



**GRUPO III
LINHAS DE TRANSMISSÃO (GLT)**

**LINHAS NÃO CONVENCIONAIS COM ELEVADA CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO -
ANÁLISE PARAMÉTRICA**

Carlos Portela *
COPPE / UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

Sergio Gomes Jr .
CEPEL e COPPE/UFRJ

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise paramétrica de linhas de transmissão, incluindo linhas não convencionais com elevada capacidade de transmissão. São mostrados resultados relativos a linhas de 500 e 750 kV, discutindo-se o impacto da variação dos diversos parâmetros de projeto no processo de otimização da linha. A partir dos resultados apresentados, é possível obter valores aproximados dos parâmetros próximos dos de linhas não convencionais ótimas, para uma gama de condicionamentos, úteis para estudos de planejamento, e uma avaliação do tipo de influência de cada parâmetro no processo de otimização global da linha.

PALAVRAS CHAVE

Otimização de Linhas, LNC, LPNE, Linhas Longas, Linhas de Transmissão, Feixes de Condutores

1. - INTRODUÇÃO

Os “parâmetros” de uma linha de transmissão que devem ser considerados no processo de otimização são, basicamente, o número de fases, o nível de tensão, o número e tipos de condutores, a configuração geométrica das fases, dos feixes, e dos cabos pára-raios, a concepção e características das cadeias de isoladores e ferragens, incluindo anéis de guarda e similares e amortecedores, os espaçadores, de feixes e, eventualmente, de fases, a concepção das estruturas, os materiais das estruturas e tipo e disposição dos respectivos elementos estruturais, o esticamento de condutores, o espaçamento e localização de estruturas, a concepção das fundações, o aterramento das estruturas e estais, o critério de ligação e seccionamento de cabos pára-raios, o traçado da linha. Essa otimização deve ser inserida e feita em conjunto com a otimização dos equipamentos de compensação reativa e de manobra, sistemas de proteção

e limitadores de sobretensões, condicionamentos e critérios chaveamento, de abertura e de religamento, e com a concepção, projeto e seleção de condicionamentos operacionais da rede em que a linha é inserida, incluindo características dos equipamentos, critérios de operação, incerteza de evolução futura, a longo prazo, condicionamentos de segurança de pessoas e de uso de faixa de passagem, condicionamentos de impacto ambiental, condicionamentos de corrosão, parâmetros estatísticos de condicionamentos meteorológicos, incluindo descargas atmosféricas e vento, características do solo, quer topográficas, quer elétricas, quer quanto a interação mecânica com fundações, quer quanto a corrosão, condicionamentos de acesso, para construção, inspeção e manutenção, condicionamentos de inspeção, manutenção e reparação, parâmetros de custos e de ponderação econômica e financeira, condicionamentos legislativos e regulamentares e de opinião pública, condicionamentos de disponibilidade e qualidade de materiais e equipamentos, condicionamentos de prazos, qualidade e custo de fornecimento de energia.

No caso de linhas convencionais, os parâmetros “ótimos” de cada projeto situam-se em gamas relativamente moderadas, e há numerosos antecedentes de linhas e redes “similares”. Desta forma, é razoável o procedimento usual de fazer a otimização da linha por um estudo comparativo de alternativas e análise de efeitos de variação de alguns poucos parâmetros, em gamas limitadas.

Com as novas concepções construtivas, não convencionais, de linhas de transmissão, incluindo disposições não convencionais de condutores, procedimentos não tradicionais para redução de sobretensões e eliminação de faltas, torna-se possível obter soluções muito vantajosas, sob os pontos de vista técnico, econômico e de impacto ambiental, viabilizando, inclusivamente, a transmissão a distâncias muito elevadas e o aprovei-

tamento de recursos energéticos muito afastados dos centros de consumo.

Designamos as soluções não convencionais por LNC (linhas não convencionais), englobando, entre outras, a linhas freqüentemente designadas por LPNE (linhas de potência natural elevada), embora esta última designação não se nos afigure muito feliz.

Para as LNC, há três tipos de condicionamentos básicos que afetam sobremaneira as metodologias e “atitudes” de projeto e otimização, impondo precauções e cautelas específicas, para assegurar soluções adequadas, sem riscos importantes de fracassos tecnológicos:

- Por um lado, há um número elevado de parâmetros a “otimizar”, em conjunto, com elevadas gamas de variação potencialmente interessantes, sobre cujos efeitos e conseqüências não há a experiência de soluções similares, já estudadas por numerosa pessoas, com condicionamentos semelhantes. Se essa experiência existisse, o que não é o caso, o risco de erros grosseiros, ou de efeitos importantes “esquecidos”, ou de soluções muito diferentes do “ótimo”, seria moderado. É imperiosa, para as LNC, uma identificação segura dos condicionamentos e interações importantes, com bases físicas e técnicas sólidas. Seria extremamente perigoso, por exemplo, fazer opções simplistas, por semelhança ou analogia com os “hábitos” técnicos, ou por extrapolação de semi-verdades “aplicáveis” às soluções convencionais. Alguns fracassos tecnológicos gritantes, em diversos países, confirmam o risco de não se tomar precauções metodológicas em LNC.

- Por outro lado, seria “suicida”, em termos tecnológicos e econômicos, fugir do problema, não adotando LNC, que têm enormes vantagens potenciais. Aliás, em parte por essa atitude de “fuga”, o setor elétrico apresenta, mundialmente, um elevado marasmo, com numerosos exemplos de erros repetidos mundialmente, por inércia cultural, com gravíssimas conseqüências quanto ao custo e qualidade do fornecimento de energia, e, inclusivamente, com níveis de qualidade que se vão deteriorando, em comparação negativa com outros setores econômicos, nos quais o esforço tecnológico e a “cultura” de atitude técnica conduzem a uma rápida evolução positiva.

- Por outro lado, pelo ineditismo ou limitada aplicação de novas tecnologias, não há, quanto a muitos aspectos, uma análise sistemática e robusta de interações e efeitos, o que obriga a um trabalho bastante extenso e demorado de análise, para uma eventual aplicação específica. Além disso, esta situação, dificulta o “acesso” e “sensibilidade” dos meios técnicos não diretamente envolvidos com LNC às potencialidades das mesmas e aos aspectos e parâmetros que será interessante considerar, em problemas específicos de planejamento e projeto otimizados.

O artigo apresenta resultados de um estudo paramétrico sistemático de sub-otimização de linhas LNC, com enfoque dominante nas características e número de condutores, e na disposição geométrica dos condutores, e tipos de “restrições” impostas, identificando as conseqüências dessa sub-otimização, quer em termos de restrições impostas, quer em termos de parâmetros de custo de investimento e de perdas, de capacidade de transmissão, de “absorção” de potência reativa e de parâmetros de valorização econômica, quer em termos de interação com parâmetros de otimização global, nomeadamente condicionamentos de impacto ambiental, de limitação de sobretensões, de requisitos de estruturas, de requisitos tecnológicos.

Esse estudo paramétrico baseia-se em metodologias robustas, de base física, objeto de numerosas comprovações e verificações, e num programa computacional de otimização de linhas transmissão, que permite considerar, conversacionalmente, LNC, além, naturalmente, de alternativas tradicionais.

Apresenta-se resultados relativos à análise sistemática de tipo de configuração de feixes, número e tipo de condutores, para os níveis de tensão de 500 e 750 kV, dentro do enfoque acima indicado. Discute-se o impacto da variação dos diversos parâmetros de projeto e de diversos tipos de restrições geométricas no processo de otimização da linha.

A metodologia apresentada constitui uma base segura para a análise das alternativas de LNC, e dos aspectos e condicionamentos das mesmas, nomeadamente quanto a vantagens e inconvenientes, comparativamente com soluções convencionais, e quanto aos efeitos e conseqüências de diversos “tipos” de opções de LNC.

2. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Considera-se uma gama de LNC de 500 kV e 750 kV, incluindo gamas de: condutores, número de condutores por fase, condicionamentos de geometria de feixes. Para visualização das suas características e condicionamentos, apresenta-se, sob forma gráfica, os seguintes parâmetros, referidos a regime balanceado a freqüência industrial, com tensão, U_c , 500 kV e 750 kV: potência característica, P_c , densidade de corrente, J_c , com potência P_c . As grandezas, U_c , P_c , J_c , em conjunto com o comprimento, L , definem, muito aproximadamente, as características e comportamento da linha em regime balanceado, a freqüência industrial e para fenômenos lentos, incluindo condicionamentos elétricos de transmissão de potência e de estabilidade eletromecânica, variação de tensão e condicionamentos de potência reativa e de estabilidade de tensão, sobretensões sustentadas, perdas; por outro lado, essas grandezas caracterizam, aproximadamente, o comportamento da linha, para diversos fenômenos transitórios relevantes. Apresentam-se, também sob forma gráfica, parâmetros geométricos que caracterizam as “dimensões” dos feixes,

que condicionam a otimização global das linhas e não foram consideradas explícita e completamente nas sub-otimizações cujos resultados são apresentados.

O processo de sub-otimização da configuração da linha consiste em otimizar o número, tipo e localização dos condutores da linha, com nível de tensão, U_c , fixo, obtendo valores de potência característica, P_c , e densidade de corrente característica, J_c , próximos do “ótimo”, e gamas de composição e condicionamentos geométricos dos feixes de condutores. A definição final dos valores ótimos dos parâmetros U_c , P_c , J_c , pode ser feita de forma comparativa, considerando variação paramétrica e análise de custos, e ponderando os aspectos referidos no item 1. e não considerados na sub-otimização.

A otimização global é, em princípio, iterativa, pois alguns resultados da sub-otimização interferem com diferentes aspectos e condicionamentos. Neste sentido, há interesse em considerar parâmetros de restrição que facilitem a interação entre a sub-otimização e a otimização global. É interessante considerar, para este efeito, parâmetros geométricos que traduzam as dimensões dos feixes; como exemplo, considera-se a distância máxima entre condutores de um feixe, separadamente para os feixes externos, D_{ext} , e para o feixe interno, ou central, D_{int} . Outro parâmetro de interesse para interpretação e avaliação dos critérios e condicionamentos da sub-otimização é o desvio entre a resistência da linha, para operação balanceada, e uma resistência mínima “ideal”. Caracteriza-se esse “desvio”, pela diferença relativa (expressa em porcentagem), Δ_R , entre a resistência da linha, com operação balanceada, e a resistência que corresponderia a uma distribuição uniforme de corrente entre os condutores do feixe, sem perdas nos cabos pára-raios e no solo.

Para o estudo paramétrico, tomou-se como base as configurações geométricas, a meio do vão, para as linhas de 500 e 750 kV descritas na figura 1. As linhas são simétricas em relação ao eixo vertical e possuem feixes elípticos de condutores distribuídos “regularmente” na elipse, e simetricamente em relação a um plano vertical, distâncias de isolamento e altura mínima constantes, cabos pára-raios com diferença de altura em relação ao condutor mais alto constante. Considerou-se flechas de 18 m para os condutores de fase e 6 m para os cabos pára-raios, para ambos os níveis de tensão.

Variou-se o número, n , de condutores do feixe (considerou-se 4, 5, 6 e 7 condutores para a linha de 500 kV e 5, 6, 7 e 8 para a linha de 750 kV) e o tipo dos mesmos. Considerou-se os condutores comerciais Hawk, Grosbeak, Drake, Rail, Bluejay, Pheasant, Falcon e Bluebird, com seções de alumínio, respectivamente, 241,7 mm², 322,3 mm², 402,8 mm², 483,4 mm², 564,0 mm², 644,5 mm², 805,7 mm² e 1092,5 mm².

A relação entre a seção total de alumínio da fase, S , e o diâmetro de cada condutor, d , é apresentada na figura 2. O número indicado junto de cada curva representa o

número de condutores do feixe; os “pontos” correspondem aos condutores que foram utilizados para a análise paramétrica. A seção S é, aproximadamente, proporcional ao custo dos condutores, e parâmetro importante do custo das torres, isoladores e ferragens; é a grandeza indicada nas abscissas das figuras 3 a 19, em que se representam, em ordenadas, diversos parâmetros das linhas, para diferentes hipóteses e condicionamentos.

As dimensões dos feixes (eixos das elipses) foram otimizadas, com um programa computacional, de forma a maximizar a potência característica, com a restrição de o campo elétrico máximo, na superfície externa dos condutores, não exceder 0,9 vezes o campo elétrico crítico de efeito coroa. Para linhas longas, este critério é equivalente a maximizar a capacidade de transmissão, e, por diversas razões, já apresentadas e discutidas anteriormente [1 – 11], traduz uma otimização efetiva, para os condicionamentos usuais, com a eventual necessidade de considerar requisitos adicionais de otimização.

Nas Figuras 3 a 19, representa-se, em função de S , as seguintes grandezas (separadamente para linhas de 500 kV e de 750 kV), definidas acima: D_{ext} , D_{int} , P_c , J_c , Δ_R .

Nota-se que os cálculos foram efetuados para os tipos de condutores mencionados, obtendo-se diversos pontos, discretos. As curvas representadas correspondem a curvas contínuas ajustadas a partir desses pontos, não tendo significado particular algumas “irregularidades” das curvas, que resultam, em grande parte, da discretização do número de condutores, n , e das diferenças de formação dos condutores.

Nas Figuras 3 a 7 representam-se estas cinco grandezas, para linhas de 500 kV, e, nas Figuras 8 a 12, de 750 kV, considerando, como critério de sub-otimização, a maximização da potência característica, para o número e tipo de condutores em causa, para o valor de U_c indicado, feixes “elípticos” simétricos, e restrição de campo elétrico

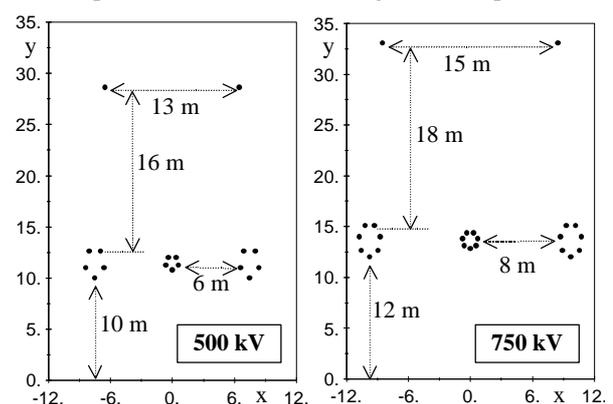


FIGURA 1 - Configuração base das linhas a otimizar. superficial máximo indicada, não considerando requisitos ou condicionamentos adicionais na sub-otimização.

Com este critério simplificado de sub-otimização, para valores de S elevados, é-se conduzido a feixes de grandes dimensões, ao maximizar P_c . Naturalmente, o aumento das dimensões dos feixes afeta aspectos construtivos

mecânicos, nomeadamente as dimensões e custo das estruturas, largura de faixa, ferragens, além de outros efeitos com menor influência na otimização global. Em termos de metodologia de otimização, e do programa computacional utilizado, para levar em conta estes aspectos, “bastaria” “quantificar” as conseqüências das dimensões dos feixes, com a pormenorização necessária, no “critério” de otimização, ponderando-as em conjunto com os valores de P_c , J_c , Δ_R . Todavia, essa quantificação envolve diversos aspectos, incluindo, variantes e alternativas de soluções construtivas e otimização de estruturas, o que torna aconselhável não ficar dependente da “necessidade” de uma “quantificação” explícita das conseqüências em causa, nas diversas fases do processo de otimização global, que não é compatível com uma quantificação explícita e “a priori” de todos os aspectos a ponderar.

Para evidenciar os aspectos dominantes de interação entre as dimensões do feixes e alguns dos parâmetros dominantes no processo de otimização global das linhas, optou-se por considerar uma restrição adicional, impondo um limite, D_m , à distância máxima entre quaisquer dois condutores de cada feixe, e considerando diferentes valores de D_m . Tem-se, assim, uma variável “de ligação” entre os parâmetros considerados explicitamente na sub-otimização e os restantes aspectos construtivos e de custo, que devem ser ponderados na otimização global.

Nas Figuras 13 a 16 representa-se P_c , J_c , Δ_R , considerando uma restrição adicional eventual, definida pelo limite D_m , para as linhas de 500 kV, e, ainda, concomitantemente com a restrição adicional, a alternativa de não impor forma elíptica para os feixes. Para $n = 5$ e $n = 6$ condutores por feixe, apresenta-se quatro curvas, uma correspondente a ausência de restrição adicional (mas feixes “elípticos”), outra, a $D_m = 5$ m e feixes “elípticos”, outra, a $D_m = 3$ m e feixes “elípticos”, outra, a $D_m = 3$ m e feixes sem outra restrição de forma (sem a condição de feixes “elípticos”). A Figura 15 é uma ampliação de parte da Figura 14.

Nas Figuras 17 a 19 faz-se representação similar para linhas de 750 kV; para $n = 8$ condutores por feixe, apresentam-se quatro curvas, uma correspondente a ausência de restrição adicional (mas feixes “elípticos”), outra, a $D_m = 6$ m e feixes “elípticos”, outra, a $D_m = 4$ m e feixes “elípticos”, outra, $D_m = 4$ m e feixes sem outra restrição de forma (sem a condição de feixes “elípticos”).

Os números junto das curvas das Figuras 2 a 19 indicam o número, n , de condutores por feixe, a letra E significa feixes “elípticos” e, a letra G, feixes sem restrição de forma, exceto não ser excedida D_m . Quando não é explicitada uma das letras E, G, trata-se de feixes “elípticos”.

A consideração de forma básica “elíptica”, para os feixes, foi motivada pelo fato de, por um lado, a mesma não levantar dificuldades construtivas, ou de comportamento mecânico, assegurando que, quanto a esses aspectos, se trata de soluções viáveis, e, por outro lado, pelo fato de a sub-otimização, sob os aspectos

analisados, mas sem a restrição de forma “elíptica”, conduzir a condições sub-ótimas com diferenças moderadas em relação às correspondentes à forma “elíptica”. Naturalmente, numa fase mais fina de otimização, há que analisar outras geometrias e suas conseqüências construtivas e mecânicas.

Não impondo o limite D_m , tem-se, basicamente, que, nas condições de sub-otimização, D_{ext} , D_{int} , P_c , J_c , Δ_R , variam muito acentuadamente com S e com n . Nomeadamente:

D_{ext} , D_{int} , P_c , Δ_R , são funções acentuadamente crescentes de S e, à parte algumas irregularidades, resultantes de quantificação, e de diferenças de formação dos cabos condutores, também de n ; há que notar que a gama de variação de Δ_R é da ordem de 4 %; J_c é função acentuadamente decrescente de S e crescente de n .

Impondo um limite D_m , o mesmo afeta significativamente a sub-otimização para valores elevados de S . Nomeadamente, para valores elevados de S e n fixo, ocorre, aproximadamente, uma saturação de P_c , ao aumentar S , e a influência relativa de n em P_c torna-se moderada. Nesta região “saturada”, o eventual aumento de seção de condutores, para n fixo, tem influência importante em J_c , e, portanto, nas perdas na linha; todavia, o efeito de S em P_c , e, portanto, na capacidade de transmissão, pelo menos para linhas longas, torna-se moderado e de pouca eficácia, quanto a este aspecto.

Na Figura 20 representa-se, em função de U_c , a ordem de grandeza da gama de potência característica, P_c , que se afigura factível obter, com LNC trifásicas, e sem o uso de feixes de grandes dimensões, nem com soluções construtivas mecânicas muito diferentes das usuais.

Salienta-se que a potência característica em causa, para transmissão a muito longa distância, por exemplo da Amazônia para a Região Sudeste do Brasil, corresponde, aproximadamente, à capacidade de transmissão de um tronco, sem necessidade de meios adicionais de compensação de potência reativa, nem de subestações intermediárias, e podendo ser energizado a partir de uma das extremidades, por um único disjuntor, sem originar sobretensões muito elevadas.

3. - CONCLUSÕES

Com o uso adequado de LNC, é possível obter linhas com capacidade de transmissão muito superior à das linhas tradicionais, para iguais níveis de tensão, e satisfazendo a requisitos de comportamento físico e de custo de investimento e de operação muito mais favoráveis. Apresentou-se os resultados de uma análise paramétrica de linhas de transmissão não convencionais de 500 e 750 kV. Esses resultados:

- Evidenciam alguns dos condicionamentos dominantes de otimização
- Fornecem indicações aproximadas quanto a gamas plausíveis de parâmetros construtivos.

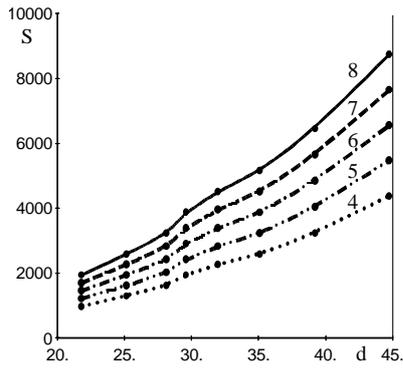


FIGURA 2 - Seção da fase, S [mm²] x diâmetro de cada subcondutor, d [mm] .

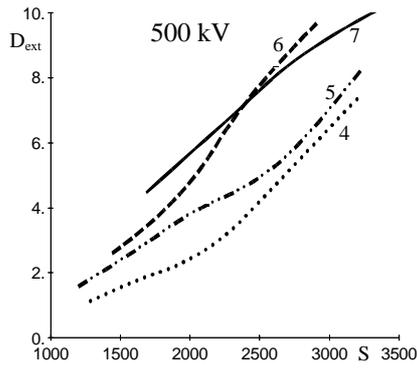


FIGURA 3 - Distância máxima, D_{ext} [m] x seção da fase, S [mm²] .

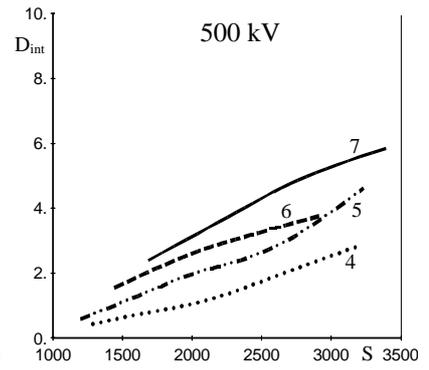


FIGURA 4 - Distância máxima, D_{int} [m] x seção da fase, S [mm²] .

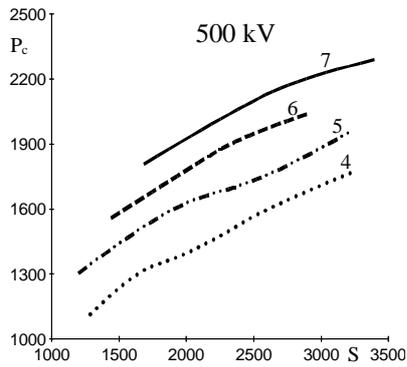


FIGURA 5 - Potência característica, P_c [MW] x seção da fase, S [mm²] .

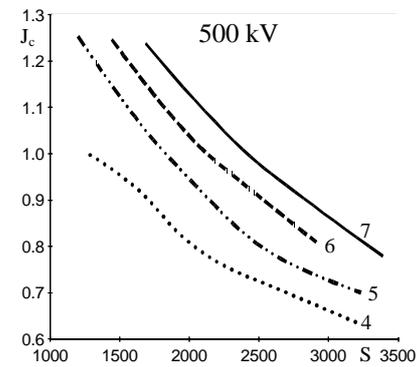


FIGURA 6 - Densidade de corrente, J_c [A/mm²] x seção da fase, S [mm²] .

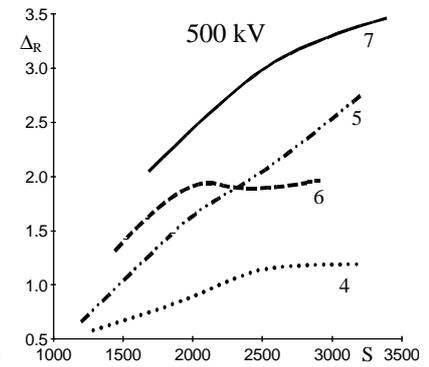


FIGURA 7 - Desvio de resistência, Δ_R [%] x seção da fase, S [mm²] .

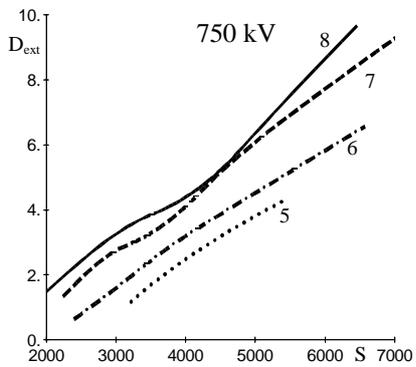


FIGURA 8 - Distância máxima, D_{ext} [m] x seção da fase, S [mm²] .

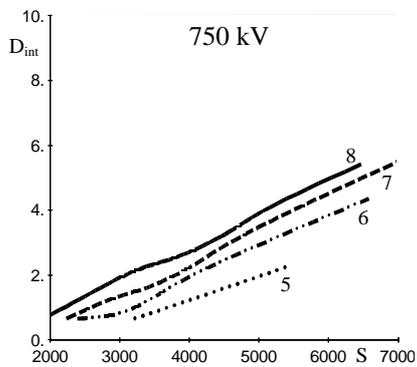


FIGURA 9 - Distância máxima, D_{int} [m] x seção da fase, S [mm²] .

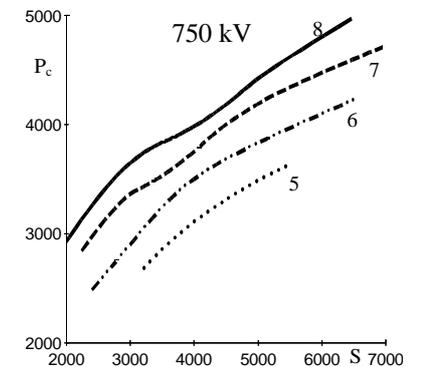


FIGURA 10 - Potência característica, P_c [MW] x seção da fase, S [mm²] .

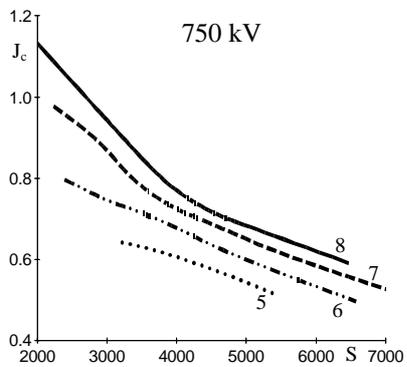


FIGURA 11 - Densidade de corrente, J_c [A/mm²] x seção da fase, S [mm²] .

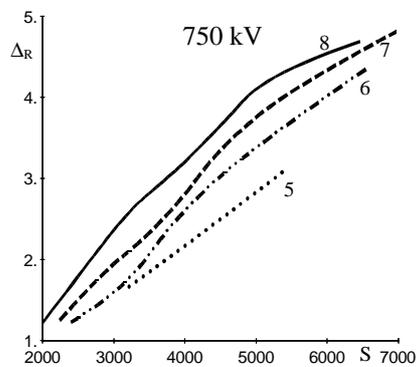


FIGURA 12 - Desvio de resistência, Δ_R [%] x seção da fase, S [mm²] .

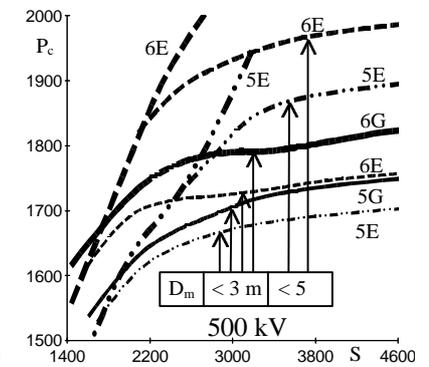


FIGURA 13 - P_c [MW] x S [mm²] , com restrição de D_m .

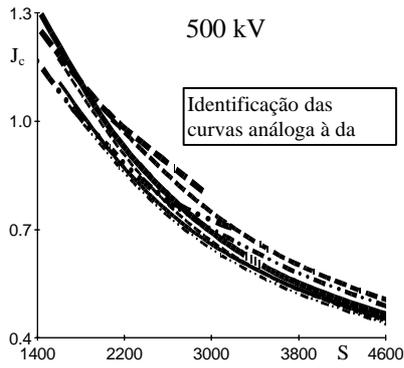


FIGURA 14 - J_c [A/mm²] x S [mm²], com restrição de D_m .

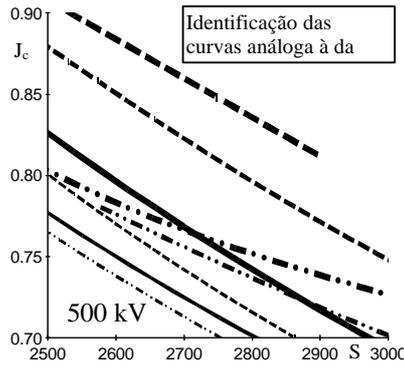


FIGURA 15 - Ampliação da Figura 14 : J_c [A/mm²] x S [mm²].

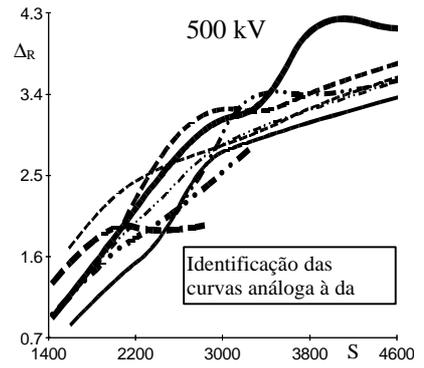


FIGURA 16 - Δ_R [%] x S [mm²], com restrição de D_m .

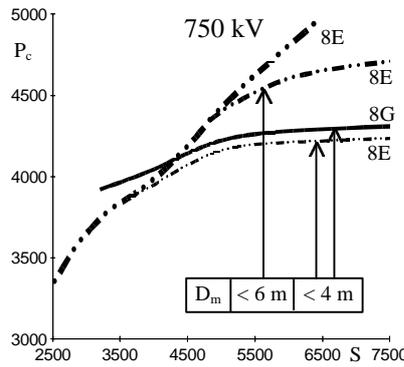


FIGURA 17 - P_c [MW] x S [mm²], com restrição de D_m .

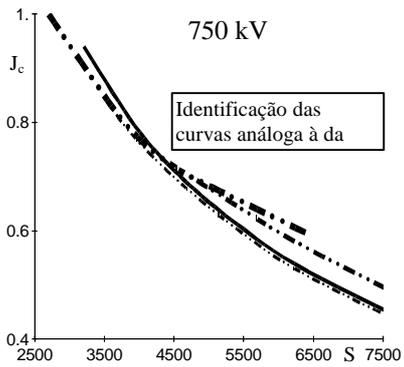


FIGURA 18 - J_c [A/mm²] x S [mm²], com restrição de D_m .

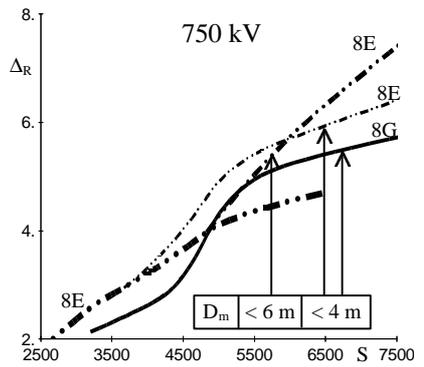


FIGURA 19 - Δ_R [%] x S [mm²], com restrição de D_m .

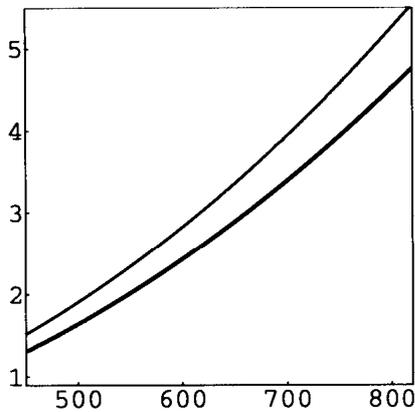


FIGURA 20 - Gama de P_c [GW] x U_c [kV]

- Fornecem indicações básicas quanto à relação entre parâmetros construtivos das LNC, os parâmetros operacionais e os parâmetros dominantes na avaliação técnico-econômica de alternativas e na otimização de troncos de transmissão.