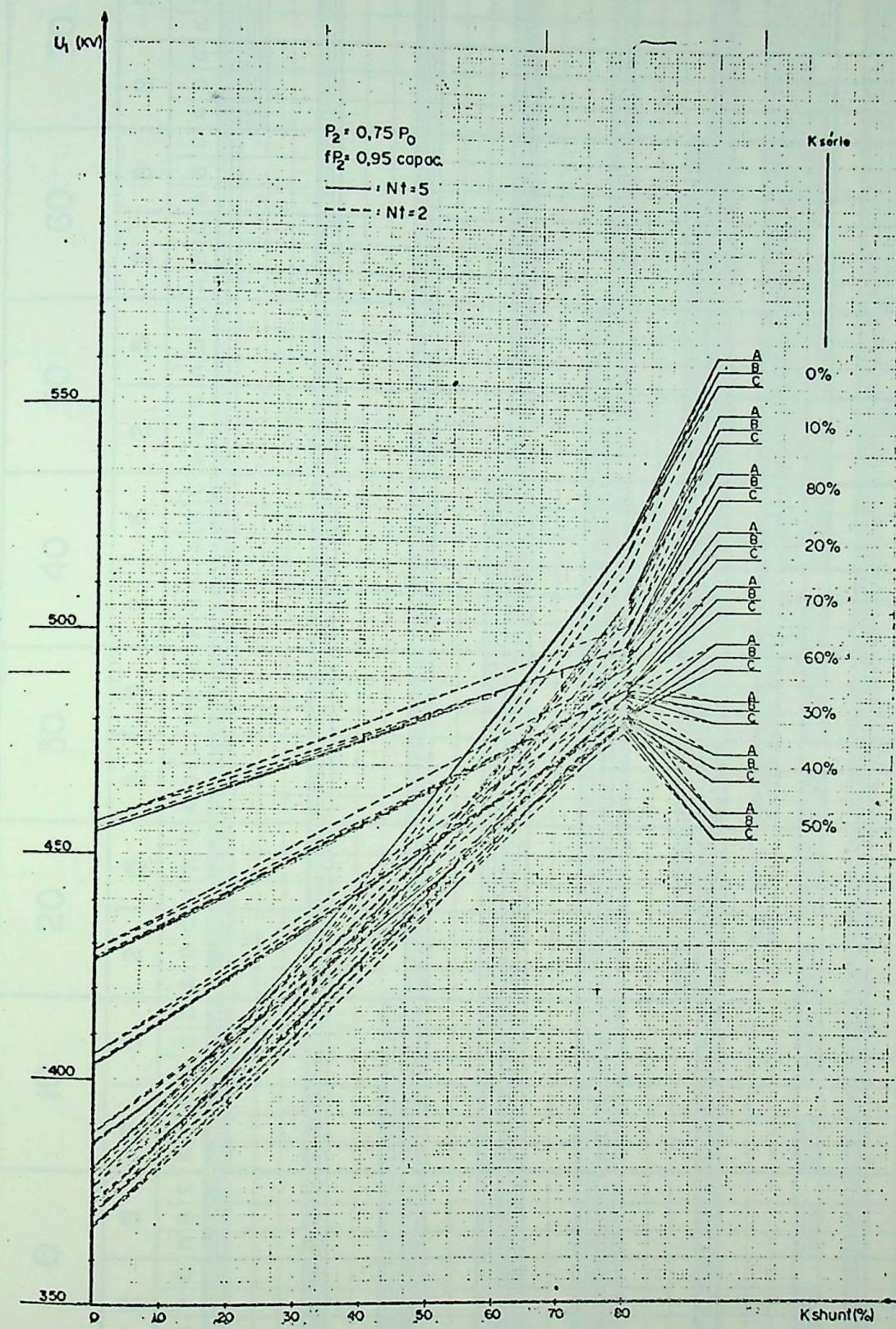


Figura 5.7 - Tensões no Transmissor x Ksérie e Kshunt.

5.7.2.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

Na figura 5.8 observa-se que raros são os casos em que algum ponto da linha excede a tensão máxima admitida de 530 KV. Entretanto, a figura 5.7 mostra que isso ocorre porque a maioria das tensões no transmissor eram bem abaixo de 500 KV. Ou seja, sobretensões, com relação ao transmissor, existem (e muitas), mas com relação à referência, que é o receptor com 500 KV, poucas. Como esta análise se refere às sobretensões relativas ao receptor, ou melhor, aos 500 KV, esta observação não invalida os resultados mostrados na figura 5.8.

As sobretensões atingem principalmente às compensações efetuadas em dois trechos. Novamente, os pontos de sobretensões maiores se encontram onde os capacitores estão instalados, conforme as figuras 5.9a, 5.9b e 5.9c evidenciam para $N_t = 5$ e a figura 5.10, para $N_t = 2$. Nesta última figura, o modelo C apresenta o capacitor mais próximo do transmissor submetido à tensão de 150 KV. Todos os casos mostrados nas figuras 5.9 e 5.10 são para $K_{série} = 80\%$ e $K_{shunt} = 10\%$, que é justamente uma das regiões mais críticas neste aspecto, pois envolve um alto grau de compensação série com um pequeno grau de compensação em derivação.

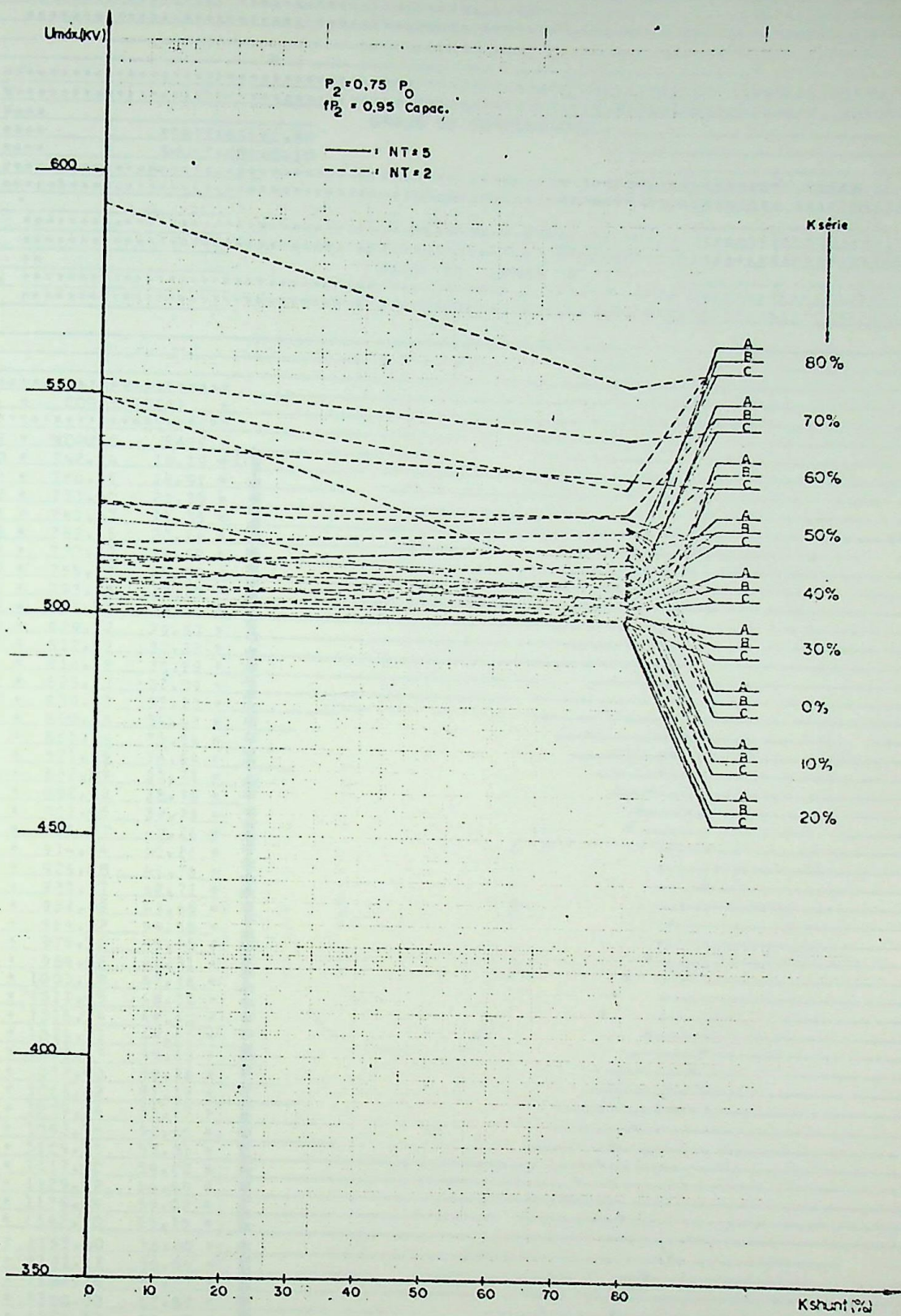


Figura 5.8 - Tensões máximas ao longo da linha x Kshunt e Ksérie.

 DADOS DE ENTRADA
 RESISTENCIA=0.021000HMS/KM INDUTANCIA=0.8655E-03HENRYS/KM
 CONDUTANCIA=0.000600SIFMENS/KM CAPACITANCIA=0.9177E-08FAR-DS/KM
 FREQUENCIA=60.0HERTZ COMP.LINHA=1000.0KM TENSÃO RECEPTOR=500.00KV
 POT.RECEP(LATIVO)=610.50MW POT.RECEP(REAT)=200.66MVAR NUM.TRECHOS=5

 GRAUS DE COMPENSAÇÃO
 SERIE(KS)=0.90
 SHUNT(KD)=0.10

 TIPO DE LINHA A

TENSÃO(KV)		CORRENTE(A)	
MODULO	FASE	MODULO	FASE
500.00	0.00	742.04	18.19
506.51	-2.63	746.35	18.91
505.85	-1.77	752.92	20.35
503.10	-0.85	761.57	21.75
500.25	0.08	762.35	22.14
497.22	1.02	777.22	24.49
494.22	1.89	785.17	25.82
491.22	2.95	793.18	27.13
488.01	3.95	801.23	28.41
484.76	4.95	809.32	29.67
498.21	2.10	812.62	30.28
511.32	-0.59	818.59	30.89
507.55	0.32	823.27	32.09
503.08	1.27	837.73	32.27
498.52	2.23	850.56	34.42
493.82	3.22	861.14	35.54
489.18	4.22	871.55	36.64
484.40	5.24	882.09	37.71
479.56	6.29	892.42	38.76
474.67	7.26	902.55	39.78
469.13	8.39	909.87	40.26
511.93	1.53	914.04	40.79
508.83	2.53	926.88	41.76
499.74	3.56	935.57	42.71
493.53	4.57	952.09	43.65
487.25	5.60	964.42	44.56
480.92	6.67	975.56	45.45
474.53	7.76	986.48	46.31
468.12	8.89	1000.18	47.16
461.67	10.04	1011.65	48.00
484.93	6.86	1016.34	48.40
508.63	4.02	1024.31	49.00
500.66	5.02	1033.42	49.60
493.23	6.05	1052.40	50.38
485.44	7.12	1066.02	51.13
477.60	8.23	1079.34	51.87
469.74	9.37	1092.36	52.60
461.85	10.55	1105.09	53.31
453.97	11.75	1117.40	54.00
446.09	13.09	1129.42	54.69
473.92	9.64	1134.24	55.02
502.18	6.61	1142.70	55.25
492.99	7.67	1157.60	56.00
483.75	8.78	1172.12	56.64
474.49	9.93	1186.26	57.27
465.21	11.13	1200.00	57.89
455.93	12.37	1213.33	58.49
446.67	13.68	1226.25	59.08
437.45	15.03	1238.74	59.66
428.29	16.45	1250.80	60.23
460.10	12.70	1255.51	60.31

 325 400 450 500 550 600

Figura 5.9a - Perfil de tensão para o modelo "A", Nt=5.
 Kshunt=10% e Ksérie=80% - P₂=0,75 Po - fp₂=0,95 C.

TIPO DE LINHA B

TENSÃO (KV)		CORRENTE (A)	
MODULO	FASE	MODULO	FASE
500.00	0.00	742.04	18.19
508.95	-2.68	745.70	18.91
506.90	-1.77	753.25	20.35
503.55	-0.85	760.93	21.76
500.71	0.08	768.72	23.15
497.77	1.07	776.60	24.51
494.25	1.98	784.56	25.84
491.65	2.84	792.58	27.15
488.46	3.64	800.65	28.43
485.71	4.38	808.76	29.69
498.20	2.10	812.83	30.91
512.37	-0.52	814.09	30.92
507.99	0.33	823.79	32.12
503.57	1.27	833.47	33.30
498.96	2.23	852.12	34.45
494.32	3.21	860.72	35.57
488.61	4.21	871.26	36.67
484.83	5.24	881.71	37.75
479.98	6.28	892.07	38.80
475.06	7.35	902.32	39.82
493.11	4.58	907.41	40.93
512.36	1.63	913.92	40.92
506.30	2.58	926.66	41.82
500.16	3.56	937.37	42.76
493.95	4.57	951.91	43.68
487.66	5.60	964.27	44.60
481.37	6.65	975.43	45.49
474.93	7.75	988.39	46.36
468.50	8.88	1000.71	47.21
462.05	10.03	1011.59	48.04
484.68	6.83	1017.26	48.45
509.04	4.02	1024.35	48.85
501.37	5.02	1038.56	49.55
493.62	6.05	1052.49	50.43
495.83	7.12	1066.14	51.19
477.86	8.22	1079.48	51.93
470.10	9.36	1092.52	52.65
462.21	10.54	1105.22	53.36
454.31	11.77	1117.62	54.06
446.42	13.04	1129.65	54.74
438.74	9.62	1135.56	55.07
502.56	6.61	1143.04	55.40
493.36	7.67	1157.96	56.06
484.11	8.77	1172.50	56.70
474.82	9.92	1186.66	57.32
465.54	11.12	1200.43	57.94
456.25	12.37	1213.79	58.54
446.97	13.67	1226.72	59.13
437.74	15.02	1239.24	59.71
428.66	16.44	1251.32	60.28
419.99	12.59	1257.22	60.56

325 400 450 500 550 600 U

Figura 5.9b - Perfil de tensão para o modelo "B", Nt = 5.
 Kshunt=10%, Ksérie=80% - P₂=0,75Po - fp₂=0,95cap.

TIPO DE LINHA C

TENSÃO (KV)		CORRENTE (A)	
MODULO	FASE	MODULO	FASE
500.00	0.00	742.04	18.19
497.96	0.93	745.03	18.92
495.83	1.88	751.25	20.35
493.61	2.83	757.59	21.75
491.31	3.80	764.05	22.13
516.81	-2.53	770.61	24.56
513.72	-1.64	780.06	25.91
509.66	-0.73	789.58	27.23
505.92	0.19	799.15	28.52
502.11	1.13	808.76	29.78
498.22	2.08	813.58	30.40
494.43	3.05	819.16	31.01
490.58	4.04	827.40	32.22
486.66	5.05	836.64	33.40
482.67	6.07	845.89	34.56
520.24	-0.41	855.03	35.70
515.00	0.49	867.35	36.91
509.65	1.42	879.40	37.89
504.21	2.38	891.45	38.94
498.69	3.35	903.32	39.97
493.09	4.35	909.33	40.47
487.65	5.37	914.93	40.96
482.14	6.42	926.20	41.95
476.58	7.49	937.31	42.90
470.97	8.58	948.25	43.84
520.22	1.84	959.03	44.76
513.31	2.78	973.08	45.66
506.30	3.75	986.93	46.53
499.21	4.75	1000.55	47.38
492.05	5.77	1013.94	48.21
484.84	6.83	1027.56	48.62
477.79	7.92	1026.77	49.02
470.71	9.05	1029.19	49.81
463.60	10.21	1051.32	50.59
456.48	11.41	1063.15	51.35
516.86	4.27	1074.73	52.10
508.25	5.25	1089.88	52.82
499.75	6.27	1104.71	53.54
491.10	7.33	1119.21	54.23
482.40	8.43	1133.36	54.91
473.66	9.57	1140.32	55.24
465.12	10.75	1146.81	55.57
456.58	11.98	1159.72	56.22
448.04	13.25	1172.26	56.86
439.54	14.59	1184.41	57.49
510.22	4.89	1195.16	58.11
500.30	7.04	1211.85	58.71
490.22	9.03	1227.12	59.30
480.11	10.17	1241.97	59.88
469.98	11.37	1256.38	60.45
459.85	12.61	1263.45	60.72

Figura 5.9c - Perfil de tensão para o modelo "C", Nt = 5.

Kshunt=10%, Ksérie=80% - $P_2=0,75P_o$ - $fp_2=0,95cap.$

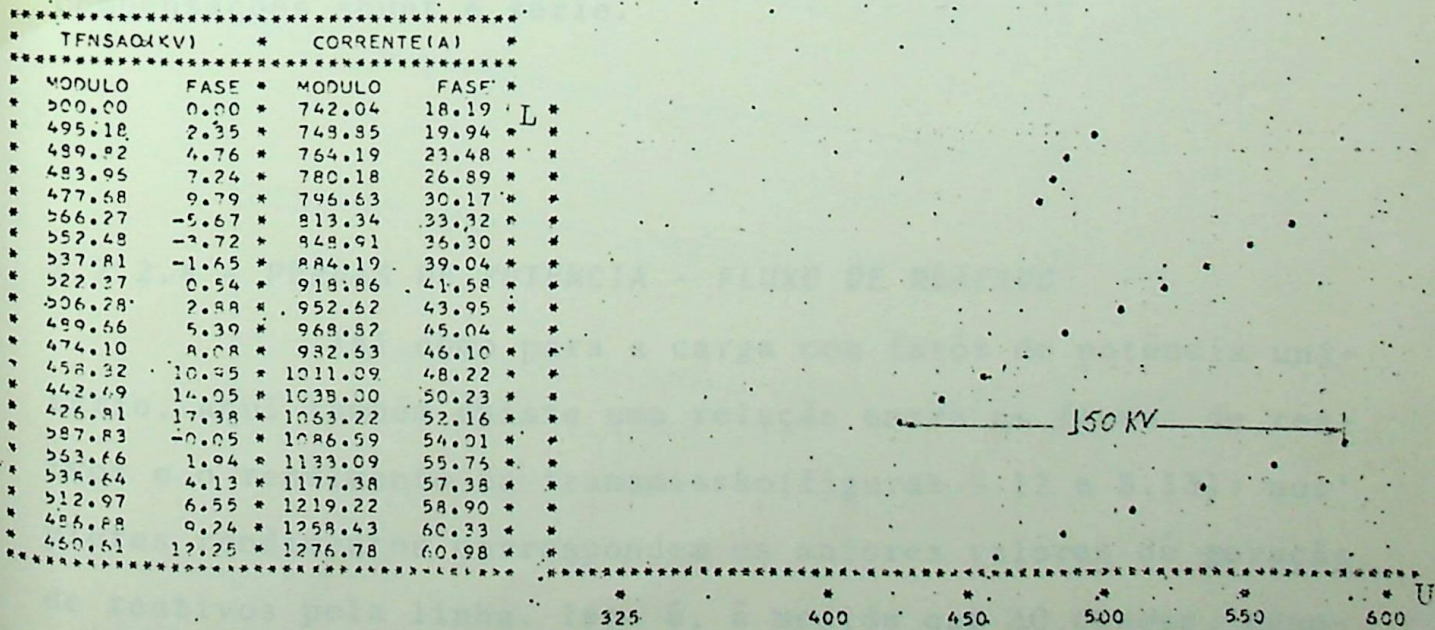


Figura 5.10 - Perfil de tensão para os modelos "A", "B" e "C".

$K_{shunt}=10\%$, $K_{série}=80\%$ - $P_2=0,75Po$ - $fp_2=0,95$ $cap.Nt=2$.

5.7.2.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

Para cargas capacitivas, os ângulos de potência são maiores que aqueles para cargas indutivas, considerando a mesma carga ativa e o mesmo fator de potência em valor numérico. As condições de estabilidade transitórias são mais sensíveis neste caso.

Pela figura 5.11, a linha sem compensações, operaria com $\theta = 66,38^\circ$, ao passo que para fator de unitário, este número seria $52,81^\circ$ e, para fator de potência indutivo igual a 0,95, $\theta = 42,51^\circ$.

Também aqui nesta carga as compensações em menor número de trechos favorece a diminuição dos ângulos de potência. Com relação aos modelos, o tipo "C" possui os menores ângulos de potência até $K_{shunt} = 70\%$ e $K_{série}$ constante. Acima de $K_{shunt} = 70\%$ (também para $K_{série}$ constante) prevalece o modelo "B". O modelo "A", no que se refere aos ângulos de potência, é o mais desfavorável, em qualquer condição de combinações das compensações shunt e série.

5.7.2.4 - PÊRDAS DE POTÊNCIA - FLUXO DE REATIVO

Tal como para a carga com fator de potência unitário, aqui também existe uma relação entre os fluxos de reativos e o rendimento da transmissão (figuras 5.12 e 5.13): aos piores rendimentos correspondem os maiores valores de geração de reativos pela linha. Isto é, à medida que ΔQ cresce, menores são os rendimentos da transmissão.

$P_2 = 0,75 P_0$
 $fP_2 = 0,95 \text{ capac.}$

— $N_1 = 5$
 - - - $N_1 = 2$

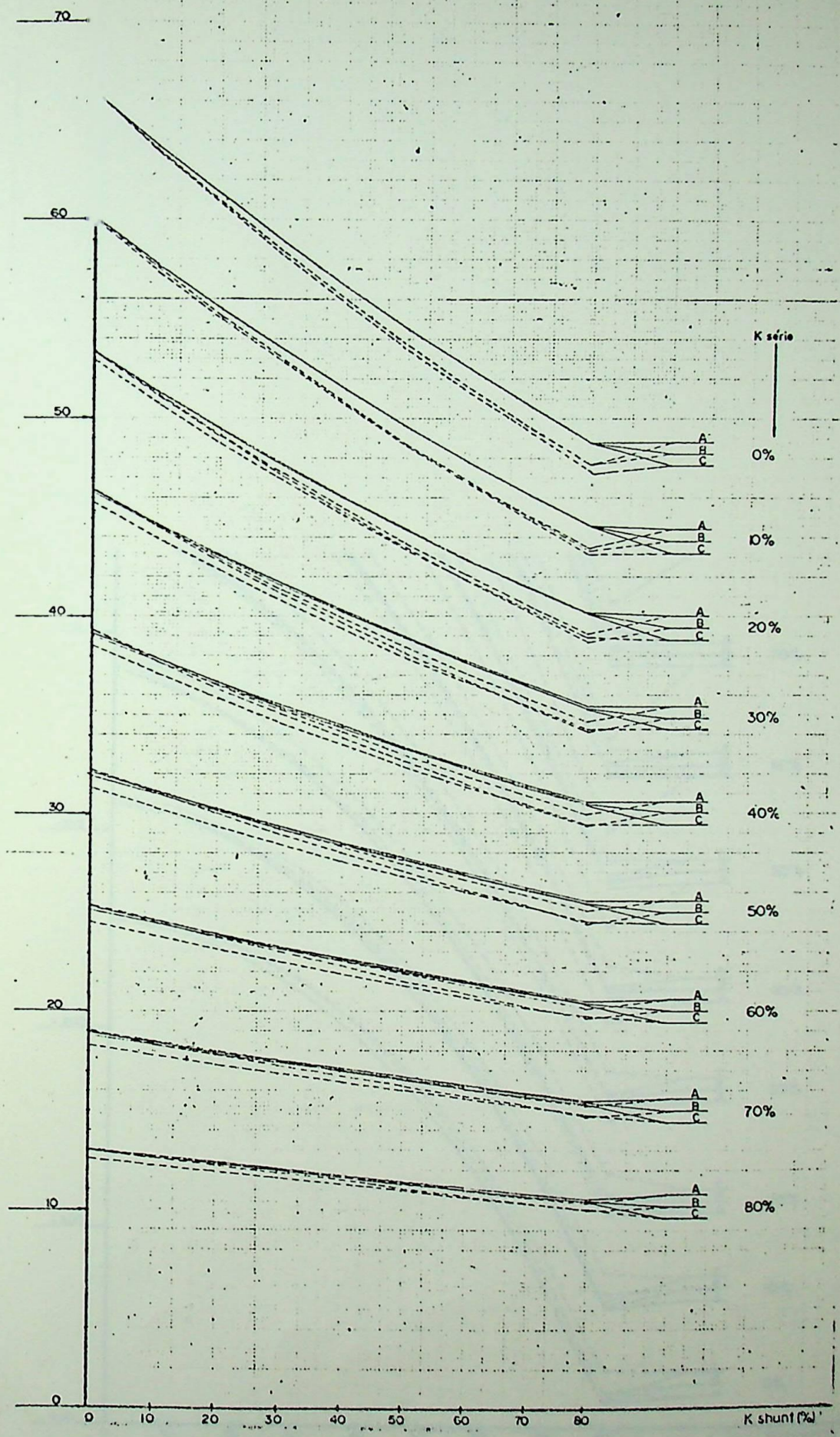


Figura 5.11 - ângulos de Potência x Kshunt e Ksérie.

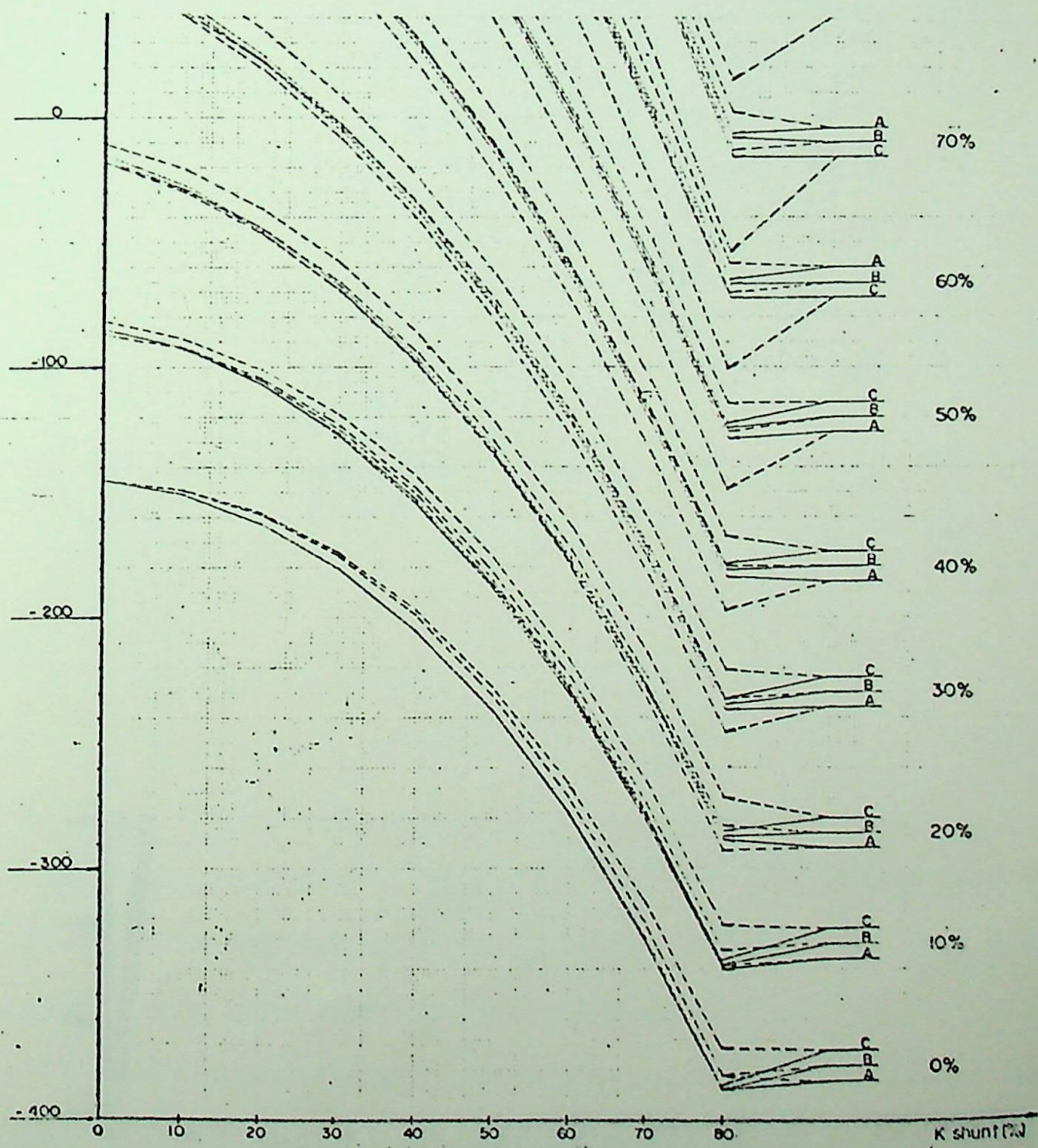


Figura 5.12 - Variações dos Reativos com Kshunt e Ksérie.

Por outro lado, à medida que a linha passa a absorver reativo, o rendimento vai aumentando. Desta forma, quanto mais negativo for ΔQ , melhor será o rendimento. Em vista disto, não haverá maiores inconvenientes em se operar na faixa de ΔQ inferior a -100 MVar, pelo menos à primeira vista. Entretanto, em uma observação mais cuidadosa, nota-se que de pouco valerá a permissão acima, uma vez que, para a linha absorvendo reativo, as tensões ao longo da mesma deverão superar os 530 KV, na maioria das ocasiões. Assim sendo, será aceito aquele caso que preencher os requisitos de U_1 , $U_{m\acute{a}x}$ e θ e não estiver dentro dos limites de ΔQ , desde que seu rendimento supere os demais. Esta consideração se faz necessária, pois assim se nota que o estudo da variação de reativo dá uma boa visão do bom comportamento da linha, porém não é a palavra final.

A figura 5.13 se comparada com a figura 5.4 evidencia os baixos rendimentos das linhas de transmissão quando transportam cargas capacitivas.

5.7.2.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Esta escolha se efetivará com o auxílio da TABELA II. Dela são retirados os casos que satisfazem simultaneamente aos limites de U_1 , $U_{m\acute{a}x}$, θ e ΔQ ou ainda, que não atenda aos limites de ΔQ mas que preencha os requisitos das demais condições, com rendimentos compatíveis.

Desta forma, constata-se a existência de dez casos com comportamentos bastante bons, havendo ainda um décimo primeiro caso, que atende às exigências de U_1 , $U_{m\acute{a}x}$ e θ , mas

que apresenta uma geração de reativo superior aos 100 MVar :
 $\Delta Q = -151 \text{ MVar}$.

Nos quadros abaixo, da TABELA I Ib, tem-se os rendimentos dos onze casos referidos:

TABELA I Ib - rendimentos dos melhores casos.

K série (%)	K shunt (%)	70					
	n_t	60	2		5		
	Modêlo	A	A	B	A	B	C
80	n (%)	93,42	93,78	94,02	93,83	93,86	93,83

K série (%)	K shunt (%)	80				
	n_t	2		5		
	Modêlo	A	B	A	B	C
80	n (%)	94,08	94,38	94,14	94,19	94,15

Da tabela acima, conclue-se que os melhores rendimentos estão com os modêlos "B". Quanto ao número de trechos os maiores rendimentos estão com as compensações efetuadas em menor número de trechos. Assim é que, em têrmos de rendimento a melhor opção é $K_{shunt} = K_{série} = 80\%$, modêlo "B", $N_t = 2$.

Poder-se-ia pensar em tomar como melhor opção a condição: $K_{shunt} = 60\%$, $K_{série} = 80\%$, modêlo "A", $N_t = 2$. Isto, em decorrência da economia no gráu de compensação Shunt do 20%. Deve ser levado em consideração, por outro lado, que o rendimento da transmissão, nesta hipótese, é inferior ao rendimento da combinação $K_{shunt} = K_{série} = 80\%$. Esta possui $\eta = 94,38\%$ contra $\eta = 93,42\%$ de $K_{shunt} = 60\%$ e $K_{série} = 80\%$. Esta perda de rendimento (0,96%), decorre do alto valôr de ΔQ , que nêsse caso é de 151 MVar, valôr superior aos 100 MVar. Em têrmos de potê

cia, esta perda significa $0,96.610,50\text{MW}/100 = 5,86\text{MW}$, aproximadamente.

Como se pode observar, a escolha da melhor opção é muito relativa: para determinada empresa energética esta perda pode ser significativa ou não, e mais, dependendo dos bancos de reatores a serem instalados, pode acontecer que, dependendo do que requerer outra carga a ser transmitida, o valor de Kshunt tenha que ser necessariamente 80%. Isto é, poderá ocorrer que tenhamos instalado ao longo da linha um banco de reatores que contenha uma potência reativa até superior a 80%. Caso isso ocorra (e ocorrerá, como se verá adiante), não haverá motivos pra o uso de Kshunt= 60%, o qual dará menor rendimento, sem contudo, proporcionar economia de custos.

Desta forma, serão destacados como opções válidas para a escolha final, os seguintes casos, todos eles envolvendo $N_t = 2$ e os maiores rendimentos em cada combinação Série-Shunt:

Ksérie=80% - Kshunt=60% - modelo "A" - $N_t=2$.

Ksérie=80% - Kshunt=70% - modelo "B" - $N_t=2$.

Ksérie=80% - Kshunt=80% - modelo "B" - $N_t=2$.

Após as análises de todas as cargas, apreciaremos em capítulo seguinte, todos os casos globalmente. Desta forma, poderá ser obtida uma melhor otimização da linha compensada.

5.7.3 - FATÔR DE POTÊNCIA = 0,95 INDUTIVO($Q_2 = 200,66$ MVar)

5.7.3.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

Ao compararmos os gráficos das variações das tensões no transmissor das duas cargas já vistas (Figuras 5.1 e 5.7) com o gráfico da situação atual, notaremos as desvantagens de se operar com fator de potência não unitário, no que se refere a U_1 . As cargas indutivas, nêsse particular trazem o maior número de problemas: a figura 5.14 apresenta um número bastante restrito de casos em que se pode operar com a linha, no intervalo de 490KV a 525KV para U_1 .

A presença dos reatores indutivos aumenta rapidamente a queda de tensão na linha, causando grandes valores para a tensão no transmissor. É exatamente o oposto do que ocorre com a carga, quando sua característica é capacitiva, onde os maiores problemas eram com o Efeito Ferranti.

Para uma compensação shunt de 80%, sem compensação série acompanhante, a tensão no transmissor atingiria os seguintes valores proibitivos:

- Para $N_t = 5$:

Modêlos A e B (que são iguais, pois $K_{série} = 0\%$): 704,14 KV.

Modêlo C: 703,39 KV.

- Para $N_t = 2$:

Modêlos A e B: 698,74 KV.

Modêlos C: 694,17 KV.

A simples introdução de capacitores série, sem a presença de reatores indutivos pode levar a situações curiosas como esta: para $K_{série} = 70\%$ e $K_{shunt} = 0\%$, a tensão U_1 no modê

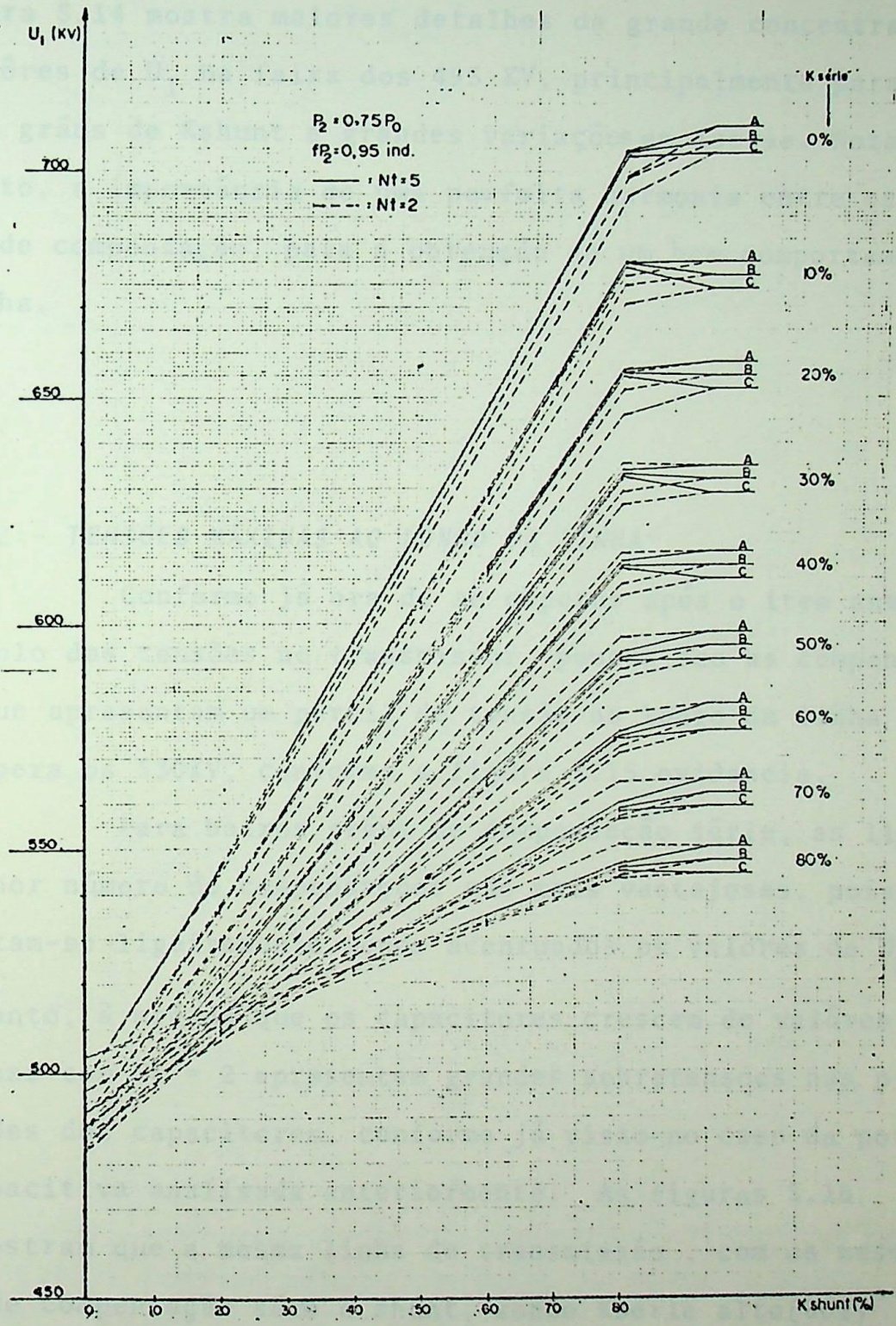


Figura 5.14 - Variação de tensões no transmissor, segundo os graus de compensação série e shunt. $U_2 = 500 \text{ KV}$

lo C, $N_t = 2$, é 492,10 KV, enquanto que, alterando o grau de compensação série de 70% para 10% e mantendo tôdas as demais condições, a tensão U_1 praticamente não se altera: 492,50 KV. A figura 5.14 mostra maiores detalhes da grande concentração de valores de U_1 na faixa dos 495 KV, principalmente para pequenos graus de K_{shunt} e grandes variações em $K_{série}$. Nota-se com isto, a importância de uma perfeita harmonia entre os dois graus de compensação, para a obtenção de um bom comportamento da linha.

5.7.3.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

Conforme já era de se esperar após o item anterior, a exemplo das tensões no transmissor, poucas são as compensações que apresentam um perfil de tensão ao longo da linha que não supera os 530KV, conforme a figura 5.15 evidencia.

Para baixos graus de compensação série, as linhas com menor número de compensações são mais vantajosas, pois apresentam-se ligeiramente menos acentuados os valores de $U_{máx}$. Entretanto, à medida que os capacitores crescem de valores, as linhas com $N_t = 2$ apresentam grandes sobretensões nas proximidades dos capacitores, conforme já visto no caso da potência capacitiva analisada anteriormente. As figuras 5.16 e 5.17 mostram que a mesma linha de transmissão, com os mesmos graus de compensação série e shunt, sendo $K_{série}$ alto(80%) e K_{shunt} baixo(20%), se $N_t = 2$, não haverá condições de operar-se com êla, ao passo que com $N_t = 5$, o perfil de tensões é bem mais suave. Mas poderá ainda ser observado que nas proxi-

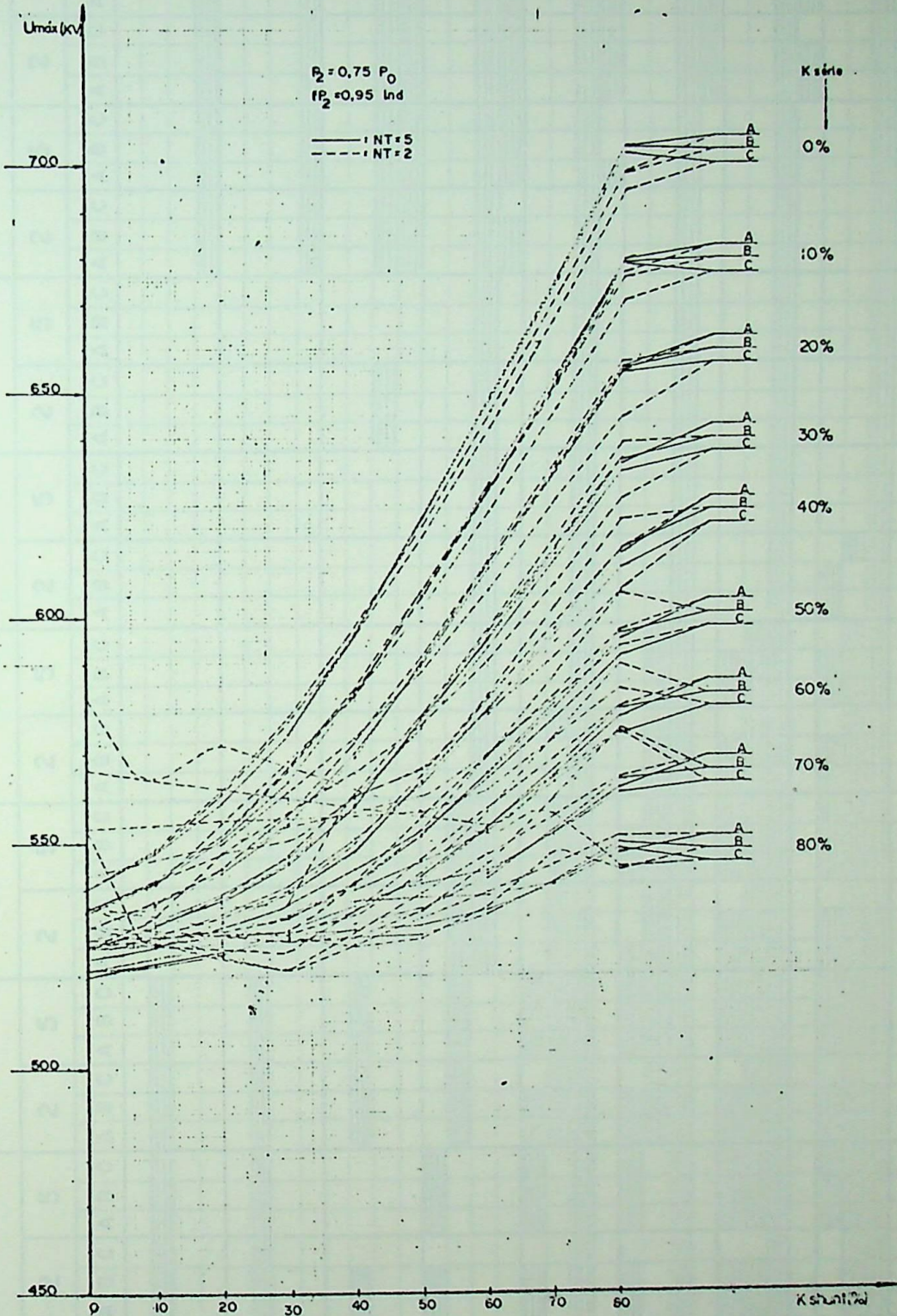


Figura 5.15 - Tensões máximas ao longo da linha x Kshunt e Ksérie. $U_2 = 500 \text{ KV}$.

TABELA III - ÁREAS HACHURIADAS: SAO CASOS DENTRO DOS REQUISITOS

$P_2 = 0,75 P_0$ $f_{P_2} = 0,95$ IND.

Kserie (%)	Kshunt (%)		0		10		20		30		40		50		60		70		80				
	nº de trechos		2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2	5			
	tipo de linha		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
10	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
20	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
30	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
40	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
50	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
60	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
70	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						
80	Um < 530KV																						
	490 < Um < 525																						
	e < 30°																						

midades do transmissor, o modelo "C", mesmo para $N_t = 5$, apresenta-se com um valôr de tensão superior aos 530 KV: exatamente no capacitor, lê-se 535,86 KV.

A TABELA III nos dá uma visão do pequeno número de casos que se enquadram dentro dos limites de U_1 e $U_{m\acute{a}x}$.

Por outro lado, os menores valôres de $K_{s\acute{e}rie}$, associados ou não com compensações shunt, não apresentam condições de se enquadrarem no limite de 530 KV, já que a carga indutiva, por si só, já provoca elevadas quedas de tensão. Se reatores indutivos forem introduzidos, a situação ficará ainda mais crítica: a partir do meio da linha até o transmissor, elevados valôres de tensão são observados, tanto para $N_t = 2$ ou 5. A figura 5.18 apresenta a linha com $K_{shunt} = 30\%$ e $K_{s\acute{e}rie} = 20\%$. Nela observa-se a inconveniência de se operar com pequenos grãus de compensação série.



DADOS DE ENTRADA

RESISTENCIA=0.021000HMS/KM INDUZANCIA=0.8655E-08LENR/G/KM

CONDUTANCIA=1.000E-08SIFEM/KM CAPACITANCIA=0.9177E-08FACAD3/KM

FREQUENCIA=60.0HERTZ COEF.LINHA=100.0KM TENSAO_RECEPTOR=500.00KV

POT.RECEPTIVA=610.50VA POT.RECEPTI=200.66VAR NUM.TRECHOS=5-2

GRAUS DE COMPENSACAO

SERIE(KS)=0.00

SHUNT(KD)=0.20

TIPO DE LINHA A

TENSAO(KV)	CORRENTE(A)
500.00	742.04
492.41	743.31
485.11	738.16
487.72	733.17
500.23	728.37
502.63	723.74
504.94	719.23
507.13	715.12
509.22	711.15
511.22	707.41
508.81	706.33
505.92	707.49
507.05	705.91
508.08	704.59
509.00	703.54
509.82	702.75
510.53	702.24
511.14	702.00
511.63	702.04
512.02	702.36
514.42	701.22
516.30	702.12
515.85	704.81
515.79	707.57
514.62	710.60
513.84	718.85
512.95	717.44
513.96	721.22
510.87	723.24
509.65	729.48
516.88	728.25
523.33	723.32
521.49	735.75
519.34	742.38
517.05	747.18
514.71	756.15
512.25	763.22
509.69	770.54
507.02	777.22
504.28	785.41
516.21	784.05
527.60	789.17
523.32	794.27
520.27	804.64
516.44	814.47
512.52	824.33
508.51	824.21
504.41	844.10
500.28	853.96
496.97	863.80
512.51	862.28

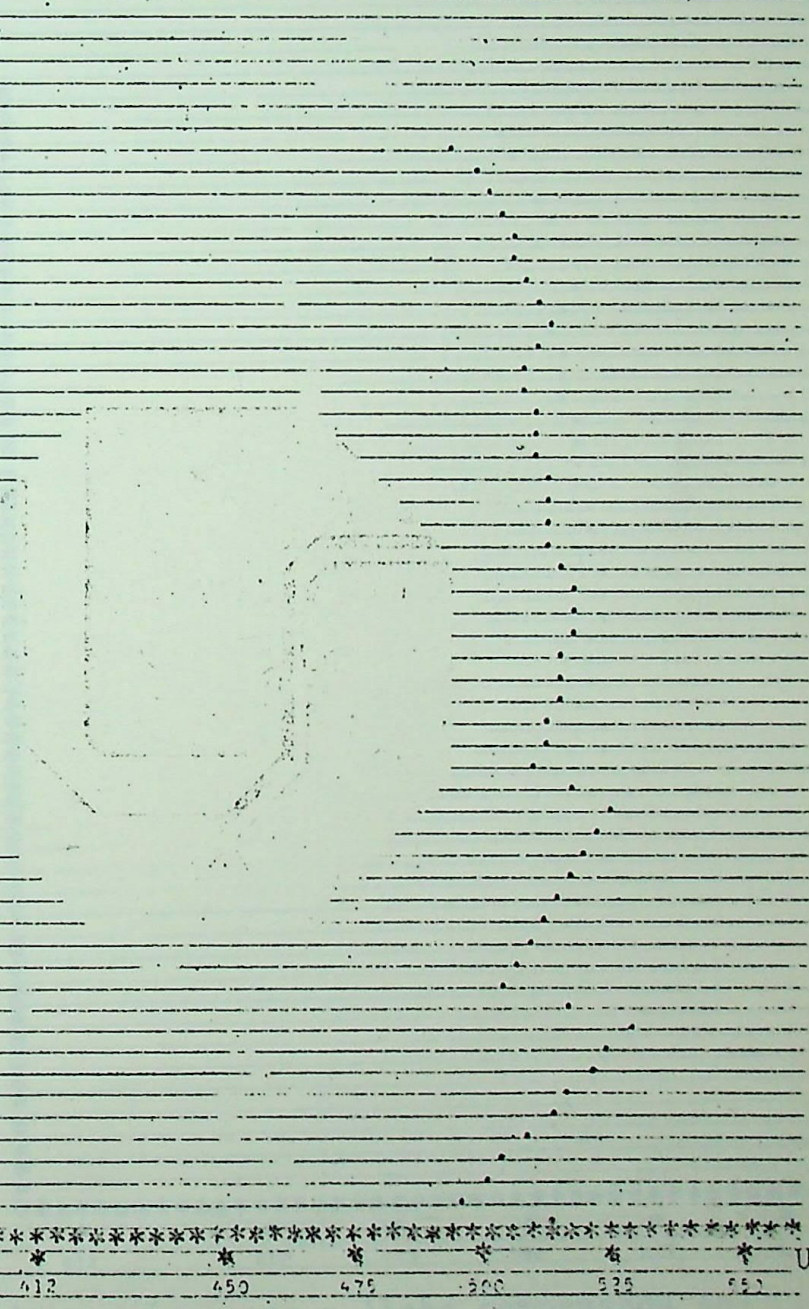


Figura 5.16a- Perfil de tensão para a linha compensada segundo o modelo "A" - Nt = 5.

TIPO DE LINHA B

* TENSÃO(KV) *		* CORRENTE(A) *	
* MODULO	* FASE *	* MODULO	* FASE *
* 500,00	0,00 *	* 742,04	-18,19 * L *
* 493,34	-2,89 *	* 741,91	-18,20 *
* 496,04	-1,83 *	* 736,75	-16,72 *
* 498,64	-0,97 *	* 731,75	-15,22 *
* 501,14	-0,07 *	* 726,95	-13,70 *
* 503,54	0,82 *	* 722,32	-12,15 *
* 505,83	1,70 *	* 717,72	-10,57 *
* 508,01	2,59 *	* 713,23	-9,00 *
* 510,09	3,46 *	* 709,76	-7,40 *
* 512,05	4,34 *	* 706,24	-5,77 *
* 508,77	1,66 *	* 706,23	-5,76 *
* 506,85	-1,03 *	* 706,08	-5,80 *
* 507,87	-0,13 *	* 704,53	-4,15 *
* 508,98	0,79 *	* 703,24	-2,50 *
* 509,89	1,64 *	* 702,22	-0,85 *
* 510,70	2,53 *	* 701,47	0,81 *
* 511,39	3,41 *	* 700,99	2,47 *
* 511,98	4,30 *	* 700,80	4,14 *
* 512,45	5,19 *	* 700,85	5,82 *
* 512,82	6,07 *	* 701,22	7,49 *
* 514,35	3,42 *	* 701,42	7,58 *
* 517,21	0,79 *	* 701,23	7,47 *
* 516,74	1,67 *	* 703,77	9,14 *
* 516,16	2,55 *	* 706,60	10,80 *
* 515,46	3,44 *	* 709,69	12,45 *
* 514,66	4,33 *	* 713,04	14,08 *
* 513,76	5,23 *	* 716,65	15,70 *
* 512,74	6,13 *	* 720,50	17,31 *
* 511,63	7,03 *	* 724,59	18,92 *
* 510,41	7,95 *	* 728,91	20,47 *
* 516,74	5,28 *	* 729,04	20,46 *
* 524,40	2,68 *	* 728,82	20,45 *
* 522,33	3,56 *	* 735,33	22,00 *
* 520,13	4,44 *	* 742,03	23,52 *
* 517,57	5,34 *	* 748,91	25,04 *
* 515,47	6,25 *	* 755,97	26,51 *
* 512,98	7,17 *	* 763,27	27,96 *
* 510,39	8,09 *	* 770,81	29,39 *
* 507,70	9,03 *	* 777,52	30,78 *
* 504,92	9,92 *	* 785,34	32,17 *
* 515,99	7,26 *	* 785,67	32,15 *
* 528,41	4,66 *	* 785,42	32,14 *
* 524,77	5,55 *	* 795,20	33,50 *
* 521,01	6,45 *	* 803,06	34,81 *
* 517,15	7,37 *	* 814,97	36,10 *
* 513,20	8,31 *	* 824,91	37,36 *
* 509,15	9,26 *	* 834,87	38,59 *
* 505,01	10,23 *	* 844,84	39,80 *
* 500,80	11,21 *	* 854,78	40,97 *
* 496,50	12,22 *	* 864,69	42,12 *
* 512,20	9,40 *	* 864,82	42,12 *

* * * * * U

412 450 475 500 525 550

Figura 5.16b - Perfil de tensões para a linha compensada segundo o modelo "B". Nt = 5.

TIPO DE LINHA C

TENSÃO(KV)		CORRENTE(A)	
MODULO	FASE	MODULO	FASE
* 500.00	0.00 *	742.04	-10.15 *
* 503.30	2.88 *	741.01	-10.20 *
* 506.50	1.76 *	735.41	-10.72 *
* 509.59	2.63 *	729.09	-15.21 *
* 512.55	3.43 *	722.31	-12.07 *
* 500.88	-2.81 *	717.00	-12.11 *
* 502.66	-1.91 *	713.85	-10.52 *
* 504.33	-1.01 *	710.99	-8.92 *
* 505.82	-0.11 *	708.34	-7.30 *
* 507.25	0.77 *	705.84	-5.68 *
* 508.71	1.65 *	703.41	-4.02 *
* 510.41	2.53 *	701.07	-2.30 *
* 512.01	3.41 *	703.17	-4.05 *
* 513.49	4.28 *	700.65	-2.29 *
* 514.86	5.15 *	698.40	-0.72 *
* 514.41	-1.00 *	698.44	0.96 *
* 514.59	-0.12 *	697.29	2.56 *
* 514.66	0.75 *	698.43	4.23 *
* 514.62	1.62 *	699.34	6.01 *
* 514.47	2.51 *	701.57	7.69 *
* 514.21	3.40 *	701.72	7.67 *
* 514.20	4.28 *	701.55	7.67 *
* 514.29	5.17 *	702.91	9.34 *
* 514.17	6.06 *	704.54	11.01 *
* 513.94	6.95 *	706.45	12.67 *
* 524.76	0.84 *	708.53	14.32 *
* 523.24	1.71 *	718.65	15.96 *
* 521.80	2.58 *	718.92	17.57 *
* 520.13	3.46 *	724.63	19.17 *
* 518.38	4.25 *	730.15	20.74 *
* 516.51	5.25 *	730.29	20.72 *
* 515.00	6.15 *	732.10	20.72 *
* 513.29	7.05 *	733.38	22.27 *
* 511.67	7.97 *	740.34	23.80 *
* 509.86	8.99 *	746.53	25.31 *
* 531.91	2.77 *	752.37	26.80 *
* 528.89	3.64 *	761.10	28.26 *
* 525.75	4.51 *	762.97	29.69 *
* 522.50	5.40 *	778.97	31.09 *
* 519.14	6.31 *	788.06	32.46 *
* 515.68	7.23 *	788.19	32.45 *
* 512.56	8.18 *	787.96	32.44 *
* 509.39	9.09 *	796.42	33.79 *
* 506.12	10.05 *	804.95	35.11 *
* 502.75	11.02 *	812.55	36.40 *
* 535.86	4.79 *	822.17	37.65 *
* 531.26	5.67 *	833.88	38.90 *
* 526.55	6.56 *	845.43	40.10 *
* 521.73	7.47 *	857.24	41.27 *
* 516.51	8.40 *	868.61	42.42 *
* 511.79	9.35 *	868.74	42.41 *

***** U
 412 450 475 500 525 550

Figura 5.16c - Perfil de tensões para a linha compensada se - gundo o modelo "C". Nt = 5.

DADOS DE ENTRADA
 RESISTENCIA=D.021000HMS/KM INDUTANCIA=D.0.8655E-03HENRYS/K
 CONDUTANCIA=D.000E-00SIFMENS/KM CAPACITANCIA=D.0.9177E-08FARADS/KM
 FREQUENCIA=60.0HERTZ COMP.LINHA=1000.0KM TENSÃO RECEPTOR=500.00K
 POT.RECEPATIVAL=610.50MW POT.RECEP(REAT)=200.66MVAR NUM.TRECHOS=25

GRAUS DE COMPENSAÇÃO

SERIE(KS)=0.80
 SHUNT(KD)=0.20

TIPO DE LINHA A

TENSÃO(KV)	CORRENTE(A)		
MÓDULO	FASE	MÓDULO	FASE
500.00	0.00	742.24	-18.19
478.66	-7.46	750.25	-18.47
454.80	-5.92	742.13	-18.34
431.44	-2.63	734.59	-17.11
413.55	-0.26	727.75	-7.30
397.10	2.07	722.35	-3.41
380.06	4.39	718.29	0.53
362.43	6.69	715.55	4.53
344.19	8.99	714.52	8.55
325.33	11.25	714.91	12.60
311.03	4.32	707.13	12.26
294.80	-2.37	713.78	11.94
270.80	-0.12	727.51	15.95
246.02	2.05	742.67	19.81
210.89	4.24	753.88	23.52
164.55	6.10	776.05	27.08
117.57	9.12	793.91	30.30
70.91	11.63	812.23	33.71
23.43	14.72	830.80	35.91
0.51	16.90	849.41	39.72
0.50	9.33	838.80	39.67

 * 412 * 450 * 475 * 500 * 525 * 550 * U

TIPO DE LINHA B

TENSÃO(KV)	CORRENTE(A)		
MÓDULO	FASE	MÓDULO	FASE
500.00	0.00	742.24	-18.19
351.93	-7.24	741.34	-18.36
211.02	-4.87	722.59	-14.63
75.54	-2.53	724.76	-10.80
29.52	-2.22	718.30	-6.89
02.85	2.05	713.22	-2.90
05.68	4.22	707.44	1.12
07.47	6.57	707.63	5.22
09.10	8.82	707.26	9.13
09.88	11.12	708.54	13.45
16.31	4.27	709.55	13.25
31.34	-2.23	707.77	13.05
75.92	-0.03	722.57	17.12
1.79	2.19	738.32	21.22
5.95	4.35	756.29	24.77
9.57	6.55	774.70	28.34
2.51	9.04	793.91	31.76
04.92	11.51	813.38	35.03
6.80	14.06	833.17	38.15
8.41	16.72	852.99	41.13
3.60	9.29	853.35	40.99

 * 412 * 450 * 475 * 500 * 525 * 550 * U

Figura 5.17a-Perfis de tensão para a linha compensada em dois trechos. Modêlos "A" e "B".

TIPO DE LINHA C

TENSÃO(KV)		CORRENTE(A)		
MODULO	FASE	MODULO	FASE	L
500.00	0.00	742.09	-18.19	*
508.95	2.18	741.58	-18.32	*
517.19	4.31	724.30	-14.55	*
524.67	6.38	708.27	-10.59	*
531.33	8.41	693.72	-6.44	*
525.96	-6.61	681.13	-2.12	*
525.30	-4.50	686.29	2.25	*
523.86	-2.88	693.45	5.56	*
521.71	-0.22	702.51	10.78	*
518.81	1.95	713.31	14.92	*
515.21	4.17	713.96	14.74	*
513.96	6.40	712.61	14.29	*
512.03	8.65	720.71	18.64	*
509.49	10.94	730.29	22.59	*
506.32	13.26	741.21	26.45	*
571.97	-1.53	753.31	30.20	*
561.45	0.38	783.90	33.76	*
530.01	2.40	814.87	37.06	*
537.73	4.61	846.16	40.12	*
524.29	6.72	977.31	42.99	*
511.02	9.09	877.48	42.87	*

 * * * * * U
 412 450 475 500 525 550

Figura 5.17b- Perfil de tensão para a linha compensada em dois trechos. Modelo "C". $U_2 = 500$ KV. $P_2 = 0,75 P_o - fp_2 = 0,95$ indutivo.

5.7.3.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

As cargas indutivas proporcionam melhores ângulos de potência que as cargas capacitivas e até superam às cargas com fator de potência unitário. Isto pode ser facilmente verificado comparando-se as figuras 5.11 ($fp_2 = 0,95$ capacitivo) e 5.3 ($fp_2 = 1,00$) com a figura 5.19 ($fp_2 = 0,95$ indutivo). As cargas capacitivas são as mais desfavoráveis neste particular.

A figura 5.19 mostra que o limite de 30° é atingido por todos os graus de compensação shunt que estejam combinados com $K_{série} \geq 40\%$. Este limite pode ser também obtido nas seguintes condições: $K_{série} \geq 30\%$ e $K_{shunt} \geq 20\%$, $K_{série} \geq 20\%$ e $K_{shunt} \geq 50\%$ (Para $N_t = 2$), ou $K_{shunt} \geq 60\%$ e $K_{série} \geq 20\%$ (Para $N_t = 5$). Evidencia-se, com os dados acima, uma vez mais a vantagem da compensação em menor número de trechos.

O modelo "C", tal como nos dois tipos de potência anteriormente estudados, prevalece sobre os demais com relação aos menores ângulos de potência. E mais: para esta carga indutiva, sua liderança se estende também para a região de $K_{shunt} = 80\%$ e $K_{série} \geq 50\%$. Por outro lado, o modelo "B", que para $fp_2 = 1,00$ e $0,95$ capacitivo, prevalece sobre o modelo "C", para $K_{shunt} = 80\%$ e qualquer $K_{série}$, agora para a carga indutiva, somente sobressairá com relação a "C", quando $K_{shunt} = 80\%$ e $K_{série}$ entre 0% e 40% .

Pode ser ainda constatado que à medida que se aumenta $K_{série}$, a redução de " θ " pouco dependerá de K_{shunt} . Esta observação vale para todos os três casos já analisados. Para $K_{série} = 80\%$, os " θ " são praticamente os mesmos para as três cargas até aqui analisadas (variações em torno de 3°). Entretanto, para pequenos $K_{série}$, é bastante grande a vantagem da carga indutiva, com relação à carga capacitiva.

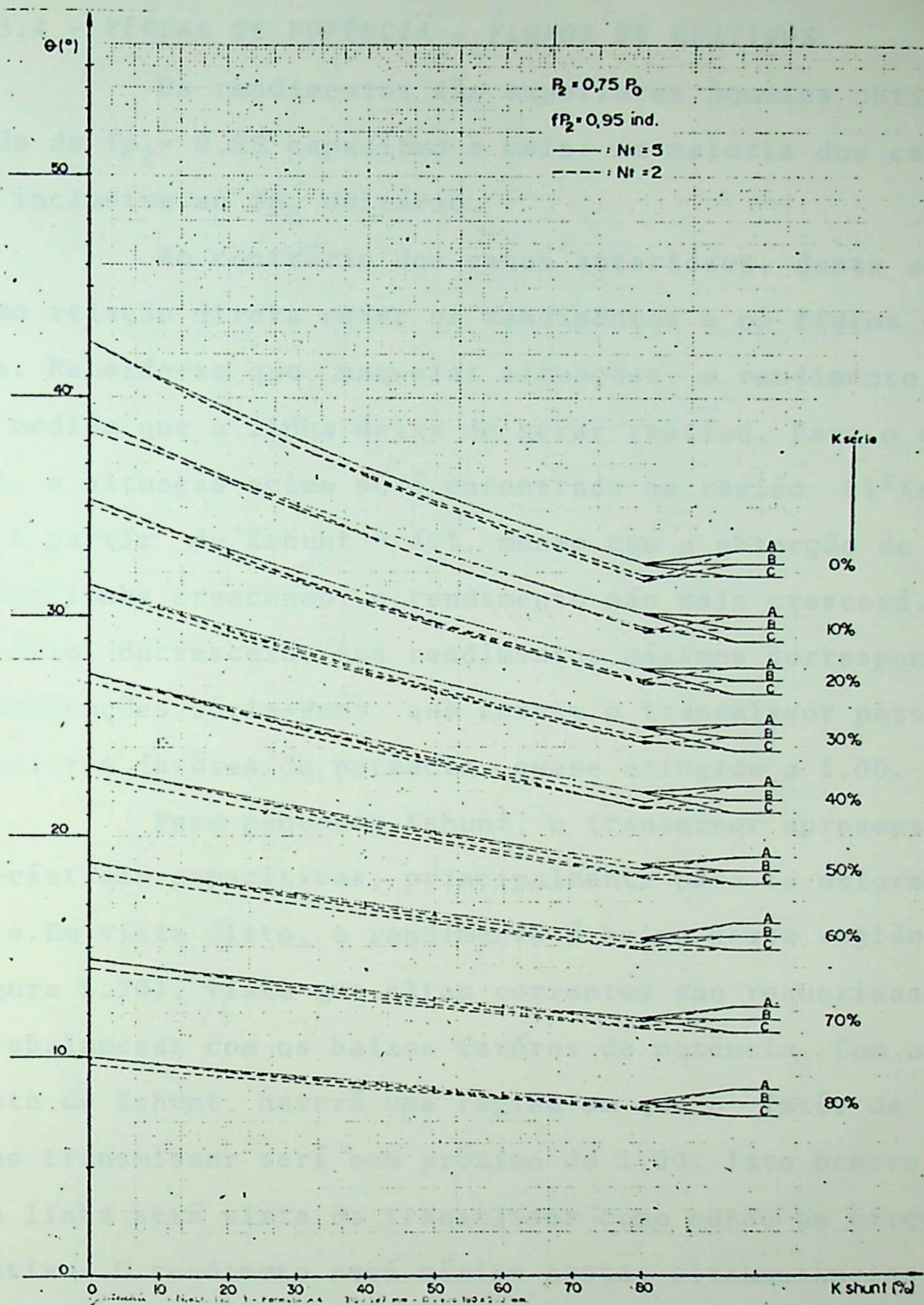


Figura 5.19 - Ângulos de potência x K_{shunt} e K_{serie} . $U_2 = 500 \text{KV}$.

5.7.3.4 - PÊRDAS DE POTÊNCIA - FLUXOS DE REATIVOS

Os rendimentos são superiores àqueles obtidos quando de $fp_2 = 0,95$ capacitivo e mais: na maioria dos casos supera inclusive ao fp_2 unitário.

Ao contrário dos casos anteriores, desta vez não há uma relação direta entre os rendimentos e os fluxos de reativos. Recorde-se que, naquelas situações, o rendimento cresce à medida que a linha deixa de gerar reativo. Para o caso atual, a situação acima só é encontrada na região $0\% \leq K_{shunt} \leq 40\%$. A partir de $K_{shunt} = 40\%$, mesmo com a absorção de reativo pela linha crescendo, o rendimento não mais crescerá. Pelo contrário, decrescerá. Aos rendimentos máximos correspondem as combinações série-shunt que tornam o transmissor possuidor dos maiores fatores de potência, quase atingido a 1,00.

Para pequenos K_{shunt} , o transmissor apresenta características capacitivas, principalmente para os maiores $K_{série}$. Em vista disto, o rendimento é baixo nesta região (Ver a figura 5.20), visto que altas correntes são requeridas para contrabalancear com os baixos fatores de potência. Com o crescimento de K_{shunt} , haverá uma região em que o fatôr de potência no transmissor será bem próximo de 1,00. Isto ocorre porque a linha será vista do transmissor como sendo um circuito resistivo. O rendimento será máximo nestas circunstâncias, já que a corrente I_1 será mínima com o fp_1 máximo. Em seguida, prosseguindo-se com o acréscimo de K_{shunt} , o rendimento irá novamente decrescer. Isto, em virtude da corrente no transmissor novamente crescer de valôr, já que o fatôr de potência no transmissor decrescerá de valôr, passando inclusive a possuir características indutivas, devido ao fato da linha agora ser vista do transmissor como sendo de características indutivas;

devido exatamente aos altos graus de compensação shunt agora inseridos na linha.

ao contrário dos casos anteriores, nos quais os melhores rendimentos, invariavelmente ficavam por conta das compensações efetuadas para $N_t = 2$, aqui as compensações efetuadas com $N_t = 5$ de um modo geral apresentam rendimentos maiores. Somente o modelo "B", com $N_t = 2$ é que consegue se sobrepor, em termos de rendimentos, às compensações em 5 trechos.

5.7.3.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

De um exame à TABELA III, nota-se que não haverá nenhum caso que preencha simultaneamente todos os requisitos. O elemento mais distoante é a variação de reativo: ΔQ na faixa de -100 MVar a +100 MVar implicará em altos valores de U_1 e $U_{m\acute{a}x}$. Somente para altos graus de $K_{s\acute{e}rie}$ é que o nível de tensão ao longo da linha se retrai por volta dos 500 KV a 530 KV. Nestas condições (altos $K_{s\acute{e}rie}$), a linha gerará altos valores de reativo.

Desta forma, para essa carga indutiva, não se poderá operar dentro dos limites previamente delineado para ΔQ . Esta observação é de sumo interêsse, já que caso esta linha seja de interligação de sistemas, ou entre uma usina e um grande sistema, um alto fluxo de reativo pode ser indesejável. Assim sendo, pode-se concluir que o transporte desta carga indutiva ficará condicionada ao sistema admitir ou não o fluxo de altos valores de MVar.

Admitindo-se que se possa operar com altos valô-

res de reativos gerados pela linha, a seguir se determina as melhores hipóteses em que isso ocorre:

a) Caso não haja nenhum limite quanto ao valor de ΔQ , a combinação $K_{série}=40\%$ e $K_{shunt}=10\%$ poderá ser utilizada (exceto para $N_t=2$, modelo C), conforme a TABELA IIIa. Esta combinação série - shunt é aquela que exigirá menores graus de compensação e que atende às exigências de U_1 , $U_{máx}$ e θ .

TABELA IIIa

K série	K shunt	10%				
	n_t	5			2	
	Modelo	A	B	C	A	B
40%	$U_{máx}(KV)$	526,8	527,0	529,2	529,18	530,5
	$U_1(KV)$	500,1	499,9	499,2	503,0	502,2
	$\theta(^{\circ})$	26,6	26,6	26,5	26,6	26,5
	$\Delta Q(MVAr)$	521,2	521,6	524,7	510,6	513,5
	$\eta(\%)$	94,83	94,83	94,84	94,78	94,80

b) Pode acontecer que a escolha seja função do menor ΔQ (mesmo que este valor supere +100 MVAr). Nesta hipótese, a combinação $K_{série}=70\%$ e $K_{shunt}=40\%$, modelo B, $N_t = 2$ poderá ser escolhida, já que apresenta o maior rendimento entre aquelas combinações série-shunt que satisfazem simultaneamente a U_1 , $U_{máx}$ e θ :

$$-U_1 = 526,08 \text{ KV (apenas 1 KV acima do limite).}$$

$$-U_{máx} = 528,84 \text{ KV}$$

$$-\theta = 12,78^{\circ}$$

$$-\Delta Q = 400,54 \text{ MVAr}$$

$$-\eta = 95,02\%$$

5.8 - ESTUDO DE $P_2 = 1.00 P_0$ (814,00 MW)

5.8.1 - FATÔR DE POTÊNCIA UNITÁRIO ($Q_2=0$)

5.8.1.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

O comportamento da tensão no transmissor, com relação às variações de K_{shunt} e $K_{série}$, é bastante semelhante aos casos já vistos: vários valores de U_1 evidenciam o Efeito Ferranti na região de K_{shunt} entre 0% e 30%, combinados com $K_{série}$ 30%. A figura 5.22 mostra ainda que esta condição de carga, $P_2 = P_0$, $fp_2=1,00$, mesmo tendo uma semelhança com os perfis de U_1 para $P_2 = 0,75P_0$, a situação atual é mais favorável. Em outras palavras, o Efeito Ferranti agora existente é de menor proporção que aqueles do item 5.7. A TABELA IV mostra que cerca de 40% das combinações série-shunt enquadram U_1 nos limites de 490 KV e 525 KV.

Ja era de se esperar que com a carga P_0 , $fp_2=1,00$ a linha apresentasse bom comportamento. A figura 5.23 confirma esta expectativa: o perfil de tensões se apresenta bastante regular para uma linha sem nenhuma compensação. A tensão de 524,30 KV para o transmissor é outro fato significativo. O bom rendimento (93,53%) e a variação de reativo dentro do intervalo de -100 a +100 MVAR ($\Delta Q=41,10$ MVAR) são outras informações satisfatórias. Apenas o aspecto *estabilidade* é que não permite que se opere com a linha sem compensações: o ângulo de potência atinge o proibitivo valor de 59,55°. Por outro lado, a inclusão de reatores e capacitores na linha, visando a diminuição de θ , irá de certa forma prejudicar o comportamento da linha nos outros aspectos igualmente importantes, isto é, o perfil de tensões, fluxo de reativo e rendimento.

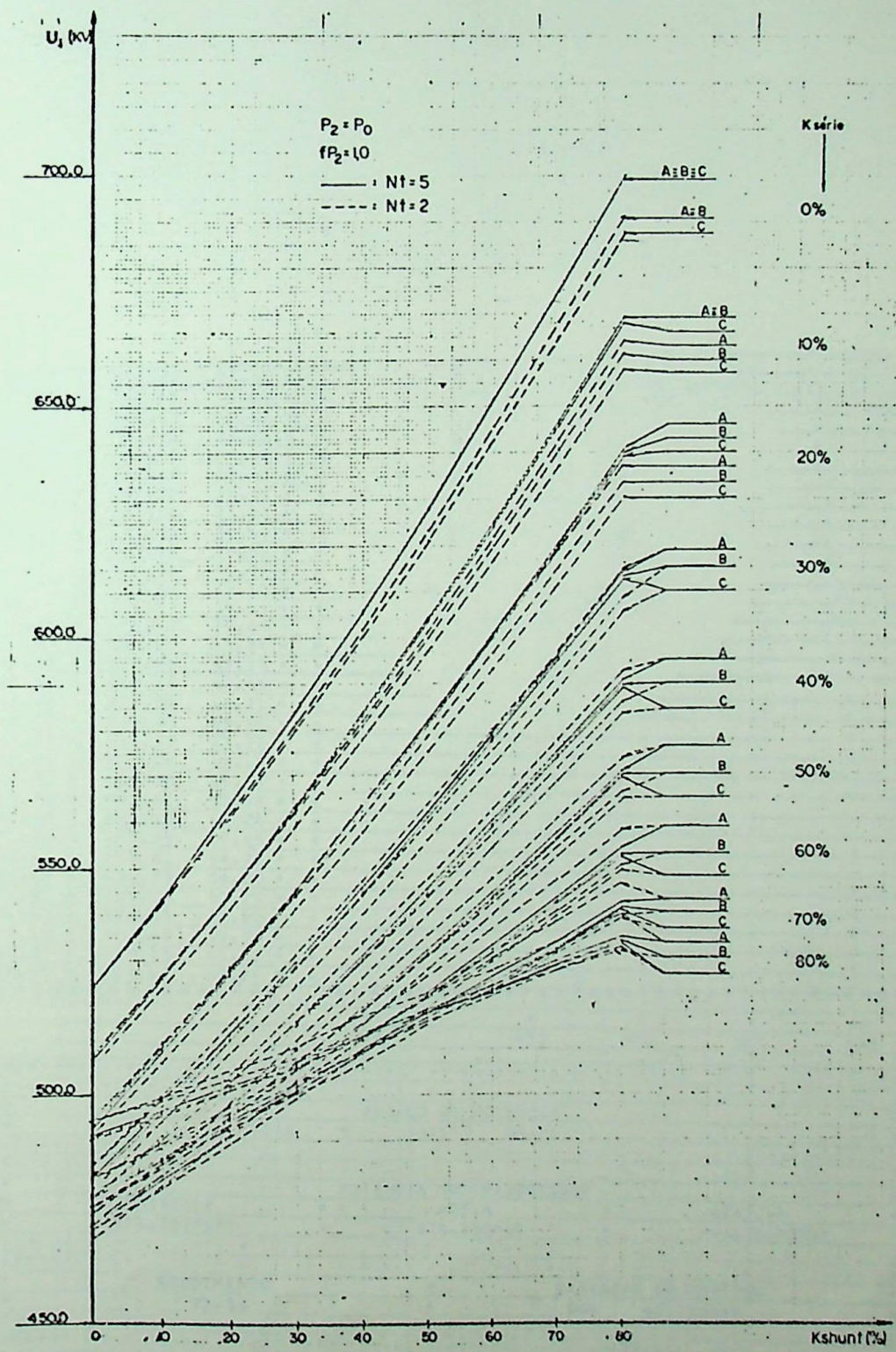


Figura 5.22 - Variações das tensões no transmissor X Kshunt e Ksérie. $U_2 = 500$ KV.

TABELA IV - ÁREAS HACHURIADAS: SAO CASOS DENTRO DOS REQUISITOS

P ₂ = P ₀ f _{P2} = 1,00		0		10		20		30		40		50		60		70		80	
Kshunt (%)	nº de trechos	2		5		2		5		2		5		2		5		2	
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0	tipo de linha																		
	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
10	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		
20	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		
30	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		
40	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		
50	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		
60	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		
70	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		
80	U _M < 530 KV																		
	490 < U ₁ < 525 e < 30°																		
	100 < U ₀ < 100																		

5.8.1.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

Comparando a figura 5.24 com a figura 5.2 (esta última para $P_2=0,75P_0, fp_2=1,00$), nota-se que, com o aumento da carga, tal como em U_1 tornaram-se menores os casos de compensação série-shunt que se enquadram dentro d-s exigências. As restrições mais desfavoráveis são aquelas em que se tem o grau de compensação série entre 70% e 80%. Entretanto, é justamente nesta região que os ângulos de potência são menores. Há um grande número de combinações, envolvendo $K_{série} = 70\%$ ou 80%, que coloca $U_{máx}$ abaixo de 530 KV.

As sobretensões surgem com mais frequência, novamente, nos terminais dos capacitores. Quanto maior fôr o banco decapacitores, maiores serão as suas sobretensões. A figura 5.25 apresenta a linha com compensação $K_{série}=80\%$ e $K_{shunt}=60\%$. Os perfis de tensões são para o modelo C, que é o mais problemático no que se refere às sobretensões. Para $N_t=5$, apenas no capacitor mais próximo do transmissor é que se tem tensões superiores a 530 KV: foram obtidas duas leituras apenas, acima do limite (532,05 KV e 534,35 KV). Já para $N_t = 2$, várias vezes foi ultrapassado o limite de 530 KV, sendo que no local mais crítico, isto é, no capacitor mais próximo do transmissor, desta vez tem-se 564,39 KV, contra 534,35 KV lido para $N_t = 5$.

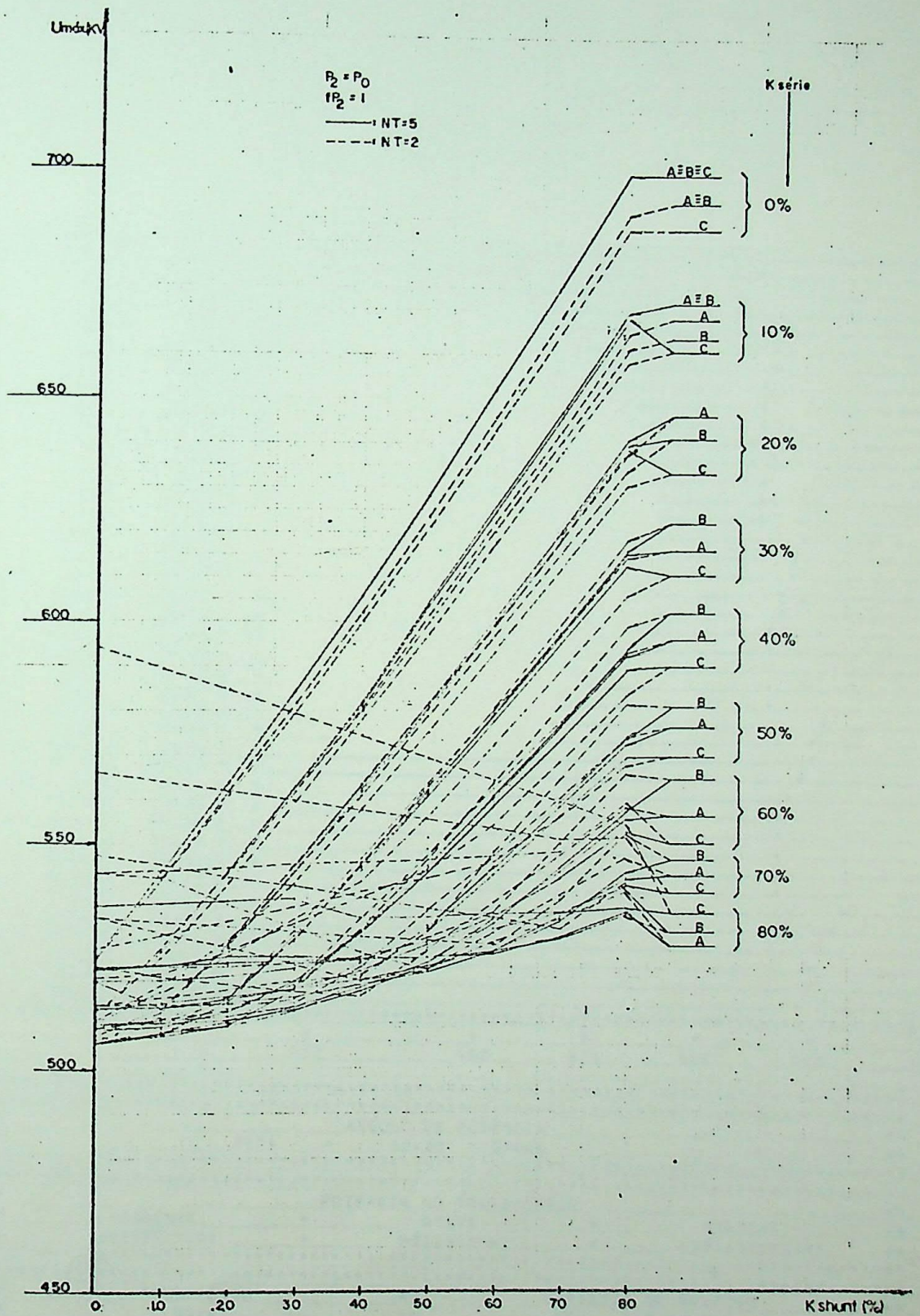


Figura 5.24 - Tensões máximas ao longo da linha x Kshunt e Ksérie. $U_2 = 500$ KV.

```

**
** TIPO DE LINHA C
**
** REAT,CAPACITIVA(XC)=-267.44OHMS
** ADMITANCIA(YR)=-0.0021557SIEMENS
**

```

TENSÃO(KV)		CORRENTE(A)	
MODULO	FASE *	MODULO	FASE *
500.00	0.00 *	939.92	0.00 * L *
506.08	2.98 *	944.50	-6.40 * *
512.07	5.90 *	936.26	-3.34 * *
517.92	8.76 *	928.10	-0.22 * *
523.58	11.57 *	920.14	2.96 * *
529.21	-8.40 *	912.48	6.21 * *
536.15	-5.68 *	926.30	9.45 * *
530.81	-2.90 *	940.40	12.50 * *
525.25	-0.06 *	954.62	15.67 * *
519.54	2.85 *	968.81	18.66 * *
513.75	5.95 *	952.03	12.28 * *
516.93	8.81 *	944.71	5.74 * *
520.03	11.74 *	942.03	8.86 * *
522.00	14.65 *	939.55	12.05 * *
525.84	17.53 *	937.31	15.24 * *
564.39	-2.15 *	935.37	18.46 * *
558.45	0.45 *	953.35	21.63 * *
548.15	3.15 *	975.45	24.68 * *
539.56	5.95 *	995.46	27.62 * *
530.78	8.55 *	1015.18	30.45 * *
521.91	11.85 *	987.03	24.37 * *

```

* * * * *
* 412 * 450 * 475 * 500 * 525 * 550 *
* * * * *

```

```

**
** ANGULO DE POTENCIA
** TETA = 11.86 GRAUS
**
** POTENCIA NO TRANSMISSOR
** APARENTE * ATIVA * REATIVA
** 992.25(MVA) * 871.07(MW) * -193.25(MVAR)
**
** RENDIMENTO * VARIACAO DO REATIVO
** 93.44 * DQ= 193.25MVAR
**

```

Figura 5.25b- Resultados obtidos para a linha compensada segundo Ksérie= 80% e Kshunt=60%. Nt = 2. Modelo "C".

5.8.1.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

Para esta carga, pode-se dizer que os ângulos de potência são bem restritivos. Isto pode ser observado na TABELA IV: a linha de transmissão, sem nenhuma compensação série ou shunt satisfaz a todas as exigências, exceto no que se refere à estabilidade, pois θ , nesta condição, atinge a $59,55^\circ$. Este número é bastante alto para uma possível perturbação transitória.

Uma análise da figura 5.26 evidenciará que os ângulos de potência serão inferiores a 30° apenas para $K_{série} \geq 60\%$ (independentemente de K_{shunt}), ou para $K_{série} = 50\%$ combinado com $K_{shunt} \geq 40\%$.

Uma vez mais, as compensações em menor número de trechos apresentam os menores ângulos de potência. O modelo C é o melhor, principalmente até $K_{shunt} = 70\%$. Este modelo somente perderá para o modelo B, assim mesmo apenas para $N_t = 2$ e $K_{shunt} > 70\%$.

5.8.1.4 - PÊRDAS DE POTÊNCIA - FLUXOS DE REATIVOS

Efetuada uma comparação entre os rendimentos observados quando de $P_2 = 0,75P_o$, $fp_2 = 1,00$, e aqueles obtidos para o caso atual, $P_2 = P_o$, respectivamente pelas figuras 5.4 e 5.27, nota-se o decréscimo (já esperado) de " η " para a maior potência. Para $P_2 = 0,75P_o$ o rendimento vai desde 92,42% até 95,41%. Com a potência natural, P_o , a faixa de variação dos rendimentos inicia em 91,69% indo até 94,21%.

Tal como em $P_2 = 0,75P_o$, $fp_2 = 1,00$ o rendimento au

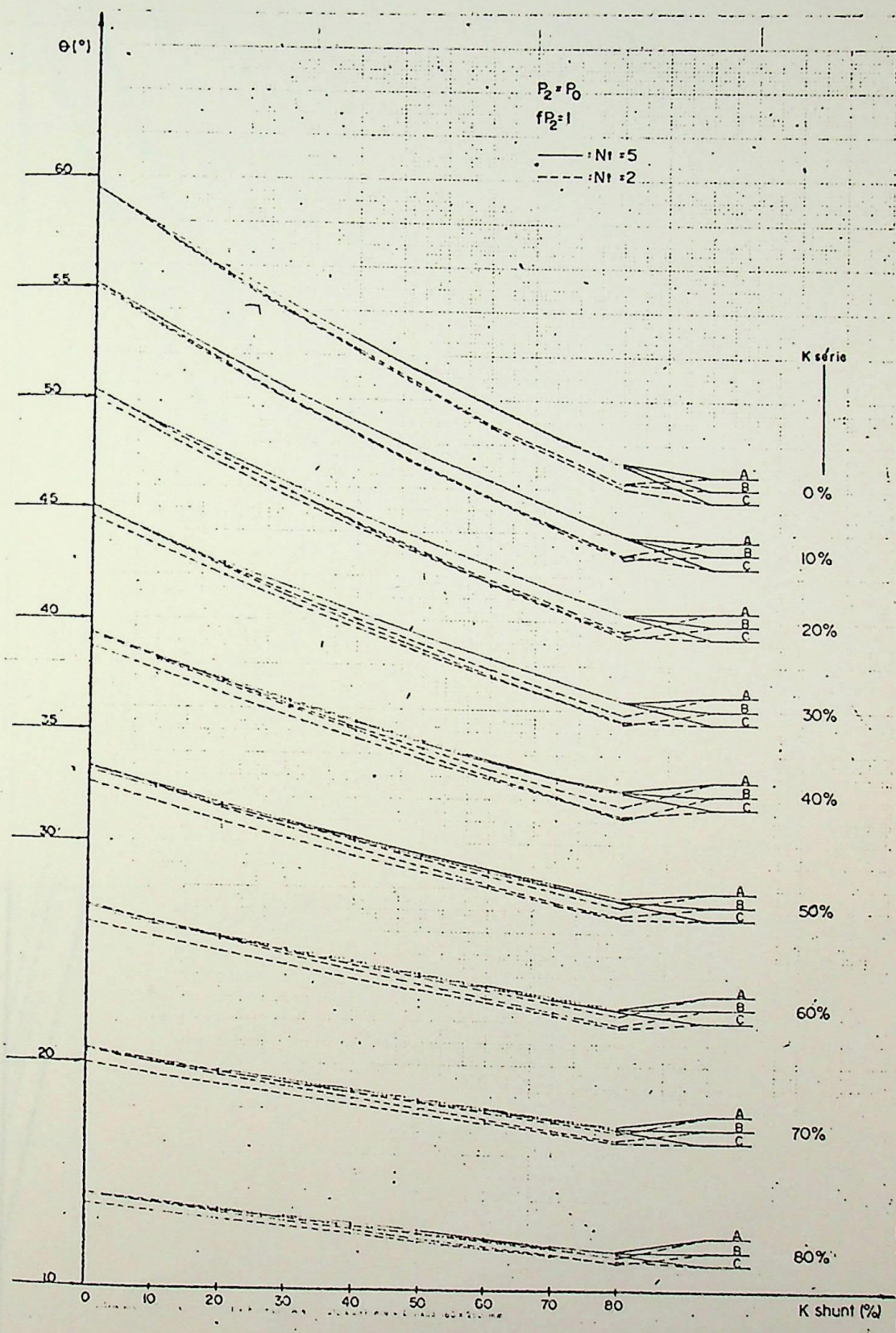


Figura 5.26 - Ângulos de potência x Kshunt e Ksérie.

menta à medida que a linha deixa de gerar reativo. O crescimento do rendimento prosseguirá e a linha agora passará a absorver reativo. A figura 5.27 evidencia que os rendimentos máximos ocorrerão para Kshunt por volta de 70%.

Para os mesmos graus de compensação e números de trechos, o modelo A é o de piores rendimentos e o modelo B é o de melhores rendimentos. Com relação ao número de trechos, o modelo A, $N_t=2$ é bem superior a $N_t=5$ na faixa de 0% a 30% para Ksérie. Daí em diante, predomina $N_t=5$. Quanto aos modelos B e C, as compensações efetuadas em menor número de trechos apresentarão sempre melhores rendimentos.

Com relação ao reativo, a linha apresenta bom comportamento mesmo sem nenhuma compensação. Nesta condição a linha deverá gerar apenas 41,10 MVar. Este número pode ser considerado excelente, para uma carga de 814 MW. A figura 5.28 apresenta diversos casos dentro da faixa de -100 a +100 MVar.

5.8.1.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Conforme comentários anteriores, a principal restrição, para esta carga, é a estabilidade transitória que, via de regra, limitará θ em 30° . Caso não se tenha esse problema (possibilidade quase remota), a linha não necessitará de compensação. Por outro lado, caso haja condição de se operar com valores pouco acima de 30° , a figura 5.26 e a TABELA IV, possibilitam escolher o caso mais conveniente para se operar, de acordo com o projetista.

Entretanto, como êste trabalho visa o estudo de otimização, será considerado apenas aquela condição que estiver dentro dos limites pré-estabelecidos. Assim sendo, a TABELA IV apresenta doze casos satisfatórios, que preenchem simultaneamente os requisitos de U_1 , $U_{m\acute{a}x}$, θ e ΔQ . A TABELA IVa apresenta estas hipóteses e seus rendimentos:

TABELA IVa

n_t	K shunt: 60%		K shunt: 50%					K shunt: 40%				
	K série: 70%		K série: 60%		K série: 50%			K série: 50%		K série: 40%		
Modêlo	2	5	2		5			2		5		
	A	B	A	B	A	B	C	A	B	A	B	C
n (%)	93,64	93,52	93,34	93,57	93,45	93,48	93,48	93,36	93,50	93,43	93,45	93,45

Como se pode observar, uma vez mais a vantagem é para a compensação efetivada em menor número de trechos: os rendimentos são maiores.

Analisando agora somente os casos em que $n_t = 2$, a maior economia de compensações será obtida para a combinação $K_{s\acute{e}rie}=50\%$ e $K_{shunt}=40\%$, modêlo B (que apresenta maior rendimento que o modêlo A). O maior rendimento será obtido em: $K_{s\acute{e}rie}=70\%$ e $K_{shunt}=60\%$, modêlo B.

A escolha final poderá ser efetivada após uma análise de todos os casos. Isto será feito no capítulo VI, onde poderá ser feita a opção por um dos casês acima.

5.8.2 - FATÔR DE POTÊNCIA = 0,95 CAPACITIVO ($Q_2 = -267,55$ MVar)

5.8.2.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

Conforme já observado para $P_2 = 0,75P_o$, $fp_2 = 0,95$ capacitivo, as cargas capacitivas têm a características de causarem elevação de tensão no receptor (Efeito Ferranti). Assim, é de se esperar que a figura 5.29, tal como a figura 5.7, apresentem tensões U_1 com valores bem inferiores a 500 KV. A presença de reatores é imprescindível para que haja um nivelamento das tensões em torno de 500 KV.

A figura 5.29 mostra que a manutenção de U_1 entre 490 e 525 KV fica facilitada com o crescimento de $K_{série}$: acima de $K_{série} = 50\%$, nota-se que as curvas ficam menos inclinadas, proporcionando assim, um maior número de tensões U_1 dentro do intervalo referido.

A TABELA V apresenta poucos casos satisfatórios no que se refere a U_1 , justamente pelo fato de que a maioria dos casos apresentarem problemas de Efeito Ferranti.

5.8.2.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

As cargas capacitivas não apresentam muitos casos de sobretensões superiores a 530 KV (Ver a figura 5.30). Os poucos casos que surgem são devidos a dois motivos:

a) Pela inclusão de reatores indutivos na linha, quando a compensação série é mínima. Nestas condições, as sobretensões surgem nas proximidades do transmissor, já que os reatores provocam grandes quedas de tensão. Em decorrência, U_1 deve ser bem alto. A TABELA V mostra que este motivo não altera prati-

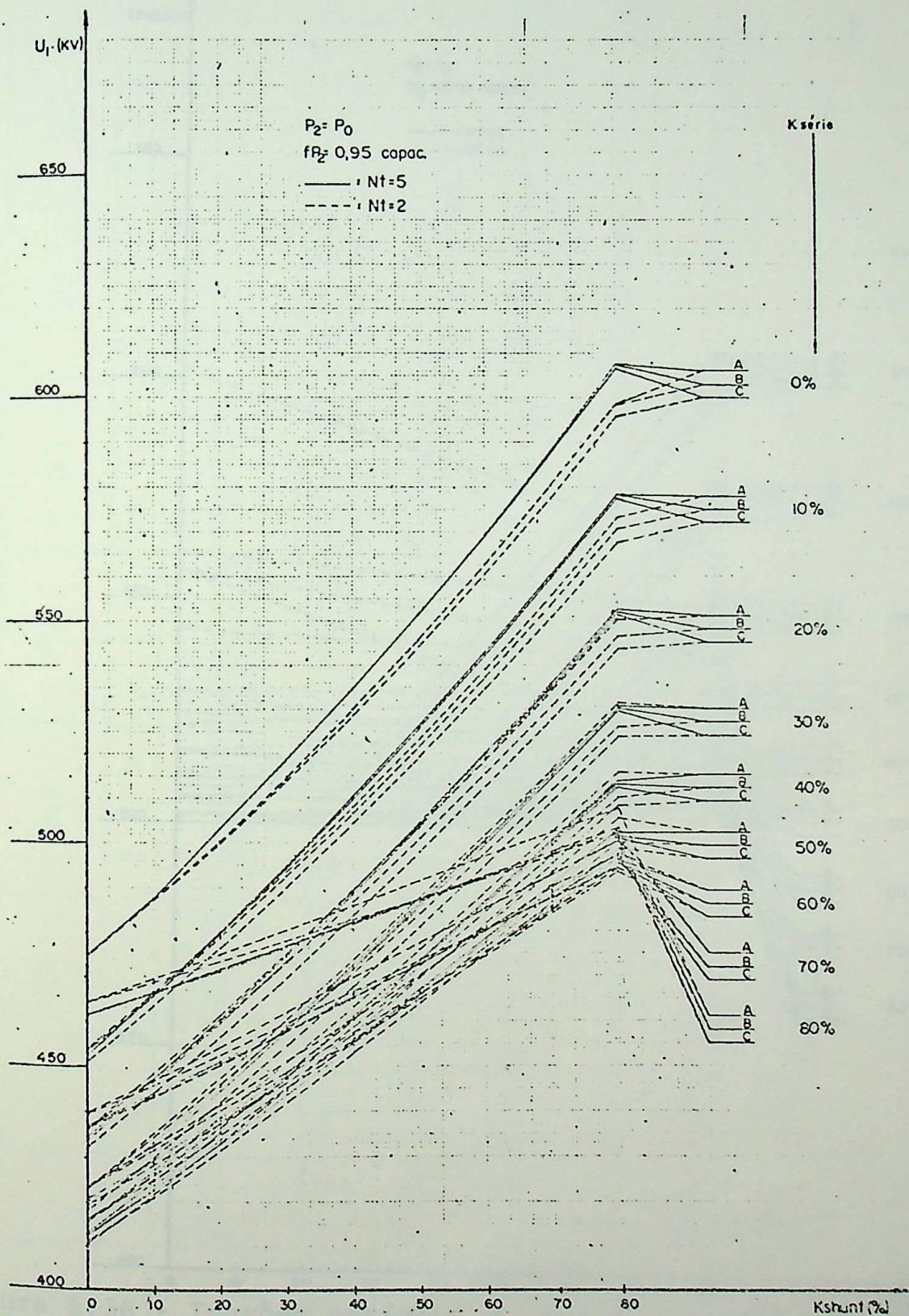


Figura 5.29 - Tensões no transmissor x Ksérie e Kshunt.

$U_2 = 500 \text{ KV.}$

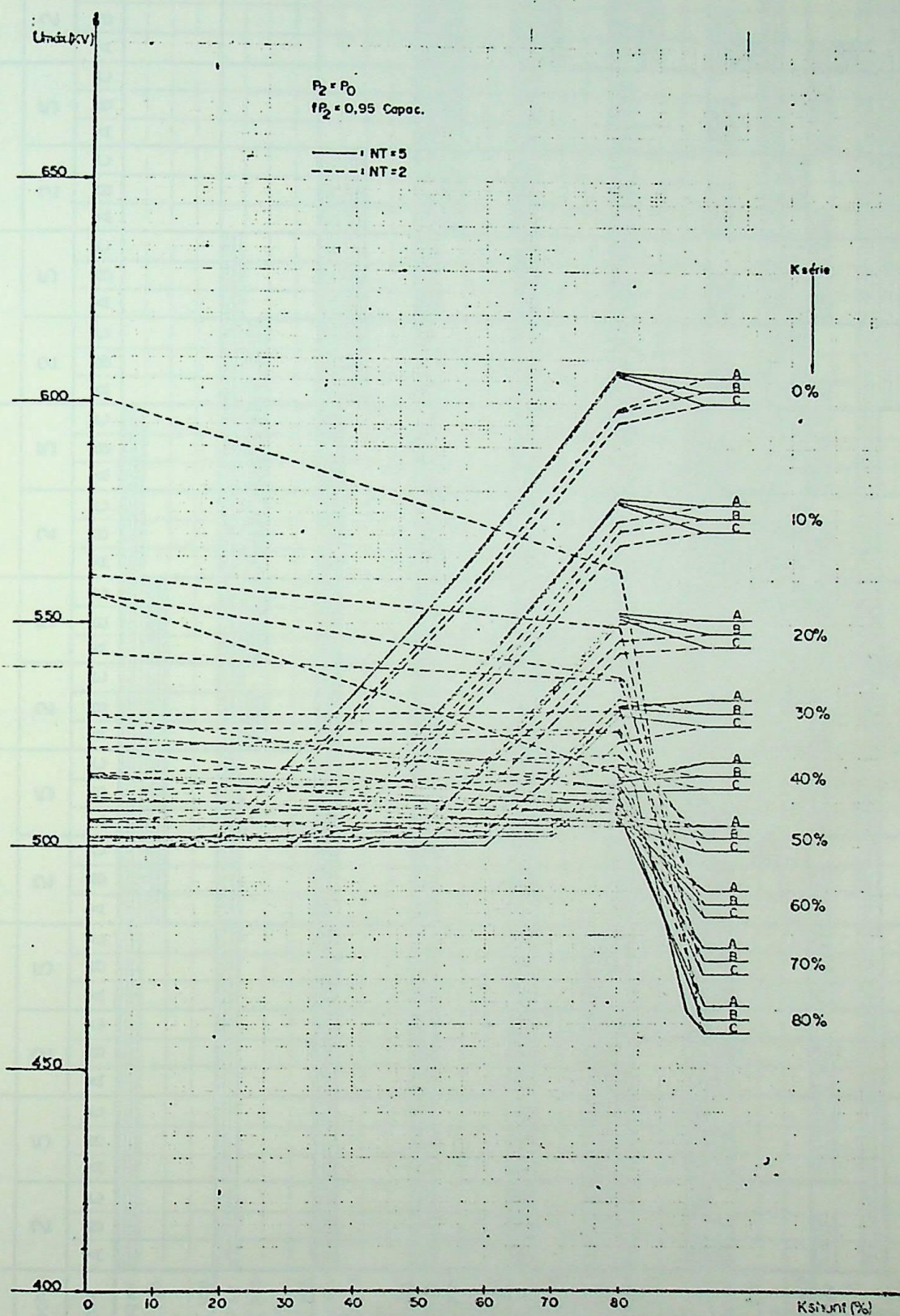


Figura 5.30 - Tensões máximas x Ksérie e Kshunt. $U_2 = 500 \text{ KV}$

TABELA V - ÁREAS HACHURIADAS: SAO CASOS DENTRO DOS REQUISITOS

$P_2 = P_0$ $f_{P_2} = 0,95$ CAP.

Kshunt (%)	0		10		20		30		40		50		60		70		8	
	2		5		2		5		2		5		2		5			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A		B
nº de trechos	2		5		2		5		2		5		2		5		2	
tipo de linha	A		B		C		A		B		C		A		B		C	
0	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
10	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
20	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
30	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
40	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
50	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
60	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
70	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			
80	Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100		Um < 530KV		490 < U ₁ < 525		φ < 30°		-100 < Δ0 < 100			

camente em nada na escolha final, já que, por razões de estabilidade, com pequena compensação série não haveria mesmo condições de transmissão.

b) O segundo motivo já fôra ilustrado quando do estudo de $P_2 = 0,75P_0$, $fp_2 = 0,95$ Capacitivo: para altos graus de compensação série aplicados em linhas compensadas com $N_t = 2$, surgem atas sobretensões nas proximidades dos capacitores (em seus terminais, principalmente).

5.8.2.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

Para as cargas capacitivas, o ângulo de potência é um fator altamente restritivo, conforme observação anterior ($P_2 = 0,75P_0$, $fp_2 = 0,95$ cap.) e reafirmado agora, por um exame da figura 5.31. Os ângulos de potência são piores que aqueles das cargas indutivas ou puramente ativas.

Assim é que, para a entrega de $P_2 = 814$ MW, sem nenhuma compensação na linha, com $fp_2 = 1,00$, tem-se $\theta = 59,55^\circ$. Para $fp_2 = 0,95$ capacitivo, $\theta = 75,13^\circ$ e, com $fp_2 = 0,95$ indutivo, $\theta = 47,37^\circ$ que é o valôr mais baixo dos três citados.

Comparando-se agora com $P_2 = 0,75 P_0 (610,5 \text{ MW})$ e $fp_2 = 0,95$ capacitivo, $\theta = 66,38^\circ$.

Do que se observou acima, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- a) O aumento de potência transmissível provoca crescimento de θ .
- b) Para a mesma potência ativa transmissível, o ângulo de potência é crescente na seguinte ordem: cargas indutivas, resistivas e capacitivas.

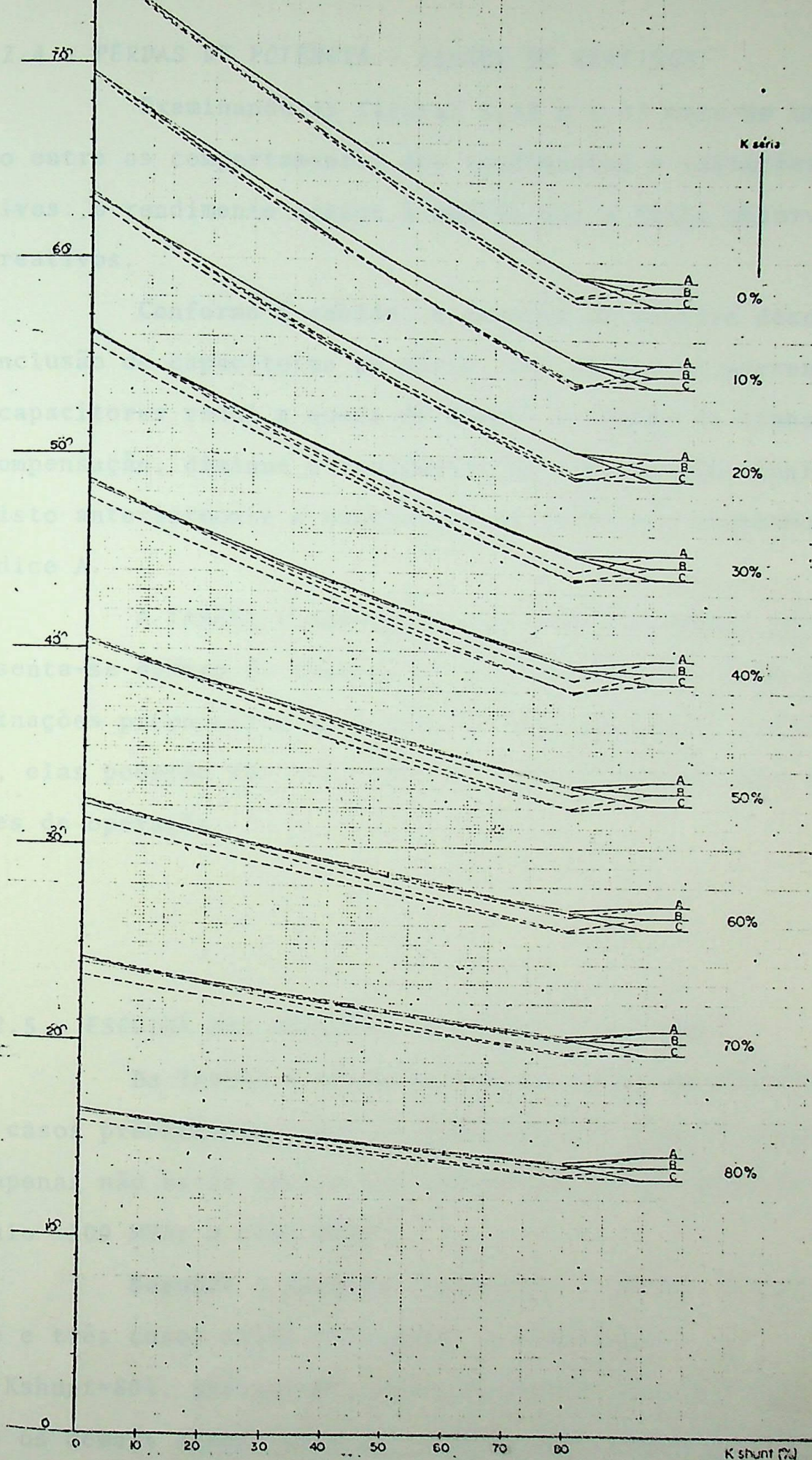


Figura 5.31- Variação dos Ângulos de Potência com $K_{série}$ e K_{shunt} .

5.8.2.4 - PERDAS DE POTÊNCIA - FLUXOS DE REATIVOS

Examinando as figuras 5.32 e 5.33 nota-se uma relação entre os comportamentos dos rendimentos e variações de reativos: o rendimento cresce à medida que a linha absorve mais reativos.

Conforme é sabido, a geração de reativo decorre da inclusão de capacitores em série, nas linhas. A presença dos capacitores reduz a queda de tensão ao longo da linha mas em compensação, diminui o rendimento da transmissão, conforme já visto anteriormente e constatado na prática e relatado no Apêndice A.

A TABELA V apresenta casos em que apenas ΔQ não apresenta-se dentro do intervalo pré-estabelecido. Caso estas combinações preencherem as condições de rendimentos satisfatórios, elas poderão ser incluídas na relação das melhores condições de operação.

5.8.2.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Da TABELA V tiram-se vários casos satisfatórios: nove casos preenchendo todos os requisitos e catorze outros que apenas não estão dentro das exigências de ΔQ dentro do intervalo -100 MVar a +100 MVar.

Segundo o aspecto rendimento, tem-se, dentre os vinte e três casos acima referidos, a combinação:

-Kshunt=80%, Ksérie=60%, Nt=2, Modelo B, com $\eta=93,02\%$.

Todos os demais casos entre os vinte e dois restantes, estão com rendimentos inferiores a 93,00%. O caso acima escolhido,

requer uma absorção de reativo por parte da linha, de 231MVar. Assim, a indicação anterior está fora dos limites pré-fixados para ΔQ .

Pelo aspecto econômico, que visa compensações com os menores graus de $K_{série}$ e K_{shunt} , a melhor opção é aquela que proporciona uma economia de apenas 10% na compensação shunt, com relação à indicação anterior:

- $K_{shunt}=70\%$, $K_{série}=60\%$, $N_t=2$, Modelo A, $\eta=92,41\%$.

Este caso também supera os limites de ΔQ , pois apresenta-se com $\Delta Q = 194,37$ MVar.

Fazendo agora uma escolha que envolva também ΔQ dentro de seu limite pré-fixado, poderá ser indicada a combinação:

- $K_{shunt} = K_{série} = 80\%$, $N_t=5$, com o rendimento de 92,61%. Entretanto, o custo desta combinação série-shunt deverá ser bem alto, considerando-se que $N_t = 5$ e os altos de compensações requeridos. Uma opção razoável, ainda para ΔQ dentro de seus limites poderá ser:

- $K_{shunt} = K_{série} = 70\%$, $N_t=2$, Modelo A, com um rendimento pouco abaixo dos casos até então citados: $\eta=92,29\%$ e com ΔQ praticamente dentro dos seus limites: $\Delta Q = -103,02$ MVar.

No capítulo VI, onde se efetua uma análise de custos, poder-se-á optar por um destes casos de uma maneira mais firme.

5.8.3 - FATOR DE POTÊNCIA = 0,95 INDUTIVO ($Q_2 = 267,55$ MVar)

5.8.3.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

Dentro do intervalo de 490 a 525 KV, a carga indutiva ora em pauta se apresenta inviável de ser transmitida. As quedas de tensão são muito altas, requerendo altos valores para U_1 . A figura 5.34 mostra que inúmeros casos de compensações se apresentam com valores de U_1 acima de 600 KV. Somente a presença de altos graus de compensação série é que poderá reduzir estas altas quedas de tensão.

Um acréscimo gradual e proporcional no grau de compensação série não proporcionará à linha uma resposta totalmente linear, no decréscimo das quedas de tensão. Para os maiores $K_{série}$, U_1 pouco se reduz com o aumento da compensação série. A figura 5.34 mostra que este problema é maior quando a compensação shunt acompanhante está entre 0% e 30%. Mesmo assim, consegue-se obter cerca de onze casos em que a tensão U_1 se encontra abaixo de 525 KV.

Uma compensação série superior a 80% poderia ser a solução para a redução maior das quedas de tensão, para que a tensão U_1 fique abaixo dos 525 KV. Entretanto, esta medida pode não ser viável tecnicamente, devido a problemas de proteção e economicamente, devido aos altos custos desta instalação.

Analisando a TABELA VI, nota-se que a operação da linha com esta carga indutiva, não é muito viável, não só devido às altas quedas de tensão, mas também e principalmente, pelas sobretensões altas ao longo da linha (Ver item seguinte).

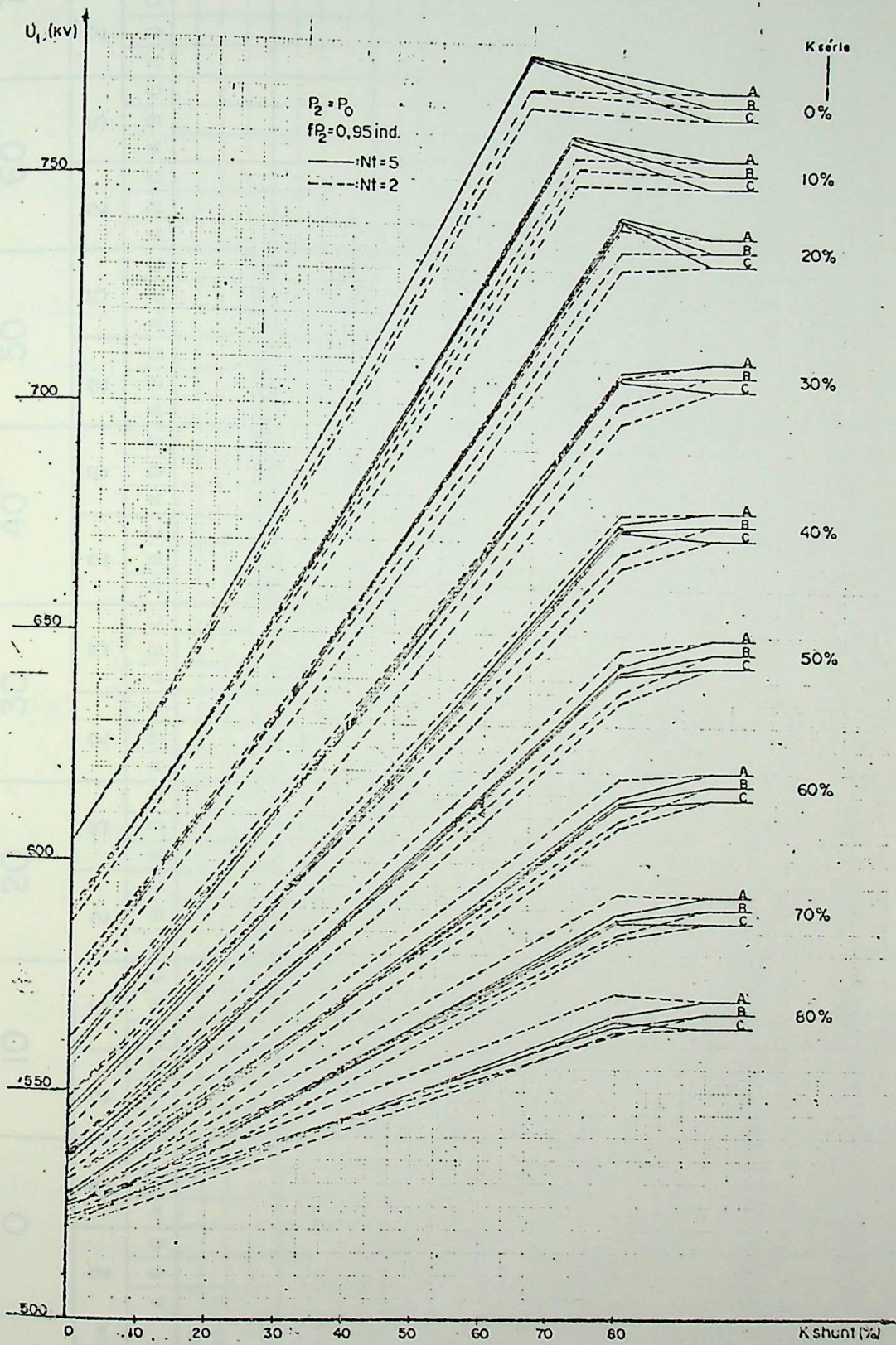


Figura 5.34 - Tensões no transmissor x Kshunt e Ksérie.

$U = 500 \text{ KV.}$

$f_2 = P_0$

TABELA VI -

- ÁREAS HACHURIADAS: SÃO CASOS DENTRO DOS REQUISITOS

Kshunt (%)	Kshunt (%)	0		10		20		30		40		50		60		70		80	
		0		2		5		2		5		2		5		2			
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A		B
0	nº de trechos tipo de linha Um < 530 KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
10	Um < 530 KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
20	Um < 530KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
30	Um < 530 KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
40	Um < 530KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
50	Um < 530KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
60	Um < 530KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
70	Um < 530KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		
80	Um < 530KV 490 < U ₁ < 525 e < 30° 100 < Δ0 < 100																		

5.8.3.2 - TENSÃO MÁXIMA AO LONGO DA LINHA

Pelo exame da TABELA VI e da figura 5.35, nota-se que nenhuma combinação série-shunt estudada consegue fazer com que a tensão máxima ao longo da linha, seja inferior a 530 KV.

Uma medida racional, neste caso, é a sugestão de melhorar o fator de potência no receptor, para que a transmissão se processe segundo o fator de potência unitário. Outra medida, uma outra menos razoável é aquela de se reforçar o isolamento nas regiões mais próximas do transmissor, já que é nesta região que as maiores sobretensões são obtidas.

5.8.3.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

Ao contrário das tensões, os ângulos de potência para as cargas indutivas são muito bons. Para a carga atual, cerca de 45% dos casos analisados estão dentro dos limites de 30° , conforme a figura 5.36 e a TABELA VI mostram. Assim é que para $K_{série} \geq 50\%$, independentemente de K_{shunt} , os ângulos de potência são inferiores a 28° .

Pode ser ainda observado novamente a predominância do modelo C: ele supera a A e B a partir de $K_{série} = 30\%$ (independentemente de K_{shunt}). Para valores de $K_{série}$ inferiores a 30%, o modelo B é levemente superior. Entretanto, estas diferenças constatadas, não interferem de maneira significativa nas escolhas das melhores opções, já que as variações são em torno de $0,5^\circ$ apenas.

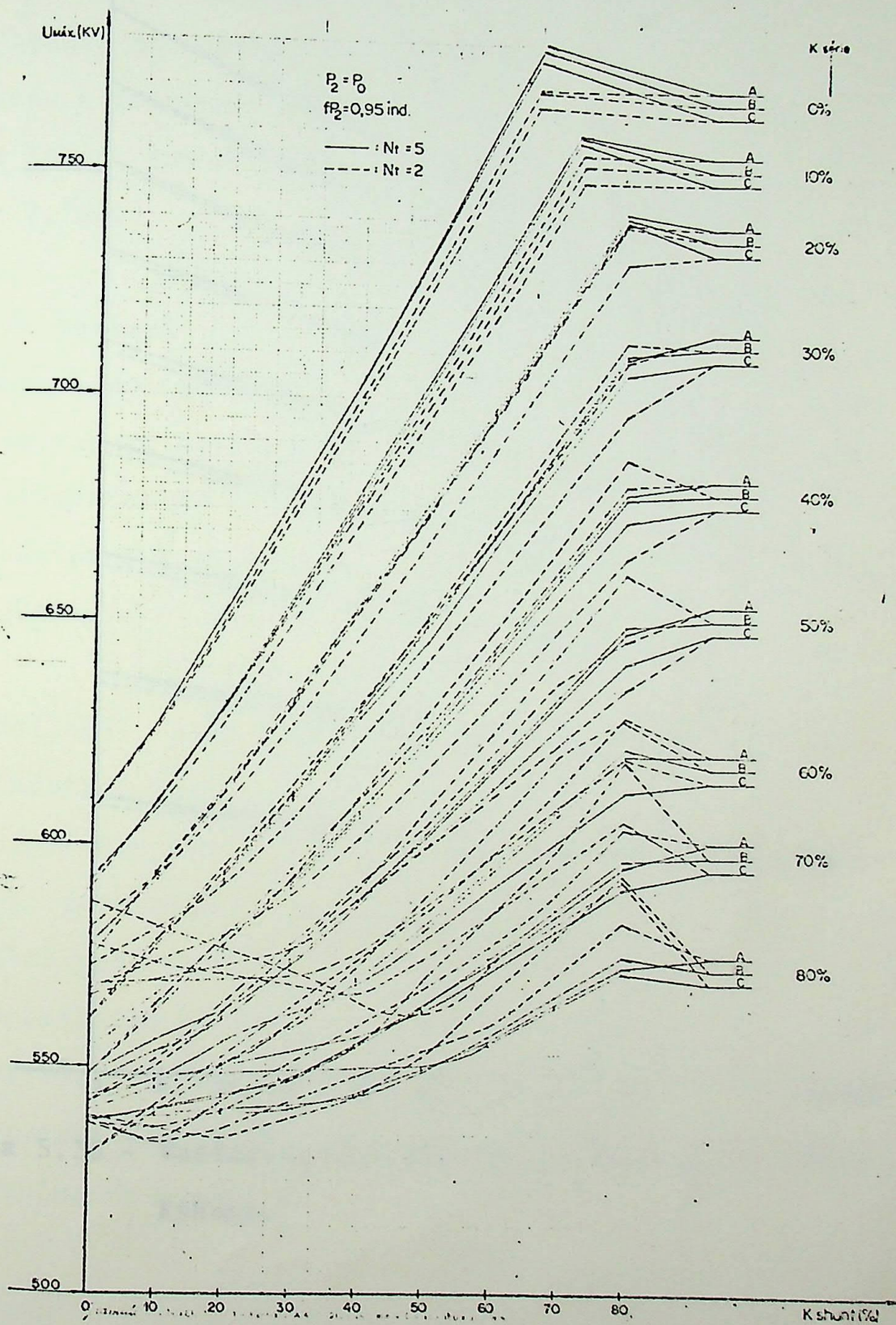


Figura 5.35 - Tensões máximas ao longo da linha x Ksérie e Kshunt. $U_2 = 500 \text{ KV.}$

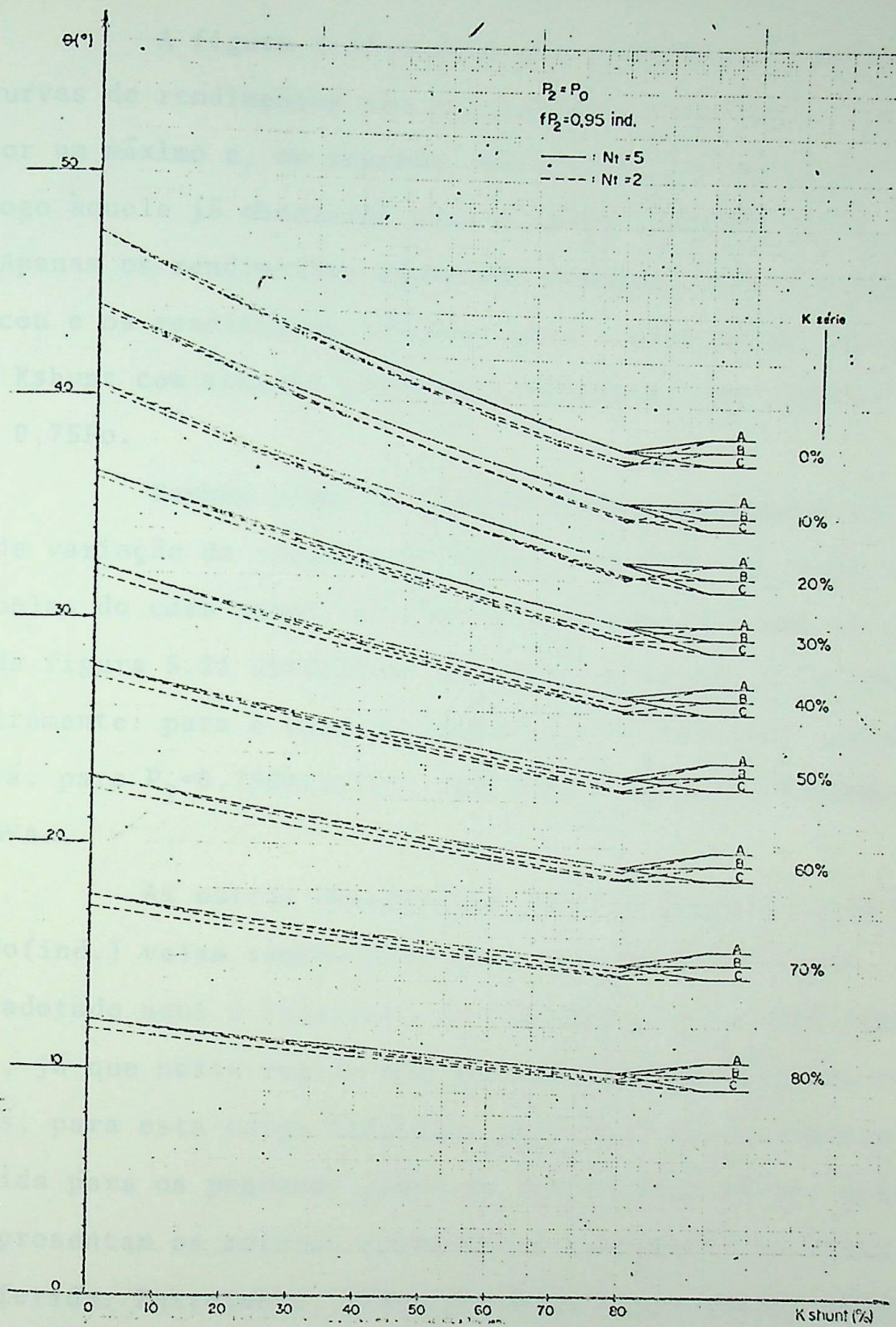


Figura 5.36 - Variações dos ângulos de potência com Ksérie e Kshunt.

A figura 5.37 mostra que para Kshunt crescente, as curvas de rendimentos são inicialmente crescentes, passando por um máximo e, em seguida, decrescem. O comportamento é análogo àquele já observado para a carga indutiva de $P_2 = 0,75 P_o$. Apenas os rendimentos agora são menores, pois a carga cresceu e os rendimentos máximos, para o caso atual, surgem para Kshunt com menores graus de compensação que aqueles de $P_2 = 0,75 P_o$.

Também possuirão comportamento semelhante as curvas de variação de reativo do caso $P_2 = 0,75 P_o, f_{p_2} = 0,95$ indut. e aquelas do caso atual, na figura 5.38. Assim é que as curvas da figura 5.21 diferirão daquelas da figura 5.38 apenas ligeiramente: para o caso da linha sem compensação, a linha gerará, para $P_2 = 0,75 P_o$ (ind.), 468 NAr e, para $P_2 = P_o$ (ind.), 412 NAr.

As outras observações efetuadas para ΔQ em $P_2 = 0,75 P_o$ (ind.) valem também para esta ocasião. Assim sendo, não será adotado aqui o intervalo de -100 NAr a +100 NAr rigidamente, já que nesta região não se encontram os melhores rendimentos, para esta carga indutiva. Esta observação somente não é válida para os pequenos graus de compensação série, pois estes apresentam os maiores rendimentos exatamente na faixa de ΔQ referida. Entretanto, estas pequenas compensações série não deverão ser utilizadas, pois não reduziriam as tensões e os ângulos de potência.

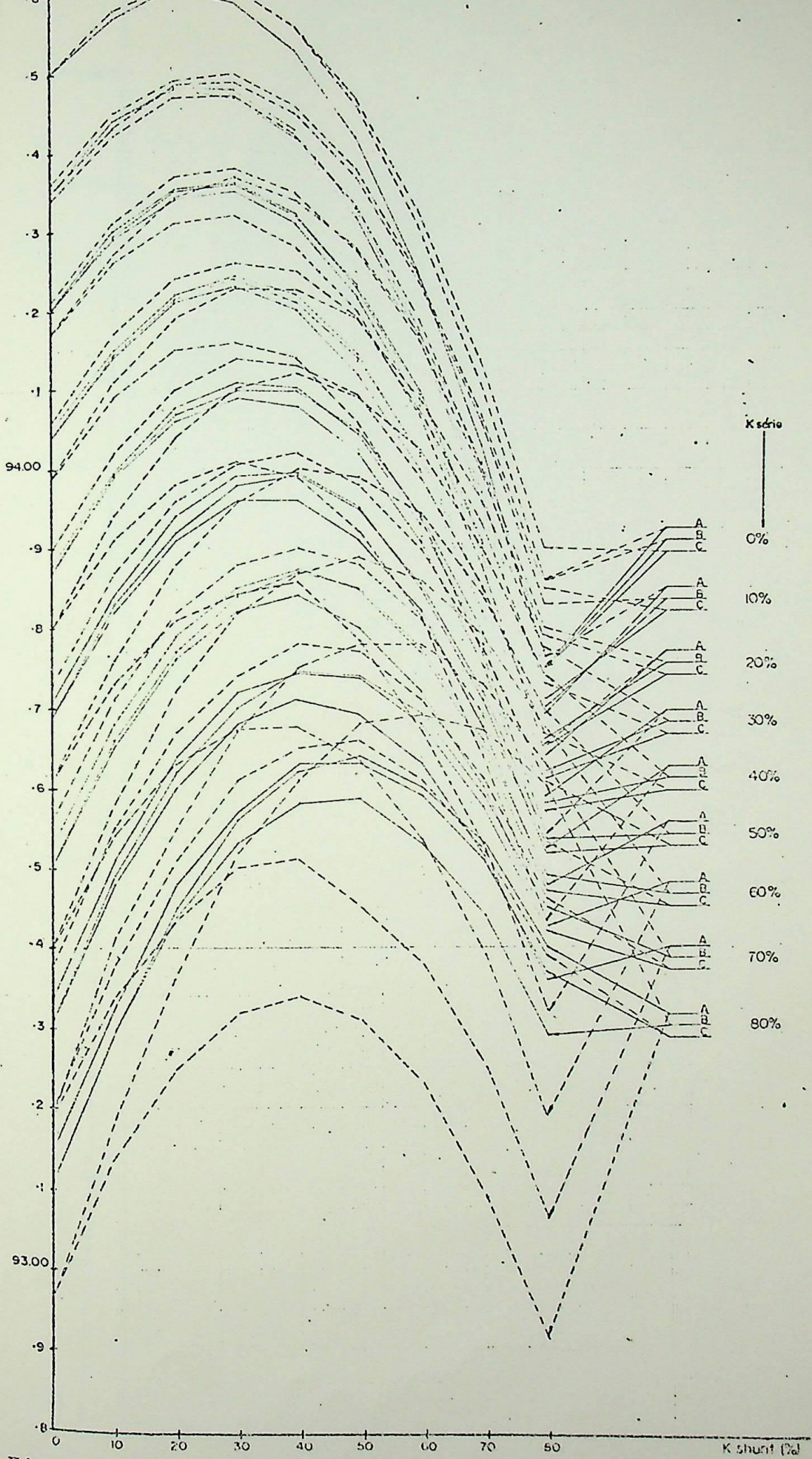


Figura 5.57 - Rendimentos x Kshunt e Ksérie.

5.8.3.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES

Com relação aos limites adotados no início destes estudos, a operação com esta carga indutiva é totalmente inviável. Um simples exame da TABELA VI comprova esta afirmativa. Desta forma, a análise, com relação a esta carga, termina laconicamente aqui.

No entanto, antes de tudo pretende-se obter uma otimização, isto é, uma escolha econômica e tecnicamente racional, objetivando operações com o mínimo de custos e perdas. Nestas condições, justo será que se determine em que condição ou condições a linha poderá operar com esta carga indutiva.

Assim é que, no aspecto rendimento esta carga indutiva pode levar vantagens com relação às cargas capacitivas e resistivas. A figura 5.37 mostra que os rendimentos variam desde o mínimo de 92,98% até o máximo de 94,60% para a carga indutiva atual, ao passo que, para a mesma potência ativa, mas com $fp_2=0,95$ capacitivo esta faixa vai de 89,30% até 93,30%. Com o fator de potência unitário, o rendimento irá desde 91,7% até 94,20%.

Analisando cuidadosamente as figuras 5.34(U_1) e 5.35($U_{m\acute{a}x}$), constata-se vários casos em que a tensão no transmissor está por volta de 540 KV e a tensão máxima, ao longo da linha, em torno dos 550 KV. Isto ocorre para $Ks\acute{e}rie \geq 50\%$ e $Kshunt \leq 30\%$. Desta forma, admitindo novos limites para U_1 e $U_{m\acute{a}x}$, pode-se escolher uma combinação série e shunt que leve à operação da linha com esta carga indutiva. Deverá ser aumentado o isolamento da metade de linha mais próxima do transmissor, conforma a figura 5.39 mostra. Na TABELA VIa tem-se os casos que satisfazem aos limites de U_1 (540 KV) e $U_{m\acute{a}x}$ (550KV).

Ksérie (%)	Kshunt (%)	0			10			20			30					
	nº de trechos	2		5	2		5	2		5	2		5			
	tipo de linha	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
50	$U_M \leq 550 \text{ KV}$															
	$490 \leq U_i \leq 540$															
	$\theta \leq 30^\circ$															
60	$U_M \leq 550 \text{ KV}$															
	$490 \leq U_i \leq 540$															
	$\theta \leq 30^\circ$															
70	$U_M \leq 550 \text{ KV}$															
	$490 \leq U_i \leq 540$															
	$\theta \leq 30^\circ$															
80	$U_M \leq 550 \text{ KV}$															
	$490 \leq U_i \leq 540$															
	$\theta \leq 30^\circ$															

Deixou-se de apontar os reativos, uma vez que êstes, para a faixa de -100 a +100 MVar envolvem tensões ao longo da linha superiores a 570 KV.

Dentre os casos aceitáveis segundo a tabela anterior, o caso mais econômico é a combinação:

-Ksérie = 50%, Kshunt=0%, Modelo B (ou A), Nt = 2.

Portanto, não haverá compensação shunt. Examinando a figura 5.37, relativa a rendimentos, nota-se que êste caso é também o de maior rendimento dentre todos apresentados na tabela acima, a menos do seu equivalente, para Nt=5, que apresenta o rendimento de 93,69% contra 93,61%, de Nt=2. Esta diferença, mínima, não modificará a escolha acima. A figura 5.39 apresenta os resultados e o perfil de tensão para o caso ora escolhido. Novamente deve ser frisado que esta solução não satisfaz às hipóteses iniciais. Ela foi apresentada com o objetivo de destacar a condição menos desfavorável em que se podia operar com esta carga indutiva.

Ainda dentro aspecto, pode ser citado o caso de $K_{série}=80\%$ e $K_{shunt}=0\%$, Modelo B=A, $N_t = 2$, o qual também satisfaz aos limites de U_1 em 525 KV (Veja a TABELA VI) e que apresenta $U_{máx} = 539$ KV. Seu rendimento no entanto, é menor que o do caso anteriormente citado: 92,90%.

Assim sendo, os dois casos poderão ser apresentados como em mesmo nível, já que o primeiro requer maior isolamento, mas apresenta maior rendimento e é mais econômico em termos de capacitores. O segundo pode ser também preferido já que requer menor nível de isolamento.

Dentro desta linha de raciocínio, pode ser ainda indicado os casos, para $N_t = 2$, para $K_{série}=60\%$ e $K_{série}=70\%$. Eles são intermediários dos dois casos já citados. Dependerá então somente do projetista optar por maiores rendimentos com maiores custos de isolamento ou o inverso.

5.9 - ESTUDO DE $P_2 = 1,25 P_0$ (1017,58 MW)

5.9.1 - FATÔR DE POTÊNCIA UNITÁRIO ($Q_2=0$)

5.9.1.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

Com as análises já efetuadas, o comportamento da carga atual poderá ser previsto, com relação às compensações. Assim é que, como a figura 5.40 mostra, há uma redução de tensões no transmissor para os menores valores de $K_{série}$, como já vinha ocorrendo anteriormente.

Também já não causa surpresa o fato de que para altos graus de compensação série, pouco se consegue em termos de redução de U_1 . Para pequenos K_{shunt} , é preferível usar $K_{série} = 70\%$ do que $K_{série} = 80\%$, pois esta última é menos eficiente na redução de U_1 , conforme a figura 5.40 demonstra. Este fato é bem notório para K_{shunt} abaixo de 30%.

Esta figura e a TABELA VII evidenciam a importância de se usar $K_{série} \geq 60\%$ para a obtenção de valores de tensão menores que 525 KV, no transmissor.

5.9.1.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

A Figura 5.41 permite concluir que, para o limite de 530 KV poucas são as combinações que satisfazem. Tal como das vezes anteriores (quando da análise de cargas menores), também aqui as maiores sobretensões são para as compensações efetuadas em menor número de trechos, destacando-se neste aspecto, uma vez mais, o modelo C. Entretanto, as compensações efetuadas para $N_t = 5$ também apresentam sobretensões acima de

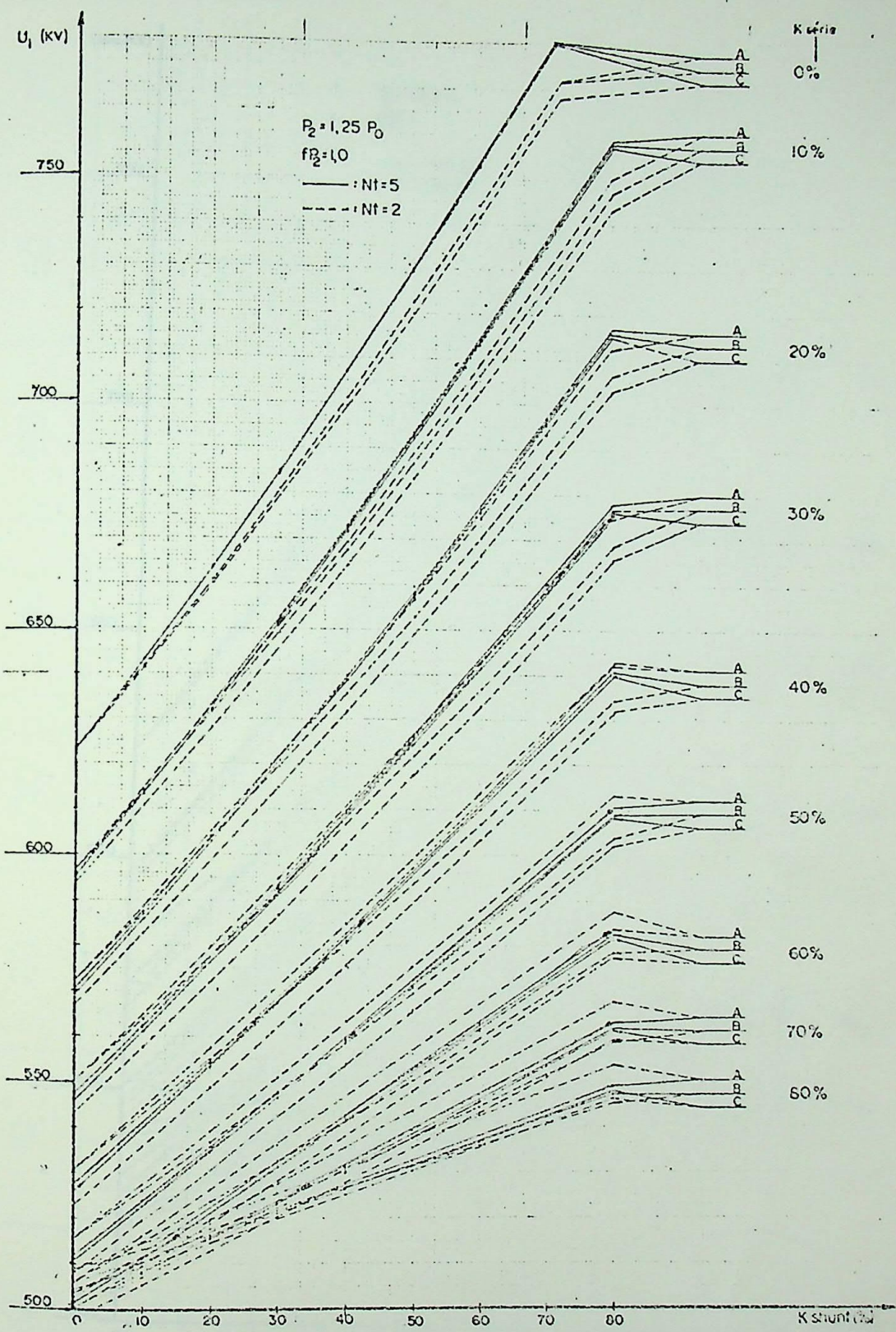


Figura 5.40 - Tensões no transmissor x Kshunt e Ksérie.

$U_2 = 500 \text{ KV.}$

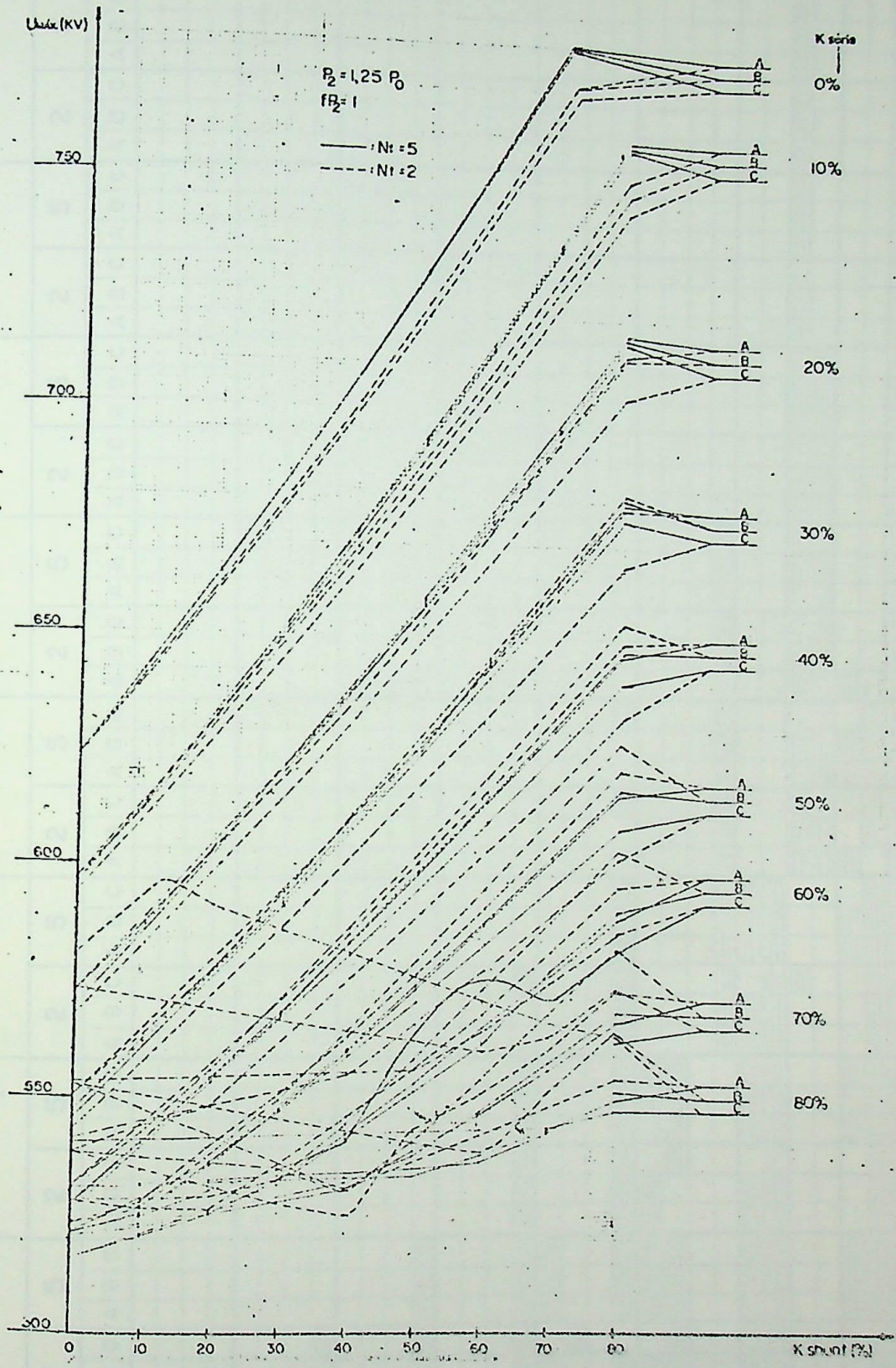


Figura 5.41 - Tensões máximas ao longo da linha x Kshunt e Kserie. $U_2 = 500$ KV.

530 KV, principalmente para Ksérie = 80%. Nos casos vistos anteriormente para fator de potência unitário, isso não ocorre.

5.9.1.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

Com o aumento da potência entregue, os ângulos de potência devem crescer. Há uma grande semelhança entre as curvas da figura 5.42 e aquelas da figura 5.31 (para $P_2 = P_0$, $fp_2 = 0,95$ capacitivo). Esta semelhança é mais marcante na região em que se tem $\theta < 30^\circ$. Para altos valores de θ são visíveis as desvantagens de se operar com cargas capacitivas: a semelhança acima vai desaparecendo pois os ângulos de potência, para a carga capacitiva referida, são maiores que aqueles da carga indutiva ora em pauta.

A observação acima é importante para se frisar uma vez mais a desvantagem de se operar com cargas capacitivas no que se refere à estabilidade.

Uma vez mais, as compensações em menor número de trechos apresentam valores ligeiramente menores para os ângulos de potência.

5.9.1.4 - PÊRDAS DE POTÊNCIA - FLUXO DE REATIVO

Para o transporte desta carga constata-se uma vez mais que o tipo de compensação "B" se sobressai entre os demais no aspecto de *rendimentos*. No caso ora em análise, tem -

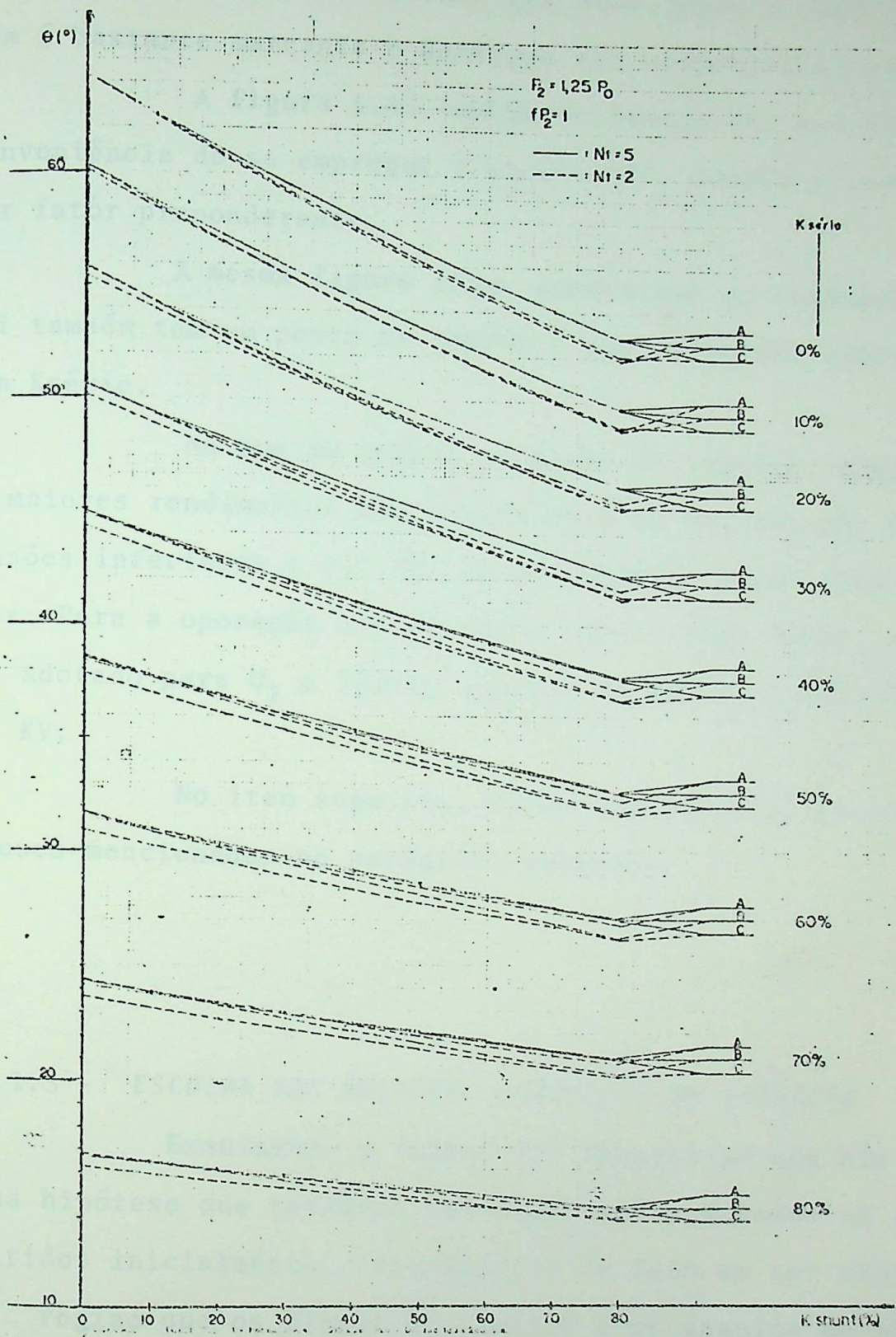


Figura 5.42 - Ângulos de potências x Kshunt e Kserie.

se a maior vantagem observada até aqui, para o tipo "B". Também é bastante marcante o destaque das compensações para $N_t=2$.

A figura 5.43 também evidencia uma vez mais a inconveniência de se empregar o modelo "A", quando o rendimento fôr fator preponderante.

A mesma figura ainda mostra que os rendimentos aqui também têm um ponto de máximo e que as perdas aumentam com K série.

No que se refere ao fluxo de reativo, neste caso os maiores rendimentos não surgem para os menores ΔQ . Para as tensões inferiores a 530 KV, ΔQ se encontra entre -300 e -400 MVar. Para a operação com ΔQ entre -100 e +100 MVar, deverá ser adotado para U_1 o limite superior de 530 KV e para $U_{m\acute{a}x}$, 550 KV.

No item seguinte, serão consideradas as duas hipóteses mencionadas no parágrafo anterior.

5.9.1.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Examinando a TABELA VII observa-se que não há nenhuma hipótese que satisfaz simultaneamente a todos os limites admitidos inicialmente. Isto decorre do fato de ser exatamente na região que os fluxos de reativo e os ângulos de potência deixam de se satisfazer às exigências que as tensões começam a entrar dentro dos limites a elas predeterminados. Pode-se concluir daí, que há uma região de transição, na qual não se obtem simultaneamente U_1 , $U_{m\acute{a}x}$, θ e ΔQ dentro de seus melhores limites de atuação. Esta região, como a TABELA VII mos

tra, se situa por volta de $K_{série} = 60\%$ e 70% e $K_{shunt} = 20\%$ a 30% .

Portanto, já se sabe em qual região, em termos de graus de compensação série e shunt, que se deve operar, para a carga $P_2 = 1,5P_0$, fator de potência unitário. Para a escolha definitiva, envolvendo o tipo de compensação e os graus de compensação série e shunt mais vantajosos, devem ser consideradas algumas hipóteses e concessões:

I) Inicialmente proceder-se-á a uma escolha, sem se considerar os limites de ± 100 MVAR para ΔQ . Serão tomados rigorosamente todos os outros aspectos (U_1 , $U_{máx}$, θ e η). Desta forma, o grau de compensação série que satisfará é $K_{série} = 70\%$. O número de trechos deverá ser $N_t = 5$. O modelo de compensação será função do grau de compensação K_{shunt} . A escolha deste, no entanto, será função do rendimento ou da economia que se queira fazer nos bancos de reatores. O máximo rendimento será, dentro da região coberta por $K_{série} = 70\%$ (e que satisfaz às exigências de U_1 , $U_{máx}$ e θ), para $K_{shunt} = 30\%$: $\eta = 91,82\%$ e o modelo é o "B". Caso se queira economizar em reatores, perde-se em rendimento. Ao menor valor de K_{shunt} corresponde o menor rendimento. Nesta situação, a TABELA VII e a figura 543 indicam:

- $K_{série} = 70\%$, $K_{shunt} = 0\%$, $N_t = 5$, modelo "C" (pois este modelo supera aos outros dois em rendimento, nesta combinação), com o rendimento de $91,20\%$. Os modelos "A" ou "B" poderão ser utilizados, com o rendimento ligeiramente inferior: $\eta = 91,16\%$.

II) As duas combinações série-shunt até aqui apresentadas apresentam altos valores para ΔQ . Para $K_{shunt} = 30\%$ e $K_{série} = 70\%$, $\Delta Q = 220$ MVAR e, para $K_{shunt} = 0\%$ e $K_{série} = 70\%$,

$\Delta Q = 430$ MVar. Caso se queir a linha gerando menos reativo, pode-se operar com $K_{s\acute{e}rie} = 60\%$. Assim procedendo, será obtido maior rendimento, pois êste cresce com o decréscimo de $K_{s\acute{e}rie}$.

Prosseguindo atendendo às exigências de U_1 e de $U_{máx}$ e com ângulos de potência levemente superiores a 30° , a combinação $K_{s\acute{e}rie} = 60\%$ e $K_{shunt} = 20\%$, para $N_t = 2$ ou 5, poderá ser utilizada. Os ângulos de potência estarão entre $30,20^\circ$ e $30,40^\circ$. Como a diferença entre $N_t = 2$ ou 5  mínima, opta-se, uma vez mais, por $N_t = 2$. A TABELA VII apresenta duas opções mais: modelo "A" ou "B"? O modelo "B" apresenta maior rendimento e menor ângulo de potência que "A", enquanto que êste último supera "B" com relação ao fluxo de reativo, conforme a TABELA VIIa demonstra:

TABELA VIIa

K série: 60%	n_t	2	
	Modelo	A	B
	θ	$30,36^\circ$	$30,21^\circ$
K shunt: 20%	n	91,70 %	91,81%
	ΔQ	-146,88 MVar	-159,48 MVar

Tudo indica que a melhor opção seja mesmo o modelo "B", pois até aqui êle vem predominando e não seria apenas pelo menor fluxo de reativo que o modelo "A" seria escolhido.

III) Caso seja imperioso que o fluxo de reativo seja realmente minimizado tanto quanto se possa, a TABELA VII apresenta as seguintes possibilidades:

a) A utilização da combinação $K_{s\acute{e}rie} = 60\%$ e $K_{shunt} = 30\%$, na qual θ e ΔQ estão dentro dos pré-requisitos e a tensão no transmissor como sendo a máxima da linha, superando os 530 KV:

TABELA VIIb

	n_t	2			5		
	Modelo	A	B	C	A	B	C
K série: 60%	U_1 (KV)	536,1	532,4	528,1	532,4	531,8	531,1
	$U_{m\acute{a}x}$ (KV)	536,1	532,4	555,21	532,14	531,8	535,0
K shunt: 30%	θ (°)	29,71	29,48	28,97	29,80	29,76	29,67
	ΔQ (MVar)	72,74	91,59	121,4	95,38	98,38	103,36
	η (%)	91,86	92,02	92,08	91,98	92,00	92,01

Os modelos "C" ficam descartados, já que seus fluxos de reativo superam os 100 MVar. Também ficam fora de cogitação as compensações em que $N_t=5$, uma vez que devem custar mais caro, sem propiciarem marcantes vantagens. Novamente, a escolha final recai sobre os modelos "A" e "B", compensados em $N_t=2$. Dos cinco itens analisados na TABELA VIIb, três favorecem ao modelo "B" (U_1 , $U_{m\acute{a}x}$ e η), e dois favorecem ao modelo "A" (θ e ΔQ). A escolha final deverá recair, novamente, sobre o modelo "B".

b) Uma outra solução, mais econômica que a anterior, poderá ser obtida de $K_{s\acute{e}rie}=50\%$ e $K_{shunt}=20\%$. Nesta hipótese, além da economia nos graus de compensação, os rendimentos serão também maiores. Por outro lado, os ângulos de potência superarão o limite de 30° e as tensões continuarão superando os 530 KV. A TABELA VIIc apresenta os números exatos e, da mesma forma que no item "a", o modelo "B" pode ser o escolhido.

Fica portanto constatada a existência de uma região de combinações série e shunt, que satisfaz pelo menos em parte. Dentro das particularidades de cada necessidade, o pro

TABELA VIIc

	n_t	2			5		
		Modêlo	A	B	C	A	B
K série: 50%	U_1 (KV)	539,1	536,7	530,8	535,7	535,4	534,4
	$U_{máx}$ (KV)	539,1	536,7	548,3	535,7	535,4	536,6
K shunt: 20%	θ (°)	36,84	36,70	36,12	36,92	36,90	36,79
	ΔQ (MVar)	44,42	54,52	84,36	60,83	62,40	67,29
	n (%)	91,94	92,03	92,12	92,03	92,05	92,06

jetista poderá optar dentro desta região, por uma combinação mais adequada a seus propósitos finais, ou seja dirigir sua escolha para a sua meta principal (U_1 mínimo, rendimento máximo, θ mínimo, etc.).

5.9.2 - FATÔR DE POTÊNCIA = 0,95 CAPACITIVO ($Q_2 = -334,44 \text{ MVAR}$)

5.9.2.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

Tal como nas duas outras cargas capacitivas anteriormente analisadas, também nesta haverá dificuldade em enquadrar U_1 dentro dos limites de 490 e 525 KV. Observando a figura 5.45 e comparando a TABELA VIII com a TABELA II (para $P_2=0,75P_0$) e com a TABELA V (para $P_2=P_0$), nota-se que à medida que a potência ativa cresce, mantido o fator de potência em 0,95 capacitivo, maiores são os números de combinações série e shunt que satisfazem às condições de $U_1: 490\text{KV} \leq U_1 \leq 525\text{KV}$.

Outro aspecto a ser destacado: comparando agora as figuras 5.7, 5.29 e 5.45, nota-se que, nas três figuras, os comportamentos das curvas que envolvem $K_{\text{série}}=70\%$ e 80% praticamente não se alteram com a carga transportada. Isto é, para as três cargas capacitivas analisadas, as curvas referidas passam quase que pelos mesmos pontos de tensões.

Por outro lado, para os pequenos graus de compensação série, notam-se grandes quedas de tensão na linha para a carga de $1,25P_0$. Para $K_{\text{série}}=0\%$ (e também $K_{\text{shunt}}=0\%$), a tensão no transmissor será de 577,80 KV.

Com relação ao número de trechos e ao modelo de compensação, nota-se que o modelo "A" e $N_t = 2$ apresentam-se com um número de combinações dentro do intervalo de 490 KV a 525 KV levemente maior que os demais. No entanto, o modelo "A" para a mesma combinação série-shunt, é o que apresenta as maiores tensões U_1 (Para $K_{\text{série}} < 40\%$, $N_t=5$ e, para $K_{\text{série}} \geq 40\%$, $N_t=2$). Esta última observação não significa uma desvantagem constante, pois para $U_1 < 490\text{KV}$ quanto maior for U_1 , melhor será.

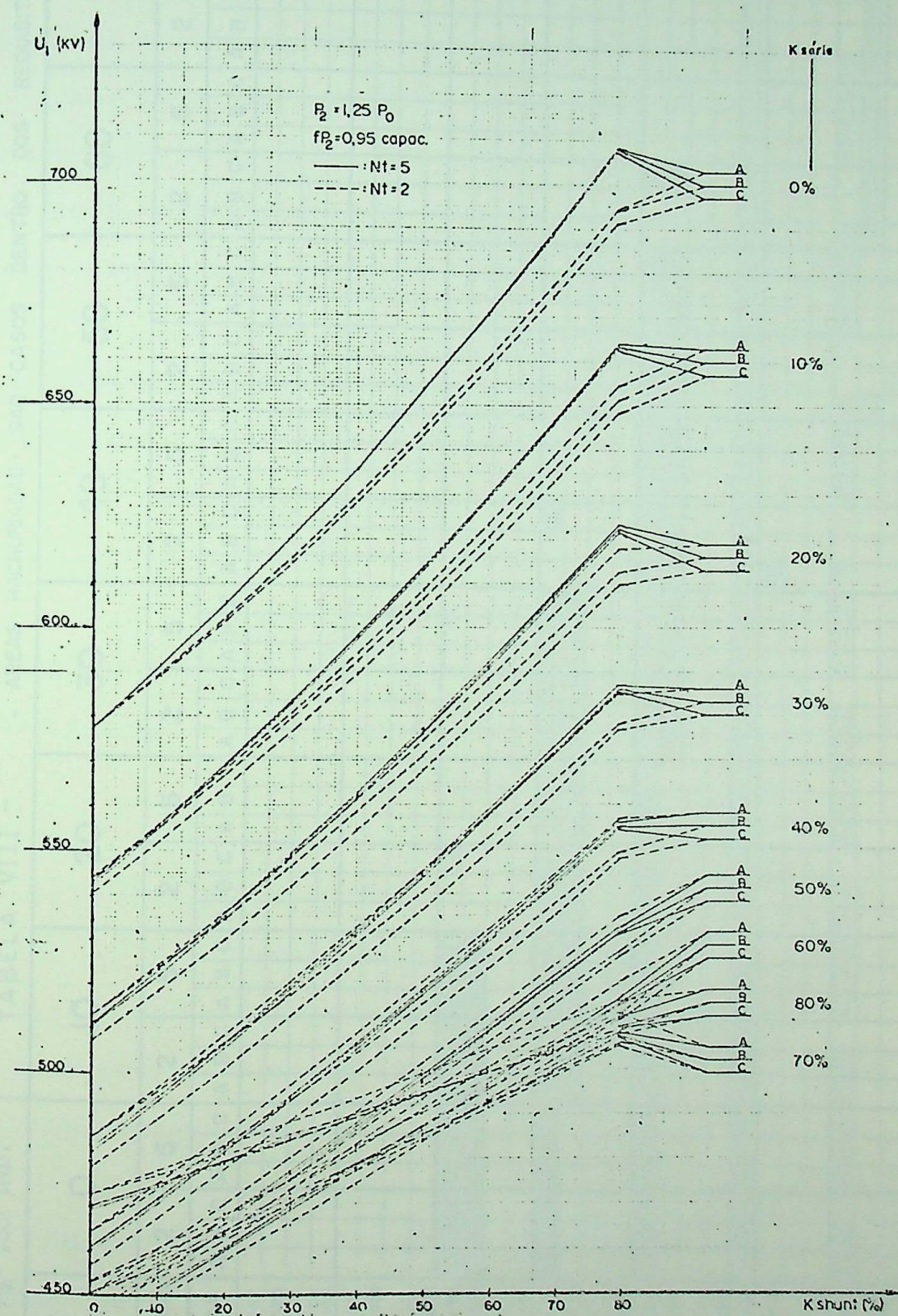


Figura 5.45 - Tensões no transmissor x Kshunt e Ksérie.

$$U_2 = 500 \text{ KV.}$$

TABELA VIII - ÁREAS HACHURIADAS: SAO CASOS DENTRO DOS REQUISITOS

$P_2 = 1,25 F_0$ $f_{R_2} = ,95$ IND.

Kshunt (%)	0			10			20			30			40			50			60			70			80		
	2	5	A B C	2	5	A B C	2	5	A B C	2	5	A B C	2	5	A B C	2	5	A B C	2	5	A B C	2	5	A B C			
0	nº de trechos tipo de linha $U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										
10	$U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										
20	$U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										
30	$U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										
40	$U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										
50	$U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										
60	$U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										
70	$U_M < 530$ KV $490 < U_l < 525$ $\phi < 30^\circ$ $-100 < \Delta U < 100$																										

5.9.2.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

Por se tratar de carga capacitiva, novamente será salientado que a denominação *sobretensões* se refere àqueles valores superiores a 530 KV, ou seja 30 KV a mais que a classe de tensão da linha, que também é a tensão no receptor da linha. Esta observação se faz necessária, já que se esta denominação se referisse às tensões U_1 o número de sobretensões seria maior e a análise seria incorreta, pois na verdade não se cogitará de operações com U_1 abaixo de 490 KV.

A exemplo do que vem ocorrendo com frequência, notadamente para cargas capacitivas, os modelos "C", com $N_t=2$, para $K_{série} \geq 60\%$, apresentam grandes sobretensões. Estas, como já foi mostrado, se fazem presente em sua maioria, nas extremidades dos capacitores.

A figura 5.46 apresenta um grande número de compensações com $N_t=5$, em que temos $U_{máx} \geq 530$ KV, fato que não ocorria antes.

5.9.2.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

É o fator mais restritivo para o transporte desta alta carga ativa acompanhada de reativo capacitivo. Somente para $K_{série}$ acima de 70% é que se obtém $\theta < 30^\circ$. Sem nenhuma compensação, $\theta=80,87^\circ$.

Comparando as figura 5.11($P_2=0,75P_o$) e 5.31($P_2 = P_o$) com o caso atual, figura 5.47, nota-se uma grande semelhança de comportamento entre as curvas dos ângulos de potência quando das cargas capacitivas. Desta forma, valem para o caso atual, os comentários efetuados quando das duas cargas capacitivas anteriores.

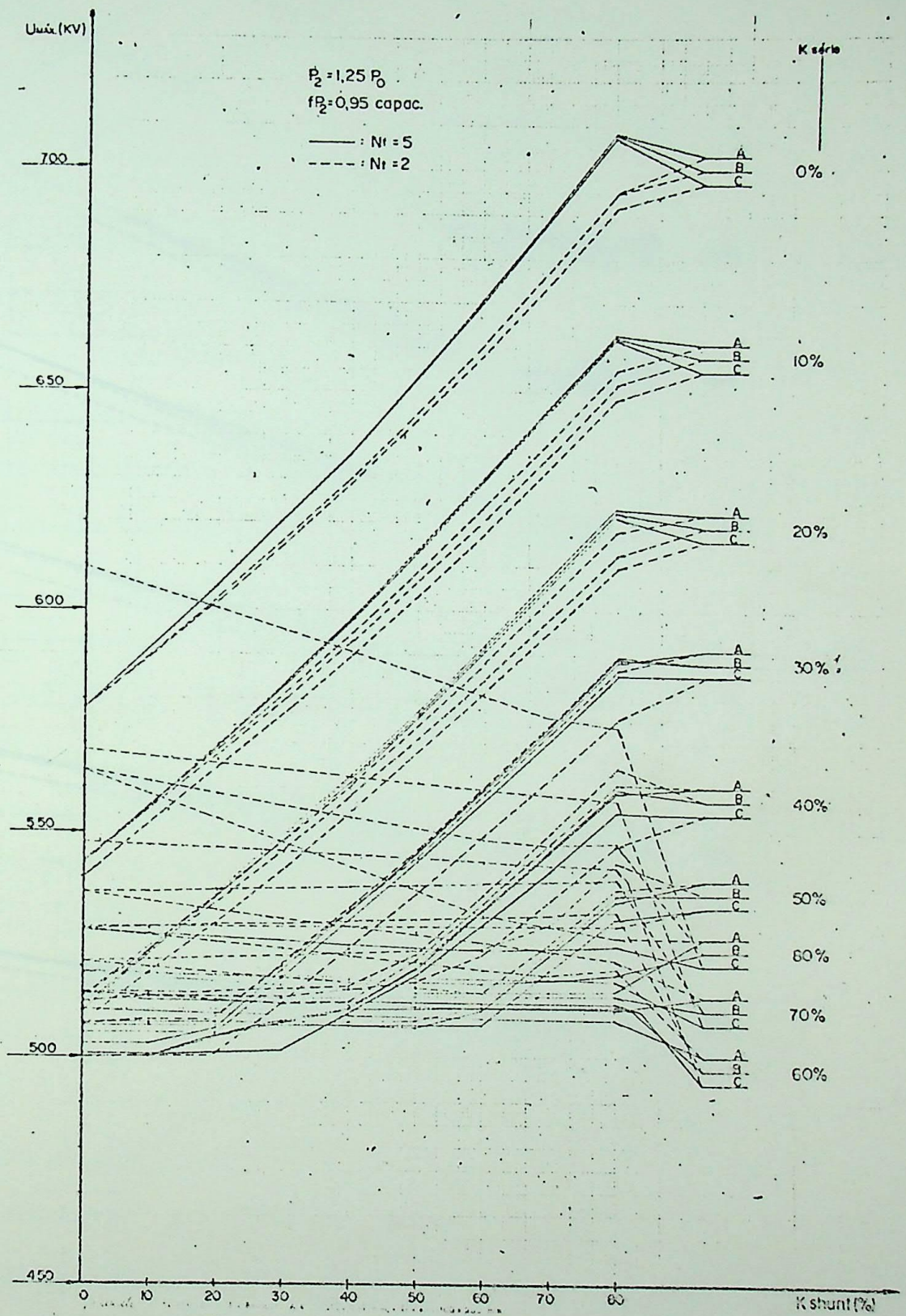


Figura 5.46 - Variações das tensões máximas com $K_{\text{série}}$ e com K_{shunt} . $U_2 = 500 \text{ KV}$.

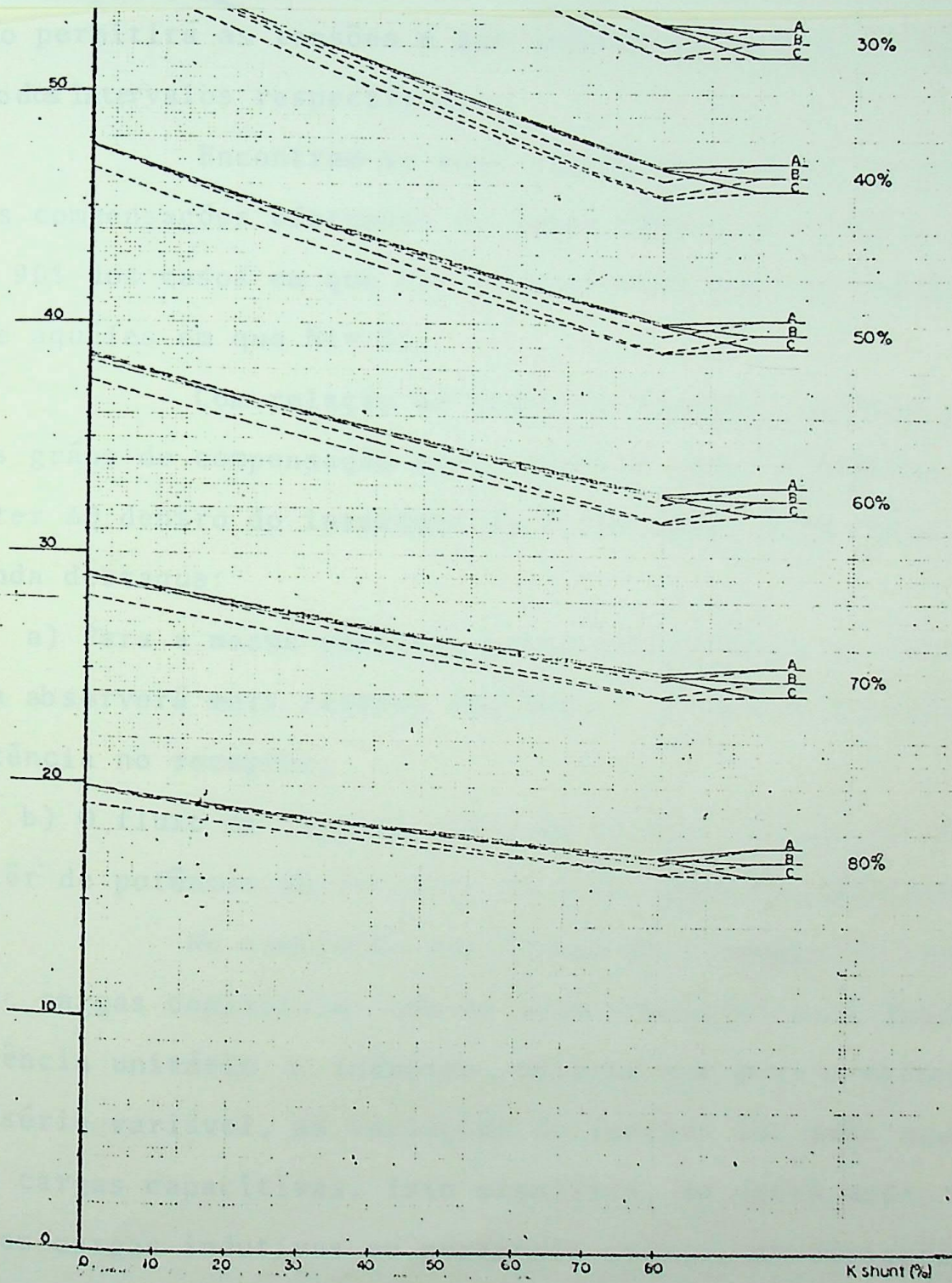


Figura 5.47 - ângulos de potência x K_{shunt} e $K_{série}$.

5.9.2.4 - PÊRDAS DE POTÊNCIA - FLUXO DE REATIVO

A figura 5.48 revela que os rendimentos ora apresentados são os piores observados até aqui. Os rendimentos oscilam desde o mínimo de 88,20% até um máximo de 91,90%. Não se poderá operar com êsse rendimento máximo, uma vez que assim a combinação série-shunt seria: $K_{série}=0\%$ e $K_{shunt}=80\%$, que não permitirá às tensões e aos ângulos de potência ficarem dentro dos intervalos respectivos.

Encontram-se aqui também as maiores vantagens das compensações efetuadas em menor número de trechos. Cerca de 90% dos casos em que $N_t=2$ apresentam maiores rendimentos que aqueles em que $N_t=5$.

Com relação ao fluxo de reativo, somente para altos graus de compensação série ($K_{série} \geq 60\%$) é que se poderá obter ΔQ dentro do intervalo de $\pm 100 \text{ MVar}$. Dois fatos são ainda destaque:

a) Para a mesma potência ativa transmitida, a linha, a linha absorverá mais reativo exatamente ao operar com fator de potência no receptor;

b) O fluxo de reativo pouco se altera, quando se varia o fator de potência do receptor de 0,95 indutivo para 1,00.

No confronto das curvas de variação de reativo das cargas capacitivas com as suas similares para fator de potência unitário e indutivo, nota-se que para o mesmo K_{shunt} e $K_{série}$ variável, as variações de reativo são mais acentuadas nas cargas capacitivas. Isto significa, de outro modo, que para as cargas indutivas ou puramente ativas, as variações de ΔQ com $K_{série}$ são menores, sendo que para as cargas indutivas, a faixa de variação de ΔQ referida é ainda mais concentrada

que para as cargas com fator de potência unitário. Esta observação se faz necessária e importante, porque se constata com isto que há um número maior de casos dentro do intervalo $-100 \text{ NVar} \leq \Delta Q \leq +100 \text{ NVar}$ na seguinte ordem decrescente, com relação aos fatores de potência no receptor: indutivo, unitário e capacitivo.

5.9.2.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Como todas as cargas capacitivas anteriormente analisadas, há um certo número de opções que preenchem totalmente os requisitos. Uma observação à TABELA VIIIa mostra que nove casos satisfazem simultaneamente às exigências de $U_1, U_{\text{máx}}$, θ e ΔQ . Todos estes casos são para $K_{\text{série}}=80\%$. Outro particular: devido às correntes envolvidas, as compensações com menores números de trechos não são as mais indicadas, pois surgiriam sobretensões nos capacitores. Os nove casos apresentados na tabela seguinte, são todos para $N_t = 5$.

TABELA VIIIa

K série (%)	K shunt (%)	60			70			80		
	n_t	5			5			5		
	Modelo	A	B	C	A	B	C	A	B	C
80	$n(\%)$	90,23	90,28	90,27	90,51	90,58	90,55	90,76	90,84	90,8

Novamente tem-se a predominância do modelo "B", com relação aos rendimentos. Da tabela anterior, pode-se concluir que a melhor opção do ponto de vista rendimento, é :

-Ksérie = 80%, Kshunt = 80%, Nt=5, Modelo "B".

Analisando o aspecto *economia* dos graus de compensação, a escolha recai em:

-Ksérie = 80%, Kshunt = 60%, Nt=5, Modelo "B".

Com relação a Nt = 2, as escolhas acima poderiam também ser também procedidas, desde que se reforçasse os isolamentos nas regiões dos capacitores.

5.9.3 - FATOR DE POTÊNCIA = 0,95 INDUTIVO ($Q_2 = +334,44 \text{ MVar}$)

5.9.3.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

As tensões no transmissor, conforme mostra a figura 5.50, são bastante desfavoráveis. Não há nenhuma combinação de compensações dentro do intervalo de 490 KV a 525 KV. O melhor valor lido foi 540,48 KV, para o modelo "C", $N_t = 2$, para $K_{\text{série}} = 80\%$ e $K_{\text{shunt}} = 0\%$, conforme a figura 5.51a demonstra. Entretanto, este modelo é mais desvantajoso que os modelos "A" ou "B", como a mesma figura evidencia: surgem novamente as incômodas sobretensões nas proximidades dos capacitores. Na extremidade do capacitor mais próximo do transmissor, há uma tensão de 592,36 KV. Um perfil de tensões mais suave pode ser obtido para $N_t = 5$, conforme será discutido no item 5.9.3.2.

A tensão de 525 KV, para ser obtida, requererá uma compensação série superior a 100%, a qual deverá produzir, por sua vez, altíssimos valores de tensão nas proximidades dos capacitores.

Comparando a figura 5.50 com a figura 5.34 (esta, para $P_2 = P_0$, $fp_2 = 0,95$ indutivo), nota-se que os comportamentos das curvas são bastante semelhantes, embora para o caso ora em estudo, as tensões alcançadas sejam bem maiores.

DADOS DE ENTRADA
 RESISTENCIA=0.021000HMS/KM INDUTANCIA=0.2655E-03HENRYS/KM
 CONDUTANCIA=0.0035E-03SIEMENS/KM CAPACITANCIA=0.9177E-08FARADS/KM
 FREQUENCIA=60.0HERTZ COMP.LINHA=1000.0KM TENSAO-RECEPTOR=500.00KV
 POT.RECEP(ATIVA)=1017.50MW POT.RECEP(REAL)=334.44MVAR NUM.TRECHOS=5

SERIE(KS)=0.80 GRAUS DE COMPENSAÇÃO
 SHUNT(KB)=0.00

TIPO DE LINHA B=A

REAT.CAPACITIVA(XC)=-262.040HMS
 ADMITANCIA(YR)=0.0006000SIEMENS

TENSÃO(KV)		CORRENTE(A)		
MODULO	FASE	MODULO	FASE	L
500.00	0.00	1236.74	-16.19	*
689.24	-4.72	1232.61	-17.31	*
493.22	-3.16	1228.33	-16.42	*
497.24	-1.63	1223.58	-15.52	*
501.59	-0.12	1218.69	-14.61	*
505.65	1.36	1213.36	-13.69	*
510.42	2.82	1208.19	-12.77	*
514.80	4.26	1202.59	-11.83	*
519.63	5.67	1196.79	-10.88	*
524.36	7.06	1190.76	-9.93	*
515.64	2.72	1184.54	-8.96	*
509.74	-1.74	1182.42	-7.98	*
512.11	-0.26	1180.11	-6.99	*
514.88	1.19	1177.67	-6.00	*
517.15	2.65	1174.36	-5.01	*
519.81	4.03	1172.12	-4.01	*
522.57	5.51	1169.11	-3.00	*
525.43	6.92	1165.93	-1.98	*
528.33	8.32	1162.60	-0.96	*
531.32	9.71	1159.12	0.00	*
527.82	5.46	1155.49	1.10	*
527.02	1.13	1155.91	2.14	*
527.68	2.60	1156.19	3.19	*
528.43	4.02	1156.34	4.23	*
529.27	5.44	1156.35	5.28	*
530.19	6.85	1156.22	6.33	*
531.19	8.26	1155.96	7.38	*
532.27	9.67	1155.57	8.45	*
533.43	11.07	1155.04	9.48	*
534.67	12.46	1154.39	10.54	*
536.49	8.26	1153.61	11.60	*
540.92	4.11	1156.39	12.66	*
539.84	5.49	1160.04	13.72	*
538.84	6.89	1163.06	14.77	*
537.91	8.29	1165.95	15.82	*
537.06	9.69	1168.69	16.87	*
536.30	11.11	1171.30	17.91	*
535.62	12.52	1173.77	18.95	*
535.03	13.95	1176.09	19.98	*
534.52	15.37	1178.27	21.02	*
541.64	11.15	1180.29	22.05	*
551.37	7.06	1186.43	23.08	*
548.54	8.44	1192.40	24.10	*
545.17	9.82	1198.27	25.11	*
543.02	11.23	1203.93	26.11	*
540.48	12.65	1209.43	27.10	*
537.96	14.08	1214.71	28.09	*
535.69	15.53	1219.82	29.07	*
533.23	16.99	1224.73	30.04	*
531.03	18.47	1229.44	31.01	*
543.37	14.18	1233.94	31.97	*

 325 400 450 500 550 600 U

Figura 5.51b - Perfil de tensão para a linha compensada em cinco trechos - Kshunt=0% e Kserie=80%.

5.9.3.2 - TENSÕES MÁXIMAS AO LONGO DA LINHA

O modelo "C", conforme já era esperado, é muito desfavorável neste aspecto, como das outras vezes. A figura 5.52 confirma isso. Um aumento de $K_{série}$, acima de 80% pode resolver o problema no transmissor mas, de um modo geral, não soluciona o impasse em outros pontos da linha.

Observando-se as figura 5.51a e 5.51b, nota-se que as condições mais vantajosas, com relação ao perfil de tensões ao longo da linha, ficam com os modelos "A" e "B", que neste caso se confundem, pois $K_{shunt} = 0\%$. Um exame dos perfis também esclarece a respeito dos locais das maiores sobretensões. Assim é que, pela figura 5.51b, relativa a $N_t = 5$, nota-se que as maiores sobretensões, para o modelo "A"(ou "B"), ocorrem a 200 Km do transmissor: 551,37 KV. Fazendo-se um reforço no isolamento nesta região, o restante da linha não supera 540 KV. Mais precisamente: do receptor até ao meio da linha as tensões sequer atingem 530 KV. Voltando à figura 5.51a pode ser observado que as compensações efetivadas com $N_t = 2$ também poderão satisfazer, desde que a região central da linha, numa faixa de 350 Km (± 175 Km do centro) tenha um reforço no isolamento, pois as tensões ali giram em torno de 530 a 545 KV. O restante da linha não possuirá tensões superiores a 530 KV, com exceção do próprio transmissor, pois ali a tensão será a *mais alta* de toda a linha: 546,49 KV. Este valor alto decorre da presença ali de um capacitor.

5.9.3.3 - ÂNGULOS DE POTÊNCIA

Por se tratar de uma carga indutiva, esta é a condição mais favorável, no que se refere à estabilidade, entre as três cargas analisadas com $P_2 = 1,25P_o$ e ainda supera a carga $P_2 = P_o$, com $fp_2 = 0,95$ capacitivo e unitário e se iguala, praticamente, à carga $P_2 = 0,75P_o$, com o $fp_2 = 0,95$ capacitivo. Com relação a esta última carga, numa observação mais apurada, constata-se que a carga indutiva ora em pauta, de um modo geral apresenta curvas de melhor comportamento. O valor máximo obtido para θ na carga atual é de $50,76^\circ$ ao passo que naquela carga este número é substituído por $66,38^\circ$.

Outra constatação interessante é a que se segue: Para a mesma potência aparente, porém para o fator de potência ora $0,95$ capacitivo, ora $0,95$ indutivo, nota-se que a redução do ângulo de potência é maior (ou *mais rápida*) na carga capacitiva. Como ilustração, podem ser citadas as figuras 5.53 (de $P_2 = 1,25P_o$, $fp_2 = 0,95$ ind.) e 5.47 (de $P_2 = 1,25P_o$, $fp_2 = 0,95$ cap.). Nelas, comparando a compensação série de 40% e a compensação em derivação variando de 0% a 80%, com $N_t = 2$ e modelo "B", tem-se que:

- Para $K_{shunt} = 0\%$, na carga capacitiva, lê-se $\theta = 56,24^\circ$ e na carga indutiva, lê-se $\theta = 36,36^\circ$.

- As mesmas leituras, agora para $K_{shunt} = 80\%$, indicam para a carga capacitiva, $\theta = 45,47^\circ$ e para a carga indutiva, $\theta = 30,10^\circ$.

Tem-se assim, um decréscimo no ângulo de potência para a mesma variação de K_{shunt} , de $10,77^\circ$ e $6,26^\circ$, respectivamente, para a carga capacitiva e indutiva.

Esta eficiência na redução de θ será novamente maior para a carga capacitiva mesmo fixando K_{shunt} e variando

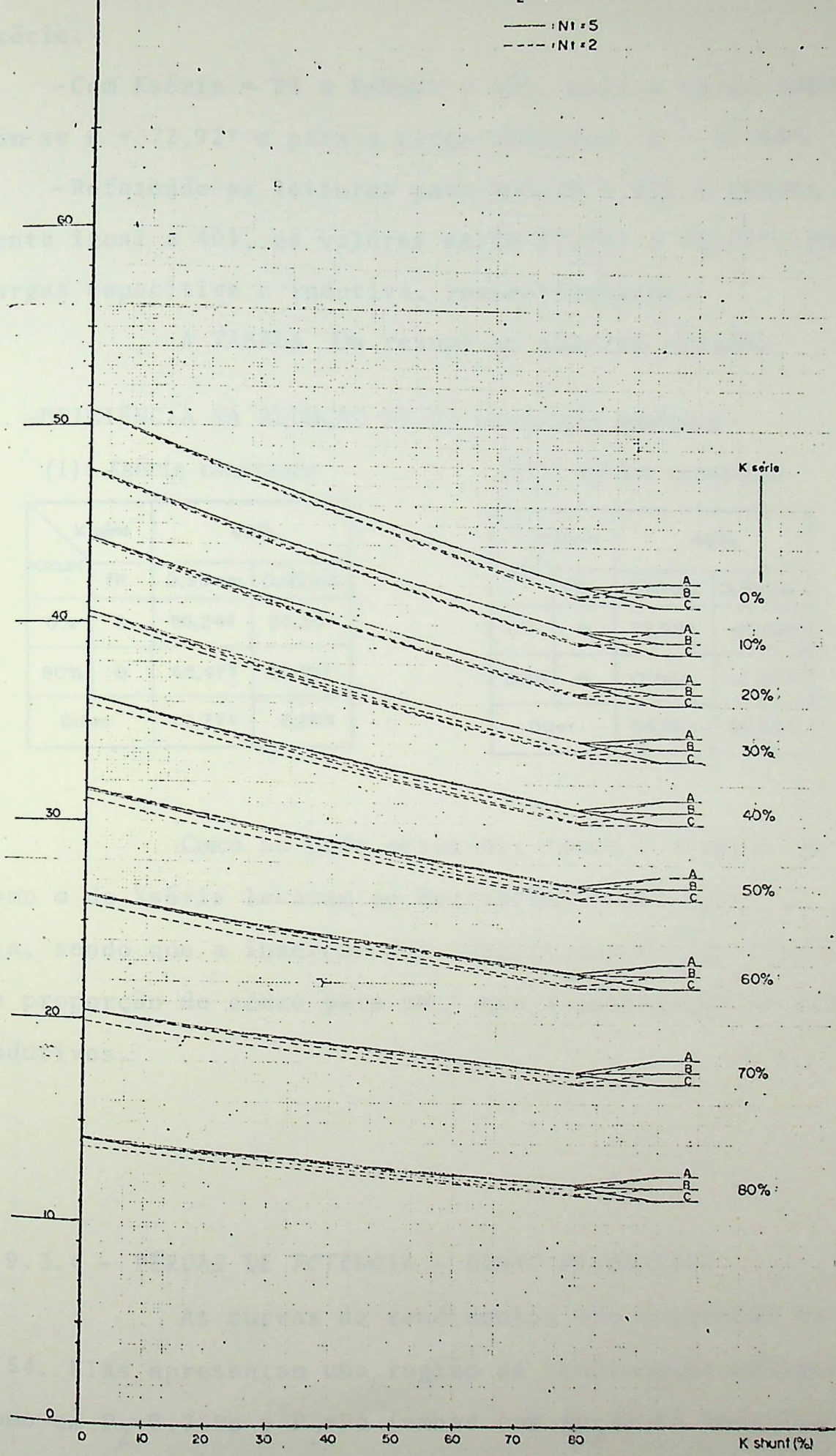


Figura 5.53 - Ângulos de potência x Kshunt e Ksérie.

Ksérie:

- Com Ksérie = 0% e Kshunt = 40%, para a carga capacitiva tem-se $\theta = 72,92^\circ$ e para a carga indutiva, $\theta = 45,66^\circ$.

- Refazendo as leituras para Ksérie = 80% e Kshunt novamente igual a 40%, os valores serão $17,96^\circ$ e $12,77^\circ$, para as cargas capacitiva e indutiva, respectivamente.

A TABELA IXa resume os números citados:

-EFICIÊNCIA NA REDUÇÃO DE θ : ilustração numérica -

(I): Ksérie constante

(II): Kshunt constante

K série		40%	
Kshunt	fP	0,95 cap.	0,95 ind.
0%	θ	56,24°	36,36°
80%	θ	45,47°	30,10°
Difer.		10,77°	6,26°

K shunt		40%	
Ksérie	fP ₂	0,95 cap.	0,95 ind.
0%	θ	72,92°	45,66°
80%	θ	17,96°	12,77°
Difer.		54,96°	32,89°

Como se pode observar, tanto o aumento de Kshunt como o de Ksérie levaram ao decréscimo dos ângulos de potência, sendo que a inserção dos capacitores é mais eficiente, numa proporção de cinco para um, que a instalação de reatores' indutivos.

5.9.3.4 - PÊRDAS DE POTÊNCIA - FLUXO DE REATIVO

As curvas de rendimentos são mostradas na figura 5.54. Elas apresentam uma região de rendimentos máximos, tal' como em $P_2 = 0,75P_o$ e $P_2 = P_o$ (ambas com $f_{p_2} = 0,95$ indutivo). Comparando as curvas de rendimentos para os três casos com car-

gas indutivas, tem-se que os pontos de rendimentos máximos, com relação a K_{shunt} e $K_{série}$, vão se modificando à medida que cresce a carga ativa. Assim é que, para a menor carga analisada ($P_2=0,75P_o$), os maiores rendimentos são para K_{shunt} por volta de 50%. Para $P_2=P_o$, os rendimentos máximos se encontram na região de $K_{shunt} = 40\%$. Finalmente, para $P_2=1,25P_o$, estes rendimentos serão obtidos para K_{shunt} entre 10% e 20%. O motivo do deslocamento dos pontos de máximos rendimentos é o que se segue. Para as menores cargas, a linha tem mais efeito capacitivo, necessitando assim de maior quantidade de reatores na linha para que ela fôsse vista, do transmissor, como puramente resistiva, já que é nesta condição que os maiores rendimentos surgirão. Com o crescimento da carga indutiva transportada, a linha terá sua característica capacitiva mais rapidamente eliminada. Assim, para que os rendimentos máximos sejam obtidos, não mais será necessário que K_{shunt} seja alto como antes, quando da carga menor.

De uma maneira geral, as compensações com menor número de trechos apresentam os maiores rendimentos, para a carga ora analisada, *exceto* o modelo "A" na região dos altos graus de compensação série. Os modelos "B" e "C" se revezam na liderança dos melhores rendimentos: para $K_{shunt} \geq 40\%$, o modelo "B" predomina enquanto que para $K_{shunt} < 40\%$, o modelo "C" é melhor.

Com relação aos fluxos de reativos, a figura 5.57 e a TABELA IX mostram que não há a mínima condição de se operar na região de -100 a +100 MVAR. É que neste intervalo, as tensões atingem os 600 KV.

5.9.3.5 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

As tensões excessivamente altas, notadamente nas imediações do transmissor, são os maiores problemas encontrados para o transporte desta carga indutiva. Os ângulos de potência não são fatores tão preponderantes, nesta ocasião.

Uma medida sensata, a ser analisada economicamente, é o estudo da viabilidade de se melhorar o fator de potência, antes de transmitir (ou de tentar) esta carga indutiva. Esta é uma medida, que muito provavelmente, será mais econômica já que a linha com fator de potência unitário, poderá ser operada mais facilmente, conforme visto em 5.9.1.

Como solução para o estudo de otimização proposto, poderá ser indicado precariamente, com as ressalvas já evidenciadas quando da análise das tensões no transmissor e ao longo da linha e dos fluxos de reativos, o modelo "B", $N_t = 2$, com $K_{série} = 80\%$ e $K_{shunt} = 0\%$. Esta combinação é de pequeno rendimento, se comparado com os demais da figura 5.54:91,81%.

5.10 - ESTUDO DA LINHA A VAZIO

5.10.1 - TENSÃO NO TRANSMISSOR

Para a linha a vazio, o maior problema a ser superado é o Efeito Ferranti. Este incômodo é mais acentuado nas linhas longas, cujos comprimentos forem da ordem de um quarto do comprimento de onda. É o que ocorre no caso desta linha, que com mil quilômetros de extensão, se aproxima bastante de $\lambda/4$ (cêrca de 1250 Km, para $f = 60$ Hz).

Sendo fixados 500 KV para o receptor, haverá Efeito Ferranti quando a tensão no transmissor estiver abaixo dêste valôr. Admite-se uma vez mais, que a linha estará em condições de ser operada, se a tensão no transmissor estiver dentro de uma faixa de variação de 5% com relação ao transmissor. Assim, será considerado o intervalo de $475KV < U_1 < 500KV$, como de comportamento admissível.

A figura 5.56 apresenta o perfil de tensões e as demais condições para a linha estudada, estando esta em vazio. Como se poderá observar, para a manutenção dos 500 KV no receptor, sem compensação, a tensão no transmissor não poderá ultrapassar os 243,71 KV. Há também uma enorme corrente a vazio, de 821,17 A. Como comparação, a mesma linha quando entrega a potência natural (P_o) ao receptor, com o fatôr de potência unitário, terá uma corrente de 940 A no receptor.

As condições do transmissor, com relação às compensações série e shunt, estão na figura 5.57. Nela nota-se que a colocação de reatores shunt é a solução mais viável, já que êles absorvem o reativo gerado pela linha, reduzindo-se a energia anteriormente armazenada no campo elétrico e, em con-

sequência, o Efeito Ferranti. Resultado semelhante pode ser obtido com a colocação dos capacitores em série (inclusive com a mesma eficiência dos reatores), conforme será visto a seguir. Para 500 KV no receptor, a tensão U_1 , para $K_{shunt}=80\%$ e $K_{série}=0\%$ é de 445,60 KV ($N_t = 5$, modelos "A" ou "B") ou de 450,92KV ($N_t = 2$, mesmos modelos anteriores). Para o modelo "C", os números serão, respectivamente, 444,89 KV e 446,32 KV. Invertendo-se as posições, isto é, para $K_{série} = 80\%$ e $K_{shunt} = 0\%$, com $N_t = 5$: 445,03 KV (modelos "A", "B" ou "C") e, com $N_t = 2$: 446,48 KV (modelos "A" e "B") e 445,94 KV (modelo "C"). A melhor condição apresentada na figura 5.57 é, entretanto, para $K_{shunt}=K_{série}=80\%$, pois assim haverá contribuições dos dois lados. A TABELA IXa sintetiza estas informações:

TABELA IXa - Linha em vazio -

K série	K shunt	0%						80%					
	N_t	2			5			2			5		
	Modelo	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
0%	$U_1(KV)$	243,7	243,7	243,7	243,7	243,7	243,7	450,92	450,92	446,32	445,60	445,60	444,90
80%	$U_1(KV)$	446,50	446,50	446,50	445,0	445,0	445,0	493,70	490,21	489,65	489,59	488,97	488,9

Pela tabela acima, nota-se que o modelo de linha "A" é ligeiramente superior a "B" que, por sua vez, supera ao "C". Com relação ao número de trechos, a compensação com $N_t=2$ se apresenta novamente com certa vantagem.

5.10.2 - FLUXO DE REATIVOS

As linhas de transmissão são alimentadas por transformadores com altos quantidades de reativo, instalados nos blocos de energia.

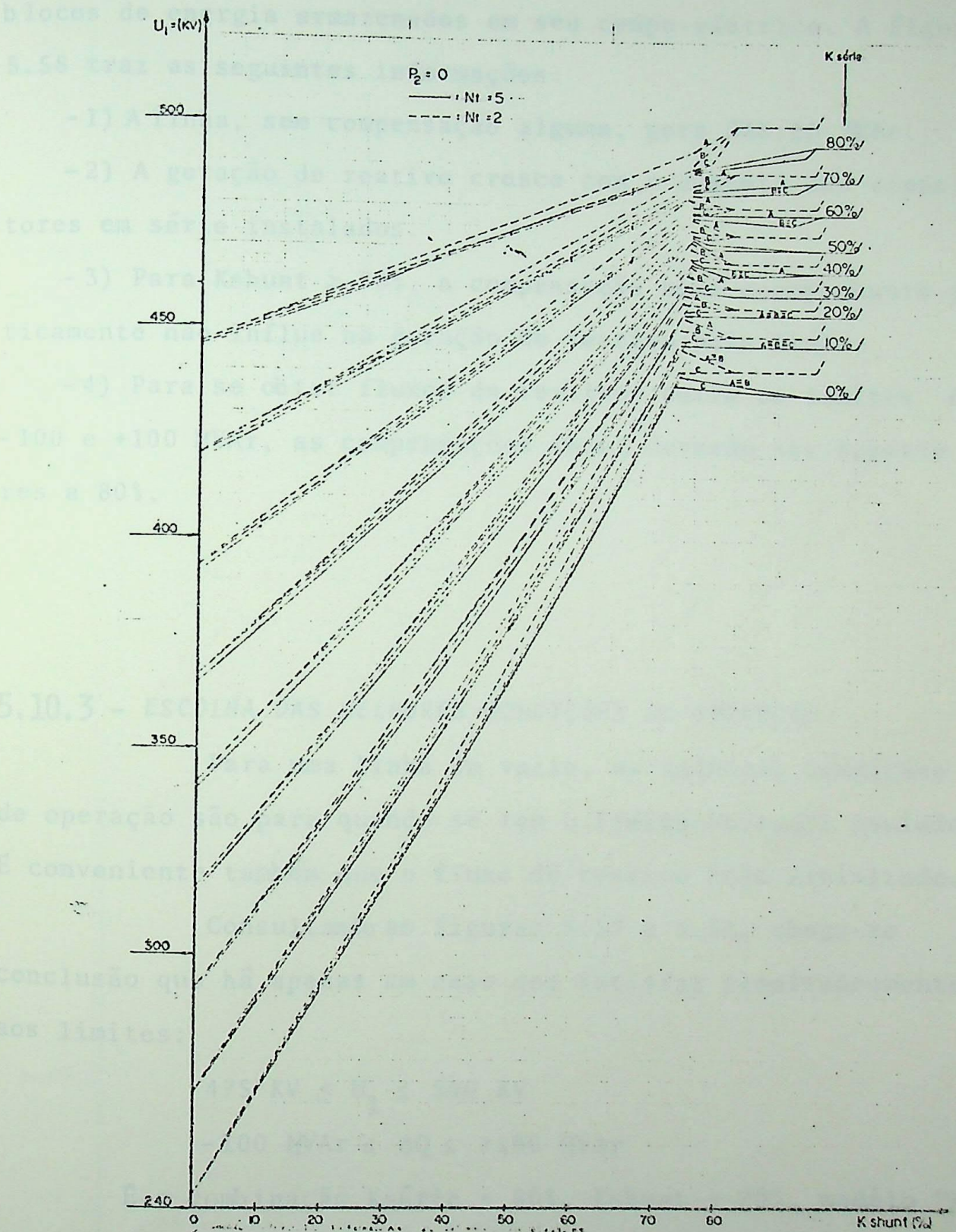


Figura 5.57 - Tensões no transmissor da linha em vazio x Ksérie e Kshunt. - $U_2 = 500$ KV.

5.10.2 - FLUXO DE REATIVO

As linhas de transmissão quando a vazio, geram altas quantidades de reativo, justamente devido aos grandes blocos de energia armazenados em seu campo elétrico. A figura 5.58 traz as seguintes informações:

- 1) A linha, sem compensação alguma, gera 346,20 MVar.
- 2) A geração de reativo cresce com o aumento dos capacitores em série instalados.
- 3) Para $K_{shunt} \geq 70\%$, a compensação série acompanhante praticamente não influe na geração de reativo pela linha.
- 4) Para se obter fluxos de reativos entre os limites de -100 e +100 MVar, as compensações shunt deverão ser superiores a 80%.

5.10.3 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Para uma linha em vazio, as melhores condições de operação são para quando se tem o Efeito Ferranti anulado. É conveniente também que o fluxo de reativo seja minimizado.

Consultando as figuras 5.57 e 5.58, chega-se à conclusão que há apenas *um caso* que satisfaz simultaneamente aos limites:

$$475 \text{ KV} \leq U_1 \leq 500 \text{ KV}$$

$$-100 \text{ MVar} \leq \Delta Q \leq +100 \text{ MVar}$$

É a combinação $K_{série} = 80\%$, $K_{shunt} = 80\%$, modelo "A"; $N_t = 2$. Conforme a figura 5.59 mostra, nesta condição, tem-se $U_1 = 493,70 \text{ KV}$ e $\Delta Q = +95,38 \text{ MVar}$. Este pequeno reativo fará com que a corrente I_1 seja de apenas 111,55 A. Esta é a melhor

```

*****
***** GRAUS DE COMPENSAÇÃO
*****
***** SFRF(KSI)=0.80
***** SFRF(KDI)=0.80
*****
*****
***** TIPO DE LINHA A
*****
***** REAT.CAPACITIVA(XCI)=-268.110HMS
***** ADMITANCIA(YR)=-0.00295655SIEMENS
*****
***** PERFIS DG TENSOES
*****

```

TENSÃO(KV)		CORRENTE(A)		
MODULO	FASE	MODULO	FASE	L
500.00	0.00	0.00	0.00	*
480.58	-0.04	165.62	-89.99	*
484.58	-0.07	117.41	-89.96	*
487.21	-0.09	68.68	-89.88	*
488.47	-0.09	20.14	-89.38	*
488.35	-0.09	28.64	89.39	*
486.85	-0.08	77.35	89.71	*
483.98	-0.06	125.84	89.79	*
479.75	-0.02	173.98	89.84	*
474.16	0.01	221.32	89.87	*
498.42	0.06	55.95	89.30	*
483.97	0.02	109.58	-89.53	*
486.36	0.01	60.12	-89.17	*
487.37	0.00	11.51	-85.71	*
487.01	0.01	37.19	88.68	*
485.27	0.02	85.75	89.44	*
487.17	0.05	134.07	89.65	*
477.70	0.09	182.01	89.76	*
471.89	0.14	229.44	89.83	*
464.74	0.20	276.22	89.89	*
493.70	0.25	111.55	89.36	*

g	237	350	425	500	575	650
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

```

*****
***** ANGULO DE POTENCIA
***** TETA = 0.25 GRAUS
*****
***** POTENCIA NO TRANSMISSOR
*****
***** APARENTE * ATIVA * REATIVA
***** 95.39(MVA) * 1.47(MW) * -95.38(MVAR)
*****
***** RENDIMENTO * VARIACAO DO REATIVO
***** 0.00 * DQ= 95.38MVAR
*****

```

Figura 5.59 - Melhor comportamento técnico obtido para a linha operando em vazio. Modelo "A". Nt = 2.

opção técnica obtida.

Por outro lado, as mesmas figuras 5.57 e 5.58 ' permitem concluir que um maior grau de compensação shunt, de 90% por exemplo, melhoraria ainda mais as condições.

Voltando agora para o aspecto econômico, optando por uma combinação que proporcionasse um fluxo de reativo superior aos ± 100 MVar, poderá ser tomado:

-Kshunt = 80%, Ksérie = 50%, Nt = 2, modelo "A", que fornece para U_1 ; 477,73 KV e, para ΔQ : 130,87 MVar.

CAPITULO VI - ASPECTOS ECONÔMICOS DAS COMPENSAÇÕES SÉRIE E EM DERIVAÇÃO, CONCLUSÕES FINAIS.

6.1 - CONSIDERAÇÕES

No capítulo anterior efetuou-se as análises técnicas das linhas. Foram apresentadas para cada carga passível de ser transportada, ou melhor, para os tipos de carga mais prováveis de serem transmitidos, as características das tensões ao longo da linha e no transmissor, os ângulos de potência, os rendimentos e os fluxos de reativos. Em seguida, determinou-se para cada condição de carga estudada, as combinações série e shunt que mais se destacavam sob o ponto de vista técnico. Sempre que possível, foi feita uma apreciação econômica, embora superficial. Já se previa então que as compensações efetuadas em menor número de trechos, seriam de custo inferior.

No presente capítulo, procede-se a um estudo econômico bem mais profundo, que determinará o custo dos reatores e capacitores a serem inseridos nas linhas de transmissão, quando das compensações série e shunt. Pretende-se com esta análise econômica, aliada às conveniências técnicas já determinadas, obter-se um refinamento maior nas escolhas das melhores opções de operações.

6.2 - CUSTOS DOS REATORES E CAPACITORES

A seguir é apresentada a TABELA 6.1, relativa aos custos dos bancos de capacitores série, bancos de reatores em derivação e de linhas de transmissão. Os dados desta tabela, foram fornecidos por Furnas Centrais Elétricas S/A. A conversão *Cruzeiro/Dólar* deverá ser feita, considerando-se:

$$US\$1,00 = Cr\$26,80$$

T A B E L A 6.1

Custos de reatores, capacitores e linhas de transmissão

DESCRIÇÃO	TENSAO	Cr\$/Km
LINHAS DE TRANSMISSÃO	800 KV	4.246.000,00
	550 KV	2.640.296,00
	362 KV	1.684.930,00
DESCRIÇÃO	TENSAO/POTÊNCIA	Cr\$/KVA
BANCO DE REATORES "SHUNT"	800 KV - 300 MVar	270,43
	800 KV - 200 MVar	393,67
	550 KV - 136 MVar	388,66
	550KV - 100 MVar	477,47
	550KV - 72,5 MVar	594,07
BANCO DE CAPACITORES SÉRIE	140 MVar	467,15
	172 MVar	414,73
	214 MVar	369,17
	230 MVar	357,33
	302 MVar	316,21
	379 MVar	290,91

Da TABELA 6.1 se conclui que o custo dos bancos de capacitores é superior aos dos bancos de reatores shunt, no que se refere ao KVA. Os equipamentos de maior potência serão relativamente mais baratos.

Será efetuada uma comparação de custos das compensações série e shunt instaladas em dois e em cinco trechos. Ainda serão também avaliados economicamente os modelos "A", "B" e "C". Para tal, será assumido que $K_{shunt} = K_{série} = 80\%$. Justifica-se o uso destes dois graus de compensação na análise econômica, pelo fato de que, quando das análises técnicas do capítulo anterior, foram indicados para determinadas cargas, ou $K_{série} = 80\%$ ou $K_{shunt} = 80\%$. Essas duas eventuais condições permitem concluir e propôr que, quando da instalação dos reatores e capacitores, estes devam possuir potências reativas instaladas que permitam compensarem até aos graus de compensação $K_{série}$ e K_{shunt} de 80%. Por outro lado, para cada carga transportada ou ainda, para uma determinada mudança nas características da carga, as análises técnicas anteriores indicam que os graus de compensação devem ser alterados quase sempre com a variação da carga, para que o comportamento da linha seja sempre o melhor.

O estudo de custos ora em pauta, não compara os graus de compensação série ou shunt economicamente. Isto é, seja $K_{série} = 50\%$ e $K_{shunt} = 40\%$. Esta combinação pode dar os mesmos resultados técnicos que $K_{série} = 60\%$ e $K_{shunt} = 30\%$. Entretanto, será considerado que na linha já existem instalados capacitores e reatores que fornecem $K_{série} = K_{shunt} = 80\%$. Desta forma, não se justifica uma longa comparação econômica entre os dois conjuntos de compensação série-shunt referidos acima, pois

em termos práticos ela não teria maior interesse, já que a presença de $K_{série}=K_{shunt}=80\%$ esvazia esta comparação: qual-quer uma das duas combinações série-shunt poderá ser usada.

Portanto, partindo da condição máxima instalada, isto é $K_{série}=K_{shunt}=80\%$, segue-se uma análise econômica comparativa entre as compensações efetivadas segundo os modelos "A", "B" e "C" em 2 e 5 trechos. Para isto, serão tomadas as figuras 6.1, 6.2 e 6.3 as quais mostram a linha compensada, respectivamente, pelos modelos A, B e C.

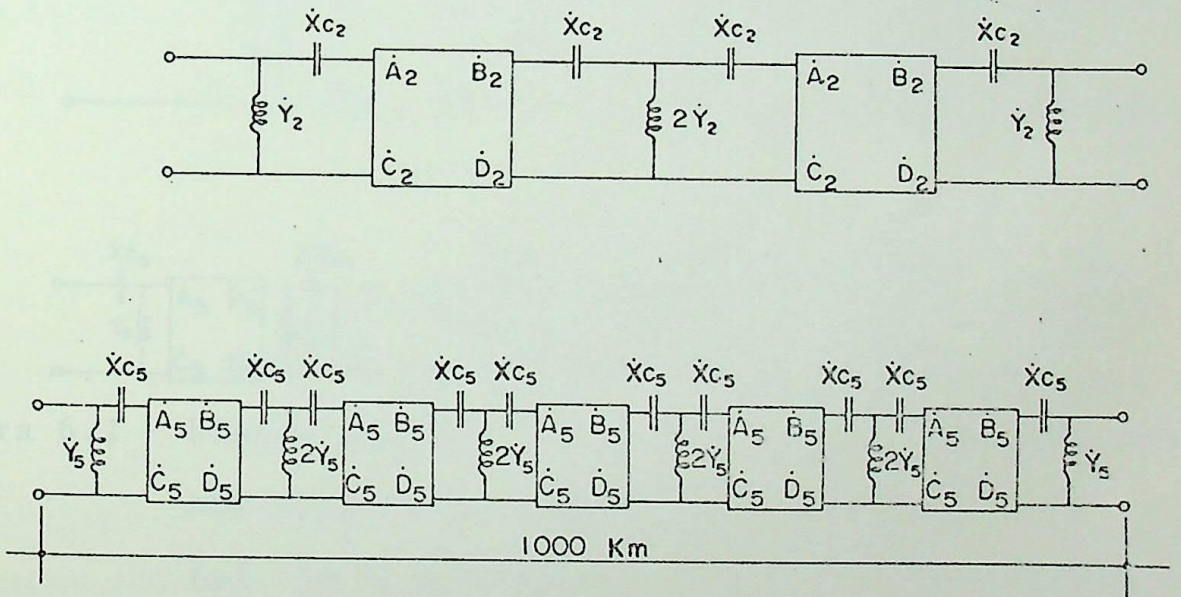
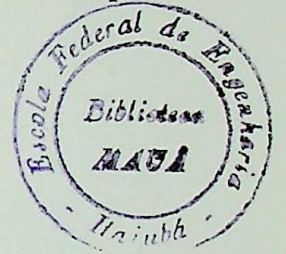


Figura 6.1 - Aspecto da linha de transmissão compensada em 2 e em 5 trechos. Disposição dos reatores e capacitores. Modelo "A".

Na figura 6.1(a) a linha está compensada em dois trechos. Nesta compensação (modelo "A", $N_t=2$), em cada fase serão necessários 4 capacitores " X_{c2} ", 2 reatores " Y_2 " e 1 reator de admitância " $2Y_2$ " (devido à associação de 2 reatores conectados em paralelo, ambos de valor " Y_2 "). Vale mencionar que,

em termos econômicos, a TABELA VI 6.1 mostra ser mais vantajoso a instalação de um reator maior, pois eletricamente, não há alterações. De maneira análoga, para a figura 6.1(b) (modelo "A", $N_t=5$), tem-se 10 capacitores " X'_5 ", 2 reatores " Y'_5 " e 4 reatores " $2Y'_5$ ".

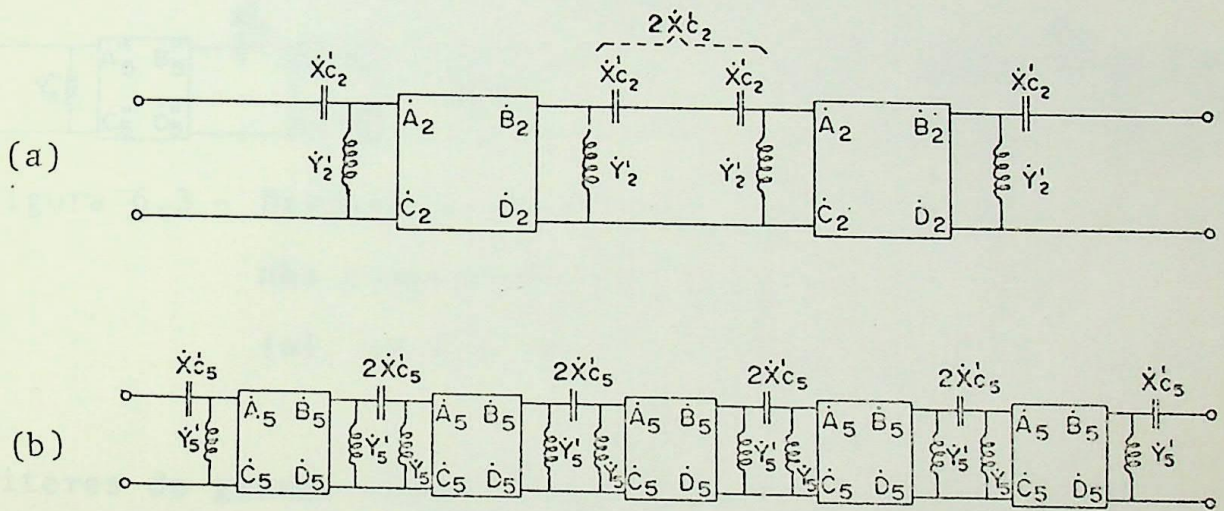


Figura 6.2 - Disposição dos reatores e capacitores para a linha compensada segundo o modelo "B".

(a): em dois trechos - (b): em cinco trechos.

Para o modelo "B", a figura 6.2(a) indica que, para $N_t = 2$, serão necessários dois capacitores " X'_2 ", um capacitor " $2X'_2$ " e quatro reatores " Y'_2 ". Em cinco trechos, a figura 6.2(b) indica que serão necessários por fase: dois capacitores para as extremidades " X'_5 ", quatro capacitores intermediários " $2X'_5$ " e dez reatores " Y'_5 ".

Finalmente, para o modelo "C", a figura 6.3(a), para $N_t = 2$ indica que serão necessários por fase: dois capa-

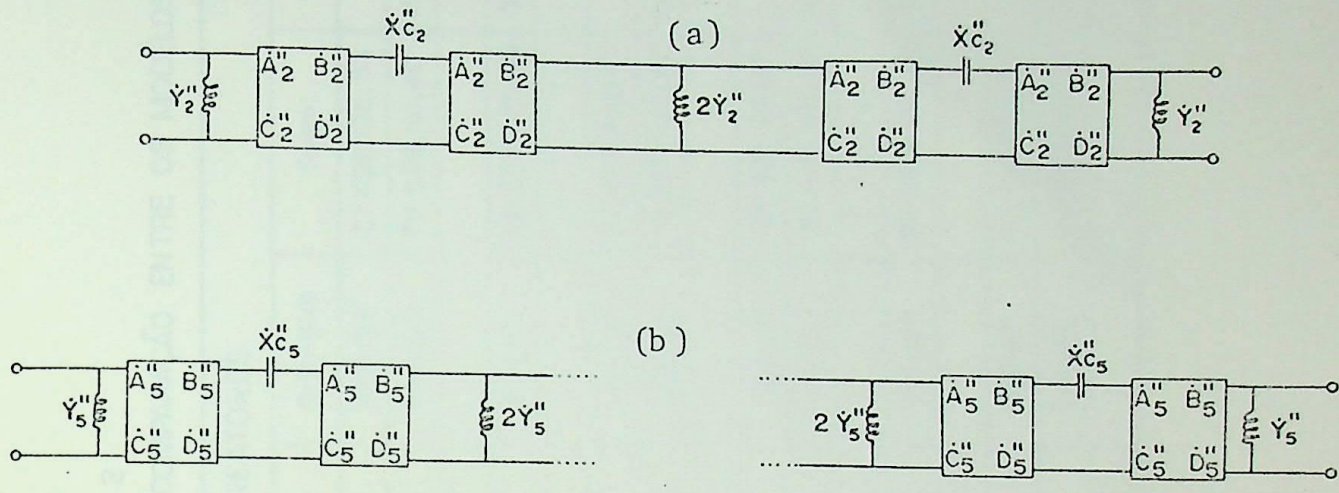


Figura 6.3 - Disposição dos reatores e capacitores para a linha compensada pelo modelo 'C'.

(a): em dois trechos - (b): em cinco trechos.

citores de grande capacidade " \dot{X}_{c_2}'' ", dois reatores " \dot{Y}_2'' " e um reator " $2\dot{Y}_2''$ ". Para $N_t=5$, tem-se: cinco capacitores " \dot{X}_{c_5}'' ", dois reatores para as extremidades " \dot{Y}_5'' " e, para o meio da linha, quatro reatores " $2\dot{Y}_5''$ ".

Seguem as TABELAS 6.2 e 6.3, onde se pode observar, respectivamente, os custos das compensações shunt e série para o grau de 80% de compensação. São flagrantes as desvantagens econômicas das compensações em cinco trechos. Estas desvantagens serão ainda mais acentuadas se fôr lembrado que, para $N_t=5$, um número maior de subestações será necessário. Desta forma, o custo final da linha compensada em maior número de trechos, são muito maiores que aqueles indicados nas duas tabelas.

TABELA 6.2

CUSTOS - Compensação "Shunt" de 80% - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS E " n_f "

		REATORES							
n_f	Modelo	Admitância	Reativo Req.	Qte.	Potência	Cr\$/KVA	Custo	Custo Total	
5	A	0,002814	233,35 MVAR	2	23,35 MVAR	594,07	27.739.108,53		
				4	70,04 MVAR	388,66	72.586.141,60	100.325.250,10	
	B	0,0027867	232,39 MVAR	10	23,24 MVAR	594,07	138.056.917,40		
	C	0,0027843	232,03 MVAR	2	23,20 MVAR	594,07	27.568.808,47		
					4	46,41 MVAR	388,66	72.145.660,27	99.714.468,74
2	A	0,0029565	246,38 MVAR	2	61,60 MVAR	393,67	48.500.144,00		
				1	123,19 MVAR	270,43	33.513.370,27	81.813.514,27	
	B	0,0029043	242,00 MVAR	4	60,50 MVAR	393,67	95.268.140,00		
	C	0,0028742	239,52 MVAR	2	59,88 MVAR	393,67	47.145.919,20		
					1	119,76 MVAR	270,43	32.386.696,80	79.532.616,00

Custos para uma fase da linha.

TABELA 6.3

Compensação Série de 80% - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS E "n_f"

n _f	Modelo	CAPACITORES EM SÉRIE							Custo Total
		Reatância Cap.	Reativo Req.	Qte.	Potência Ind.	Cr\$/KVAR	Custo		
5	A	262,04 OHMS	231,54 MVAR	10	23,15 MVAR	565,13	130.850.200,20	130.850.200,20	
	B	259,66 OHMS	229,43 MVAR	2	22,94 MVAR	565,13	25.931.931,93		
				4	45,89 MVAR	467,15	85.743.825,33	111.675.757,40	
2	C	262,02 OHMS	231,52 MVAR	5	46,30 MVAR	467,15	108.153.010,80	108.153.010,80	
	A	268,11 OHMS	236,90 MVAR	4	59,23 MVAR	414,73	98.252.301,87	98.252.301,87	
									B
				1	111,66 MVAR	290,91	32.483.010,60	78.791.972,40	
	C	267,44 OHMS	236,31 MVAR	2	118,16 MVAR	280,91	68.745.911,80	68.745.911,80	

Custos para uma fase apenas da linha.

Devido ao maior valôr dos capacitores das linhas compensadas segundo o modelo "C", êste arranjo serã o de mais baixo custo, tanto para a compensação sêrie como a shunt. O modelo "B", no que se refere às compensações em derivação, é a de mais alto custo: cêrca de 30 a mais que "A" ou "C". Isto se explica assim: os reatores, no modelo "B" não podem ser agrupados, como em "A" ou "C". Já o modelo "A" se torna o mais caro, quando se analisa apenas as compensações sêrie, pois os capacitores, no modelo "A", não podem ser réunidos dois a dois.

Entretanto, conforma afirmado no início dêste capítulo, as análises técnicas indicavam que deveriam ser instaladas compensações sêrie e shunt de 80%. Desta forma, para uma análise econômica mais precisa, deverão ser comparados os custos da combinação sêrie-shunt: $K_{sêrie}=K_{shunt}=80\%$. A TABELA 6.4 mostra os números desta comparação.

Q U A D R O 6.4

Custo total dos reatores e capacitores, para $K_{sêrie}=K_{shunt}=80\%$, considerando-se apenas *uma* fase.

Modêlo \ n _f	5	2
A (Cr\$)	231.175.450,30	180.065.816,10
B (Cr\$)	249.732.674,70	174.159.902,40
C (Cr\$)	207.867.479,60	148.278.527,80

NOTA: CUSTOS P/ UMA FASE DA LINHA.

De posse dos dados da TABELA 6.4, já podem ser descartadas de vez, as compensações em cinco trechos.

Em seguida, agora apenas considerando $N_t = 2$, tem-se que o modelo "A" é o mais caro. Vale ressaltar que esta desvantagem ficaria com o modelo "B", para $N_t=5$.

O modelo "C" é mais barato que o modelo "B" da quantia de Cr\$77.644.123,80, considerando as três fases da linha.

Retornado às figuras 6.2(a) e 6.3(a), nota-se que o modelo "B" requererá três subestações e o modelo "C" necessitará de cinco. Esta observação permite cre que o modelo "C", em termos de custos, irá ultrapassar o modelo "B", já que o custo das duas subestações adicionais seguramente superará os Cr\$77.644.123,80.

Pelo que foi expôsto, o modelo "B" deve ser o indicado economicamente para as compensações série-shunt nas linhas de transmissão. Esta escolha também implicará que as compensações devem ser feitas com o menor número de trechos possíveis ($N_t=2$), já que assim o custo será menor, sem no entanto influir tão violentamente no comportamento técnico. Os perfis de tensão não serão tão suaves como em $N_t = 5$, mas são perfeitamente aceitáveis, conforme o que foi visto no capítulo anterior. Isto é aquelas compensações escolhidas quando das análises técnicas e que envolviam $N_t = 2$, satisfazem no aspecto perfil de tensões.

6,3 - ESCOLHA DAS MELHORES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO. CONCLUSÕES FINAIS.

De posse das considerações econômicas do item anterior, podem ser definidas de vez, para cada carga, a combinação série-shunt mais conveniente.

6,3,1 - CARGA $P_2 = 0,75P_0$

a) FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO

Da TABELA I tirou-se a combinação $K_{\text{série}}=40\%$ e $K_{\text{shunt}}=60\%$ que é aquela de menor custo, no que refere aos graus de compensação. O modelo "B", com $N_t = 2$ é o de maior rendimento, nesta combinação: 95,09%. Considerando agora que se tem instalado na linha $K_{\text{série}}=K_{\text{shunt}}=80\%$, poderá ser investigada na TABELA I uma outra combinação, que satisfaça técnica-mente aos requisitos e que apresente um rendimento maior que 95,09%. Esta combinação existe e, por mera coincidência, é exatamente $K_{\text{série}}=K_{\text{shunt}}=80\%$. O rendimento agora é de 95,18%. Portanto, tem-se finalmente indicada a melhor opção:

P_2	fP_2	K_{shunt}	$K_{\text{série}}$	Modelo	n_t	$n(\%)$
$0,75 P_0$	1,00	80%	80%	B	2	95,18

b) FATOR DE POTÊNCIA: 0,95 CAPACITIVO

A TABELA II apontou dez casos que preencheram todos os requisitos U_1 , $U_{\text{máx}}$, θ e ΔQ . Os rendimentos maiores ficaram com os modelos "B". Destacando-se os rendimentos obtidos

para o modelo "B", com $N_t = 2$ nos dez casos referidos (nos quais há 6 casos com $N_t=5$, já descartados economicamente):

$$K_{série}=80\% - K_{shunt}=70\% - \eta=94,02\%$$

$$K_{série}=80\% - K_{shunt}=80\% - \eta=94,38\%$$

Novamente será escolhida $K_{série}=K_{shunt}=80\%$, já que apresenta o maior rendimento:

P_2	fP_2	K_{shunt}	$K_{série}$	Modelo	n_f	$\eta(\%)$
$0,75 P_0$	0,95 cap.	80%	80%	B	2	94,38

c) FATÔR DE POTÊNCIA: 0,95 INDUTIVO

Observando-se a TABELA III nota-se que não haverá nenhum caso que preencha simultaneamente todos os requisitos. A variação de reativo é o elemento mais distoante. Não há a mínima chance de se operar com esta carga dentro do intervalo de ± 100 MVar. Será apresentado e indicado o caso que apresenta o menor fluxo de reativo e que esteja dentro dos padrões impostos inicialmente para U_1 , $U_{máx}$ e θ . Acrescente-se que o menor fluxo de reativo corresponde ao máximo de rendimento:

P_2	fP_2	K_{shunt}	$K_{série}$	Modelo	n_f	$\eta\%$
$0,75 P_0$	0,95 ind.	40%	70%	B	2	95,02

6.3.2 - CARGA $P_2 = P_0$

a) FATÔR DE POTÊNCIA: 0,95 CAPACITIVO

Da TABELA V tiram-se nove casos que atendem perfeitamente a todos os requisitos e catorze outros que apenas não preenchem as exigências de ΔQ . Dentre os nove casos citados, por incrível que pareça, não há sequer um que seja do modelo "B", com $N_t = 2$. Nos catorze restantes, há vários casos com $N_t = 2$ e modelo "B". O de maior rendimento entre eles (e entre os vinte e três casos totais) é o que apresenta $K_{shunt} = 80\%$ e $K_{série} = 60\%$: $\eta = 93,02\%$, com $\Delta Q = -230,75$ MVar. Os outros detalhes: $\theta = 25,76^\circ$, $U_1 = 496,14$ KV e $U_{m\acute{a}x} = 526,26$ KV.

P_2	fP_2	K_{shunt}	$K_{série}$	Modelo	n_t	η (%)
$1,00 P_0$	0,95 cap.	80%	60%	B	2	93,02

b) FATÔR DE POTÊNCIA UNITÁRIO

A principal restrição para o transporte desta carga, é com relação ao ângulo de potência. Caso fôsse possível operar com $\theta = 60^\circ$, não seria necessária nenhuma compensação série ou shunt.

De um exame da TABELA IV pode ser retirada uma combinação série-shunt que coloque θ abaixo dos 30° e que forneça o maior rendimento possível. Esta combinação é:

$K_{série} = 70\%$. $K_{shunt} = 60\%$, com os seguintes valores:

$$U_1 = 524,31 \text{ KV}$$

$$U_{m\acute{a}x} = 527,51 \text{ KV}$$

$$\theta = 17,57^\circ$$

$$\Delta Q = 96,29 \text{ MVar}$$

$$\eta = 96,64\%$$

P_2	fP_2	Kshunt	Ksérie	Modêlo	n_t	n (%)
$1,00 P_0$	1,00	60%	70%	B	2	96,64

c) FATOR DE POTÊNCIA: 0,95 INDUTIVO

A operação com esta carga, dentro dos limites estipulados inicialmente, é inviável. No entanto, dentro do estudo de otimização, serão determinadas em que condições se dará a transmissão desta potência indutiva.

Examinando as figuras 5.34 e 5.35, nota-se que há um certo número de tensões no transmissor por volta de 540 KV e, ao longo da linha, em cerca de 550 KV. Nestas condições de tensão, tem-se que os reativos são bastante altos e proibitivos. ΔQ está entre 500 e 700 MVar. Os ângulos de potência, por se tratar de carga indutiva, não apresentam maiores problemas. Dentre os casos analisados com as condições acima, o de maior rendimento é o de $Ksérie=50\%$, $Kshunt=0\%$, $N_t=2$, modêlo "B" ou "A": 93,61%. Este caso inclusive está mostrado na figura 5.39.

Novamente deve ser destacado que esta solução não satisfaz às exigências de um bom comportamento. É entretanto, a condição menos desfavorável que se tem, para o transporte desta carga indutiva.

P_2	fP_2	Kshunt	Ksérie	Modêlo	n_t	n (%)
$1,00 P_0$	0,95 ind.	0%	50%	B	2	93,61

a) FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO

De um exame à TABELA VII, constata-se não haver nenhum caso que satisfaça simultaneamente a todas as exigências. É que exatamente na região em que os fluxos de reativos e ângulos de potência deixam de satisfazer, as tensões passam a entrar dentro de seus respectivos limites. Desta forma, há uma região de combinações série-shunt que satisfazem simultaneamente pelo menos parcialmente. Dentro das particularidades de cada projeto, será possível optar, dentro desta referida região de transição, por uma combinação mais conveniente aos desejos e metas principais do projetista. Isto é, dedicar mais atenção a um detalhe, que pode ser U_1 , θ , rendimento, etc.

Assim, admitindo que se possa ultrapassar os limites de θ e ΔQ , poderá ser escolhido:

$K_{\text{série}}=60\%$ - $K_{\text{shunt}}=20\%$ - modelo "B" - $N_t = 2$, que apresenta os seguintes dados:

$$U_1 = 523,63 \text{ KV}$$

$$U_{\text{máx}} = 529,11 \text{ KV}$$

$$\theta = 30,21^\circ \text{ (levemente superior aos } 30^\circ)$$

$$\Delta Q = 159,48 \text{ MVAR (superior aos } +100 \text{ MVAR)}$$

$$\eta = 91,81\%$$

Admitindo agora, que se possa ultrapassar os limites de U_1 e $U_{\text{máx}}$ apenas:

$K_{\text{série}}=60\%$ - $K_{\text{shunt}}=30\%$ - modelo "B" - $N_t = 2$, com os seguintes resultados:

$$U_1 = 532,40 \text{ KV}$$

$$U_{\text{máx}} = 532,40 \text{ KV}$$

$$\theta = 29,48^\circ$$

$$\Delta Q = 72,74 \text{ MVar}$$

$$\eta = 92,02\%$$

Desta forma, ficam os dois casos citados como opções melhores para a operação da linha com esta carga.

Para θ superior a 30° e ΔQ superior a 100 MVar:

P_2	fP_2	K shunt	K série	Modelo	n_t	$\eta(\%)$
$1,25 P_0$	1,00	20%	60%	B	2	91,81

Para U_1 e U_{\max} superiores a seus limites iniciais:

P_2	fP_2	K shunt	K série	Modelo	n_t	$\eta(\%)$
$1,25 P_0$	1,00	30%	60%	B	2	92,02

b) FATOR DE POTÊNCIA: 0,95 CAPACITIVO

Há nove casos na TABELA VIII que preenchem aos requisitos. Entretanto, nenhum deles poderá ser usado, uma vez que todos são para $N_t = 5$. De acordo com o estudo econômico, essa hipótese ($N_t=2$) está afastada totalmente.

Procedendo a uma nova escolha, que envolva $N_t=2$ e o modelo "B", nota-se que deverá ser ultrapassado os limites de ΔQ , θ e, levemente, de U_{\max} . Em compensação, o rendimento será superior a qualquer um daqueles nove casos referidos inicialmente. É a combinação $K_{\text{série}}=60\%$, $K_{\text{shunt}}=60\%$, modelo "B", $N_t = 2$, cujos valores são:

$$U_1 = 494,51 \text{ KV}$$

$$U_{\text{máx}} = 531,29 \text{ KV}$$

$$\theta = 33,15^\circ \text{ (superior a } 30^\circ)$$

$$\Delta Q = -301,97 \text{ MVar (superior a } -100 \text{ MVar)}$$

$$\eta = 91,06\%$$

Caso se queira diminuir o fluxo de reativo e o ângulo de potência, as tensões sairão de seus intervalos: U_1 diminuindo de 490 KV, causando o Efeito Ferranti e $U_{\text{máx}}$ superando os 530 KV e o rendimento decrescerá.

P_2	fP_2	Kshunt	Ksérie	Modêlo	n_1	$\eta(\%)$
$1,25 P_0$	0,95 cap.	60%	60%	B	2	91,06

c) FATÔR DE POTÊNCIA: 0,95 INDUTIVO

Conforme o que já era previsto, a transmissão desta elevada potência indutiva acarretará elevadas tensões ao longo de toda a linha. A figura 5.50 mostra que a menor tensão obtida no transmissor é de 540 KV. Em contrapartida, a tensão máxima nesta oportunidade será de 592,0 KV. A melhor opção, deve ser realmente melhorar-se o fator de potência do receptor antes de tudo.

A condição menos desfavorável pode ser obtida, no entanto: é a combinação $K_{\text{shunt}}=0\%$ e $K_{\text{série}}=80\%$, com $N_t = 2$, modelo "B" ou "A", que apresenta os seguintes resultados:

$$U_1 = 546,49 \text{ KV (É exatamente no transmissor que$$

$$U_{\text{máx}} = 546,49 \text{ KV está a maior tensão).}$$

$$\theta = 14,13^\circ$$

$$\Delta Q = 663,41 \text{ MVar (bastante superior a } +100 \text{ MVar)}$$

$$\eta = 91,81\%$$

P_2	fP_2	Kshunt	Ksérie	Modelo	n_t	$\eta(\%)$
$1,25 P_0$	0,95 ind.	0%	80%	B	2	91,81

6.3.4 - LINHA A VAZIO

De acordo com o que já foi visto no capítulo anterior, há apenas um caso que satisfaz simultaneamente às condições de U_1 entre 475 KV e 500 KV e de ΔQ entre -100 e +100' MVar. Entretanto, este caso ($Ksérie=Kshunt=80\%$) envolve o modelo "A" e não o modelo "B". Fica no entanto constatado que o melhor número de trechos é $N_t = 2$.

As melhores opções envolvendo o modelo "B" são:

- $Ksérie=80\%$ - $Kshunt=80\%$ - $U_1=490$ KV e $\Delta Q = 153,92$ MVar
- $Ksérie=70\%$ - $Kshunt=80\%$ - $U_1=485$ KV e $\Delta Q = 152,00$ MVar
- $Ksérie=60\%$ - $Kshunt=80\%$ - $U_1=480$ KV e $\Delta Q = 150,06$ MVar
- $Ksérie=50\%$ - $Kshunt=80\%$ - $U_1=475$ KV e $\Delta Q = 148,15$ MVar

Como se pode observar, diminuindo-se a compensação série, aumenta-se o Efeito Ferranti, sem que o fluxo de reativo decresça significativamente. A opção mais vantajosa das quatro apresentadas é, indubitavelmente, a primeira. Sua única desvantagem é o fluxo de reativo superior a +100 MVar.

P_2	Kshunt	Ksérie	Modelo	n_t
0,00	80%	80%	B	2

ESTUDO DE COMPENSAÇÃO SÉRIE EM UM MODELO ELÉTRICO
DE LINHA DE TRANSMISSÃO.

A.1 - INTRODUÇÃO

Com a construção de um modelo elétrico equivalente de uma linha aérea de transmissão, foi possível constatar certos aspectos da transmissão, antes e após as compensações por capacitores série.

O referido modelo está em laboratório do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia e pode ser visto na figura A.1. Nesta, o modelo está sendo visto de frente, com os capacitores instalados nas extremidades, para $K_{série} = 71,50\%$ (valor arbitrariamente escolhido). Na figura A.2 tem-se o modelo internamente: Vêm-se as bobinas, em número de 20 (que representam a resistência e a indutância da linha) e os capacitores, em número de 21 (representando a capacitância natural da linha).

O modelo estudado representa uma linha de transmissão de 400 Km de extensão, classe de tensão de 230 KV, que possui os seguintes parâmetros elétricos:

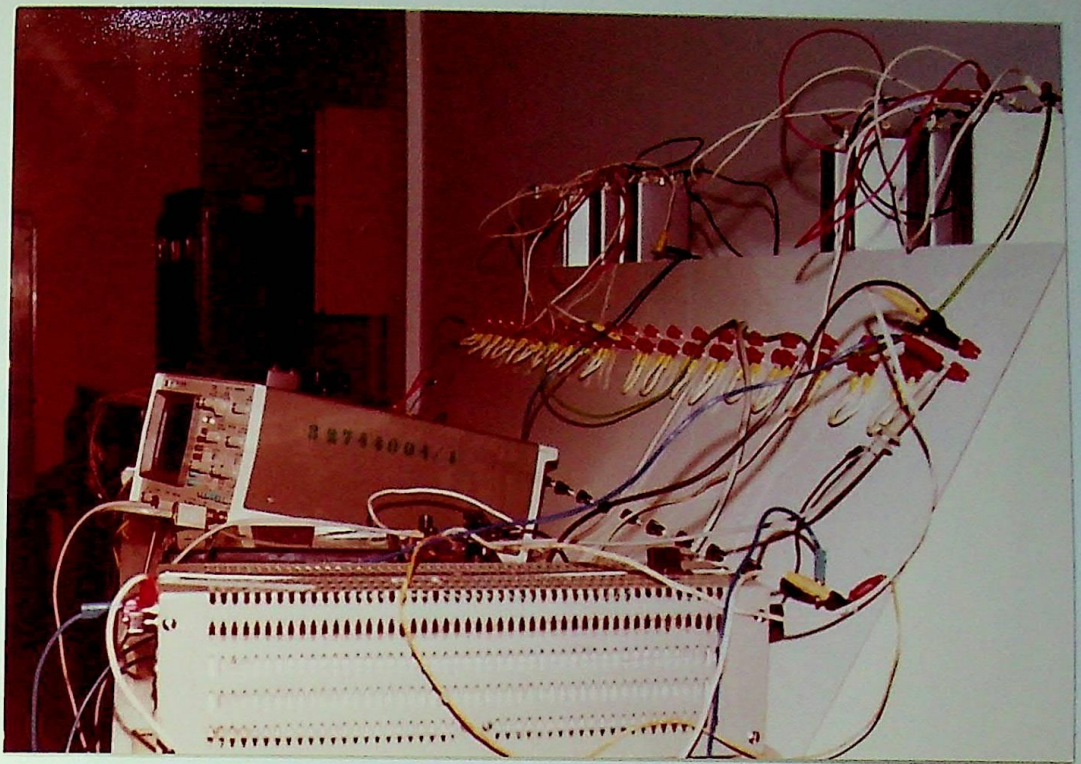


Figura A.1 - Modelo elétrico equivalente de uma linha de transmissão, visto de frente.



Figura A.2 - Vista interna do modelo elétrico equivalente de uma linha de transmissão.

$$r = 0,2125 \Omega/\text{Km}$$

$$L = 1,355 \cdot 10^{-3} \text{ H/Km}$$

$$C = 0,00845 \mu\text{F/Km}$$

$$g = 0$$

Estes parâmetros fornecem $Z_0 = 400,44 \Omega$.

As constantes de quadripolo medidas foram:

- Para meia linha:

$$\dot{A}_1 = \dot{D}_1 = 0,9674 \angle 0,8018^\circ$$

$$\dot{B}_1 = 109,79 \angle 67,75^\circ$$

$$\dot{C}_1 = 6,302 \cdot 10^{-4} \angle 90,26^\circ$$

- Para linha inteira:

$$\dot{A} = \dot{D} = 0,8709 \angle 3,57^\circ$$

$$\dot{B} = 212,37 \angle 68,57^\circ$$

$$\dot{C} = 12,189 \cdot 10^{-4} \angle 91,08^\circ$$

Para este modelo, será aplicada uma tensão de 127 V, que significará, na linha real, a aplicação de 220 KV entre fases. A Potência natural desta linha, com a tensão de 220 KV é de 120 MW. Para o modelo reduzido, que é monofásico, a potência natural será de $P_0 = 40 \text{ W}$.

A.2 - LINHA SEM COMPENSAÇÃO

A.2.1 - COM A CARGA $P_2 = P_0$

O receptor, em qualquer hipótese, deverá estar com a tensão $\dot{U}_2 = 127 \angle 0^\circ$. A Potência será $P_2 = 40 \text{ W}$, $fp_2 = 1,0$.

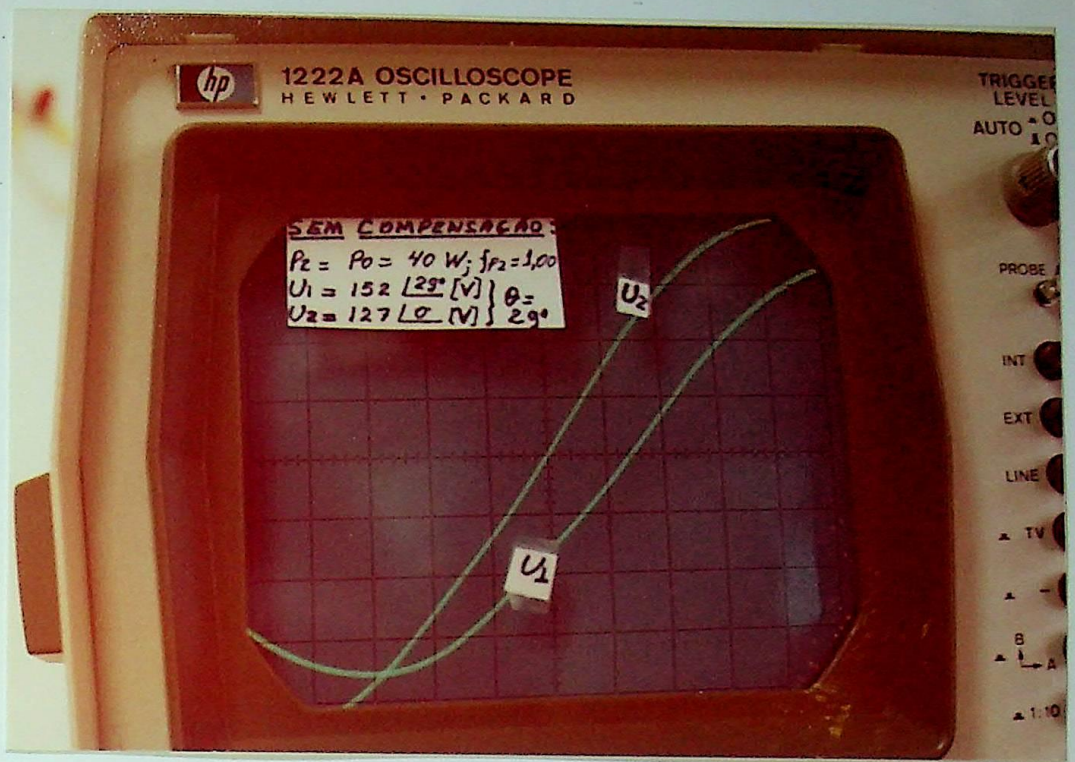


Figura A.3 - Tensões no transmissor e receptor, para a linha sem compensação.

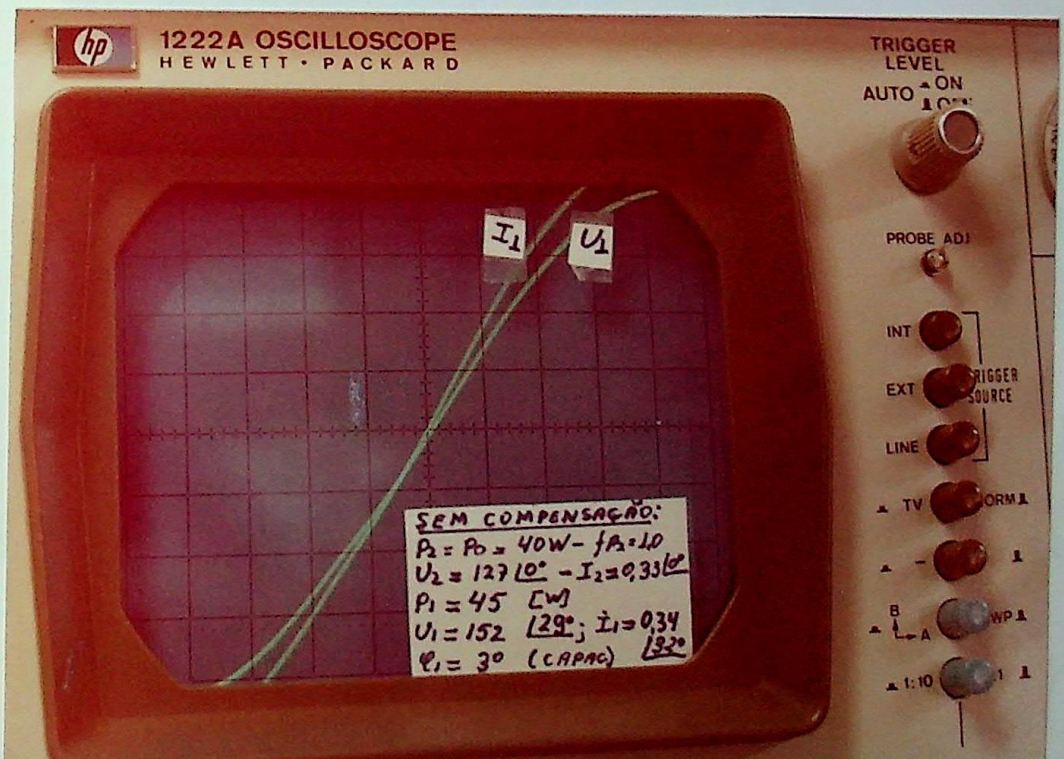


Figura A.4 - Tensão e corrente no transmissor, para a linha sem compensação.

Conforme a figura A.3 mostra, para estas condições, a tensão no transmissor será $\dot{U}_1 = 152/29^\circ$. A figura A.4 informa, com relação ao transmissor, que:

-A potência é $P_1 = 45$ W. Isto proporciona à transmissão, um rendimento de $\eta = \frac{40W}{45W} \cdot 100\% = 88,89\%$

-A corrente é $\dot{I}_1 = 0,34/32^\circ$ (A). Desta forma, a defasagem entre U_1 e I_1 é de $(29^\circ - 32^\circ) = -3^\circ$. Ou seja, o fator de potência é capacitivo e igual a $\cos 3^\circ = 0,99863$.

A.2.2. - LINHA A VAZIO

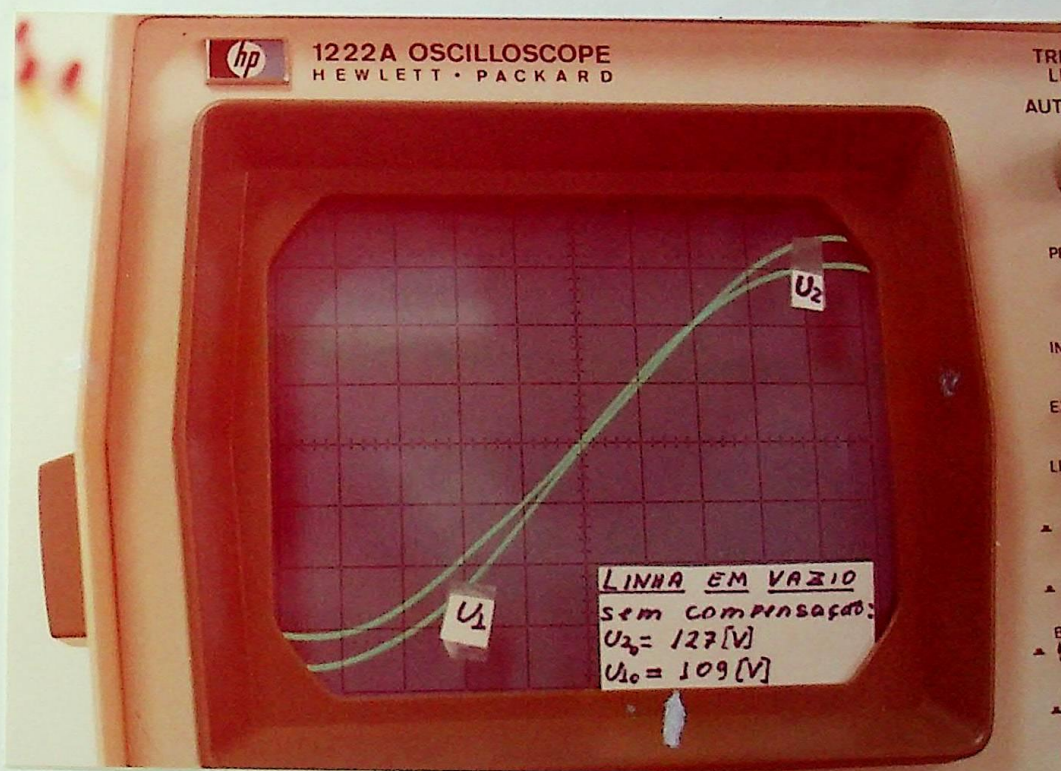


Figura A.5 - Tensões no transmissor e receptor, para a linha sem compensação, a vazio.

Pela figura A.5 nota-se que para $U_{20} = 127$ (V), a tensão no transmissor é $U_{10} = 109$ (V), o que evidencia a presença do efeito ferranti.

A.3 - LINHA COM COMPENSAÇÃO SÉRIE NAS EXTREMIDADES. $K_s \text{ série} = 71,5\%$

A.3.1 - COM A CARGA $P_2 = P_0$

A carga no receptor é a mesma anterior. A figura A.6 indica que a tensão no transmissor pouco diminuiu com a presença dos capacitores: de 152 V ela passa para 151 V. O efeito da presença dos capacitores é notada pela redução do ângulo de potência, que de 29° passou apenas para $10,5^\circ$.

A figura A.7 apresenta a corrente e a tensão no transmissor. O watímetro ali instalado indica agora uma potência ativa maior que aquela da linha sem compensação. A potência P_1 , de 45W passa para 47W e, com isso, o rendimento decresce para 85,106%. Recorde-se que para a linha sem compensação o rendimento é de 88,89%. A corrente lida no amperímetro instalado no transmissor é maior que aquela anterior: $\dot{I}_1 = 0,375/30^\circ$ (A). O fator de potência no transmissor *decreceu* com a inserção dos capacitores: agora é igual a $\cos(10^\circ - 30^\circ) = \cos 20^\circ = 0,93969$.

A.5.2 - LINHA A VAZIO

A presença dos capacitores em série reduz também o efeito ferranti. A figura A.8 indica que para $U_{20} = 127(V)$, a tensão no transmissor é $U_{10} = 122(V)$.

Em A.2.2 (linha sem compensação série), a tensão no transmissor não podia passar de $U_{10} = 109(V)$.

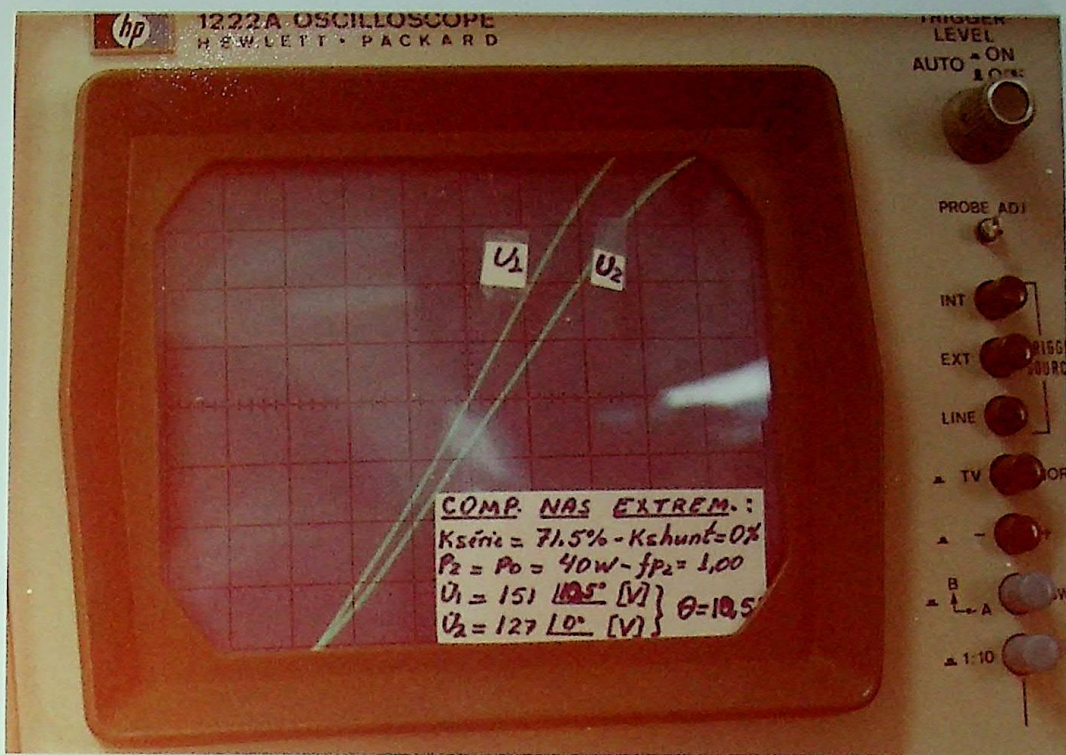


Figura A.6 - Tensões no transmissor e receptor, para a linha com compensação nas extremidades.

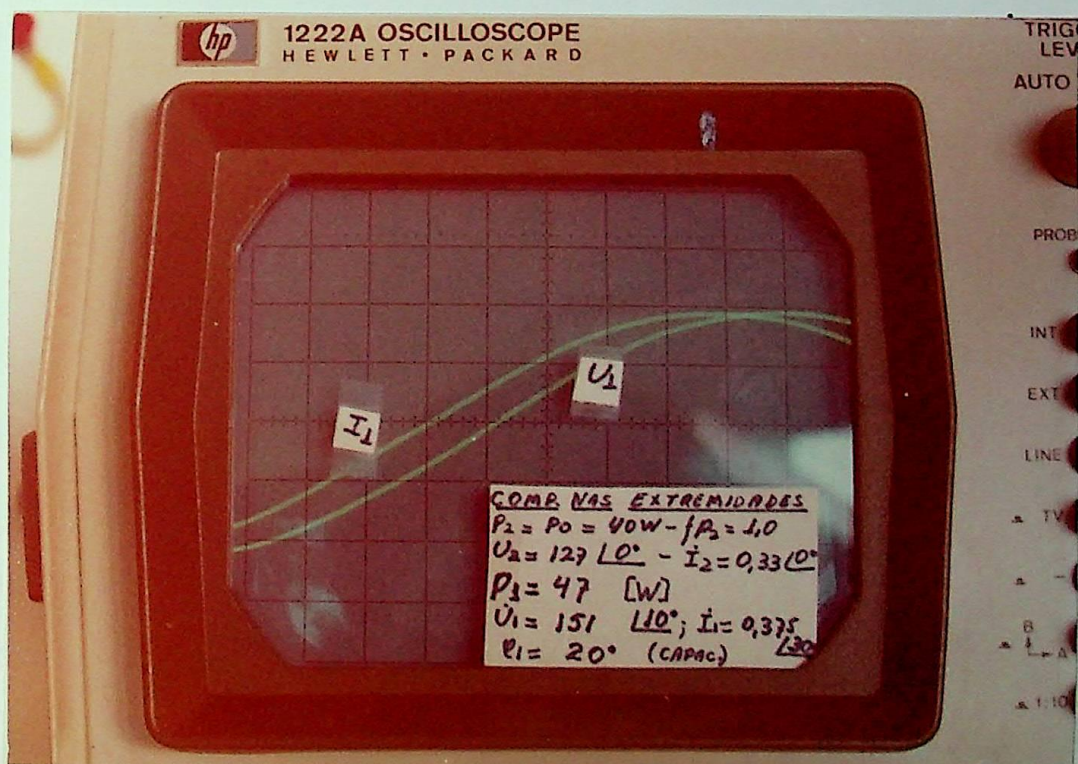


Figura A.7 - Tensão e corrente no transmissor, para a linha com compensação nas extremidades.

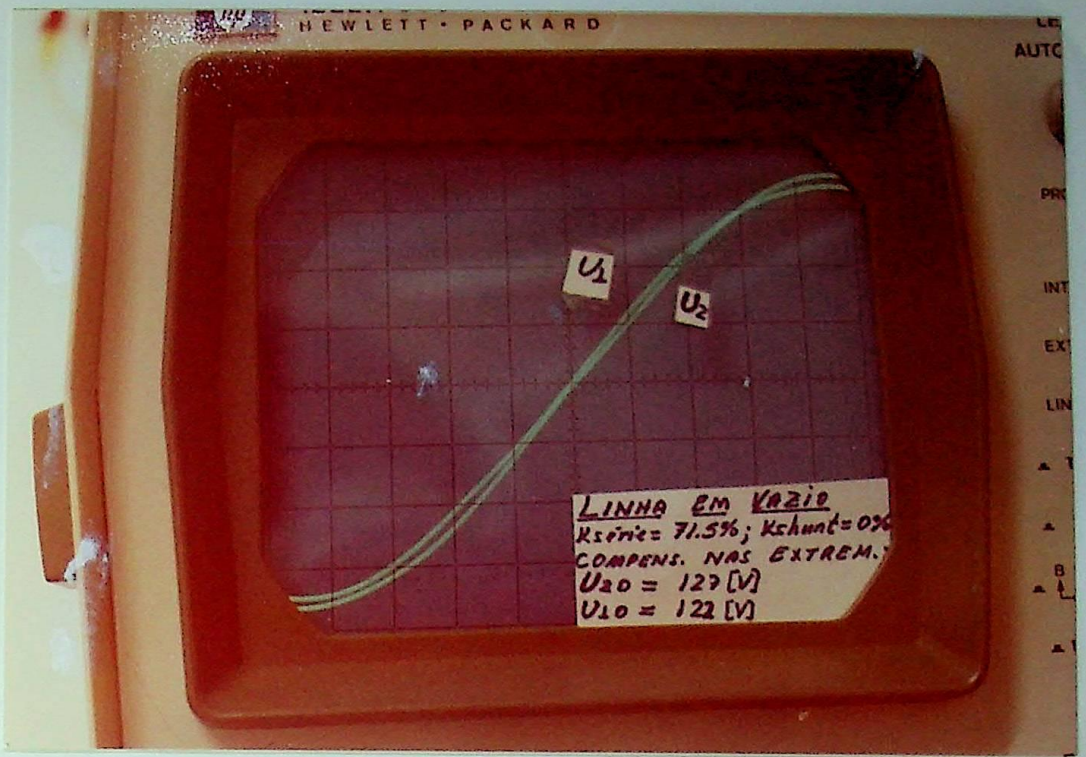


Figura A.8 - Tensões no transmissor e receptor, para a linha com compensação série nas extremidades, a vazio.

A.4 - LINHA COM COMPENSAÇÃO SÉRIE NO MEIO DA LINHA - $K_{série} = 71,5\%$

A.4.1 - LINHA COM A CARGA $P_2 = P_0$

Novamente é mantida a mesma carga no receptor : $P_2 = P_0 = 40 \text{ W}$, $fp_2 = 1,00$, sob a mesma tensão $\dot{U}_2 = 127/0^\circ \text{ (V)}$. Nota-se que agora houve uma menor queda de tensão ao longo da linha, pois a tensão no transmissor é $\dot{U}_1 = 150/10^\circ \text{ (V)}$, conforme indica a figura A.9. Comparando esta figura com a figura A.6 nota-se que o ângulo de potência no caso atual é ligeiramente menor, mas também em torno de 10° .

A figura A.10 aponta outra pequena vantagem desta compensação, com relação à compensação nas extremidades:

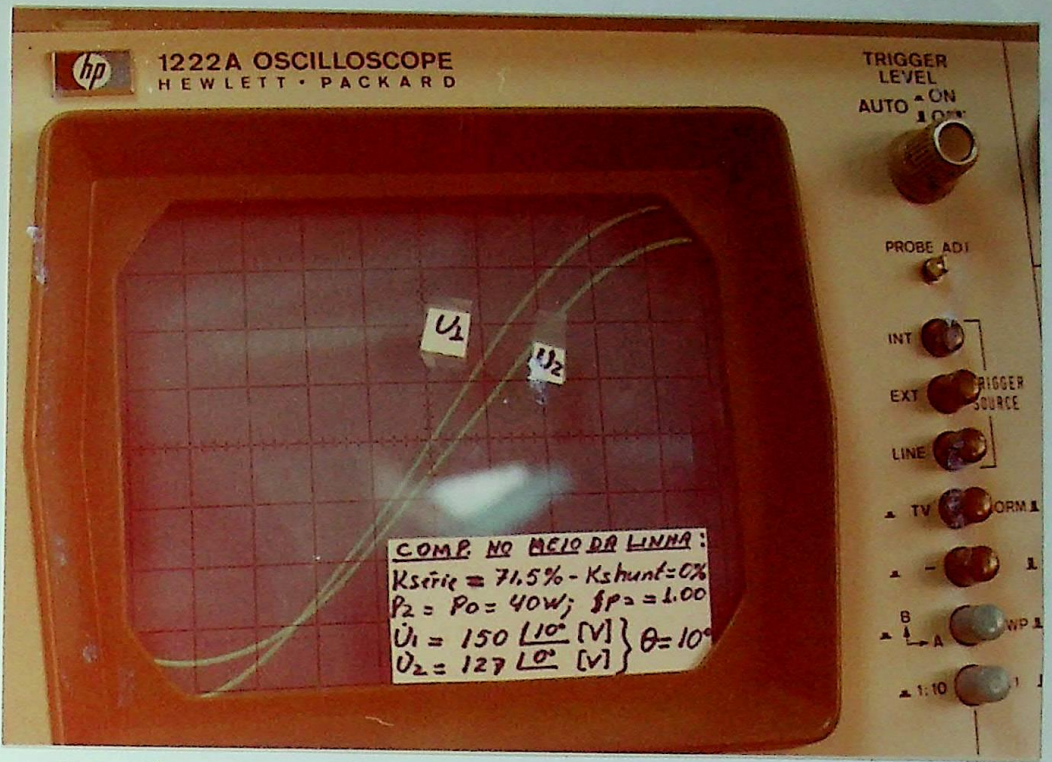


Figura A.9 - Tensões no transmissor e receptor, para a linha compensada no meio.

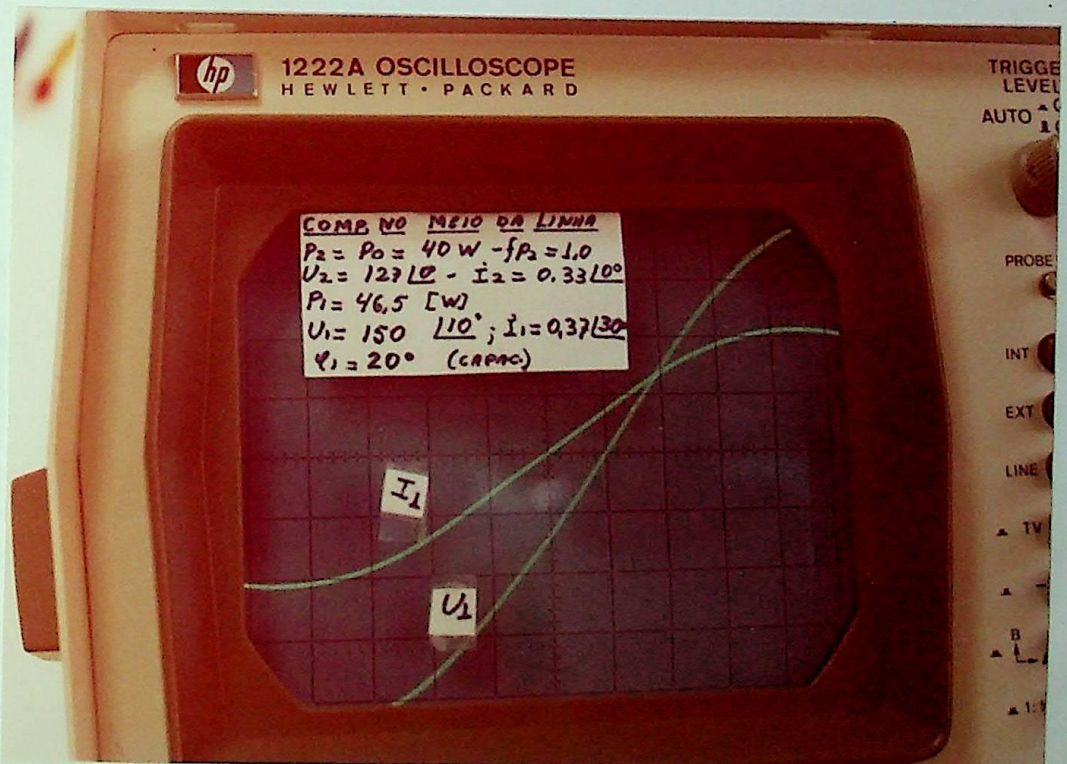


Figura A.10 - Tensão e corrente no transmissor, para a linha compensada no meio.

-O rendimento, agora, será maior, pois $P_1 = 46,5$ (W), contra $P_1 = 47,0$ (W) anteriormente anotado. No entanto, a linha sem compensação supera os dois rendimentos da linha com pensada.

O rendimento para a linha compensada com capacitores no meio da linha será:

$$\eta = \frac{40,0}{46,5} = 86,02\%.$$

-A corrente é ligeiramente menor para o caso atual, com relação à compensação nas extremidades:

$$\dot{I}_1 = 0,37/\underline{30^\circ}.$$

-O fator de potência é o mesmo do caso anterior (fp_1), portanto, é menor que aquele da linha sem compensação.

A.4.2 - LINHA A VAZIO

Uma vez mais, a presença dos capacitores elimina o efeito ferranti. A figura A.11, se comparada com a figura A.8, demonstra que, neste particular, a compensação nas extremidades é melhor: naquela ocasião, para os mesmos $U_{20}=127$ (V), tem-se $U_{10} = 122$ (V) e, para o caso atual, da linha com os ca pacitores no meio da linha, lê-se $U_{10} = 121$ (V).

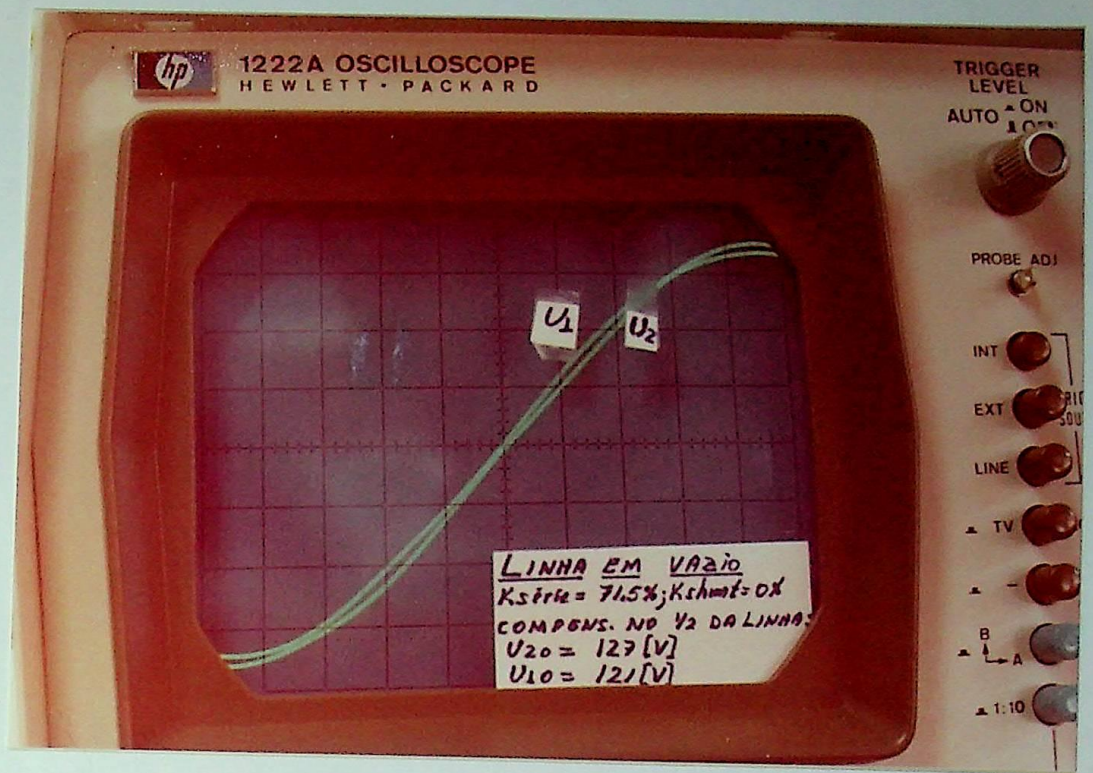


Figura A.11- Tensões no transmissor e receptor, para a linha a vazio, compensada no meio.

A.5 - CONCLUSÕES

Pelo que foi observado e exposto para o modelo de linha de transmissão, tem-se comprovado na prática aquilo que foi constatado por cálculos, para a linha de 1000 Km analisada neste trabalho: os rendimentos decrescem com a colocação de capacitores em série nas linhas; os ângulos de potência diminuem com os capacitores em série; os capacitores diminuem a queda de tensão ao longo da linha; e finalmente, eliminam o efeito ferranti nas linhas.

Ficou também constatado que as linhas, para uma potência P_o no receptor, são vistas do transmissor, como sendo capacitivas. Com a instalação dos capacitores em série, a linha ficará ainda mais capacitiva, decrescendo assim, os " η ".

APÊNDICE B

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Fuchs, R.D. - *Tranmissão de Energia Elétrica* - Livros Técnicos e Científicos Editôra - Rio de Janeiro - 1977 - 1ª Ed.
- 2- Cinieri, E e Iliceto, F. - *Ottimazione della compensazione serie e derivata nella trasmissione dell'energia a grande distanza* - Revista L'Energia Elétrica - nº2 - 1976 - páginas 77-85.
- 3- Iliceto, F. - *Considerazioni sulla possibilità di trasmissione dell'energia con linee compezzate in corrente alternata a distanze superiore a 1500 Km* - Relatório A.78 - Reunião anual do AEI - Roma - 1974.
- 4- Dubois, E.W.; Martin, D.E.; Murphy, C.M. e Fairman, J.F. - *Extra long-distance transmission* - Trans. AIEE - Nova Iorque - 1962 - Vol. 80 - págs. 1108-1116.
- 5- Kumar, B, S.A.; Parthasarathy, K.; Prabhakara, F.S. e Khincha, H.P. - *Effectiveness of series capacitors in long distance transmission lines* - Trans. IEEE - Nova Iorque - 1970 - págs. 941-951.
- 6- Kimbark, E.W. - *Improvement of sistem stability by switched series capacitors* - Trans. IEEE-PAS - Nova Iorque - Vol. 85 - 1966 - pág. 180-188.

- 7- Starr, E.C. e Evans, R.D. - *Series Capacitors for transmission circuits* - Trans. AIEE - Nova Iorque - 1942 - pág. 963 - 973.
- 8- Starr, E.C. e Seymour, R.S. - *Economic aspects of series capacitors in high-voltage transmission* - Trans. AIEE - Nova Iorque - Vol. 70 - 1951 - pág. 1663-1670.
- 9- Crary, S.B. e Saline, L.E. - *Location of series capacitors in high-voltage transmission systems* - AIEE Committee on Technical Operations - AIEE Pacific General Meeting - Vancouver - 1953.
- 10- Butler, J.W.; Paul, J.E.; Schoeder, T.W. - *Steady-state and transient analysis of series capacitors in long transmission lines* - Trans. AIEE - Nova Iorque - Vol. 62 - 1943 - pág. 58-65.
- 11- Berdy, J. - *Protection of circuits with series capacitors* - Trans. AIEE - Nova Iorque - Vol. 81 - 1963 - pág. 929-935.
- 12- Maneatis, J.A.; Hubacher, E.J.; Rothenbuhler, W.N. e Sabath, J. - *500 KV series capacitors installations in California* - Trans. IEEE-PAS - Nova Iorque - Vol. 89 - 1974 - pág. 1138-1148.
- 13- Hoard, B.V. - *Characteristics of a 400-Miles 230 KV series-capacitors compensated transmission system* - Trans. AIEE - Nova Iorque - Vol. 65 - 1946 - pág. 1102-1114.

- 14- Johnson, A.A.; Narbury, E.R.E. e Arthur, J. N. - *Design and Protection of 10.000 KVA series capacitors for 66 KV transmission line* - Trans. AIEE - Nova Iorque - Vol. 67 - 1948 - pág. 363-368.
- 15- Knudsen, N. - *Economic comparison between devices for stabilising long transmission lines* - ASEA Research - Nº 9 - Vasteras, Suécia - 1966 - pág. 87-106.
- 16- Siemens - *Protection of H.V. Lines with series-capacitors* - Erlangen - 1972.
- 17- Lalander, S. e Norlin L. - *The use of series capacitors on High-voltage transmission systems* . CIGRE - Rel. 330-1958.
- 18- Landa, J.V. - *Redes Eletricas* - Editôra: Representaciones y Servicios de Ingenieria, S.A.- México-DF - 1975-2ª Ed.
- 19- Crary, S.B. - *Power system stability* - General Electric Company - Schenectady - Nova Iorque - 1955 - 3ª Edição.
- 20- Kimbark, E.W. - *Introduction to problems of power stability* - IEEE Tutorial Course: Modern Concept of Power Systems' Dynamic - Nova Iorque - 1970 - pág. 5-10.
- 21- Stevenson, W.C. - *Elements of Power Systems Analysis* - McGraw Hill - Kogakusha-Tôquio - 1962 - 2ª Edição.

