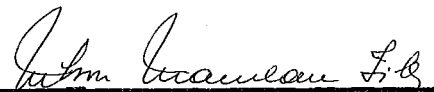


" LOCAÇÃO ÓTIMA DE TORRES DE  
TRASSMISSÃO UTILIZANDO TEORIA DE GRAFOS"

JOÃO NEIVA DE FIGUEIREDO

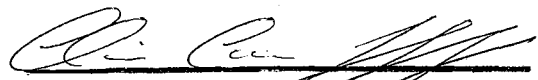
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRA  
MAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PA  
RA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:

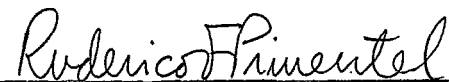


Nelson Maculan Filho

(Presidente)



Clovis Caesar Gonzaga



Ruderico Ferraz Pimentel

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 1978

FIGUEIREDO, JOÃO NEIVA DE

Localção Ótima de Torres de Transmiss  
missão (Rio de Janeiro) 1978.

VI, 110p. 29,7 cm (COPPE-UFRJ,  
M.Sc, Engenharia de Sistemas, 1978)

Tese - Univ. Fed. Rio de Janeiro.  
Fac. Engenharia

1. Otimização            I. COPPE/UFRJ  
II. Título (Série).

Para a Celinha,  
e o pessoal do Chalé

Beto

Lígia

Zé

Tonico

Iuki

Betina

... que dividiram comigo os tempos do LTT.

A G R A D E C I M E N T O S

Desejo agradecer ao professor Nelson Maculan Filho, não somente pela orientação, mas principalmente pela amizade com que acompanhou meu trabalho.

Ao professor Clóvis Caesar Gonzaga e ao companheiro Carlos Roberto Guzzo da Cruz pelas sugestões apresentadas e pelo apoio nunca recusado.

Ao eficientes analistas Lúcio Waterkemper e Moira E.F. Rech pela colaboração na elaboração do Sistema Computacional.

Ao Eng<sup>o</sup> Jarbas Goulart cujo conhecimento sobre Linhas de Transmissão se revelou valiosíssimo no período de desenvolvimento e testes do Sistema.

A Neusa Stiipp Sachetti pela imensa paciência e boa vontade na datilografia.

Em especial, gostaria de agradecer ao Eng<sup>o</sup> Mário A.F. Baptista, a quem devo o tema da pesquisa e a oportunidade de desenvolver este trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é estudado o problema da locação de torres de transmissão num perfil previamente determinado. O problema é equacionado através de um modelo, utilizando teoria de busca em grafos, no qual são apresentados os conceitos de configuração e estado de uma configuração, além de serem de finidos os nós, os ramos e o operador sucessor. O algoritmo A\* é proposto para a determinação do caminho de custo mínimo, sen do sugeridos critérios de poda e artifícios heurísticos para a celerar a convergência. É desenvolvido um sistema computacional onde o algoritmo proposto é implementado, sendo apresentados alguns resultados obtidos.

ABSTRACT

The problem of Tower Spotting on a known terrain is focused. The problem is equationed through a graph search theory model, in which the concepts of configuration and state of a configuration are presented. The nodes, arcs and an operator for generating the nodes successors are defined. The **A\*** algorithm is proposed in order to determine the minimum cost path. Heuristic and Elimination techniques are suggested to accelerate convergence. A computational system is developed in which the proposed method is implemented. Some practical results are presented.

Í N D I C E

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	1
Seção 1 - Situação do Problema .....	2
Seção 2 - Objetivo e Restrições .....	5
Seção 3 - Modelagens Possíveis .....	6
Seção 4 - O Sistema Mecanizado .....	9
CAPÍTULO II - MODELAGEM .....	11
Seção 1 - Conceituação Física .....	12
Seção 2 - O Modelo .....	18
CAPÍTULO III - EXPANSÃO .....	20
Seção 1 - Generalidades .....	21
Seção 2 - Restrições do Perfil - tratamento .....	24
Seção 3 - Restrições Mecânicas - tratamento .....	32
Seção 4 - O Método de Expansão .....	46
Seção 5 - Critérios de poda no Operador Sucessor .....	51
CAPÍTULO IV - OTIMIZAÇÃO .....	53
Seção 1 - O Grafo .....	54
Seção 2 - O Algoritmo .....	56
Seção 3 - Regras de Eliminação .....	58
Seção 4 - Heurística .....	59

CAPÍTULO V - IMPLANTAÇÃO .....	61
Seção 1 - Crítica .....	62
Seção 2 - Perfil .....	67
Seção 3 - Otimização .....	72
Seção 4 - Emissão de Relatórios .....	77
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES .....	78
APENDICE .....	79
Seção 1 - Documentos de entrada para o Sistema Mecanizado.	79
Seção 2 - Processamento de um caso Exemplo .....	92
REFERÊNCIAS .....	110



CAPÍTULO IINTRODUÇÃO

O problema de locação de torres ocorre na fase de projeto de uma linha de transmissão.

Neste capítulo inicial o problema será situado e serão descritos os objetivos e as restrições além de ser resumidamente a apresentado o sistema mecanizado.

## SEÇÃO 1 - SITUAÇÃO DO PROBLEMA

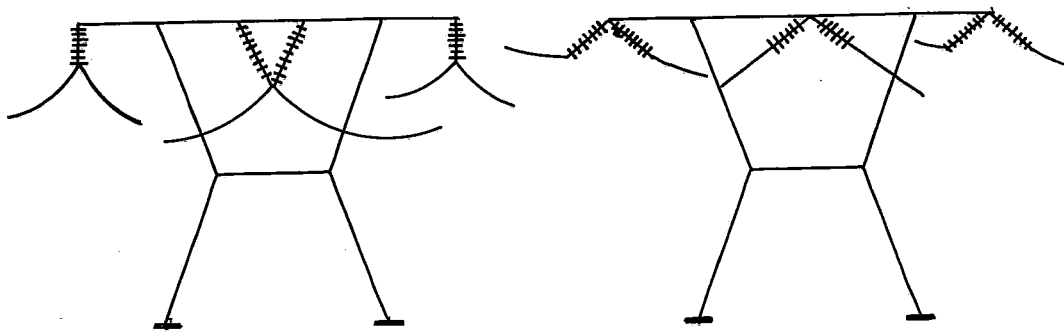
Há diversas etapas num projeto de linhas de transmissão.

- Determinação das características eletromecânicas da linha.
- Especificação e projeto dos tipos de estrutura a serem utilizados.
- Escolha do traçado.
- Locação das torres.

As características eletromecânicas da linha são definidas em nível de ante-projeto onde se escolhem os cabos condutores e pára-raios, número de isoladores nas cadeias e dimensões básicas dos suportes.

Numa segunda etapa é feito o detalhamento dos suportes atendendo não só às características eletro-mecânicas do ante-projeto como também equacionando todo carregamento mecânico a que estarão submetidos.

Nesta fase são determinados os tipos básicos das estruturas, que deverão ser de suspensão (utilizados com maior frequência) e de ancoragem (utilizados em ângulos fortes, nas chegadas em subestações ou em outros casos especiais).



Torre de Suspensão

Torre de Ancoragem

Figura 1

Conhecidos os dois pontos extremos, a escolha do traço do tem caráter basicamente econômico levando em conta o custo social e financeiro das desapropriações.

Pode-se verificar uma interdependência nestas fases do projeto, ou seja, a determinação das características elétricas bem como a topografia do traçado influirão decisivamente no projeto final dos tipos de estruturas a serem utilizadas, e consecutivamente, na locação.

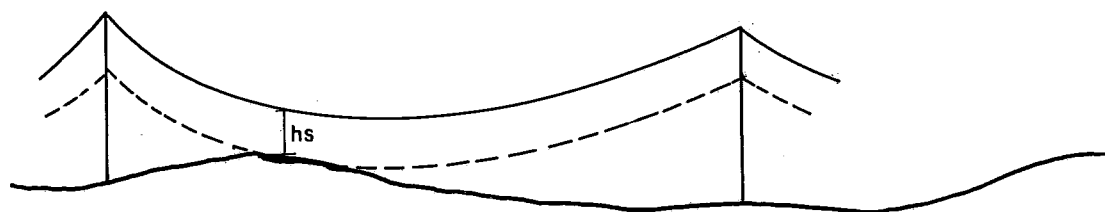
Atualmente a locação é feita manualmente por projetis-tas experientes ou então com alternância entre o projeto manual e o computador. Mesmo utilizando o computador não há até hoje garantia de se chegar ao resultado mais econômico.

Na locação de torres é conhecido o traçado da linha e as características completas da primeira torre do trajeto, além dos tipos e alturas das estruturas previstas. Procura-se locar a linha com o menor custo possível por quilometro - uma minimização de despesas. Deve-se locar cada torre de maneira a obter seu aproveitamento máximo. Para isto é necessário que cada torre esteja submetida a esforços iguais ou pouco menores (muito próximos) que os esforços

limites permitidos para o respectivo tipo, e mais, que a altura de cada torre seja altura ótima para o ponto onde ela está locada.

O cabo de linha de transmissão é suspenso entre duas torres tomando o formato de uma catenária.

Há uma distância de segurança mínima entre esta catenária e o solo, distância esta que varia com a tensão da linha e com obstáculos atravessados por ela.



hs - ALTURA DE SEGURANÇA

Figura 2 - Catenária.

Os esforços mecânicos que atuam em cada torre são três: vertical (peso dos cabos), longitudinal (tração dos cabos) e transversal (ação lateral do vento e existência ou não de deflexão na linha).

## Seção 2 - OBJETIVO E RESTRIÇÕES

O problema da locação existe entre dois pontos dos quais no primeiro temos uma torre de altura e tipo conhecidos.

O objetivo é minimizar o custo total da linha. Eventualmente o próprio custo de processamento pode ser incluído no custo total, de tal maneira que para trajetos longos haja um critério de interrupção do processamento.

Devem ser consideradas duas classes de restrições, inter-relacionadas, na busca da solução ótima.

### 1 - Restrições topográficas

- Perfil do terreno
- Pontos de locação obrigatória
- Trechos de locação proibida
- Alturas das torres

### 2 - Restrições mecânicas.

### Seção 3 - MODELAGENS POSSÍVEIS

Para minimizar o custo da linha de transmissão, devemos considerar dois aspectos: O primeiro se refere ao ajuste da catenária de segurança ao solo e é um problema relativo a cada vão. O segundo se refere à otimização global (minimização do custo total da linha) implicando em uma abordagem mais geral e utilizando técnicas de otimização.

A catenária de segurança em cada vão, sempre que possível, deve ser tangente ao perfil do terreno e quanto melhor for o ajuste, melhor será o aproveitamento das torres respectivas.

Na otimização da linha de transmissão como um todo, foram consideradas as metodologias:

- Modelagem analítica, interrelacionando as variáveis distância e desnível entre torres consecutivas, bem como a altura de cada torre. Após este equacionamento, poder-se-ia partir para técnicas de programação não linear ou linearização por partes para a locação de custo mínimo.

Esta modelagem foi abandonada devido à grande complexidade analítica das equações, inviabilizando o procedimento.

- Programação inteira onde em uma primeira fase seria determinada uma solução viável para depois alterar valores das variáveis percorrendo o politopo para encontrar a solução ótima. Este método foi descartado por ser muito grande o número de variáveis necessárias (tendendo a infinito), já que o nível combinatório dos problemas é muito alto.

- Programação dinâmica. Há na literatura uma aplicação de programação dinâmica a este tipo de problema (referência 1). São definidos estágios em diferentes pontos do perfil, e os diferentes estados de cada estágio são as possíveis alturas de torres. Não foi utilizada esta modelagem porque a determinação dos estágios por si só já elimina possibilidades de locação, não se atingindo assim o resultado ótimo.

- Pesquisa em trechos do traçado. Outro processo já sugerido para locar torres de transmissão num perfil topográfico é o de fazer uma pesquisa prévia num trecho pequeno logo após a última torre locada, e escolher a melhor opção de locação para a torre seguinte com base num exame exaustivo de todas as possibilidades de locação e altura para o trecho (referência. 2).

Não se atinge tampouco o resultado ótimo usando o modelo, pois este se baseia em otimização local e não global.

- Otimização em grafos. O problema pode ser representado por um grafo onde os nós são as torres e aos arcos são associados custos correspondentes (da torre (nó) anterior por exemplo). Nesta abordagem, haveria necessidade de determinar o custo associado a cada vão do intervalo. Devido ao grande número de nós e arcos que seriam resultantes da expansão, seria necessário utilizar técnicas de programação heurística que garantiriam se não o resultado ótimo, pelo menos um resultado bem próximo do ótimo (referências 3,4,5,6,7). Para trechos maiores de perfil, o número de nós a serem expandidos seria imenso, tornando impossível o uso deste método.

A modelagem utilizada une as duas últimas abordagens, a aproveitando suas características positivas. O trecho que segue a última torre locada é pesquisado e é retido um pequeno número de locações para a torre seguinte. Estas locações são as mais econômicas para o trecho, implicando nos melhores aproveitamentos para a torre anterior. Fica então determinado um grafo em forma de árvore com um número pequeno de nós sucessores a cada nó. São utilizados critérios de poda e técnicas de programação heurística para encontrar o caminho de custo mínimo nesta árvore, atingindo-se então a solução ótima.



#### Seção 4 - O SISTEMA MECANIZADO

O Sistema segue os princípios da Programação Estruturada e é composto fundamentalmente por quatro módulos:

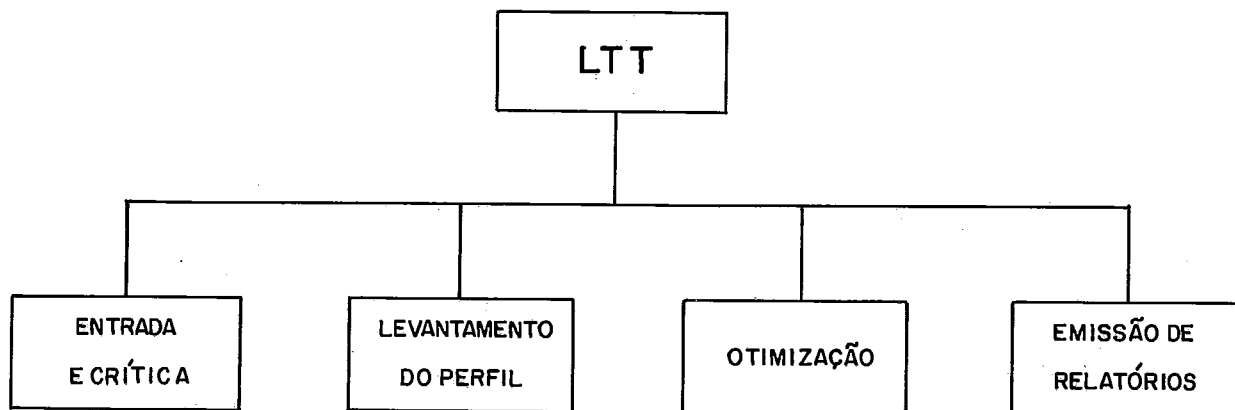


Figura 3 - Estrutura do Sistema

No primeiro módulo, os dados de entrada são lidos, ordenados e examinados para determinação de qualquer incoerência existente.

São feitos os testes:

- a) Validação- onde cada dado é verificado quanto à sua natureza alfabética ou numérica.
- b) Consistência- onde é verificada a ordem de grandeza de cada dado numérico.
- c) Interrelacionamento- onde os dados são verificados para evitar incoerências.

No levantamento do perfil, parte-se dos dados da caderneta de campo para a determinação das coordenadas dos pontos do perfil, bem como a determinação dos obstáculos existentes.

O módulo de otimização é o mais elaborado do Sistema e tem por objetivo minimizar o custo total da linha respeitando as restrições do traçado.

No último módulo, as informações resquisitadas são impresas em relatórios de saída.

Os recursos mínimos de hardware para implantação e operação do sistema são:

- Computador IBM/370
- Partição de memória de 384K
- Periféricos:
  - Leitoras de cartões perfurados
  - Unidade de disco 3330
  - Impressora com 133 caracteres por linha.

Os recursos de software necessários para implantação do Sistema são:

- Sistema Operacional OS/VS1
- Compilador COBOL-ANS
- Compilador FORTRAN - H
- Compilador PL/1

C A P Í T U L O    I IM O D E L A G E M

Neste capítulo é exposto formalmente o problema de locação de torres de transmissão num perfil previamente determinado. Inicialmente é feita uma descrição do problema, e em seguida apresenta-se a modelagem sugerida. São definidos os parâmetros que caracterizam uma linha locada, com a introdução dos conceitos de configuração e estado de uma configuração. Utiliza-se a teoria de grafos para a apresentação formal da modelagem, sendo definidos o nó, o operador sucessor e o cálculo de custos. São feitas considerações sobre a expansão num curto espaço e é comentada a otimização, ou seja, a determinação de uma série de Torres locadas num trecho conhecido que satisfaça a condições eletromecânicas preestabelecidas, a um custo mínimo.

## Seção 1 - CONCEITUAÇÃO FÍSICA

O projeto de uma linha de transmissão inclui o problema de selecionar e locar as torres de transmissão num traçado pré-determinado de tal maneira que o custo total das estruturas locadas seja mínimo. Em particular, o problema requer a determinação da posição no traçado, o tipo e a altura de cada torre, além do número de torres a serem utilizadas na linha.

O resultado deve ser compatível com restrições de altura de segurança, capacidade de carga mecânica para os tipos de torres disponíveis, alturas de torres existentes, posições pré-fixadas de torres e obstáculos encontrados no perfil topográfico.

Dado o perfil topográfico do traçado, é escolhido o conjunto de torres que correspondem à disposição mais econômica entre cada par de pontos de locação obrigatória, e assim sucessivamente. Existe um número imenso de opções a serem consideradas, uma vez que cada torre já situada pode ter a torre subsequente locada em um número grande de pontos, e existem média de duas a três torres por quilômetro numa linha.

1. Linha alternativa: Dã-se o nome de linha alternativa a uma disposição factível de torres locadas no trecho considerado, isto é uma disposição que satisfaça a todas as restrições eletromecânicas e topográficas do problema. Procura-se então determinar a linha alternativa de menor custo, dentre todas as possibilidades existentes.

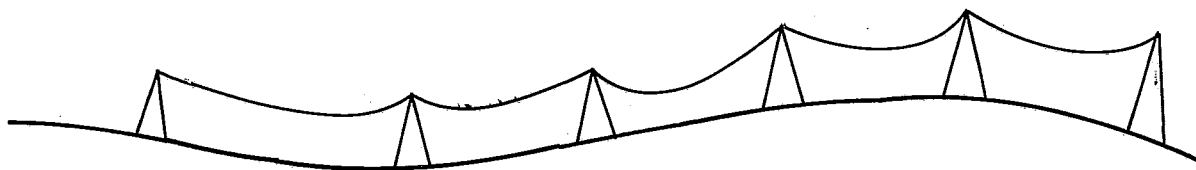


Figura-4 Linha Alternativa

2. Tipos de Torres: Na locação de uma linha de transmissão é utilizado um número limitado de tipos de torre (geralmente inferior a 10), especificados em termos de anteprojeto para suportarem diferentes níveis de esforços mecânicos.

As grandezas que limitam o uso de determinado tipo de torre constam de sua carta de aplicação, e podem ser:

- ângulo máximo de deflexão.
- Vão médio máximo (Esforço transversal)
- Vãos gravantes máximo e mínimo  
(limites para o esforço vertical).
- Balanço máximo das cadeias em I.
- Esforço mínimo nas cadeias em V.
- cargas de ruptura das cadeias I e V.
- Fatores de segurança.

Para a determinação do tipo de uma torre, é necessário que se conheça a locação e a altura do condutor ao solo nas duas torres adjacentes a ela.

Existem dois grupos de tipos de torres:

Torres de suspensão utilizadas puramente para sustentação e torres de amarração (para suportar esforços maiores) utilizadas pa-

ra a ancoragem de cabo condutor. Para definir o tipo de uma torre, é necessário que se conheça altura e locação das duas torres adjacentes.

3. O cabo condutor: O cabo suspenso entre duas torres toma o formato de uma catenária cuja distância ao solo deve ser em todos os pontos maior ou igual a uma distância de segurança estabelecida. Esta catenária é definida com o conhecimento da altura do condutor ao solo em duas torres consecutivas, além das constantes mecânicas: peso por metro do cabo e tração longitudinal no trecho, determinadas em nível de anteprojeto.

4. Alturas de Torres: Cada tipo de torre tem um conjunto de alturas passíveis de serem utilizadas já que a catenária é conhecida a priori (com a determinação do peso por metro do cabo e tração longitudinal), o seu ajuste ao terreno é função apenas da posição e altura das torres consecutivas, além da altura de segurança. Chama-se catenária de segurança à catenária decrescida da altura de segurança. No presente trabalho, quando for feita referência à altura de uma torre, entenda-se altura do condutor mais baixo ao solo.

5. Configuração : Chama-se configuração a uma parte de uma linha alternativa, isto é, a uma série de torres locadas até algum ponto do traçado. Para ser descrita uma configuração é necessário que se conheça altura e posição da última torre locada, além de tipo, altura e posição de todas as anteriores (desde o início do trecho).

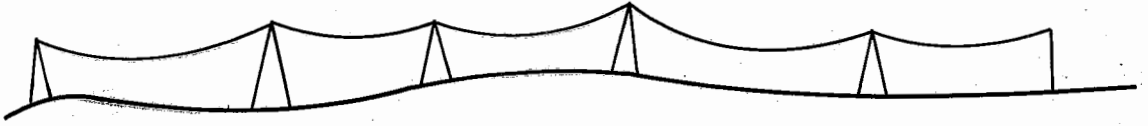


Figura - 5 - Configuração

6. Estado de uma Configuração: Para se determinar a locação de uma torre subsequente, basta ser descrita a configuração em termos das duas últimas torres locadas. As informações necessárias formam o estado da configuração. Quando a locação da última torre é especificada, fica conhecido o tipo da torre imediatamente anterior. o estado da configuração é composto pela altura e locação da última torre locada, além da locação, altura e tipo da penúltima torre. É fundamental lembrar que para se determinar o tipo de uma torre é necessário conhecer as características das duas torres adjacentes.

7. Grafo Um conjunto de configurações factíveis pode ser modelado como um grafo, já que a primeira torre do trecho é comum a todas as configurações, as diferentes locações para a segunda torre são pertinentes às diversas configurações a assim sucessivamente.

8. Nós O nó  $n_1$  é definido como sendo um par de torres locadas onde a primeira torre tem tipo e altura determinados (torre A) e a segunda tem somente a altura definida (torre B). Ao nó estão

associadas duas torres, das quais apenas uma tem seu tipo e conseqüentemente custo definidos. O conjunto de nós é finito e enumerável sendo função do tamanho do trecho da linha que se quer locar e do número de sucessores a cada nó.



Figura - 6 O Nó

9. Ramos - A cada ramo é associado o custo de uma torre, que é a última torre locada, torre B do nó de partida do ramo, ou seja, o custo da torre de tipo conhecido (torre A), no nó de chegada. O ramo  $(n_i, n_j)$  tem um custo associado  $c(n_i, n_j)$  que é o custo da primeira torre do nó  $n_j$ . A cada nó é associado o custo total acumulado somado a uma estimativa.

10. Sucessores - Dado um nó  $n_i$ , o conjunto de nós ligados a  $n_i$  por ramos saindo de  $n_i$  é o conjunto de sucessores de  $n_i$ , definidos pelo operador sucessor.  $\Gamma(n_i)$ . A torre B de um nó, quando tem seu tipo determinado, é a torre A do nó sucessor.

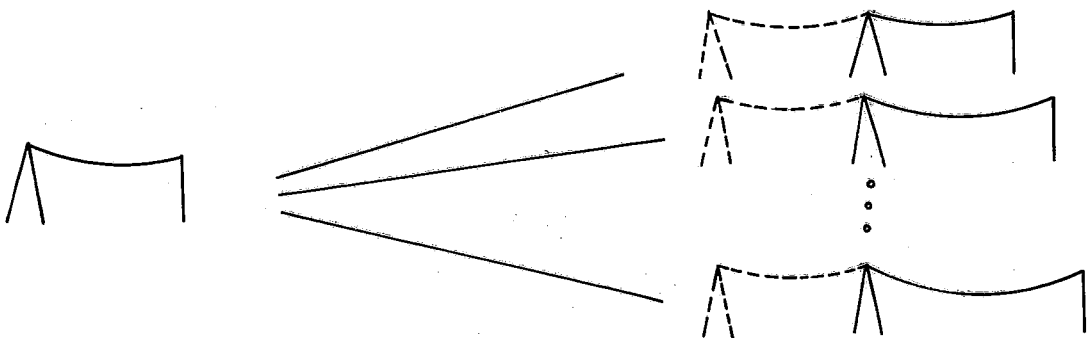


Figura - 7 Sucessores de um nó



11. O Operador Sucessor - O operador sucessor define o conjunto de nós sucessores a  $n_i$ . É escolhido o conjunto de torres locadas a partir da última de locação conhecida Torre  $B_i$ , que apresentam a maior economia, satisfeitas as restrições topográficas do traçado. É utilizado um critério de investigação do perfil no trecho à frente, fazendo-se uma expansão das possibilidades de locação, e retendo-se as  $q$  melhores opções. São  $q$  torres B dos  $q$  nós sucessores de  $n_i$ , já com  $q$  tipos diferentes para as torres A dos referidos nós.

## Seção 2 - O MODELO

A expansão de um nó para determinar seus sucessores é feita de maneira tal que se leva em conta a variação de cotas do perfil no trecho imediatamente adiante da torre B do nó que se deseja expandir. Isto porque se o perfil é muito acidentado, há necessidade de testar um maior número de possibilidades de locação no trecho, acontecendo o inverso se o perfil for pouco acidentado. O algoritmo utilizado na otimização é o A\* com critérios heurísticos e critérios de poda para evitar que o tempo de processamento seja proibitivo com o crescimento exagerado do grafo.

12. Sensibilidade do Perfil - A partir de cada ponto levantado do perfil, é calculado o desvio padrão das cotas por um trecho de dois quilômetros. Este cálculo permite a obtenção de uma medida na variação topográfica existente no trecho considerado. É uma medida de sensibilidade para o perfil.

13. Traçado da Catenária e locação - A catenária usada tem sua equação definida, a menos das constantes de translação. Sendo assim, dois pontos a definição. Procura-se adaptá-la ao terreno da melhor forma possível, passando pela torre que a sustenta e tangenciando o perfil do traçado. Em seguida é feita a locação da próxima torre em cada um dos pontos possíveis, respeitando as restrições de perfil e de alturas disponíveis.

14. A Expansão - O processo referenciado acima é descrito com detalhe no capítulo III e constitui a base da expansão. É feita uma otimização local, num determinado trecho adiante da torre B do nó que está sendo expandido, e são escolhidas as melhores locações para a próxima torre buscando as opções de menor custo médio por quilômetro para o trecho. Ficam determinados os sucessores do nó. O trecho em que é feita a otimização local tem tamanho variável, função da variação topográfica no perfil. Quanto mais acidentado o perfil, menor o trecho pois a pesquisa é exaustiva e vice-versa. É feita esta verificação à frente num trecho razoável do perfil para haver uma previsão de acidentes topográficos que possam prejudicar a locação.

15. Otimização - É feita a busca do caminho de custo mínimo através da árvore formada, utilizando o algoritmo A\* para cada trecho entre pontos consecutivos de locação obrigatória.

São utilizados critérios de poda e artifícios heurísticos a serem descritos posteriormente para reduzir o tempo de processamento. É opcional o uso de otimização adaptativa com soluções parciais, usadas como heurísticas que aceleram a convergência. Neste caso o critério de parada pode ser vinculado ao tempo de processamento.

## C A P Í T U L O II

A E X P A N S Ã O

Neste capítulo é exposto o método de expansão dos nós com detalhes. Primeiramente é feita uma descrição geral da expansão. Em seguida são comentados os métodos de tratamento das restrições do perfil, e das restrições mecânicas. São expostos os critérios heurísticos e os critérios de poda, com o desenvolvimento de uma função heurística. Finalmente é feita uma apreciação geral da expansão.

## Seção 1. G E N E R A L I D A D E S

Para determinação dos nós sucessores, são examinados, a partir de cada torre já locada, possíveis pontos de locação através de uma pesquisa prévia no traçado. Dependendo das condições do perfil, esta pesquisa abrange locações para um intervalo correspondente a 3,4,5 ou até mais torres. Por motivos de economia no processamento, a pesquisa não é exaustiva. São retidas as torres que apresentam melhor aproveitamento global para o intervalo, usando o critério de menor custo médio por km. Este critério permite uma correta estimativa do nível de utilização de cada tipo de torre para determinado ponto. Em suma, cada torre locada gera um determinado número de torres locadas em seguida, das quais uma certamente será a de melhor locação.

1. O NÓ que se quer expandir é representação de duas torres: (A-de tipo e locação determinada e B- apenas com locação conhecida). O objetivo da expansão é determinar os sucessores deste nó, ou seja, determinar o(s) tipo(s) mais econômicos da torre B do nó gerador bem como a posição da torre subsequente. Quando isto é realizado, são determinados os nós sucessores, nos quais a torre A é a torre B do nó anterior, já com seu tipo definido e a torre B é a torre subsequente com apenas a locação definida. O nó representa o estado da configuração associada, tem um apontador e um custo a ele associados. Este custo é o custo total da configuração incluindo a torre A do nó.

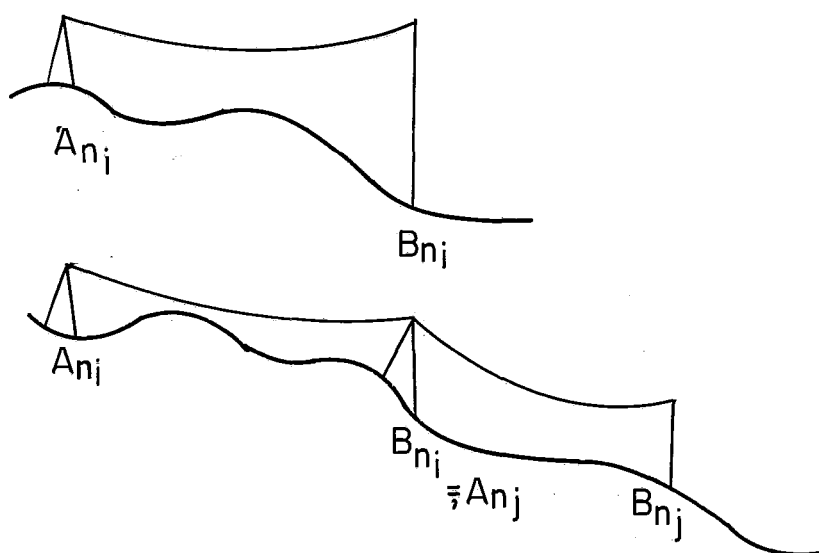


Figura 8 - O nó e um sucessor

2. As Restrições que atuam na escolha dos sucessores são de natureza topográfica (acidentabilidade do terreno) e mecânica (esforços que atuam nas torres). Para contornar restrições topográficas, conta-se basicamente com as diferentes alturas de torres, e excepcionalmente com os diversos tipos. Para contornar restrições mecânicas são testadas variações tanto no tipo quanto na altura da torre em questão.

Assim cada vez que a catenária é lançada, para cada torre locada é determinado o melhor tipo para a torre anterior, e assim sucessivamente até um determinado horizonte de pesquisa que é função do grau de variação do perfil e do número de alturas disponíveis. Atendido este horizonte, as diversas opções de tipos para a torre B são comparadas, e são retidas as mais econômicas, uma vez que as restrições já estão satisfeitas por um trecho razoável à frente da torre B. Isto impede que o terreno venha a proporcionar "surpresas" uma vez que o trecho à frente também é levado em conta.

O critério de escolha é a determinação do conjunto de torres de menor custo médio por km a partir da torre B e até o fim do horizonte de pesquisa para a expansão considerada.

A seguir serão descritos com detalhe os processos de lançamento de catenária, locação, determinação do tipo, e consequentemente custo de cada torre, determinação do horizonte de pesquisa e critérios de poda.

## Seção 2 : RESTRIÇÕES DO PERFIL - TRATAMENTO

3. O Perfil topográfico é levantado "in loco" por meio de uma caderneta de campo), que nada mais é que o resultado das medições no campo feitas com auxílio do teodolito. São medidas basicamente distâncias horizontais e desníveis entre pontos consecutivos do traçado da linha além de serem anotados os obstáculos naturais e artificiais que ocorrerem. Quando se efetua a locação das torres de uma linha pela primeira vez deve ser fornecida a caderneta de campo do traçado, que permite a expressão ao perfil em coordenadas cartesianas ( x e y ).

São calculados e retidos para a locação

- x<sub>i</sub> - distância progressiva do ponto i.
- Y<sub>i</sub> - cota central do ponto i.
- Y<sub>hi</sub> - cota mais alta dentre o ponto central, o à direita e o à esquerda correspondentes às três fases da linha)
- de<sub>i</sub> - maior desnível lateral em i entre o ponto central e cada um dos laterais referidos acima.
- T<sub>i</sub> desvio padrão da cota central por dois quilômetros à frente do ponto i.

$$T_i = \frac{\sum_{j=i}^{i+n} (Y_j - \bar{Y})^2}{n - 1}$$

$$j=i, i+n$$

onde n é o número (1)  
de pontos em 2 km;

- códigos de terreno fundação, etc.



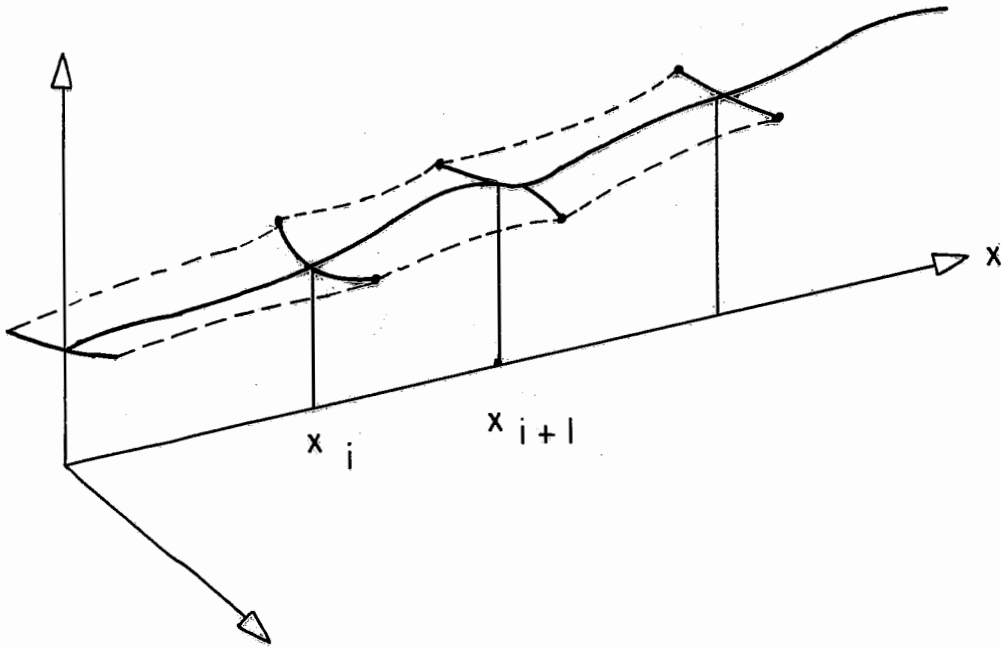


Figura 9 - O perfil Levantado

4. Vão Médio ( $V_{mk}$ ) de uma torre é a semisoma dos dois vão adjacentes.

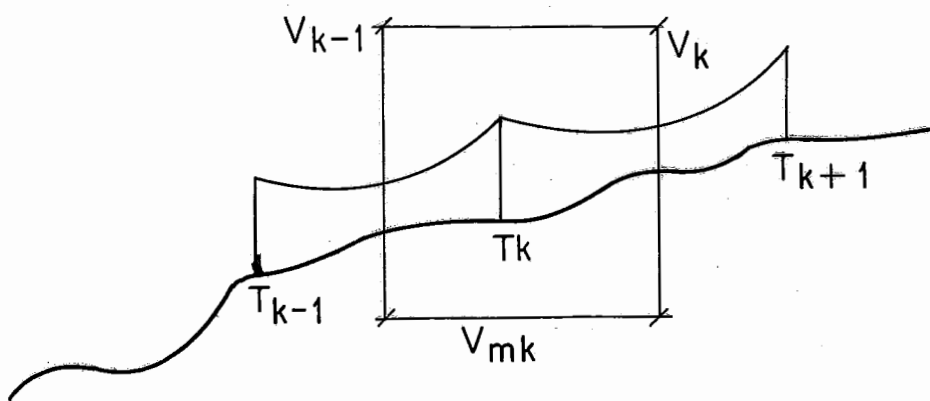


Figura 10 - Vão Médio

$$V_{mk} = \frac{V_{k-1} + V_k}{2}$$

5. Vão Gravante (VG<sub>k</sub>)

(2)

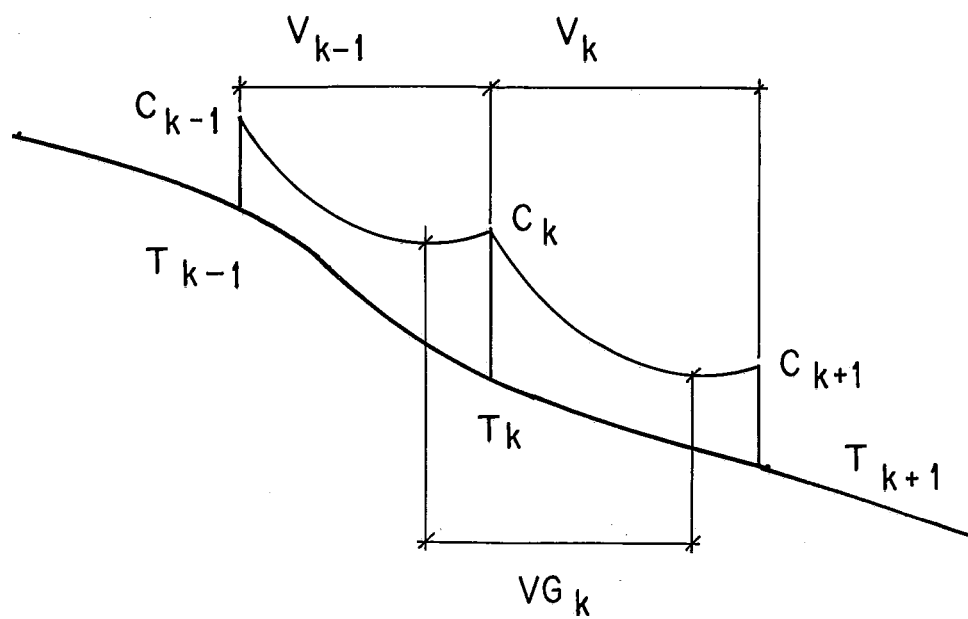


Figura 11 - Vão gravante

$$VG_i = Vm_i + \frac{T_r}{W_c} \frac{C_k - C_{k+1}}{V_k} + \frac{C_k - C_{k-1}}{V_k - 1}$$

onde  $VG_k$  - vão gravante da torre  $T_k$

$C_k$  - cota do condutor na torre  $T_k$ .

$Vm_k$  - Vão médio da torre  $T_k$

$T_r$  - Tração longitudinal no cabo

$W_c$  - peso do cabo condutor.

6. A Catenária é traçada de cada torre de tal maneira que seu ajuste ao terreno seja o mais perfeito possível. A curva que o cabo toma quando suspenso é de uma catenária de formato constante, uma vez que a tração longitudinal é fixa entre duas torres de ancoragem, independente do número de torres de suspensão que existam entre elas, e o peso por metro do cabo é igualmente constante. Em nível de anteprojeto, é determinada uma tração longitudinal aproximada em todos os trechos ancorados da linha. A equação da catenária utiliza esta tração prefixada, além do peso do cabo como constantes.

Para o traçado da catenária que melhor se ajusta ao perfil são determinadas as posições dos eixos de simetria das curvas que passam pela torre e por pontos distintos do perfil. Dado o fato de que a parábola é uma aproximação satisfatória da catenária (exceto para vãos de dimensões extraordinárias), para simplicidade de cálculo foram usadas as equações da parábola. A curva (parábola) cujo eixo de simetria estiver à menor distância do ponto de locação da torre anterior é a parábola que tangencia o perfil.

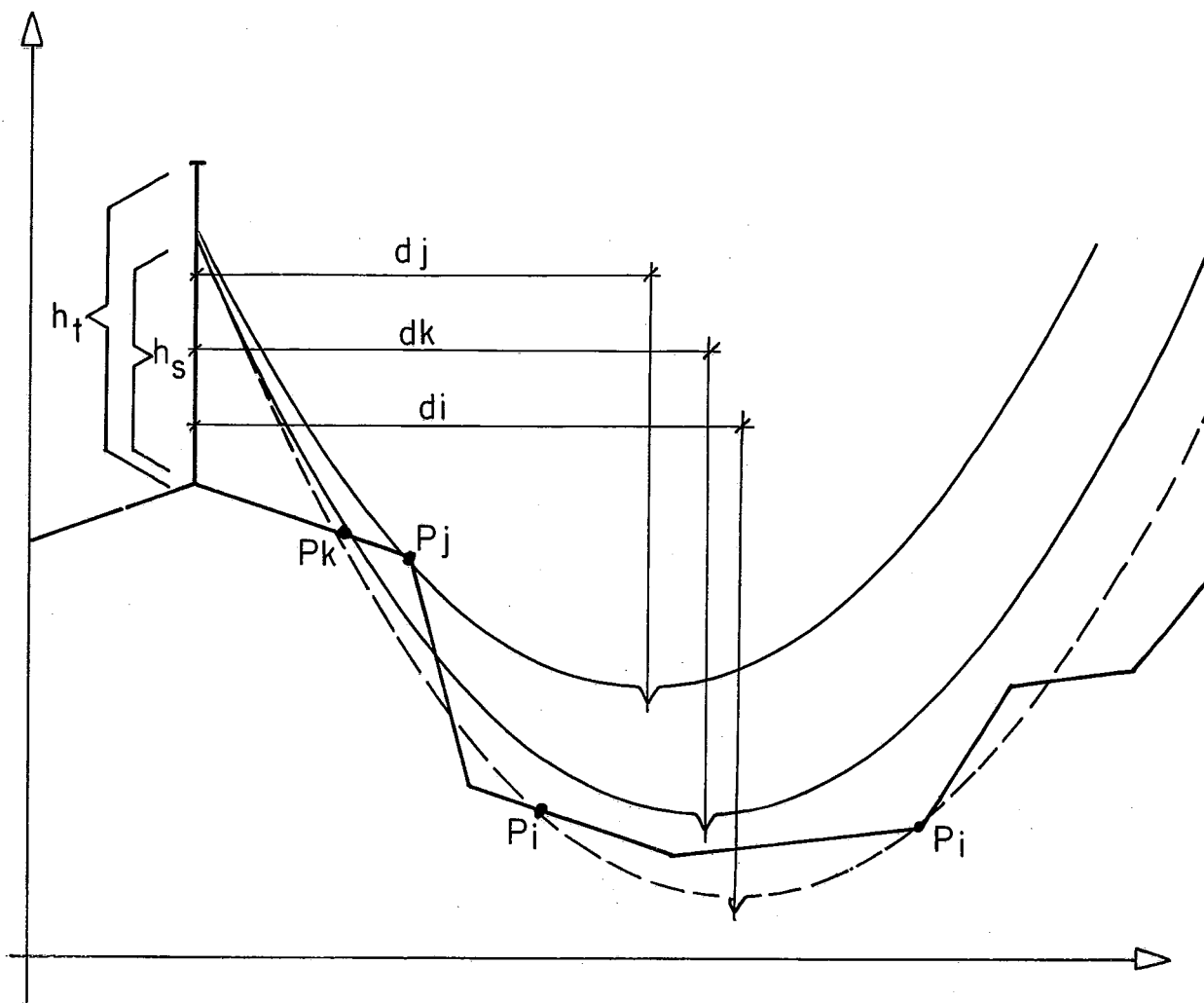


Figura - 12 Traçado da Catenária

Com os parâmetros:

$h_s$  - altura da catenária de segurança na torre.

$h_t$  - abcissa do ponto onde está locada a torre.

$y_t$  - ordenada do ponto onde está locada a torre.

$d_i$  - distância entre a torre locada e o eixo de simetria da parábola que corta o perfil no ponto  $p_i$ .

$W_c$  - peso do cabo condutor.

$T_r$  - tração longitudinal.

São "traçadas" a partir da torre diversas catenárias de segurança que passam pelos pontos dados da representação do perfil. Suponhamos um ponto  $P_i$  de abcissa  $X_i$  e ordenada  $Y_i$ .

Da equação de vão gravante, temos

$$d_i = \frac{x_i - x_t}{2} + \frac{T_r}{W_C} \frac{y_t + h_s - Y_i}{(X_i - X_t)} \quad (4)$$

São então determinados os diversos valores de  $d_i$  para pontos dados do perfil sendo separados os menores valores. Se o menor e o segundo menor valor forem pontos consecutivos do perfil, são verificados os pontos intermediários para determinar a parábola cujo eixo de simetria está mais próximo da última torre locada.

7. A Locação das Torres: As possíveis alturas de torres são dados de entrada do programa. Para cada possível altura de torre é traçada uma catenária partindo do ponto de ordenada  $h_t - h_{pt}$  onde  $h_{pt}$  é a altura da próxima torre. O ponto onde esta catenária cruza o perfil de terreno será o ponto de locação da próxima torre (para aquela altura).

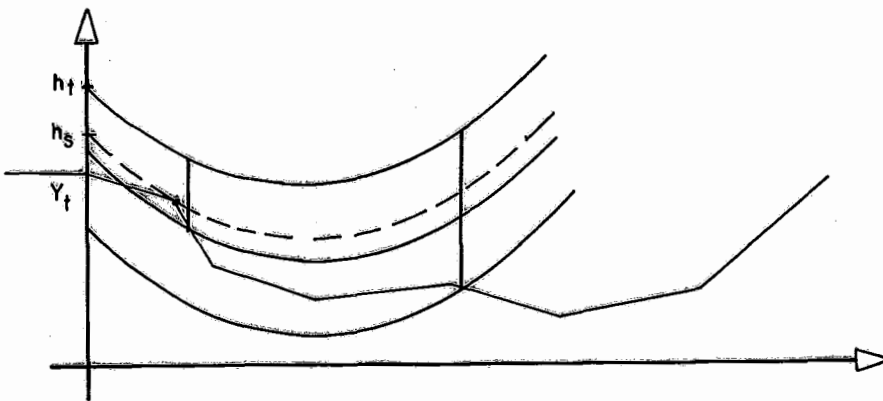


Figura 13 - Locação das torres

A equação da parábola é:

$$Y_t = \frac{W_c}{2T_r} ((X_i - X_t)^2 - 2 d_{\min} (X_i - X_t)) + Y_t + h_t - h_{pt} \quad (5)$$

onde:

$h_{pt}$  - altura da torre seguinte

$d_{\min}$  - distância entre o eixo de simetria da parábola

e a torre já locada.

A partir de um ponto afastado da primeira torre é feita a diferença  $Y_{ti} - Y_i$  regressivamente até que ela seja positiva. É então feita uma interpolação entre este ponto e o anterior para encontrar o ponto de cruzamento da parábola com o perfil. Pode ser que o terreno seja ondulado e haja mais de um ponto onde uma torre de determinada altura possa ser locada. Para verificar todas as possibilidades deve-se continuar a pesquisa e cada vez que a grandeza  $Y_{ti}$  mudar de sinal é feita uma interpolação para encontrar o ponto.

8. A Interpolação feita é uma interpolação quadrática em que é determinado o exato ponto de cruzamento da parábola com o perfil representado.

9. Obstáculos do perfil recebem um tratamento especial. Na ocorrência de obstáculos (rios, estradas, etc.) a norma brasileira exige que certas condições de travessia sejam satisfeitas pela linha. Assim, são especificadas diferentes alturas de segurança e distâncias- critério (distância mínima entre o obstáculo e a torre mais próxima) para diferentes obstáculos. (estradas federais, estaduais, ferrovias, rios, linhas telefônicas, etc.).

São utilizados dois métodos para contornar este problema. Na caderneta de campo é especificado cada obstáculo que ocorre no traçado da linha, com ângulo de cruzamento, código de tipo e nome. É armazenada perifêricamente uma tabela com o ângulo mínimo de cruzamento, altura de segurança e distância critério para cada obstáculo a cada tensão. Assim é automaticamente determinado o trecho de locação proibida (ao redor do ponto de cruzamento), além da altura de segurança exigida. Há também a opção de serem especificados trechos proibidos quaisquer ao longo do traçado, independente da existência de obstáculos, a critério do projetista. Em ambos casos, o processo usado é o de criar "buracos" artificiais nos trechos proibidos de modo a impossibilitar a locação de torres.

### Seção 3 - RESTRIÇÕES MECANICAS - TRATAMENTO.

10. Critérios para aplicação devem ser satisfeitos para cada torre.

Uma vez determinada a locação de uma torre são conhecidos todos os esforços que atuam sobre a torre anterior, e podem ser especificados seu tipo e custo.

Sob o ponto de vista mecânico da aplicação das torres, devem ser verificadas diversas condições relacionadas ao posicionamento da torre, para garantia que uma determinada torre de determinado tipo, instalada em determinado ponto da linha de transmissão, terá seu carregamento mecânico compatível com os esforços para os quais aquele tipo de torre foi dimensionado.

São verificadas as condições limites de utilização citadas abaixo.

#### 13. Torres de Suspensão -

- a) Esforço transversal máximo nas mísulas.
- b) Vão médio máximo para torres em alinhamento.
- c) Vão gravante máximo e mínimo.
- d) Ângulo máximo de aplicação da torre.
- e) Carga de ruptura nas cadeias I e V.
- f) Balanço máximo das cadeias em I.
- g) Esforço mínimo nas cadeias em V.

#### 14. Torres de ancoragem -

- a) Esforço transversal nas mísulas.
- b) Vão gravante máximo e mínimo.
- c) Ângulo máximo de aplicação da torre.



d) Vão médio máximo para torres em alinhamento.

As grandezas relacionadas nos diversos itens das torres se suspensão e de ancoragem são características de um determinado tipo de torre. Existem outras grandezas que são definidas no projeto de linhas de transmissão.

#### 15. Dados Gerais da Linha de Transmissão -

N - número de subcondutores por fase

$\varnothing$  - diâmetro do cabo condutor.

PV<sub>1</sub> - pressão de vento máximo

T<sub>1</sub> - tração longitudinal do condutor com vento máximo.

T<sub>2</sub> - tração longitudinal do condutor com temperatura mínima.

T<sub>3</sub> - tração longitudinal do condutor com temperatura máxima.

W<sub>c</sub> - peso linear do cabo condutor.

W<sub>p</sub> - peso linear do cabo pára-raios

T<sub>4</sub> - tração longitudinal c/temperatura mínima p/ pára-raios.

T<sub>5</sub> - Tração longitudinal c/temperatura máximo para pára-raios.

FSMA - fator de segurança dos isoladores sob vento máximo.

FSME - fator de segurança dos isoladores sob vento médio.

TM - tração longitudinal com vento médio p/condutor.

PVM - pressão de vento médio.

16. Dados característicos de um tipo de torre qualquer.

$\alpha$  máx ângulo máximo de deflexão

VG máx-vão médio máximo

ET máx-esforço transversal máximo

VG máx-vão gravante máximo p/cabo condutor

VG máx-vaõ gravante mínimo p/cabo condutor

VGP -parcela de vão gravante positivo p/torres de ancoragem (máximo).

VGN -parcela de vão gravante negativo p/torres de ancoragem (máximo).

VGP máx - Vão gravante máximo p/cabo pára-raios.

VGP min - Vão gravante mínimo p/ cabo pára-raios.

17. Dados característicos de torres de suspensão.

$\Theta$  máx - ângulo máximo de balanço da cadeia I.

PVB - Pressão de vento para cálculo do balanço das cadeias I.

TB - tração longitudinal, com PVB para balanço da cadeia I.

CRI - carga de ruptura da cadeia I.

FCI - força de vento na cadeia de isoladores I.

PCI - peso da cadeia de isoladores I.

$\beta$  - ângulo entre as pernas da cadeia V.

PVV - pressão de vento para cálculo do esforço na perna da cadeia V

TV - tensão longitudinal com PVV p/cálculo do esforço na perna de V.

CRV - carga de ruptura da cadeia V.

FCV - força de vento na cadeia de isoladores V.

PCV - peso da cadeia de isoladores em V.

M min - esforço mínimo nas pernas da cadeia V.

18. Determinação do tipo de torre: Seja a situação abaixo onde são conhecidos  $V_{i-1}$ ,  $V_i$ ,  $C_{i-1}$ ,  $C_i$ ,  $C_{i+1}$ ,

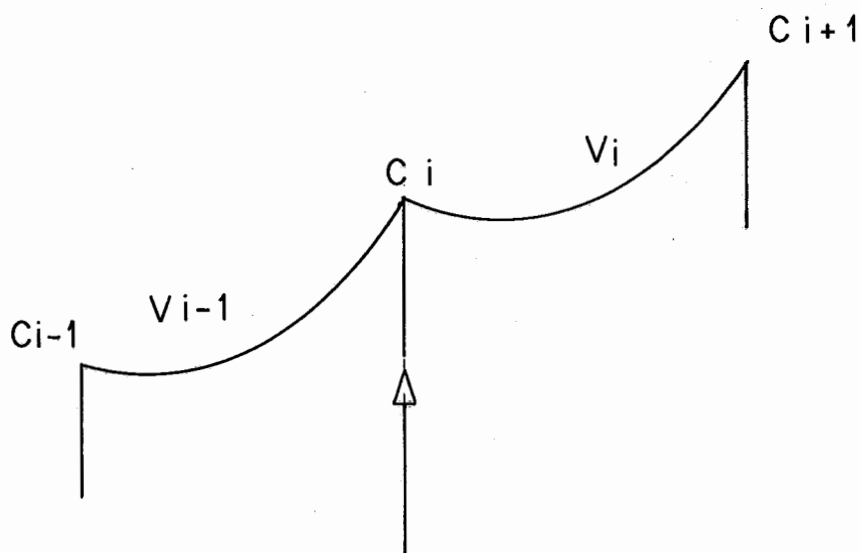


Figura 14 - Torre a ser estudada

Os itens seguintes se referem às diversas etapas da determinação do tipo de uma torre.

19. Verificação de alinhamento (ângulo de aplicação da torre -  $\alpha$ )

- Se  $\alpha = 0$ , procura-se na série de torres qual o tipo de torre mais leve em disponibilidade. Passa-se ao item 20.

- Se  $\alpha \neq 0$  procura-se na série de torres qual o tipo mais leve que pode ser utilizado ( $\alpha \leq \alpha \text{ máx}$ ). Passa-se ao item 21.

20. Verificação de esforço transversal - para torres em alinhamento.

O vão médio da torre em estudo deve ser menor que o vão médio máximo do tipo de torre em questão.

$$VM \text{ máx} \gg VM \text{ (6) onde } VM = \frac{V_{i-1} + V_1}{2} \quad (7)$$

Se for satisfeita esta condição passar ao ítem 22.

Se não for satisfeita, considerar o tipo de torre subsequente e voltar ao ítem 19.

21. Verificação de esforço transversal para torres fora de alinhamento.

Calcular o esforço transversal atuante sobre a torre (ET) e verificar se o tipo de torre considerado suporta êste esforço, isto é, verificar se  $ET \leq ET \text{ máx}$  (8)

onde:

$$ET = N \times PV_1 \times \varnothing \times \frac{V_{i-1} + V_i}{2} + 2 \times N \times T_1 \times \text{sen} \frac{\alpha}{2} +$$

FCI (9)

Se a condição for satisfeita, passar ao ítem 22. Caso contrário considerar o tipo de torre subsequente e retornar ao ítem 19.

22. Verificação de esforço vertical máximo.

Calcular o maior vão gravante que está atuando sobre a torre (VGB) e verificar se este vão gravante é menor que o máximo permitido para o tipo em questão.

$$VGB = VM + \frac{T2}{W_C} \times \left( \frac{C_i - C_{i-1}}{V_{i-1}} + \frac{C_i - C_{i+1}}{V_i} \right) \quad (10)$$

Se  $VGB \leq VG \text{ máx}$  passar ao item 23. Caso contrário, considerar o tipo de torre subsequente e voltar ao item 19.

23. Verificação de esforço vertical mínimo.

Calcular o menor vão gravante que está atuando sobre a torre (VGS) e verificar se este vão gravante é maior que o mínimo permitido para o tipo em consideração.

$$VGS = VM + \frac{I3}{W_C} \left( \frac{C_i - C_{i-1}}{V_{i-1}} + \frac{C_i - C_{i+1}}{V_{i+1}} \right) \quad (11)$$

Se  $VGS \geq VG \text{ min}$ , passar para o item 24.

Se a condição não for satisfeita, deve-se tentar elevar a altura desta torre, mantendo o tipo, de maneira a aumentar o VGS. Deve-se determinar a cota do condutor (cota do solo + altura) tal que o menor vão gravante seja aceitável para o tipo de torre em estudo.

Da equação (11) tiramos esta cota.

$$C_{in} = \frac{\frac{(VGS - VM) W_C}{T3} + \frac{C_i - 1}{V_i - 1} + \frac{C_i + 1}{V_i + 1}}{\frac{1}{V_i - 1} + \frac{1}{V_i + 1}}, \text{ e } (12)$$

$$h_{nt} = C_{in} - C_{ti} \quad \text{onde} \quad (13)$$

$C_{in}$  nova cota do condutor em  $i$

$h_{nt}$  nova altura para a torre.

$C_{ti}$  cota do terreno em  $i$

Se  $h_{nt}$  for maior que a maior altura disponível para o tipo de torre em questão, não é possível locar uma torre do tipo considerado neste ponto e deve-se considerar o próximo tipo, retornando ao ítem 19.

Caso contrário verificar se o custo da torre de altura  $h_{nt}$  é maior que o custo de uma torre de tipo mais pesado da altura anterior. Se for, considerar o tipo de torre subsequente e retornar ao ítem 19. Caso contrário, passar ao ítem 24.

24. Verificações dos cabos pãra-raios. Repetir as verificações dos ítems 21, 22 e 23 para os cabos pãra-raios caso dados dêstes façam parte da carta de aplicação do tipo de torre em estudo. Caso contrário passar ao ítem 24 se a torre for de suspensão e ao ítem 31 se a torre for de ancoragem.

Se alguma das condições de aplicação dos cabos pãra-raios não for aceita, tomar o tipo de torre subsequente e voltar ao ítem 19.

Caso contrário passar ao ítem 25 se a torre for de suspensão ou ao ítem 31 se a torre for de ancoragem.

25. Verificação do ângulo de balanço da cadeia I.

Se condições de balanço da cadeia I não fizerem parte da carta de aplicação para o tipo de torre em questão passar ao ítem 28.

Calcular o ângulo de balanço da cadeia I ( $\Theta$ ) e verificar se este é menor que  $\Theta_{\text{máx}}$ .

$$\Theta = \text{arc tg} \left( \frac{N \times \text{PVB} \times \varnothing \times \text{VM} + 2 \times N \times \text{TB} \times \text{sen } \bar{Z} + \text{FCI}}{N \times W_c \times \text{VGS} + \frac{1}{2} \text{PCI}} \right) \quad (14)$$

Se  $\Theta \leq \Theta_{\text{máx}}$ , passar ao ítem 25.

Caso contrário descobrir a altura de torre necessária para que a condição seja satisfeita.

Temos:

$$\Theta_{\text{max}} = \text{arctg} \left( \frac{N \times \text{PVB} \times \varnothing \times \text{VM} + 2 \times N \times \text{TB} \times \text{sen } \bar{Z} + \text{FCI}}{N \times W_c \times \text{VGSCI} + \frac{1}{2} \text{PCI}} \right) \quad (15)$$

onde VGSCI é o vão gravante que corresponde às condições limites de balanço das cadeias I.

$$\text{VGSCI} = \frac{N \times \text{PVB} \times \varnothing \times \text{VM} + 2 \times N \times \text{TB} \times \text{sen } \bar{Z} + \text{FCI} - \frac{1}{2} \text{PCI} \times \text{tg} \Theta_{\text{máx}}}{N \times W_c \times \text{tg} \Theta_{\text{máx}}} \quad (16)$$

de (16) temos a cota nova:

$$C_{in} = \frac{\frac{(\text{VGSCI} - \text{VM}) W_c + C_i - 1 + C_1 + 1}{T} \frac{V_{i-1}}{V_i}}{\frac{1}{V_{i-1}} + \frac{1}{V_i}} \quad (17)$$

$$h_{nt} = C_{in} - C_{ti} \quad (18)$$

Se  $h_{nt}$  for maior que a maior altura disponível para o tipo de torre considerado, é impossível locar neste ponto uma torre deste tipo. Retornar ao item 19, considerando o próximo tipo disponível.

Caso contrário escolher a opção mais barata dentre a torre de altura  $h_{nt}$  e outra com altura  $h_t$  de tipo mais pesado.

Se a opção mais barata for esta última, considerar o tipo de torre subsequente e retornar ao item 19. Caso contrário passar ao item 26.

26. Verificação do fator de segurança para cadeias I - condições de vento máximo.

Calcular o fator de segurança para vento máximo (FSMACI) e verificar se é maior que o fator de segurança limite (FSMA)

$$FSMACI = XRI \times \left( (VGB \times N \times W_c + PCI)^2 + (2 \times N \times Tl \times \text{sen} \frac{\alpha}{2} + N \times PVI \times \phi \times VM + VFCEI)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Se  $FSMACI \gg FSMA$  passar ao item 27.

Caso contrário tomar o próximo tipo de torre e retornar ao item 19.

27. Verificação de fator de segurança para cadeias I - condições de vento médio.

Calcular o fator de segurança para vento médio (FSMECI) e verificar se é maior que o fator de segurança limite (FSME).



$$FSMECI = CRI \times \left( (VGB \times N \times W_C + PCI)^2 + (2 \times N \times TM \times \frac{\sin \beta}{2} + N \times PVM \times \phi \times VM + VF CI)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Se  $FSMECI \gg FSME$  passar ao item 28. Caso contrário tomar o próximo tipo de torre e retornar ao item 19.

### 28. Verificação do esforço atuante nas pernas da cadeia V.

Se condições de esforço nas pernas da cadeia V não fizerem parte da carta de aplicação para o tipo de torre em questão está terminado o conjunto de verificações para a torre de suspensão. Dado o tipo basta determinar o custo (passar ao item 33).

Calcular o esforço atuante nas pernas da cadeia V ( $M$ ) e verificar se este é maior que o esforço mínimo permitido ( $M_{\min}$ ).

$$M = \frac{1}{\sin \beta} \left( VGS \times N \times W_C \times \frac{\sin \beta}{2} - \cos \frac{\beta}{2} \times (2 \times N \times TV \times \frac{\sin \beta}{2} + N \times PVV \times \phi \times VM) \right) \quad (21)$$

Se  $M \gg M_{\min}$  passar ao item 29. Caso contrário descobrir a altura de torre necessária para que a condição seja satisfeita.

$$VGSCV = \frac{1}{N \times W_C \times \frac{\sin \beta}{2}} \times \left( M \times \frac{\sin \beta}{2} + \cos \frac{\beta}{2} \times (2 \times N \times TV \times \frac{\sin \beta}{2} + N \times PVV \times \phi \times VM) \right) \quad (23)$$

onde  $VGSCV$  é o vão gravante que corresponde às condições limites de esforço nas pernas da cadeia V.

de (23) temos a cota nova:

$$C_{in} = \frac{\frac{(VGSCV - VM) W_c}{T} + \frac{C_{i-1}}{V_{i-1}} + \frac{C_{i+1}}{V_i}}{\frac{1}{V_{i-1}} + \frac{1}{V_i}} \quad (24)$$

$$e \quad h_{nt} = C_{in} - C_{ti} \quad (25)$$

Se  $h_{nt}$  for maior que a maior altura disponível para o tipo de torre em questão, é impossível locar neste ponto uma torre deste tipo. Retornar ao item 19, considerando o tipo subsequente disponível.

Caso contrário escolher a opção de menor custo entre a torre de altura  $h_{nt}$  e a anterior (altura  $h_t$ , com tipo mais pesado). Se a opção mais barata for a primeira passar ao item 29. Caso contrário passar ao item 19 considerando o tipo de torre subsequente).

### 29. Verificação do fator de segurança para cadeias V.

Condições de vento máximo.

Calcular o fator de segurança para vento máximo (FSMACV) e verificar se é maior que o fator de segurança limite (FSMA)

$$FSMACV = CRV \times \left( \frac{N \times W_c \times VGB \times PVC}{2 \times \cos \frac{\beta}{2}} + \frac{N \times 0 \times PVL \times VM + 2 \times N \times Tl \sin \frac{\beta}{2} + FVCV}{2 \sin \frac{\beta}{2}} \right)^{-1} \quad (26)$$

Se  $FSMACV \gg FSMA$  passar ao item 29. Caso contrário tomar o próximo tipo de torre e retornar ao item 19.

30. Verificação do fator de segurança para cadeias V -  
Condições de vento médio.

Calcular o fator de segurança para vento médio (FSMECV) e verificar se é maior que o fator de segurança limite (FSME).

$$FSMECV = CRV \times \left( \frac{N \times W_C \times VCB \times PVC}{2 \times \cos \frac{\beta}{2}} + \frac{N \times O \times PVM \times VM + 2 \times N \times T \times \text{sen} \frac{\beta}{2} + FVCV}{2 \times \text{sen} \frac{\beta}{2}} \right)^{-1} \quad (27)$$

Se  $FSMECV \gg FSME$  está terminado o conjunto de verificações para torres de suspensão. Passar ao item 33 para determinar o custo. Caso contrário retornar ao item 19 com o próximo tipo de torre disponível.

31. Verificação das parcelas de esforço vertical em condições de temperatura mínima.

Calcular as parcelas de esforço vertical que atuam sobre a mísula

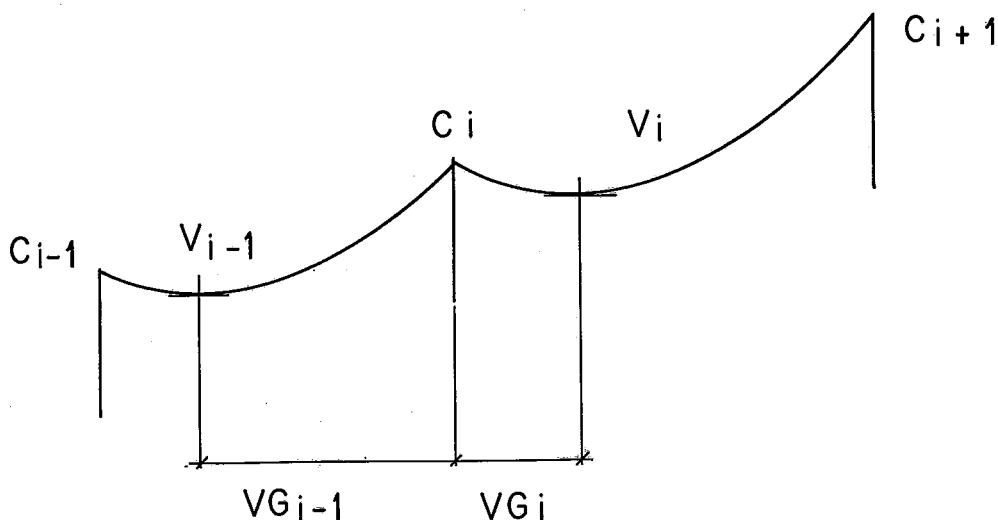


Figura 15 - Parcelas de esforço vertical

$$VG_{i-1} = \frac{V_{i-1}}{2} + \frac{T_2}{W_C} \times \frac{(C_i - C_{i-1})}{V_{i-1}} \quad (28)$$

$$VG_i = \frac{V_i}{2} + \frac{T_2}{W_C} \times \frac{(C_i - C_{i+1})}{V_i} \quad (29)$$

Se  $VG_{i-1}$  e  $VG_i$  forem ambos positivos ou ambos negativos, passar ao passo seguinte. A torre está bem.

Se  $VG_{i-1}$  for positivo e  $VG_i$  for negativo ou vice-versa, os valores positivo (VGPC) e negativo (VGNC) devem ser menores que VGP e VGN, em módulo.

$$|VGPC| \leq |VGP| \quad (30)$$

e  $|VGNC| \leq |VGN| \quad (31)$

Se ambas as condições forem satisfeitas, passar ao ítem 32. Se pelo menos uma não for, é necessário descobrir a altura de torre que satisfaça a condição.

$$C_{in} = \frac{\frac{(VGP - VM) W_C}{T_2} + \frac{C_{i-1}}{V_{i-1}} + \frac{C_{i+1}}{V_i}}{\frac{1}{V_{i-1}} + \frac{1}{V_i}} \quad (32)$$

(ou substituindo VGP por VGN se o problema for na parcela de vão gravante negativo).

e  $h_{nt} = C_{in} - C_{ti} \quad (33)$

Se  $h_{nt}$  for maior que a maior altura disponível para o tipo de torre considerado, é impossível locar neste ponto uma torre deste tipo. Retornar ao item 19, considerando o próximo tipo disponível. Se não houver mais nenhum tipo disponível, é impossível locar qualquer torre neste ponto. Passar à próxima opção de locação.

Se a altura encontrada for compatível com o tipo de torre em consideração, comparar o custo desta com uma de altura  $h_t$  e tipo mais pesado, retendo a mais barata. Se for esta, retornar ao item 19. Se for aquela passar ao item 32.

32. Verificação das parcelas de esforço vertical em condições de temperatura máxima.

Repetir o procedimento do item 31 substituindo nas equações (28), (29) e (32) T2 por T3.

Se as condições forem satisfeitas, está terminado o conjunto de verificações para torres de ancoragem. Passar ao próximo item para determinar o custo. Caso contrário, retornar ao item 19 considerando o próximo tipo disponível de torre. Se não houver mais nenhum tipo disponível, é impossível locar qualquer torre neste ponto. Passar à próxima opção de locação.

33. A Determinação do custo de uma torre é função exclusiva de sua altura e tipo. Uma vez tendo sido determinadas estas características, o custo é automaticamente conhecido.

#### Seção 4 - O METODO DE EXPANSÃO

34. Dado o nó  $n$  representando a configuração  $C_n$  e tendo como variáveis de estado a locação, altura e tipo da torre. A, a lém da locação e altura da torre B, o problema é determinar seus nós sucessores, ou seja, determinar o tipo mais econômico para a torre B com conhecimento da locação e altura da torre subsequente.

Na descrição do método de expansão será apresentado primeiramentê o processo considerando uma pesquisa exaustiva. A seguir serão introduzidos critérios que permitem reduzir consideravelmente o tempo de processamento sem comprometer a precisão dos resultados.

35. O Método de pesquisa exaustiva consiste basicamente em considerar todas as locações possíveis de torres num trecho ã frente da torre B do nó que se quer expandir, trecho êste que é de tamanho variável, podendo abranger um intervalo correspondente a 3,4,5 ou até mais torres. São retidas as torres seguintes ã torre B que apresentam melhor aproveitamento global para o intervalo, usando o critério de menor custo médio por quilômetro. Este critério permite uma correta estimativa do nível de utilização de cada tipo de torre para determinado ponto.

36. Parte-se de uma torre de locação e altura conhecidas e a partir dela traça-se a catenária que melhor se ajusta ao terreno, buscando possíveis pontos de locação para a próxima torre, pontos êsses que serão em número de  $n$ , aproximadamente. O número poderã ser menor que  $n$  caso haja algum obstáculo assinalado no perfil

e poderá ser maior que  $n$  caso o perfil acompanhe o traçado da ca  
tenária. A situação é esquematizada a seguir:

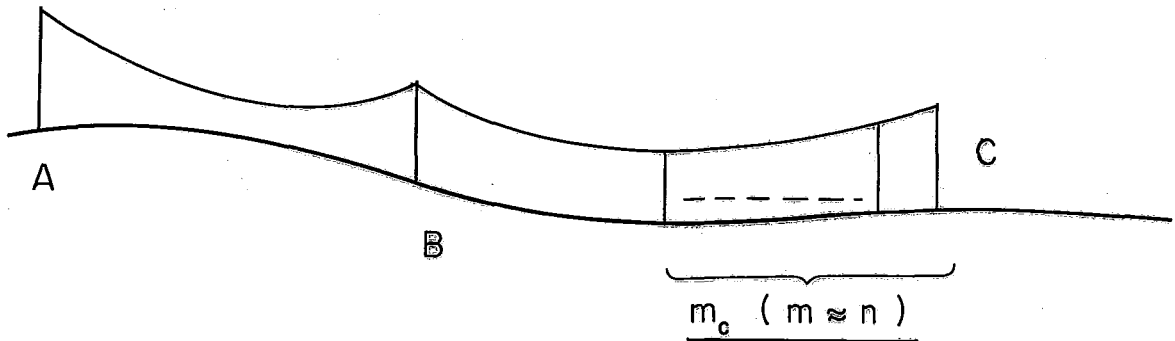


Figura 16 - Expansão (fase 1)

A torre A é a torre já locada, com tipo conhecido.

A torre B e a torre que só tem altura e posição definidas.

C é um conjunto de  $m$  pontos possíveis de locação para a torre subsequente.

Os  $m$  conjuntos diferentes de esforços mecânicos que atuam sobre a torre B já estão definidos e é possível determinar para cada uma das  $m$  opções o tipo e daí o custo correspondente que teria a torre B. Este custo é associado ao vão médio de B, função da distância de B a C, sendo definido o custo médio por Km da torre B referente a cada possibilidade de locação em C como sendo:

$$C_{mi} = \frac{2 \times CB_i}{d_{AC_i}} \quad i \in [1, m] \quad (34)$$

onde  $C_{mi}$  - Custo médio p/km associado à torre C locada no  $i$ ésimo ponto.

$CB_i$  - custo da torre B com a torre C locada no  $i$ ésimo ponto.

$\frac{dAC_i}{2}$  - Vão médio da torre B com a torre C no  $i$ ésimo ponto.

Em seguida é traçada a catenária de segurança de cada uma das torres do conjunto C, e em cada catenária são definidos  $m_i$  possíveis pontos de locação ( $m_i \approx n$ ) - A situação é então a seguinte:

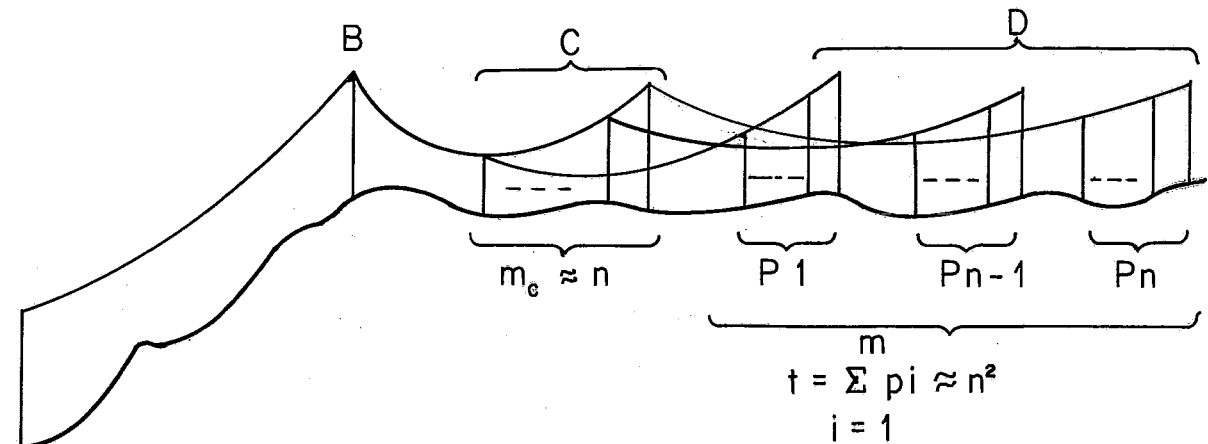


Figura 17 - Expansão (fase 2)

O número de possíveis pontos de locação para o grupo D (3ª torre) é  $t = \sum_{i=1}^m p_i$  onde  $p_i$  é o número de torres (D)  $i=1$  que podem ser locadas a partir da torre C locada no  $i$ ésimo ponto. É determinado o custo  $C_{ij}$ ,  $i \in [1, m]$ ,  $j \in [1, p_i]$  da torre C referente a cada uma destas  $t$  possibilidades. Este custo é função da distância  $d_{ci} D_{ij}$  (da  $i$ ésima locação de C à  $i$ ésima locação cor



respondente de D), além de ser função do  $d_{BC_i}$  e é definido o custo médio por km das torres B e C referentes às possibilidades de locação em C como sendo:

$$C_{mij} = \frac{(CB_i + C_{Cij}) \times 2}{dAC_i + dBD_{ij}} \quad \begin{array}{l} i \quad 1, m \\ j \quad 1, pi \end{array} \quad (36)$$

onde  $C_{mij}$  - custo médio p/km associado às torres C locada no  $i$ ésimo ponto e D no  $j$ ésimo ponto correspondente.

$CB_i$  - custo da torre B com a torre C locada no  $i$ ésimo ponto.

$CC_{ij}$  - custo da torre C com a torre, D locada no  $j$ ésimo ponto correspondente.

$\frac{dAC_i}{2}$  - Vão médio da torre B com a torre C locada no  $i$ ésimo ponto.

$\frac{dBD_{ij}}{2}$  - Vão médio da torre  $C_i$  com a torre D locada no  $j$ ésimo ponto.

A pesquisa exaustiva consiste em verificar desta maneira todas as possibilidades existentes de locação adiante da torre B até uma determinada profundidade.

37. Verifica-se que mesmo quando há um número pequeno de alturas disponíveis, não é aconselhada a busca exaustiva para profundidades maiores, devido à ocorrência de tempos de processamento proibitivos. Para contornar este problema, foram desenvolvidos critérios de poda que permitam a redução do esforço computacional.

## Seção 5 - CRITÉRIOS DE PODA NO OPERADOR SUCESSOR.

38. Para diminuir o tempo de processamento, foi utilizado o artifício de escolher apenas algumas torres (as mais promissoras), a partir de determinada profundidade de pesquisa. O critério usado foi o de locar todas as torres possíveis até profundidade 2, isto é, até a segunda torre a partir da torre B do nó que está sendo expandido. Para profundidades de pesquisas maiores é retida apenas uma fração das torres de locação possível em cada ciclo. As torres retidas são as que apresentam maior aproveitamento no intervalo considerado.

39. Uma função  $F(p, \sigma, N)$  é utilizada para determinar esta fração onde  $p$  é a classe do desvio padrão e  $n$  é o número total de alturas disponíveis. O valor de  $f$  varia de um mínimo de zero (nenhuma torre é retida) a um máximo de 1 (todas as torres são retidas, e representa a fração de torres a serem mantidas para a profundidade  $p$  em questão.

40. A partir de profundidade 3, são lançadas as catenárias das torres que apresentaram melhor aproveitamento até o momento, ou seja, ocorre uma busca do caminho de 'custo médio por quilômetro' mínimo dentro do operador sucessor a partir da profundidade referida. Esta busca termina quando todos os ciclos possíveis foram testados, isto é quando  $f(p, \sigma, n) = 0$   $\forall$   $p$  e para o  $\sigma$  e o  $n$  em questão, ou quando o número de torres consideradas ultrapassar a um número determinado.

41. Mantendo  $\sigma$  e  $n$  constante, a função  $f$  decresce à medida que  $p$  aumenta. Este decréscimo deve ser aproximadamente exponencial a partir da profundidade 3.

42. Para valores grandes de  $p$ , a função  $f$  decresce à medida que  $\sigma$  aumenta, isto é, quanto maior for o desvio padrão das cotas (quanto mais acidentado for o perfil), menor será  $f$  para profundidades maiores, e vice-versa.

43. Mantendo  $p$  e  $\sigma$  constantes, o decréscimo de  $f$  será maior para um valor alto de  $n$ , e menor para um valor baixo de  $n$ .

44. Foram elaboradas tabelas contendo valores de  $f$  para diferentes valores de  $p$ ,  $\sigma$  e  $n$ . Os valores ótimos só poderão ser determinados após o período de calibração do modelo, pois o tempo de processamento é função direta dos valores de  $f$ .

C A P Í T U L O I VO T I M I Z A Ç Ã O

Neste capítulo é descrito o método utilizado para a otimização. É feita uma descrição detalhada do grafo orientado, além do algoritmo utilizado para determinar o caminho de custo mínimo. É apresentado o critério de parada, bem como artifícios heurísticos e de poda utilizados. É comentada a otimização utilizando heurística adaptativa.

## Seção I - O G R A F O

Para modelar o problema de locação de torres, é construído um grafo com as seguintes características:

1. Nô Uma estrutura de informação  $n_i$  (  $e_i, f_i, p_i$  ) onde  $e_i$  representa o estado da configuração considerada,  $f_i$  é o custo associado ao nô e  $p_i$  é o apontador que indica a posição do nô anterior na lista de nós fechados.

2. Operador Sucessor - Dado um nô  $n_i$ , uma decisão sobre a próxima torre a ser locada consiste numa expansão do nô, numa decisão a ser tomada quanto à melhor locação para próxima torre, correspondendo a uma transição no grafo. Segue-se a definição do operador sucessor.

$\Gamma (n_i)$  = conjunto dos nós ( $n_j$ ) tais que  $n_j$  são sucessores de  $n_i$ .

3. Ramos - Os ramos do grafo são pouco importantes, uma vez que se trabalha com o operador sucessor. O ramo pode ser interpretado como a decisão do ponto de locação da torre  $B_j$  do nô  $n_j$ , (isto é, do do próximo nô).

4. O grafo Conhecido o estado inicial do sistema ( $n_0$ ), o grafo é construído através de aplicações sucessivas do operador  $\Gamma$ .

O final do grafo é o alvo, constituído pelo conjunto de nós ( $n_f$ ) representando a locação da última torre.

5. Caminho - Um caminho no grafo é uma sequência de nós  $n_0, n_1, n_2, \dots, n_i, \dots, n_f$  onde cada nó é sucessor do anterior.

6. Custo - O custo  $f_i$  associado a um nó  $n_i$  pode ser decomposto:  $f_i = C_i + h_i$  onde  $C_i$  representa o custo acumulado mínimo no caminho de  $n_0$  a  $n_i$  e  $h_i$  representa uma estimativa de custo de  $n_i$  até o alvo  $n_f$ . Caso não seja utilizada estimativa  $h$ , ou seja, se  $h = 0 \forall i$ , o custo associado  $f_i$  representa apenas o custo acumulado. Os métodos para determinar  $h$  serão descritos na seção IV deste capítulo.

7. A busca : Procura-se determinar no grafo o caminho de custo mínimo entre o nó de partida  $n_0$  e um nó  $n_f$  do alvo. O algoritmo será descrito na seção seguinte. A cada caminho corresponde uma linha alternativa. Ao caminho de custo mínimo corresponderá a linha alternativa mais econômica.

## Seção 2 ALGORITMO

8. O algoritmo usado para a determinação de um caminho (linha alternativa) de custo mínimo é o algoritmo  $A^*$ , que se baseia na expansão iterativa do grafo a partir do nó inicial, guiado por uma estimativa do custo adiante da última torre locada em cada nó. Assim, para cada nó  $n$ , caracterizado pelas torres  $(A,B)$ , faz-se uma estimativa  $h_n$  do valor de uma linha ótima iniciando em  $A$  até o fim do trecho.

9. O custo da expansão é estimado pelo custo de uma linha até o fim do trecho projetado para um perfil de terreno fictício. São propostas na seção IV deste capítulo diversas maneiras de estimar este custo.

10. O algoritmo constrói nós iterativamente, através de expansões. Sendo associado a cada nó o valor  $f_n + h_n$ , a cada iteração expande-se o nó aberto (ainda não expandido) mais promissor, ou seja, o nó com valor mínimo de  $f$  entre os listados e não expandidos, que fornece a melhor expectativa de custo para uma linha alternativa.

11. O uso de tais estimativas caracteriza o algoritmo  $A^*$ . Se  $h_n$  sempre subestima o custo real da expansão de  $n$  até o fim do trecho, então garante-se a obtenção de um caminho de custo mínimo.

12. O algoritmo manipula duas listas (ABERTO e FECHADO). Nós fechados são nós que foram expandidos e cujos sucessores estão listados. Nós abertos são aqueles ainda por expandir. As listas são interpretadas como listas de configurações e não de nós.



ALGORITMO A\*

Passo 0: Inicialização. Introduza em ABERTO o nó inicial com custo 0 e apontador 0.

Passo 1: Selecione em ABERTO um nó  $\bar{n}$  tal que  $\hat{f}_{\bar{n}}$  é o mínimo de  $\hat{f}_n$  para  $n$  abertos. Se  $\bar{n}$  for um nó terminal, vá para o passo 5.

Passo 2: Transfira  $\bar{n}$  para a lista fechado. Aplique o operador sucessor a  $\bar{n}$ , obtendo sucessores  $n_1, n_2, \dots, n_p$ . Associe aos sucessores os custos e apontadores.

$$C_{n_i} = C_n + \text{custo da torre A de } n_i$$

$$P_{n_i} = \bar{n}$$

Passo 3: Compare cada sucessor com todos os nós listados. Elimine os sucessores  $n_i$  que já estavam em ABERTO ou FECHADO com custo menor ou igual a  $C_{n_i}$ . Elimine de ABERTO qualquer nó  $n$  coincidente com um sucessor  $n_i$  com  $C_n \geq C_{n_i}$ .

Passo 4: Introduza em ABERTO os sucessores remanescentes. Retorne ao Passo 1.

Passo 5: Construa a configuração correspondente a  $n$  usando os apontadores para recuperar o caminho. Pare.

Este algoritmo garante a determinação do caminho de custo mínimo em um grafo orientado.

### Seção 3 REGRAS DE ELIMINAÇÃO.

São utilizadas no processo diversas regras de eliminação. No capítulo III já foram descritos os critérios de poda utilizados no operador sucessor. Nesta seção serão descritas as regras de eliminação utilizadas para diminuir o tempo de convergência.

13. Se a lista ABERTO crescer excessivamente, podam-se os elementos com maior valor para  $f$ , reduzindo a lista a um tamanho mais razoável. Em algumas aplicações devem ser podados também elementos com maior custo médio por quilômetro, pois êstes representarão linhas alternativas cujas torres têm menor aproveitamento.

14. Um melhor resultado é obtido utilizando relações de preferência entre nós. Um nó  $n_1$  será melhor que outro nó  $n_2$  se certas condições forem satisfeitas, quais sejam:

- 1)  $A_1$  está aquém de  $A_2$
- 2)  $B_1$  está além de  $B_2$
- 3)  $C_{n_1} < C_{n_2}$ .

Neste caso,  $n_2$  pode ser eliminado da lista em que se encontrar.

Este critério de escolha entre dois nós não compromete a otimalidade da solução, o que pode ocorrer quando é usado o critério de poda anterior. Isto é inevitável se o problema for complexo e o tempo de máquina disponível pequeno.

## Seção 4 H E U R I S T I C A

15. A utilização de estimativas de custo adiante de cada nó fechado caracteriza o algoritmo  $A^*$ . Para garantir a otimalidade da solução é necessário que a estimativa subestime o custo real da expansão deste nó até o final. ( $\hat{h} \leq h_{\min}$ ). Caso a estimativa não seja inferior ao custo mínimo não há garantia de esta ser menor que o custo real, logo não há garantia de otimalidade, embora a convergência do algoritmo seja muito acelerada.

São propostas três maneiras de estimar o valor de  $h$ , que serão descritas a seguir:

16. Uma estimativa que subestima o custo real do nó  $n_i$  ao alvo em todos os casos consiste em supor que o trecho de perfil entre a torre  $B_i$  deste nó ( $n_i$ ) e o alvo é um perfil ondulado, tal que o aproveitamento das torres seja máximo. Seria o "perfil perfeito", com custo de locação mínimo, pois as torres estariam localizadas nas elevações e teriam a menor altura, enquanto o cabo (em formato de catenária) se colocaria nas depressões.

Para determinar a estimativa de custo  $\hat{h}$  do nó até o alvo (final do trecho), basta verificar qual a combinação de torres cujo limite para esforço transversal fornece maior aproveitamento e considerar a menor altura possível. Tem-se então uma estimativa que subestima o custo real.

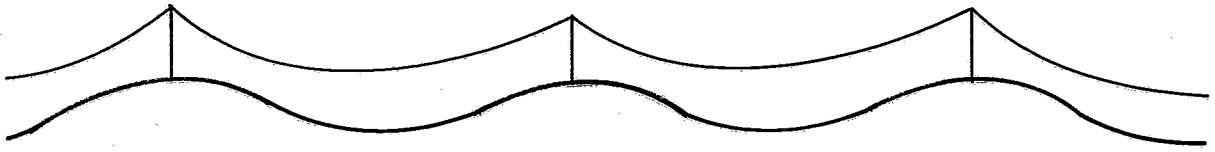


Figura 18 - O perfil "perfeito"

17. Considerando um perfil perfeitamente plano, consegue-se uma estimativa de custo que para a maior parte dos conjuntos de torres se situa em torno de 1,15 hmin.

$$1,1hmin, < \hat{n} \text{ plano} < 1,2hmin$$

Esta estimativa pode ser utilizada para acelerar a convergência, e embora comprometa a garantia de otimalidade é sugerido para casos em que o perfil não seja muito acidentado.

16. Pode ser utilizado um processo de heurística adaptativa, no qual cada resultado obtido é utilizado como estimativa para a otimização seguinte. É assegurada a convergência, o que garante a otimalidade, mas o tempo de máquina requerido é proibitivo mesmo em casos simples.

C A P Í T U L O     VI M P L A N T A Ç Ã O

Neste capítulo é descrito o sistema mecanizado que foi elaborado a partir da teoria exposta. Este foi desenvolvido utilizando diversas técnicas de elaboração de sistemas computacionais (programação estruturada, top-down approach, etc..) e é composto por quatro programas que executam respectivamente a crítica (ordenação dos dados, e verificações), o levantamento do perfil ( a partir da caderneta de campo) a otimização (utilizando metodologia descrita neste trabalho) e a emissão de relatórios.

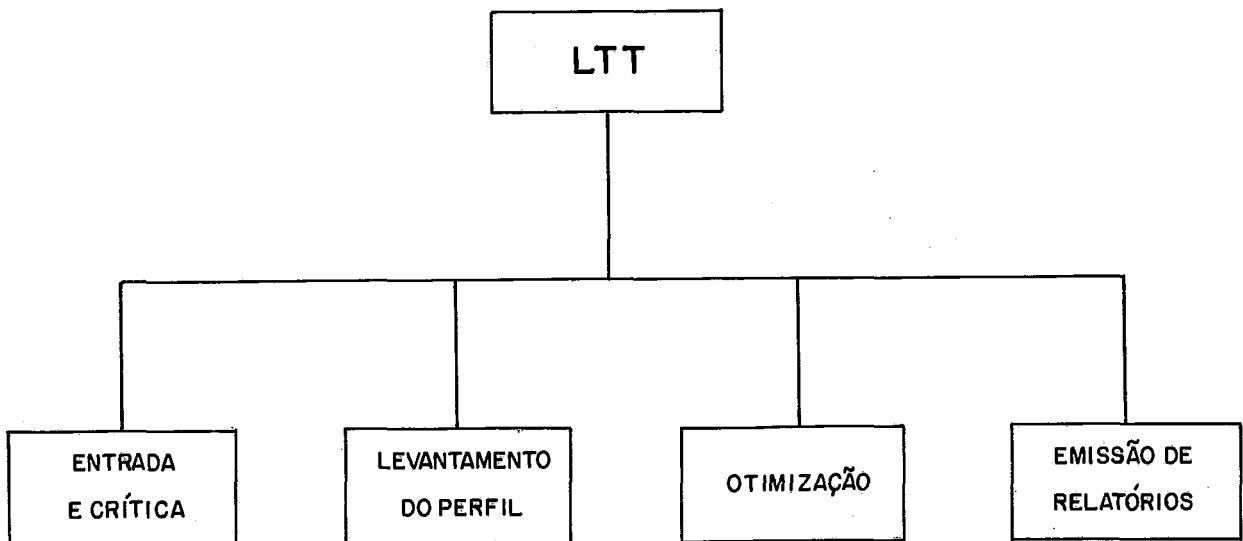


Figura 19 - Estrutura do Sistema Computacional

## Seção I CRITICA

1. No primeiro módulo, de crítica, os dados de entrada são lidos e examinados para determinação de qualquer incoerência existente. São feitos os testes:

a) Validação - onde cada dado é verificado quanto à sua natureza alfabética ou numérica.

b) Consistência-onde é verificada a ordem de grandeza de cada dado numérico.

c) Interrelacionamento-onde os dados são verificados para evitar incoerências.

2. Os dados de entrada, a grosso modo, podem ser subdivididos em dados para o levantamento do perfil topográfico e dados da linha. Numa visão mais refinada, os dados podem ser subdivididos num número maior de categorias:

a) Especificações Gerais

- Tensão da linha
- Nome da linha
- Comentários

b) Dados topográficos - Caderneta de campo.

Dados gerais

- Código de aparelho
- Data
- Empresa
- Topógrafo
- Sigla do Estado
- Município

Dados específicos (por ponto visado)

- Ponto visado
- Azimute
- Altura do aparelho
- Fios (p/aparelhos convencionais))
- Altura do refletor e distância lida (p/aparelhos eletrônicos)
- Zênite
- Obstáculos
  - Código
  - Ângulo de cruzamento
  - Nome
  - Quilometragem
- Igualdade de estacas
- Código do terreno
- Código de vegetação
- Código de fundação
- Código de ponto.

c) Dados do Perfil

Pontos de locação obrigatória

- Ordenada do ponto obrigatório
- Código do terreno
- Ângulo de deflexão da linha (se houver)
- Vão à ré (se houver obrigatoriedade)
- Vão à frente (se houver obrigatoriedade)
- Altura da torre (caso necessário).
- Tipo da torre (caso necessário)

- Nome do local
- Comentários.

Trecho de locação proibida

- Ordenadas inicial e final do trecho proibido.
- Ordenada de ponto que tenha altura de segurança anormal, e a altura.
- Comentários

Trecho c/ altura de segurança anormal

- obstáculo cuja altura de segurança será modificada.
  - Código
  - Ângulo de cruzamento.
  - Nome.
  - Quilometragem
- Ordenada do ponto de cruzamento.
- Altura mínima de segurança

d) Dados específicos da linha.

- Número de sub-condutores por fase.
- Diâmetro do cabo condutor
- Peso do cabo condutor
- Tração longitudinal do condutor à temperatura máxima.
- Tração longitudinal do condutor à temperatura mínima.
- Tração longitudinal do condutor a vento médio.
- Pressão de vento máximo.
- Pressão de vento médio.
- Diâmetro do cabo pára-raios.
- Peso do cabo pára-raios
- Tração longitudinal do pára-raios à temperatura



máxima

- Tração longitudinal do pãra-raios à temperatura mínima.
  - Força do vento sobre cadeias em I
  - Peso das cadeias em I.
  - Força do vento sobre cadeias em V.
  - Coeficiente de segurança a vento máximo
  - Coeficiente de segurança a vento médio.
  - Peso das cadeias de ancoragem
- e) Dados dos tipos de torres.
- Código do tipo da torre
  - Ângulo máximo de deflexão
  - Vão médio máximo
  - Vão gravante máximo
  - Vão gravante mínimo
  - Esforço transversal máximo na mísulas.
  - Vão gravante máximo do cabo pãra-raios.
  - Vão gravante mínimo do cabo pãra-raios.
  - Carga de ruptura das cadeias em I.
  - Balanço máximo das cadeias em I
  - Carga de ruptura p/cadeias em V
  - Ângulo das cadeias em V
  - Esforço mínimo nas cadeias em V
  - Alturas dos condutores ao solo.
  - Altura Mínima .
  - Altura máxima.
  - Incremento de altura
  - Custos da fundações

- Pesos da torres
  - Custos das torres.
- f) Dados das alturas de segurança obrigatórias e das distâncias de segurança (Escolhidas a critério).
- Obstáculo
  - Altura de segurança
  - Ângulo mínimo de cruzamento
  - distância
- g) Pedido de processamento.
- caracterização da linha
  - caracterização do conjunto de tipos de torres.
  - Código de otimização por peso ou por custo.
  - Tipo e altura das torres limitantes.
  - Sua posição

3. Após a entrada é feito um SORT para classificar e numerar os dados, que posteriormente são gravados em arquivos de trabalho para serem utilizado pelos outros programas do sistema.

Os arquivos conterão:

- Especificações Gerais
- Dados do perfil
- Caderneta de campo
- Distância e alturas de segurança.
- Dados da linha
- Dados dos tipos de torres.

O programa está codificado em COBOL-ANS

Seção 2 - LEVANTAMENTO DO PERFIL

Este é o segundo módulo, e tem a estrutura seguinte:

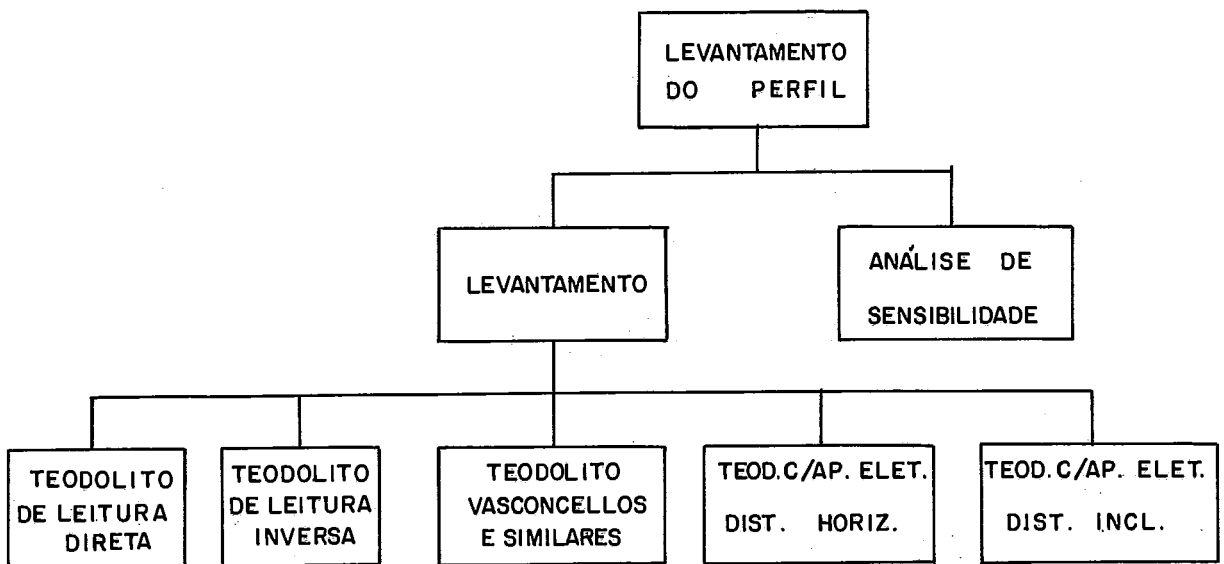


Figura 20 - Estrutura do levantamento de perfil.

4. No levantamento do perfil, os pontos são visados de uma determinada posição ( a estação), com leituras feitas do teodolito (ou no aparelhamento eletrônico se êste estiver presente). No caso de medição ser feita com teodolito, são conhecidas as leituras dos fios (médio, superior e inferior). O azimute, a altura do aparelho e o zênite( que varia com tipos diferentes de teodolito) sendo que a partir destes dados é calculada a distância e o desnível entre os dois pontos. No caso da medição ser feita por meio de aparelhamento eletrônico acoplado ao teodolito, ficam conhecidos o

desnível e a distância (horizontal ou inclinada) entre o teodolito e a estadia. O método estadimétrico de levantamento é requerido.

5. A partir destes dados, são calculados a cota de cada ponto e sua distância progressiva. De cada estação devem ser visadas as estações adjacentes (tanto a anterior como a posterior), girando o teodolito para ter duas medidas do zênite para cada estação visada. São determinadas assim quatro medidas de distância e de desnível entre as duas estações. Se estas medidas tiverem um desvio padrão maior que um determinado valor (6% da média) devem ser feitas novas medições, e é dado um aviso. É feita a análise de sensibilidade do trecho, através do cálculo do desvio padrão das cotas em intervalos de 2km.

6. Os pontos de obstáculo, (estradas, rios, ferrovias, etc.) são determinados e as distâncias e alturas de segurança necessárias são conhecidas. São também determinados trechos onde a locação de uma torre é impossível de tal maneira que à saída deste módulo seja fornecido o perfil já com todas as informações necessárias para a locação. Em trecho onde a locação for impossível, o perfil terá códigos especiais para transmitir esta informação.

7. O teodolito de leitura direta apresenta a medida do ângulo de zênite com  $0^\circ$  e  $180^\circ$  na direção vertical (sentidos respectivamente superior e inferior) e  $90^\circ$  e  $270^\circ$  na direção longitudinal (sentido respectivamente anterior e posterior).

São feitas as leituras indicadas como dados de entrada. Para encontrar a distância reduzida, usa-se a fórmula.

$$D = C.S. \cos^2 \alpha$$

onde: C é uma constante

$$C = 100$$

'S' é a diferença entre o fio superior e o inferior.

' $\alpha$ ' é o ângulo entre o horizonte e o eixo do fio médio.  
(90° - ângulo de zênite)

Para encontrar a diferença de nível temos.

$$n = C.S. \frac{\sin 2\alpha}{2}$$

onde: C, S e  $\alpha$  são as mesmas grandezas. A distância progressiva e a cota são determinadas para cada ponto.

À medida que vai sendo feito o levantamento topográfico, os obstáculos vão sendo especificados, e pontos onde é impossível a locação são discriminados.

Quando é feita a leitura invertida mede-se da mesma forma que o teodolito de leitura inversa.

8. O teodolito de leitura inversa apresenta a medida do ângulo de zênite com 0° e 180° na direção vertical (sentidos respectivamente inferior e superior) e 90° e 270° na direção longitudinal (sentidos respectivamente posterior e anterior).

Para encontrar a distância reduzida e o desnível, são usadas as mesmas fórmulas. O ângulo  $\alpha$  torna o valor 270° - ângulo de zênite.

A distância progressiva e a cota são determinadas para cada ponto.

Quando for feita a medida invertida, a leitura é igual à do teodolito de leitura direta.

9. O teodolito Vasconcellos apresenta a medida do ângulo de  $90^\circ$  e  $-90^\circ$  direção vertical (sentidos respectivamente superior e inferior) e  $0^\circ$  em ambos os sentidos longitudinais.

O ângulo  $\alpha$  é então medido diretamente.

10. Os aparelhos eletrônicos fornecem a distância inclinada e o ângulo, ou a distância horizontal e desnível.

Sendo dada a distância inclinada, para achar a distância reduzida, basta multiplicar pelo  $\cos \alpha$ .

O desnível será dado por  $\text{desnível} = D \sin \alpha$  (onde D é a distância inclinada), se não for dado de entrada.

São determinadas a distância progressiva e a cota de cada ponto.

Sendo dados a distância horizontal e o desnível, são determinadas a distância progressiva e a cota de cada ponto.

11. É importante notar que os desníveis indicados acima incluem a altura do teodolito e da estadia. É então necessário subtrair a altura do teodolito e somar a altura da estadia para encontrar o desnível real entre os pontos.

12. São gravados 2 arquivos que contêm descrição detalhada do perfil. O primeiro é utilizado pelo programa de otimização, contendo os trechos de locação proibida determinados de maneira automática ou não (cap. III.9), além de outros dados, indispensáveis à otimização. O segundo arquivo é utilizado pelo programa de emissão de relatórios e contém, além do levantamento do perfil, todos os dados descritivos do trecho. O programa utiliza ainda três arquivos de trabalho para otimizar recursos computacionais.

O programa está codificado em FORTRAN IV.

## Seção 3 - O T I M I Z A Ç Ã O

O programa de otimização tem a estrutura seguinte:

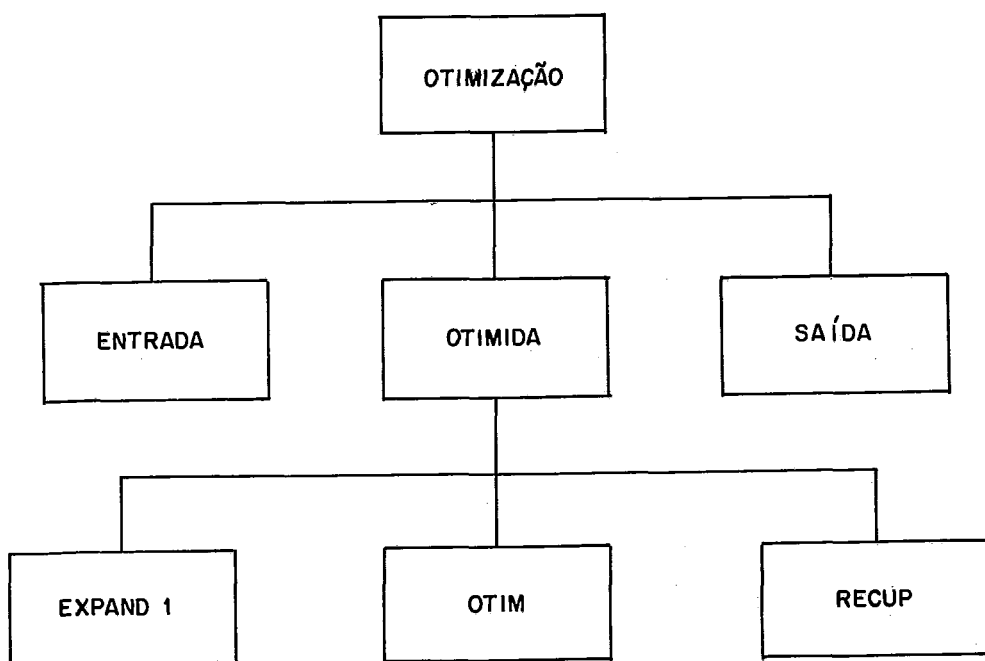


Figura 21 - Estrutura do Módulo de Otimização

13. No módulo de otimização, é determinada a locação ótima para o trecho em questão. São lidos os arquivos contendo os dados gerais da linha e das torres (gravados pelo programa de crítica), bem como o arquivo contendo os dados necessários à otimização. É gravado um arquivo contendo a locação ótima para as condições apresentadas. É utilizado um arquivo de trabalho para armazenar a lista de nós fechados.



14. O módulo ENTRADA executa a aquisição de dados de linha e das torres. São armazenados todos os dados relacionados com as restrições eletro-mecânicas a serem consideradas. É determinado o tipo de torre mais econômica caso o perfil fosse "perfeito", e são elaboradas as principais estruturas de informação que serão utilizadas em OTIMIDA.

15. O módulo OTIMIDA executa a otimização propriamente dita. É composto por três rotinas. EXPAND1 que efetua a expansão dos nós fechados (aplicação do operador sucessor), OTIM que é o algoritmo de otimização, e RECUP, que recupera da lista de nós fechados o caminho de custo mínimo uma vez que o alvo é atingido.

16. O módulo SAÍDA ordena os resultados para gravação do arquivo contendo a locação ótima, que é lido pelo programa de emissão de relatórios.

17. Descrição da rotina EXPAND1 A rotina EXPAND1 executa a expansão do nó mais promissor e tem a estrutura seguinte:

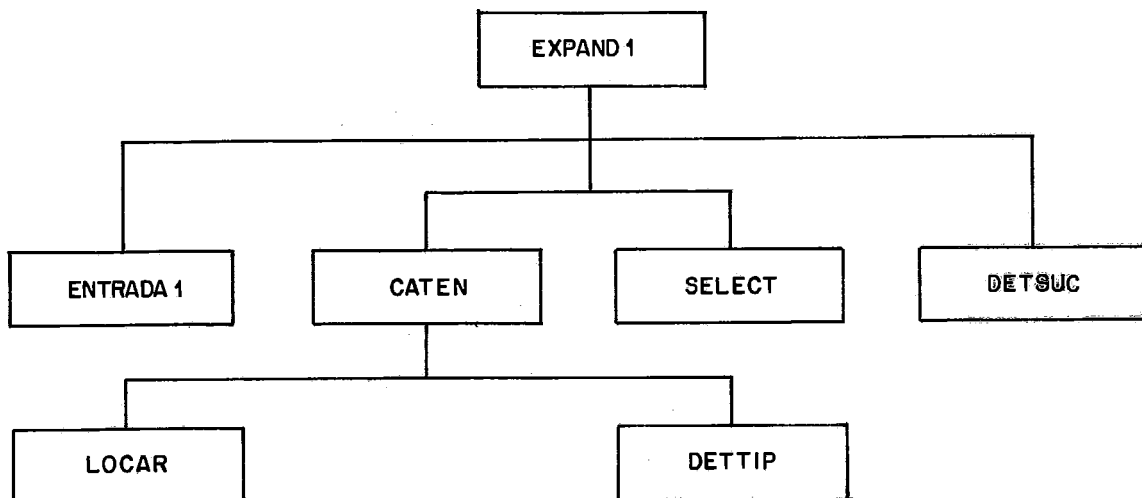


Figura 22 - Rotina EXPAND1

18. A subrotina ENTRADAL faz a aquisição de dados do perfil à medida que estes vão sendo necessários. São armazenados para cada ponto do perfil a abcissa, cota central e cota mais alta dentre as três projeções das fases, bem como códigos de terreno, fundação, vegetação, locação proibida e desnível. A cada nó  $n_i$  que é expandido, esta rotina é chamada para atualizar os pontos do perfil adiante da torre  $B_i$ .

19. A subrotina CATEN lança a catenária de cada torre, adaptando-a ao terreno tangencialmente da forma descrita no capítulo III, Seção II. É chamada muitas vezes em cada expansão.

20. Na subrotina LOCAR é definida a locação de cada uma das torres que podem ser posicionadas na catenária recém traçada, de acordo com as restrições do perfil.

21. Na subrotina DETTIP é definido o tipo de cada torre locada na subrotina LOCAR. Conhecidos o tipo de uma torre (de DETTIP) e a altura (de LOCAR), é determinado o custo da mesma na subrotina DETCUST.

22. A subrotina SEL ECT seleciona a próxima torre a ter sua catenária traçada, até se atingir a profundidade de pesquisa ideal para o trecho (ver capítulo II).

23. DETSUC é a subrotina onde são determinados os sucessores do nó que foi expandido, quando o processo de expansão é concluído. É feita uma pesquisa pela lista de torres locadas retendo-se as que correspondem a um maior aproveitamento no trecho considerado. Estas torres são as torres B dos nós sucessores ao nó expandido, nós aqueles que entram na lista ABERTO.

24. Na rotina EXPAND1, todos os valores utilizados para os cálculos são armazenados na memória rápida da máquina, sendo utilizados artifícios para reduzir os recursos de memória necessários. Os nós fechados são armazenados periféricamente em um arquivo de trabalho.

25. Descrição da rotina OTIM: A rotina OTIM encontra o caminho de custo mínimo no grafo orientado e tem a estrutura seguinte:

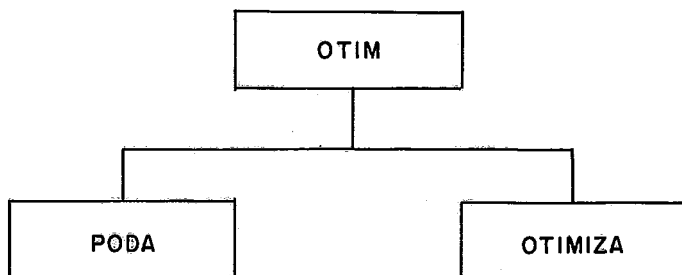


Figura 23 - Rotina OTIM

26. A subrotina PODA. executa as eliminações na lista ABERTO que foram descritas no capítulo IV Seção III, de maneira a reduzir o tempo de processamento quando houver necessidade.

27. A subrotina OTIMIZA determina o próximo nó a ser fechado, isto é, o próximo nó ao qual será aplicado o operador Sucessor, fazendo as atualizações necessárias.

28. A rotina RECUP recupera do arquivo de trabalho contendo a lista de nós fechados, o caminho de custo mínimo no grafo, isto é, a linha alternativa de menor custo. Está determinada a locação ótima, sendo satisfeitas as restrições eletromecânicas e topográficas submetidas.

O programa de otimização está codificado em PL-1.

## Seção 14 EMISSÃO DE RELATÓRIOS

29. Este programa emite relatórios contendo os dados de entrada, resultados do levantamento do perfil bem como o resultado da locação ótima, com um resumo das torres utilizadas.

30. Os relatórios dos dados de entrada contém todas as informações fornecidas ao sistema para processamento. São emitidos relatórios dos dados gerais da linha, dos tipos de torres com suas cartas de aplicação, das alturas de segurança e distâncias-critério, da tabela utilizada para o operador sucessor, dos obstáculos possíveis e da caderneta de campo.

31. Os resultados do levantamento de perfil são impressos com todos os detalhes pertinentes a cada ponto do perfil topográfico (estação, ponto visado, abcissa, cotas central, esquerda e direita, tipos de terreno vegetação, fundação, obstáculos, estado, município e proprietário).

32. O relatório de locação fornece cota e abcissa do ponto de locação de cada torre; tipo, altura e ângulo de deflexão da torre, vão à frente, vão médio e vão gravante da torre; razão entre o vão à ré e o vão à frente, fator limitante da torre, percentagem de aproveitamento vertical e horizontal, códigos de terreno e fundação; peso e custo de cada torre, bem como custo acumulado; código de aviso para casos especiais além do vão equivalente de 10 em 10 torres.

O programa está codificado em COBOL-ANS.

C A P Í T U L O   V I

## C O N C L U S Õ E S

1. A Metodologia proposta neste trabalho permite determinar a locação ótima de torres de transmissão caso não seja usado nenhum critério de poda.

2. Devido ao tempo de processamento necessário para se atingir o resultado ótimo ser proibitivo para a maior parte das aplicações, foram sugeridos artifícios que reduzem consideravelmente o esforço computacional sem reduzir a confiabilidade do resultado.

3. O modelo proposto pode ser utilizado considerando a existência de pontos de locação obrigatória, obstáculos do perfil, ângulo de deflexão na linha e demais ocorrências de projeto. Os critérios de aplicação de torres são gerais, procurando englobar todas as possibilidades existentes.

A P E N D I C E

SEÇÃO 1 - DOCUMENTOS DE ENTRADA PARA O  
SISTEMA MECANIZADO

São apresentados os documentos de entrada para o sistema mecanizado.



ELETROSUL

# LOCAÇÃO DE TORRES DE TRANSMISSÃO CARTÃO EXEC.

DOCUMENTO

L	T	T	X
1	2	3	4

COD. LINHA

5	6	7

VERSÃO

8

GRAVA-TUDO	F	L	T	P	C	F	O	D	Z	P ou C	F ou T	DESNÍVEL	VR/VF	PRIMEIRA TORRE																	ÚLTIMA TORRE																																								
														TIPO TORRE	ALTURA (m)	VÃO MAX. FRENTE (m)	POSIÇÃO						TIPO TORRE	ALTURA (m)	VÃO MAX. RE (m)	POSIÇÃO																																													
																	ESTACÃO		PT. VIS.	DIST. PROGRESSIVA (m)		ESTACÃO				PT. VIS.	DIST. PROGRESSIVA (m)																																												
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80

## OPÇÕES DE IMPRESSÃO

DOCUMENTO

L	T	T	R
1	2	3	4

## CADASTRO DAS LINHAS

### LEITURA DO CADASTRO

#### LINHAS

COD. LINHA	C	L	DADOS L	CADERNETA DE CAMPO																PERFIL				LOCAÇÃO E TORRES																																										
				Ø ou 1	TRECHO								Ø ou 1	TRECHO				Ø ou 1	TRECHO				Ø ou 1	TRECHO																																										
					DE				PARA					DE		PARA			DE		PARA																																													
					ESTACÃO		PVIS		ESTACÃO		PVIS			DE (m)	PARA (m)	DE (m)	PARA (m)		DE (m)	PARA (m)	ESTACÃO	PVIS		ESTACÃO	PVIS																																									
5				8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70

## CADASTRO DAS TABELAS

### LEITURA DO CADASTRO

#### TABELAS

C	T	FUNÇÃO		DADOS ALT.		GRUPOS T. TORRE		COD. PERF.	TUDO													
		Ø ou 1	ALTURA	Ø	Ø ou 1	TENSÃO (KV)	Ø ou 1		TENSÃO (KV)	Ø ou 1	TENSÃO (KV)											
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

## IMPRESSÃO DO PROCESSAMENTO

### PROCESSAMENTO

#### DADOS

COD. LINHA	P	DADOS											PERFIL E	PERFIL I	NÓS FECHADOS	LOC. ÓTIMA								
		DADOS LINHAS	DADOS TORRES	TABELA F	DADOS PERFIL	ALT. E DIST. SEG.	CÓDIGOS PERFIL	COD. CADER. CAMPO																
5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30







ELETROSUL

# LOCAÇÃO DE TORRES DE TRANSMISSÃO DADOS DAS TORRES

DOCUMENTO			
L	T	T	T
1	2	3	4

COD. LINHA			
		5	6 7

IRA		TENSÃO	
	8		9 10 11

CARTA DE APLICAÇÃO - FATORES LIMITANTES DEVIDO A ESFORÇOS VERTICAL E TRANSVERSAL															
VERSÃO	A/S	TIPO DA TORRE	SEQ.	ÂNGULO MÁXIMO		VÃO MÉDIO MAX. (m)	ESFORÇO TRANS. NAS MISULAS (kg)	ESFORÇO VERTICAL - CABOS		ESF. VERT. - PARA - RAIOS					
				GRAU	MIN.			VÃO GRAVANTE MIN. (m)	PARC. VÃO GRAV. POSITIVO (m)	VÃO GRAVANTE MAX. (m)	PARC. VÃO GRAV. NEGATIVO (m)	VÃO GRAVANTE MIN. (m)			
12	13	14	17	18	20	24	28	39	42	45	46	50	53	54	57
			1												

DOCUMENTO			
L	T	T	T
1	2	3	4

COD. LINHA			
		5	6 7

IRA		TENSÃO	
	8		9 10 11

CARTA DE APLICAÇÃO - FATORES LIMITATIVOS DEVIDO AS CADEIAS - TORRES DE SUSPENSÃO																	
VERSÃO	A/S	TIPO DA TORRE	SEQ.	ÂNGULO		TRAÇÃO LONG. - CALC. BAL. (Kg)	PRES. VENTO CALC. BAL. (Kg/m²)	FORÇA DE VENTO (Kg)	CARGA DE ROTURA (Kg)	PESO DA CADEIA (Kg)	PRES. VENTO P/CALC. (Kg/m²)	TRAÇÃO LONG. P/CALC. (kg)	ESFOR. MIN. (kg)				
				GRAU	MIN.												
12	13	14	17	18	20	24	28	31	34	35	38	43	46	50	53	54	57
			3														

X





















































CENTRAIS ELÉTRICAS SULL CC ERASIL S. A. ELETROSUL  
 LTT - LCCACAO OTIMA DE TRANSMISSAO  
 COJ LINHA 500 KV SALIC SANTIAGO-IVAIPORA PRIMEIRO TESTE LTT

ESPLTP21  
 PAG - 2

PERFIL TOPOGRAFICO		MUNICIPIC-ESTAC		PROPIETARIO										
ESTACA	PT. VISADO	ACEISSA (M)	ESQUER	CENTRAL	DIREI	ANGULG G M S	TERR VEG.	TIPO	TIPO	FUND.	OBST.	PROIB-	OBRI	PROPIETARIO
810	3	82457.50	765.46	762.56	759.86	NF NF NF	04	C2	CI	NF				GUARAPUAVA -PP NF
810	6	82485.54	762.50	760.00	757.70	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PP NF
810	811	82505.56	760.18	757.08	754.58	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	3	82510.37	759.37	756.27	753.57	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	6	82532.56	753.21	750.41	747.91	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PP NF
811	9	82540.37	752.23	749.98	747.88	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	12	82552.81	748.42	745.92	743.62	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	15	82583.81	742.68	740.38	738.48	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	18	82619.54	738.85	734.75	732.85	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	21	82650.37	732.53	730.63	728.73	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PP NF
811	24	82658.81	730.61	728.91	727.21	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	27	82674.69	728.50	727.00	725.70	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	30	82691.06	727.98	726.48	724.98	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
811	812	82695.62	727.50	725.90	724.60	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	3	82698.44	727.33	725.83	724.33	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	6	82705.19	725.26	722.56	720.06	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	9	82726.62	719.25	716.15	712.25	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	12	82741.31	712.65	710.15	707.95	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	15	82746.21	710.49	707.75	705.45	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	18	82775.56	697.19	694.45	692.39	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	21	82821.44	680.28	677.78	675.68	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	24	82822.50	679.99	677.69	675.79	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	27	82877.44	659.26	657.16	655.06	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	30	82885.81	651.94	651.05	649.25	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
812	31	82928.62	642.01	638.97	640.54	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PP NF
812	813	82967.69	630.72	630.16	630.35	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	1	82980.81	627.45	626.93	627.30	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	2	83010.31	626.74	621.41	627.50	NF NF NF	04	03	01	12				GUARAPUAVA -PR NF
813	3	83030.75	627.68	626.18	625.28	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	6	83054.75	635.23	638.13	643.53	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	9	83086.56	653.02	657.22	661.62	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	12	83108.81	665.54	669.54	673.54	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	15	83132.94	678.27	682.07	686.07	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	18	83163.87	693.30	696.90	700.50	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF
813	21	83188.50	702.54	706.14	709.94	NF NF NF	04	03	01	NF				GUARAPUAVA -PR NF

NOTA: NF - DADO NAO FORNECIDO.







