

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SÍNTESE DE MECANISMOS
ATRAVÉS DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

NEWTON SURE SOEIRO

FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
MARÇO - 1983

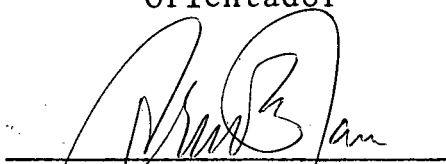
SÍNTESE DE MECANISMOS
ATRAVÉS DE MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

NEWTON SURE SOEIRO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA", ESPECIALIDADE:
ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETO, E
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

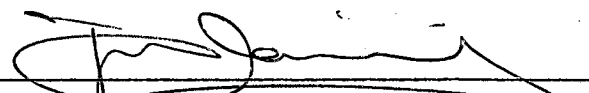


Prof. José Carlos Zanini, Ph.D.
Orientador

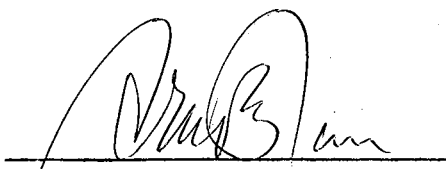


Prof. Arno Blass, Ph.D
Coordenador de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

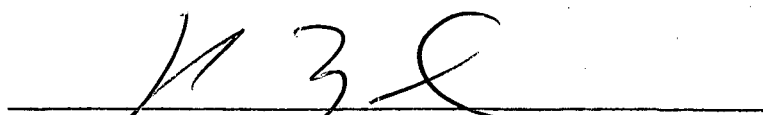
APRESENTADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA, COMPOSTA POR:



Prof. José Carlos Zanini, Ph.D.



Prof. Arno Blass, Ph.D.



Prof. Nelson Diogenes do Valle, Dr.Ing.

À minha esposa Lucidalva e a
meus filhos Thiago e Laila

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

- Ao professor José Carlos Zanini, pela orientação;
- À Universidade Federal do Pará e ao PICD, pelo suporte financeiro;
- Aos amigos Antonio Bastos, Carlos Rocha, José Cangussu e Nicodemus Lima, pelo apoio e interesse;
- Ao Josemar Maso, pelo trabalho de datilografia;
- Ao Roberto José Dias, pela qualidade dos desenhos;
- Aos funcionários do NPD da UFSC e, em especial, ao amigo Vilton Wronski Ricardo, pela presteza no atendimento;
- E a todos os demais colegas e professores do Centro Tecnológico do UFSC que, de uma forma ou de outra, colaboraram durante o Curso de Pós-Graduação.

S U M Á R I O

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
<u>CAPÍTULO I</u> - INTRODUÇÃO	01
Revisão Bibliográfica	02
Objetivos da Investigação	03
<u>CAPÍTULO II</u> - TEORIA DE OTIMIZAÇÃO APLICADA À SÍNTESE DE MECANISMOS	05
2.1 - Introdução	05
2.2 - O Problema de Programação não Linear	06
2.2.1 - Representação Geométrica do Problema de Programação não Linear	07
2.3 - Otimização e o Problema Real	09
2.4 - A Função Objetiva	12
2.5 - Os Cinco Problemas Básicos em Síntese de Mecanismos	15
2.5.1 - Geração de Trajetória	15
2.5.2 - Movimento Coplanar	19
2.5.3 - Coordenação da Trajetória	19
2.5.4 - Geração de Função	21
2.5.5 - Coordenação Angular	21
<u>CAPÍTULO III</u> - A APLICAÇÃO DO SIMPLEX NA SÍNTESE DE MECANISMOS	24

3.1 - Introdução	24
3.2 - O Método Simplex	24
3.3 - Modificações do Método para a Aplicação em Síntese	29
3.4 - Repercussões do Novo Método na Solução dos Problemas de Síntese	31
3.5 - O Programa SIMPLEX	34
 <u>CAPÍTULO IV - NOVOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA APLICAÇÃO</u>	
EM SÍNTESE	36
4.1 - Introdução	36
4.2 - Métodos de Powell com Uso de Funções Penalidade	37
4.2.1 - Método de Powell	38
4.2.2 - Função Penalidade Interior de Desigualdade ..	40
4.2.3 - Função Penalidade Exterior de Desigualdade ..	41
4.2.4 - Função Penalidade de Igualdade	41
4.2.5 - O Programa POWELL	42
4.3 - O Método Flexplex	44
4.3.1 - A Estrutura do Algoritmo	47
4.3.2 - O Programa FLEXPLEX	49
 <u>CAPÍTULO V - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA TEORIA DE</u>	
OTIMIZAÇÃO	51
5.1 - Introdução	51
5.2 - Mecanismo de Alimentação da Linha em uma Máquina de Costura	51
5.3 - Mecanismo de Movimentação de um Produto em uma Linha de Montagem	53
5.4 - Mecanismo para Confecção de Tapetes	59

5.5 - Mecanismo da Cadeira para Paraplégico	68
<u>CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	79
6.1 - Conclusões	79
6.2 - Recomendações	81
<u>APÊNDICES</u>	
I - Teorema de Robert-Chebyshev	82
II - Métodos de Zanini de Seleção de Pontos na Curva Gerada	87
III - A Equação da Malha	94
IV - Determinação de V_N na Reflexão, Expansão e Contração do Simplex	98
V - Procura Unidimensional por "Golden Section"	103
VI - Interpolação Quadrática	107
VII - Os Programas de Otimização	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154

RESUMO

São apresentados elementos da Teoria de Otimização para a síntese de mecanismos articulados planos de quatro barras, utilizando-se uma notação uniforme para os cinco casos básicos da síntese: geração de trajetória, movimento coplanar, coordenação da trajetória, geração de função e coordenação angular.

Os procedimentos de programação não linear de Powell, Simplex e Flexplex são apresentados e, posteriormente, aplicados em quatro casos específicos: um mecanismo de alimentação da linha em uma máquina de costura, um mecanismo para movimentação do produto em uma linha de montagem, um mecanismo para confecção de tapetes e um mecanismo da cadeira para paraplégicos.

Os programas computacionais desenvolvidos e utilizados na solução dos vários problemas mostraram-se adequados ao processo de síntese e são apresentados de forma resumida no trabalho.

ABSTRACT

Elements of the Optimization Theory for four-bar linkage synthesis are presented, using a uniform notation for the five basic cases on synthesis, i.e., path generation, coplanar motion, path coordination, function generation and angular coordination.

The nonlinear programming procedures of Powell, Simplex and Flexplex are presented and then applied to four specific cases: a feeding mechanism for a stitching machine, a mechanism to feed parts in a production line, a mechanism for a knitting process and a mechanism of a chair for a disabled person.

The computer programs developed and utilized in several problems have shown to be suitable for the synthesis process and are presented in a short form in this work.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Coeficiente de reflexão
b	Coeficiente de contração
c	Coeficiente de expansão
E'	Área entre a curva desejada e a gerada
E_1	Erro entre os pontos da curva desejada e da gerada
E_2	Erro entre a posição angular desejada e a gerada, do plano acoplador
$f(X), f(V)$	Função objetiva
$g_j(X), g_j(V)$	Restrições de desigualdade
$G(g, r_j)$	Função penalidade de desigualdade
$h_j(X), h_j(V)$	Restrições de igualdade
$H(h, r_j)$	Função penalidade de igualdade
H_i	Limite superior para L_i
L_i	Comprimento das barras do mecanismo
m	Número de restrições de igualdade
M_i	Limite inferior para L_i
n	Número de parâmetros a serem otimizados
p	Número de restrições de desigualdade
S_i	Direções de procura
$T(V)$	Funcional de restrições
$U(V, r_j)$	Função objetiva modificada
V	Vetor que contém os parâmetros a serem otimizados
V_*	Ponto refletido
V_{**}	Ponto expandido
V_{***}	Ponto contraído

V_i^*	Ponto reduzido
\bar{V}	Centróide dos pontos, excluindo aquele com o valor máximo de $f(V)$
V_h	Ponto de erro máximo
V_ℓ	Ponto de erro mínimo
V_N	Novo ponto
W_1	Fator peso
W_2	Fator peso
α_i, β_i	Coordenadas dos pontos da curva gerada
α_i^*, β_i^*	Coordenadas dos pontos da curva desejada
ϵ	Parâmetro utilizado na convergência do processo iterativo
$\phi^{(k)}$	Critério de tolerância no estágio k da busca do mínimo
γ_i	Posição angular, gerada do plano do acoplador
γ_i^*	Posição angular, desejada do plano do acoplador
θ_{2i}	Posição angular da manivela do mecanismo gerado
θ_{2i}^*	Posição angular da manivela do mecanismo desejado
θ_{3i}	Posição angular da barra acopladora do mecanismo gerado
θ_{3i}^*	Posição angular da barra acopladora do mecanismo desejado
θ_{4i}	Posição angular da barra de saída do mecanismo gerado
θ_{4i}^*	Posição angular da barra de saída do mecanismo desejado

C A P Í T U L O I

INTRODUÇÃO

A teoria da síntese de mecanismos está apoiada em três processos distintos a saber: síntese geométrica, síntese analítica e síntese numérica.

Os métodos geométricos e analíticos estão baseados no conceito de pontos de precisão. Estes definem as características do movimento de um ponto situado no plano acoplador e podem apresentar-se de modo finito, infinitesimal e até mesmo múltiplo, ou seja, numa combinação de posições finitas e infinitesimais, como na Teoria das Posições Multiplamente Separadas, desenvolvida por Tassar [18].

As teorias já mencionadas permitem que sejam especificados, no máximo, cinco pontos de precisão, que são, em geral, suficientes para a especificação das características do movimento. Porém, a especificação dos pontos de precisão gera dificuldades ao projetista, pois diferentes combinações de pontos de precisão produzem mecanismos completamente diferentes, que apresentam características de movimento intermediário distintas entre esses pontos.

Devido às dificuldades geradas pela especificação dos pontos de precisão, o método numérico torna-se uma alternativa atraente ao projetista, pois se deixa de lado a fundamentação no ponto de precisão e, em seu lugar, um número maior de pontos são especificados para definir a forma geral do movimento, mas sem a incômoda ênfase na exatidão. Desta forma, uma solução mais aceitável

deverá aparecer com frequência.

Nesta exposição serão utilizadas técnicas de programação não linear, que, ao lado de uma formulação adequada para a análise do sistema físico (mecanismo), levam-nos a resultados expressivos para os problemas da síntese de mecanismos planos de quatro barras, aqui abordados.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Fox e Willmert [5] publicaram em 1967 um artigo no qual os mecanismos planos foram estudados usando síntese ótima. Restrições de desigualdade foram, pela primeira vez, consideradas em síntese de mecanismos. Existiam as restrições impostas pelo projeto sobre os parâmetros do mecanismo, tais como: comprimento de barras, posições dos pivôs, etc. A solução é encontrada utilizando uma técnica iterativa, denominada Técnica Sequencial de Minimização sem Restrições [3].

Em 1968, Tomas [19] também utilizou técnicas de programação não linear, procurando uma solução otimizada para o mecanismo de quatro barras.

Em 1971, Fox [6] apresentou uma solução para o problema de geração de função, utilizando mecanismos planos de quatro barras, nos quais impôs restrições referentes a ângulos de transmissão.

Suh e Mecklenburg [15] desenvolveram um método geral de síntese ótima, baseado em matrizes de deslocamento, que são utilizadas para formar as equações que compõem a função objetiva.

Em 1975, Zanini [20] elaborou sua tese de doutoramento, utilizando o método simplex de Nelder e Mead [12], modificado pa-

ra acomodar restrições, solucionando o problema do projeto de um mecanismo alimentador de uma máquina de empacotar, bem como outros problemas básicos da síntese de mecanismos.

Suh e Radcliffe [16], em 1978, apresentaram alguns exemplos de soluções para os problemas de geração de função e geração de trajetória, utilizando matrizes de deslocamento, juntamente com o método de Powell [13].

Na dissertação, ora apresentada, são utilizados os métodos Simplex, Powell e Flexplex para solucionar problemas práticos da síntese de mecanismos. Restrições são consideradas.

OBJETIVOS DA INVESTIGAÇÃO

A síntese de mecanismos, através de métodos de otimização, preocupa-se com a determinação dos parâmetros definidores do mecanismo que levam a um erro global mínimo entre o movimento especificado e o gerado. Estes parâmetros são obtidos fazendo-se com que métodos de otimização atuem sobre a função erro, de tal forma, que um mínimo seja encontrado. Os parâmetros que definem este mínimo representam uma possível solução para o problema.

Neste trabalho procura-se, a partir de funções objetivas (função erro) elaboradas com o mesmo conjunto básico de especificações $\{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$, utilizado por Tesar [18] e Zanini [20], empregar os métodos de programação não linear de Powell, Simplex e Flexplex para solucionar os problemas da síntese de mecanismos, de modo a desenvolver uma estrutura computacional, permitindo ao projetista da área de mecanismo solucionar os cinco problemas básicos da síntese, ou seja, geração de trajetória, movimento coplanar, coordenação da trajetória, geração de função e coordena

ção angular, aliviando sobremaneira as dificuldades geradas, quando se especifica o movimento por meio de pontos de precisão.

C A P Í T U L O I I

TEORIA DE OTIMIZAÇÃO APLICADA À
SÍNTESE DE MECANISMOS2.1. INTRODUÇÃO

A incômoda especificação dos pontos de precisão, na síntese analítica, pode ser relaxada pela síntese aproximada através de métodos de otimização. Na otimização cai a fundamentação da síntese de mecanismos no ponto de precisão, podendo, então, o projetista exercer maior liberdade na especificação do problema. Se fôr um maior número de pontos utilizado na definição do problema, poderá resultar uma solução mais adequada, já que não irá existir a necessidade de o erro ser zero em todos os pontos de projeto, mas, sim, que o valor da soma dos quadrados dos erros, entre a solução gerada e a que fora especificada, seja um mínimo. O movimento gerado tende, então, a aproximar-se o mais possível ao movimento especificado em toda a sua extensão. O que comanda o método são a função objetiva e as restrições de igualdade e desigualdade impostas ao problema.

O problema de síntese de mecanismos é não linear, exigindo, portanto, a aplicação de técnicas de otimização não lineares. A não linearidade do problema implica na não existência de garantia de que a otimização termine no extremo global da função. Isto é oportuno para o problema de síntese de mecanismos, pois suposições iniciais distintas podem levar a mínimos locais diversos.

O projetista tem, assim, alternativas que permitirão acomodar com mais facilidade limitações como: comprimento de barras, ângulos de transmissão, etc... serão mais facilmente acomodadas.

2.2. O PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

O problema de programação não linear pode ser formalmente estabelecido como:

$$\text{minimizar } f(X) \quad (1)$$

onde $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^t$ é o vetor de parâmetros do projeto, submetidos a m restrições de igualdade lineares e/ou não lineares

$$h_j(X) = 0 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

e a $(p-m)$ restrições de desigualdade lineares e/ou não lineares

$$g_j(X) \geq 0 \quad ; \quad j = m+1, \dots, p \quad (3)$$

Assim, se o vetor X^* corresponde ao valor mínimo (ótimo) da função,

$$f(X^*) = \min f(X) \quad ; \quad X \in R \quad (4)$$

onde R é o domínio determinado pelas restrições.

As restrições podem se apresentar de forma explícita e implícita. As explícitas referem-se diretamente ao valor das componentes do vetor X , enquanto que as implícitas surgem a partir

da composição de funções que tem como variáveis independentes as componentes de X .

2.2.1. REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR

A minimização de uma função de n variáveis pode ser visualizada em uma hipersuperfície plotada em um sistema de $(n+1)$ coordenadas. Entretanto, não se pode visualizar um espaço n -dimensional, e sendo-se levado a restringir a representação geométrica do problema de programação não linear a um problema de duas variáveis, com a função objetiva plotada como a terceira coordenada no espaço tri-dimensional, como mostrado na figura 2.1. A representação gráfica mais conveniente de $f(X)$ é na forma de contornos com valores constantes para $f(X)$ plotados no plano base com coordenadas x_1 e x_2 .

As restrições de desigualdade definem a fronteira entre uma região possível e uma não possível. Cada desigualdade forma um lado de um polígono fechado que limita a região possível como mostrado na figura 2.1. O número de restrições de desigualdades não é limitado por qualquer número específico, e uma ou mais restrições podem ser redundantes, como indicado por $g_6(X)$ na figura 2.1.

Uma restrição de igualdade define uma curva particular no plano base. O mínimo restrito tem que satisfazer à relação funcional definida pela curva. Portanto, na presença de uma restrição de igualdade, o mínimo tem que estar em algum lugar na linha definida pela restrição de igualdade. Cada restrição de igualdade reduz o número de graus de liberdade de um, e o número máximo de restrições de igualdade tem que ser sempre menor do que o número de va-

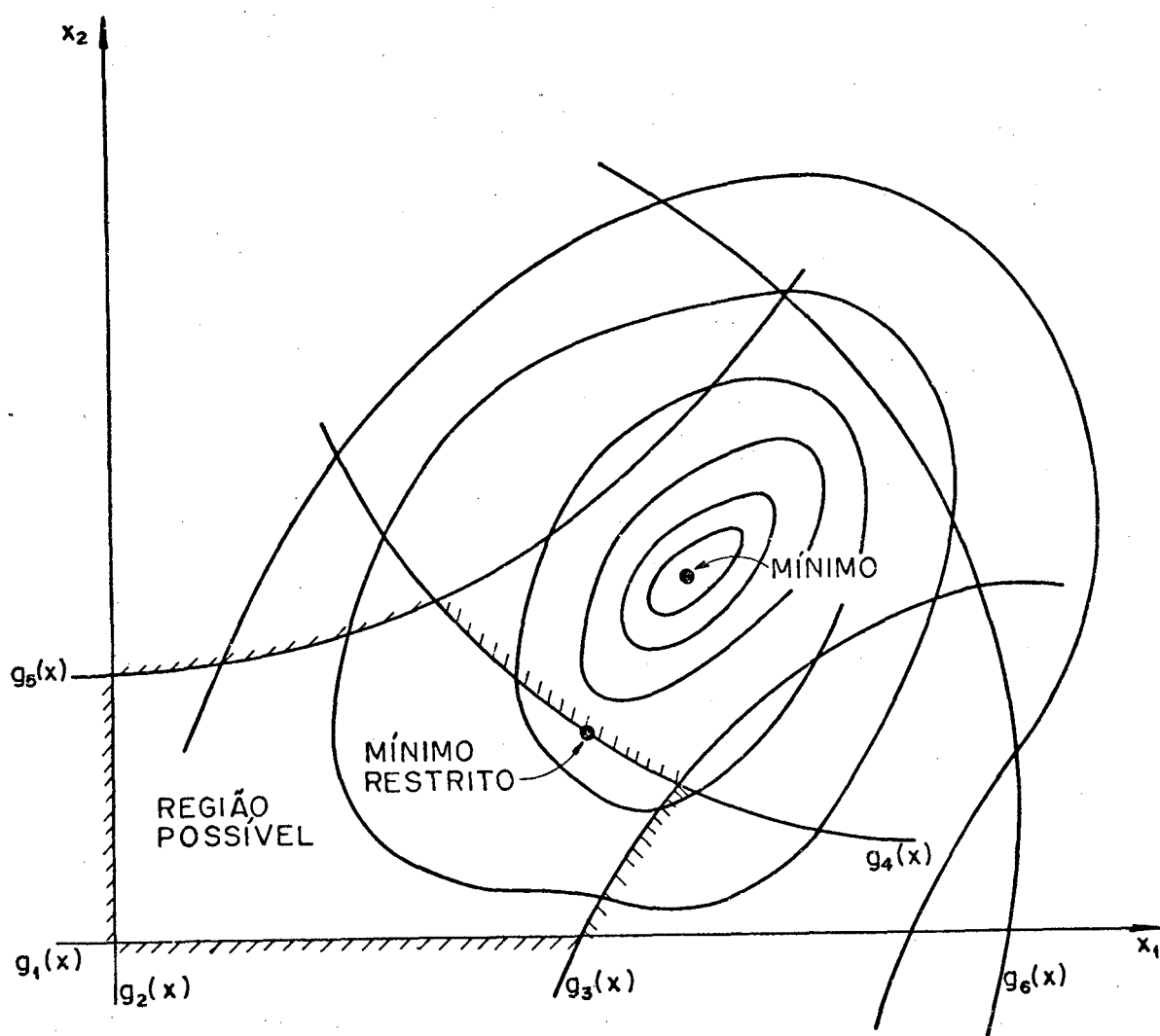


FIGURA 2.1 - Representação geométrica do problema de otimização em duas dimensões

riáveis envolvidas no processo de otimização.

2.3. OTIMIZAÇÃO E O PROBLEMA REAL

Na otimização de um processo real apresentam-se dois grupos de restrições. O primeiro diz respeito às relações funcionais que devem ser levadas em consideração para que o problema seja fisicamente possível. Este grupo compreende as restrições de igualdade. O segundo incorpora limites existentes nos parâmetros que garantem sua compatibilidade física com o processo, bem como as restrições externas impostas ao problema pelo projetista, e compreende as restrições de desigualdade.

Relacionando o processo de otimização ao problema de síntese de mecanismos articulados, é necessário que se minimize

$$f(V) \quad ; \quad V \in E^n \quad (5)$$

onde V é um vetor composto por parâmetros, tais como: comprimento das barras do mecanismo, ângulos que determinam a geometria do mecanismo, posicionamento dos pivôs fixos, etc... A função $f(V)$ está submetida a m restrições de igualdade, representadas pelas equações que descrevem o mecanismo (ver figura 2.2)

$$L_2 \cos \theta_{2j} + L_3 \cos \theta_{3j} - L_4 \cos \theta_{4j} - L_1 = 0$$

$$L_2 \sin \theta_{2j} + L_3 \sin \theta_{3j} - L_4 \sin \theta_{4j} = 0 \quad (6)$$

$$X_j - X_0 - L_2 \cos (\sigma_1 + \theta_{2j}) - R \cos (\sigma_1 + \sigma_2 + \theta_{3j}) = 0$$

$$Y_j - Y_0 - L_2 \sin (\sigma_1 + \theta_{2j}) - R \sin (\sigma_1 + \sigma_2 + \theta_{3j}) = 0 ,$$

isto é, $h_j(V) = 0$; $j = 1, \dots, m$

e (p-m) restrições de desigualdade divididas em dois grupos. Um grupo garante a compatibilidade física do processo

$$L_i > 0 \quad ; \quad i = m+1, \dots, r \quad (7)$$

onde L_i representa o comprimento das barras do mecanismo articulado. O outro grupo compreende as restrições impostas pelo projetista, tais como: valor máximo e mínimo do ângulo de transmissão, tipo de mecanismo, como sejam, manivela balancim, dupla manivela, ou duplo balancim, e restrições sobre as dimensões finais do mecanismo

$$M_i \leq L_i \leq H_i \quad (8)$$

onde M_i e H_i são, respectivamente, os limites inferior e superior para L_i . Todas estas restrições podem ser resumidas por

$$g_j(V) \geq 0 \quad ; \quad j = r+1, \dots, p$$

As equações de (5) a (8) representam totalmente o problema de síntese de mecanismos.

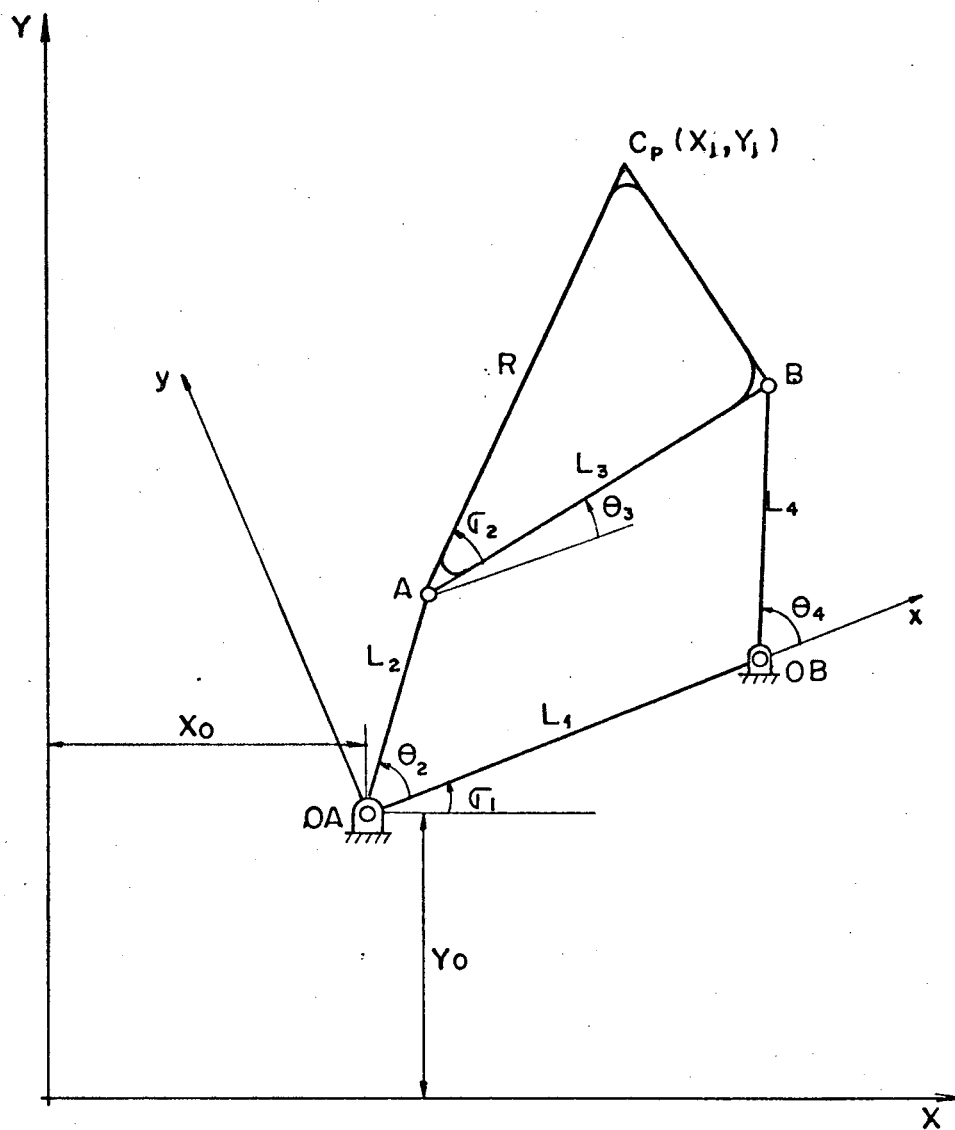


FIGURA 2.2 - Configuração geral para os mecanismos articulados

2.4. A FUNÇÃO OBJETIVA

Conforme mencionado na seção 2.1, a função objetiva deve representar a soma dos quadrados do erro entre o que se deseja obter e o que é obtido. Para tal, foi utilizado o critério dos mínimos quadrados, que juntamente com os três parâmetros do movimento α_i , β_i e γ_i fornece as expressões matemáticas que, combinadas, compõem a função objetiva para cada um dos cinco problemas básicos da síntese de mecanismos articulados de quatro barras. Os parâmetros α_i e β_i são as coordenadas da trajetória traçada por um ponto do plano acoplador e γ_i , as posições angulares deste plano nas posições i (ver figura 2.3).

O erro entre os pontos que definem as posições desejadas e geradas do plano do acoplador é expresso por

$$E_1 = \sum_{i=1}^m W_1 \left[(\alpha_i^* - \alpha_i)^2 + (\beta_i^* - \beta_i)^2 \right] \quad (9)$$

onde (α_i^*, β_i^*) são os pontos desejados e (α_i, β_i) são aqueles gerados pelo mecanismo. W_1 é um fator peso aplicado a cada posição i e é um número positivo.

O erro correspondente à posição angular do plano do acoplador pode ser similarmente expresso como

$$E_2 = \sum_{i=1}^{m-1} W2_i (\Delta\gamma_i^* - \Delta\gamma_i)^2 \quad (10)$$

onde $\Delta\gamma_i^* = \gamma_{i+1}^* - \gamma_i^*$ são os deslocamentos angulares desejados

e

$$\Delta\gamma_i = \gamma_{i+1} - \gamma_i$$

os deslocamentos angulares reais do plano do acoplador do mecanismo gerado. $W2_i$ é outro fator peso.

Os fatores peso $W1_i$ e $W2_i$ são incluídos na avaliação do erro, para que, caso seja necessário obter uma geração mais precisa de certas partes da curva do acoplador, se possa aumentar artificialmente o erro, conseguindo-se assim que o método de otimização atue de forma mais eficiente nas partes referidas acima. Contudo, o restante da curva é sacrificado e torna-se necessário usar de precaução na escolha dos pontos em que deverão ser aplicados os fatores peso.

Deve-se observar que nos problemas onde não haja necessidade do mecanismo descrever pontos com medidas específicas, o número de pontos na curva gerada é tomado em um número maior do que os especificados, sendo por isso necessária uma seleção de pontos gerados, para que, quando da avaliação do erro, se tenha o mesmo número de pontos nas duas curvas. No Apêndice II é apresentado um método de seleção de pontos proposto por Zanini [20].

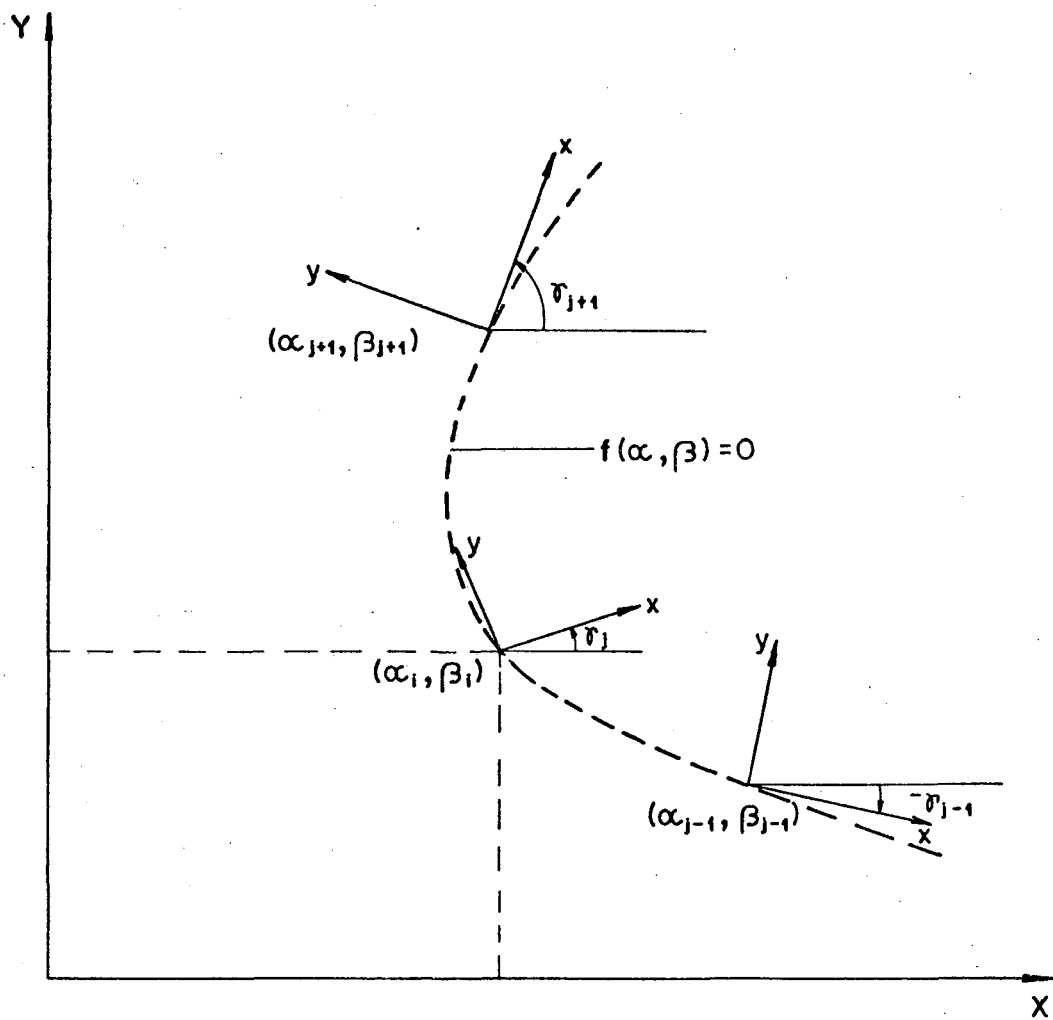


FIGURA 2.3 - Parâmetros do movimento (α_i , β_i e γ_i)

2.5. OS CINCO PROBLEMAS BÁSICOS EM SÍNTESE DE MECANISMOS

2.5.1. GERAÇÃO DE TRAJETÓRIA

O problema de geração de trajetória, como mostrado na figura 2.4, tem o objetivo de guiar um ponto ao longo de uma curva específica. O movimento do ponto é, então, perfeitamente especificado pelo conjunto de parâmetros α_i e β_i , com $i = 1, \dots, m$, onde m representa o número de posições utilizadas para especificar a curva.

Neste caso, a função objetiva é dada por

$$f(V) = E_1 \quad (11)$$

onde E_1 é dado pela equação (9).

Uma outra forma de avaliar a função objetiva é considerar a área entre a curva desejada e a gerada. Esta área pode ser estabelecida como

$$E' = \sum_{i=1}^q \left[\int_{S_i} dA \right] \quad (12)$$

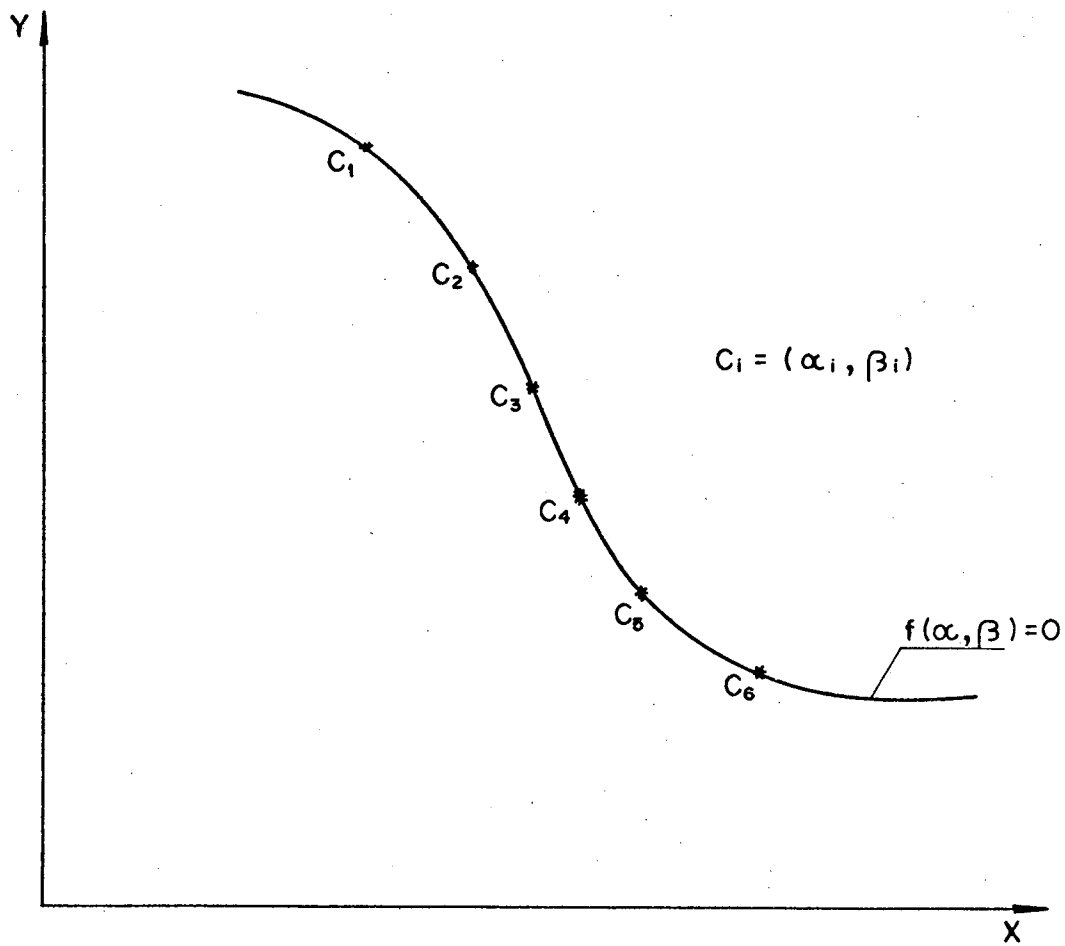


FIGURA 2.4 - Problema de geração de trajetória

onde q é o número de áreas contidas entre a curva desejada e a gerada, S_i é a superfície cercada e dA , um elemento de área da superfície S_i , como mostrado na figura 2.5. Uma avaliação aproximada para o valor da área pode ser determinada, conforme o estabelecido na figura 2.6. A área do triângulo ABD é dada por

$$S_{ABD} = \frac{1}{2} \left\| \vec{a} \times \vec{d} \right\|$$

onde
$$\vec{a} = (\alpha_{i+1}^* - \alpha_i^*) \times \vec{\ell} + (\beta_{i+1}^* - \beta_i) \times \vec{m}$$

$$\vec{d} = (\alpha_i - \alpha_i^*) \times \vec{\ell} + (\beta_i - \beta_i^*) \times \vec{m}$$

logo
$$\vec{a} \times \vec{d} = \left[(\alpha_{i+1}^* - \alpha_i^*) (\beta_i - \beta_i^*) - (\alpha_i - \alpha_i^*) (\beta_{i+1}^* - \beta_i) \right] \times \vec{n}$$

e
$$S_{ABD} = \frac{1}{2} \left\| (\alpha_{i+1}^* - \alpha_i^*) (\beta_i - \beta_i^*) - (\alpha_i - \alpha_i^*) (\beta_{i+1}^* - \beta_i) \right\| \quad (13)$$

Da mesma forma, chega-se à área do triângulo BCD.

$$S_{BCD} = \frac{1}{2} \left\| (\alpha_{i+1}^* - \alpha_{i+1}) (\beta_i - \beta_{i+1}) - (\alpha_{i+1} - \alpha_i) (\beta_{i+1} - \beta_{i+1}^*) \right\| \quad (14)$$

Portanto, a área do quadrilátero será

$$S_{ABCD} = S_{ABD} + S_{BCD}$$

Se (α_j, β_j) for um ponto de precisão $\alpha_j^* - \alpha_j = 0$ e $\beta_j^* - \beta_j = 0$, para este caso, a área a ser considerada é a do triângulo com vértices

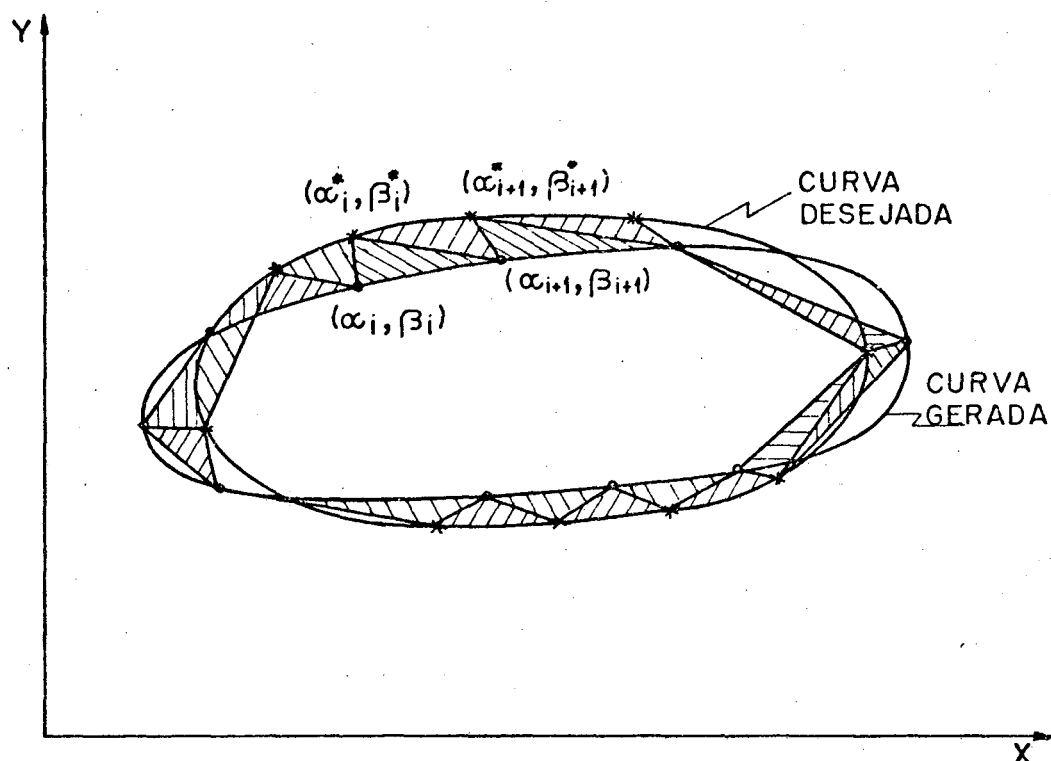


FIGURA 2.5 - Aproximação para a área entre as curvas gerada e desejada

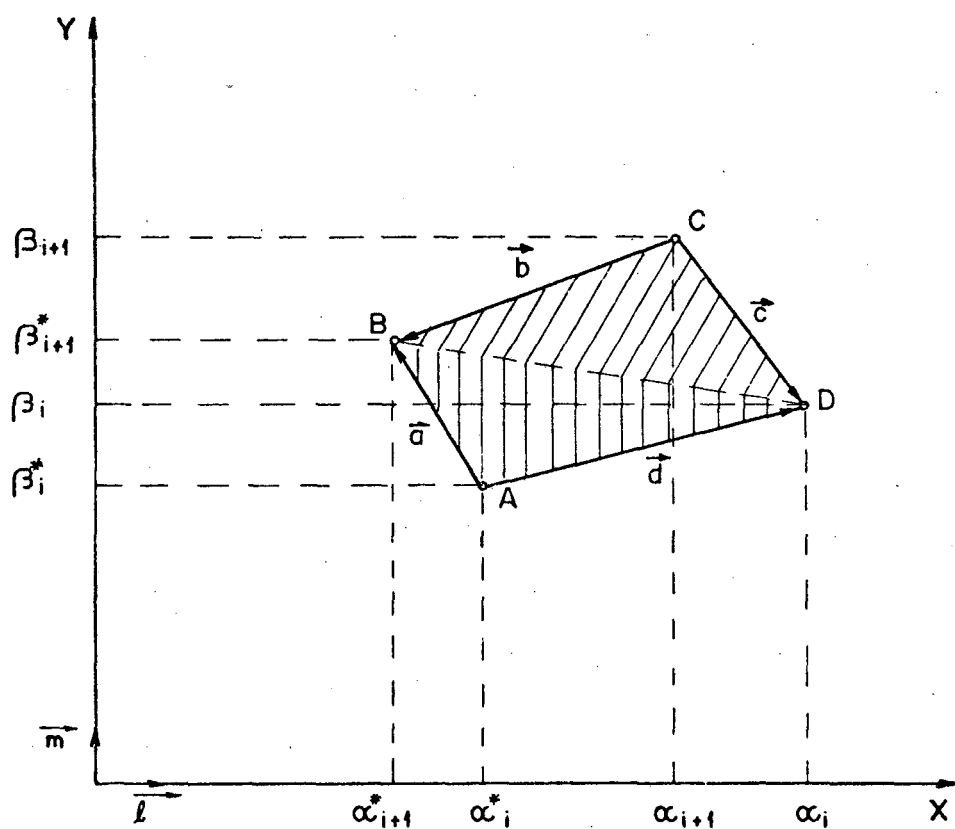


FIGURA 2.6 - Quadrilátero formado por pontos das curvas gerada e desejada

tices $(\alpha_j^*, \beta_j^*); (\alpha_{j+1}^*, \beta_{j+1}^*)$ e $(\alpha_{j+1}, \beta_{j+1})$ e a equação (15) fornece

$$S_j = \frac{1}{2} \left\| (\alpha_{j+1}^* - \alpha_{j+1})(\beta_j - \beta_{j+1}) - (\alpha_{j+1} - \alpha_j)(\beta_{j+1} - \beta_{j+1}^*) \right\| \quad (15)$$

A área total, ou seja, o erro será dado por

$$E' = S_T = \sum_{i=1}^m S_i \quad (16)$$

2.5.2. MOVIMENTO COPLANAR

O problema de movimento coplanar, como mostrado na figura 2.7, tem o objetivo de guiar um plano através de posições pré-estabelecidas. A especificação do problema é feita através dos parâmetros de movimento (α_i, β_i) e γ_i .

A função objetiva é dada por

$$f(V) = E_1 + E_2 \quad (17)$$

onde E_1 e E_2 são dados pelas equações (9) e (10), respectivamente.

A diferença entre este problema e o de geração de trajetória reside no fato de que os deslocamentos angulares do plano do acoplador são levados em consideração na determinação do erro.

2.5.3. COORDENAÇÃO DA TRAJETÓRIA

Este problema é representado na figura 2.8. O objetivo é o de correlacionar as posições angulares da manivela com as posições de um ponto ao longo de uma curva.

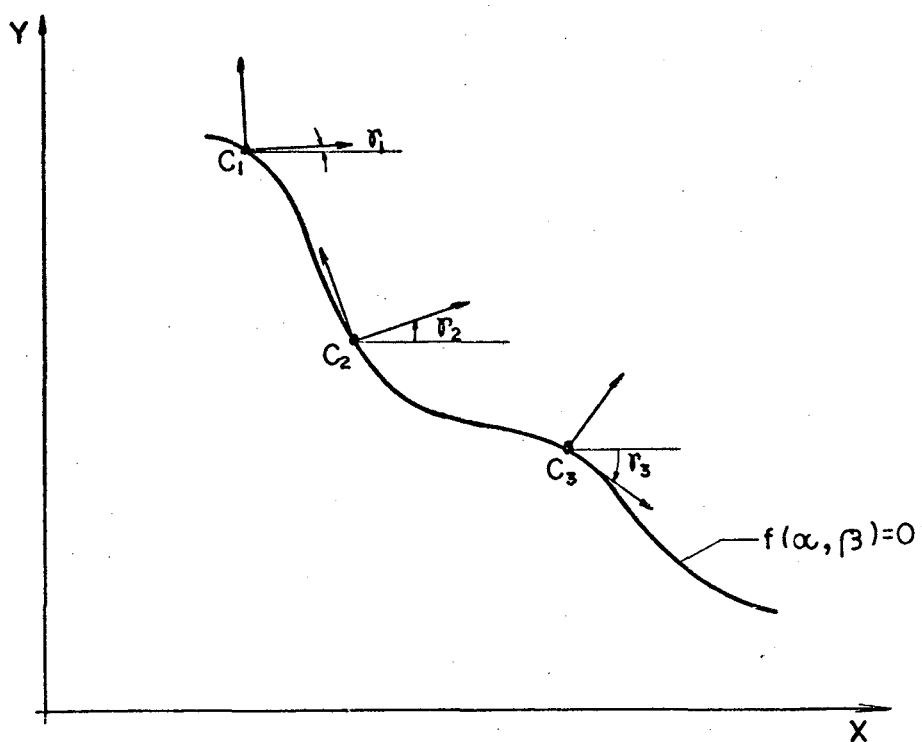


FIGURA 2.7 - O problema de movimento coplanar

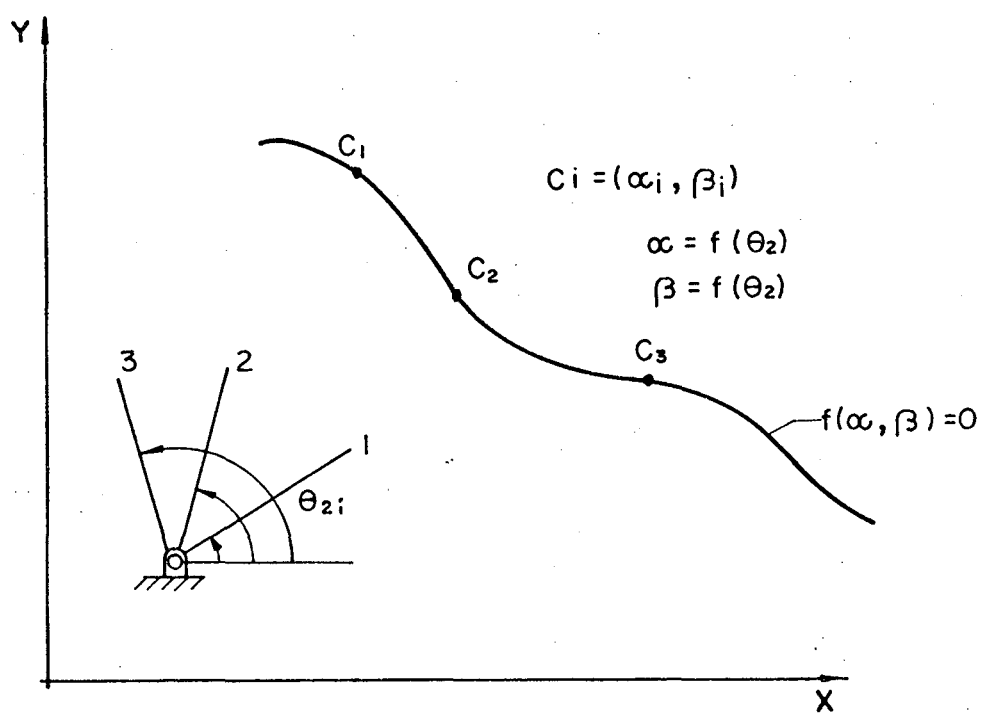


FIGURA 2.8 - O problema de coordenação de trajetória

Duas abordagens distintas podem ser feitas na solução deste tipo de problema. A primeira, transforma o problema de coordenação da trajetória num de movimento coplanar, transferindo o movimento da manivela para a barra acopladora. Obtido o mínimo, a cognação da trajetória é utilizada para obter-se o mecanismo solução para o problema original. Na segunda, o problema é solucionado diretamente, especificando-se θ_{2i} em lugar de γ_i . Em ambos os casos, a função objetiva é dada por

$$f(V) = E_1 + E_2 \quad (18)$$

2.5.4. GERAÇÃO DE FUNÇÃO

A forma gráfica do problema é mostrada na figura 2.9. Neste caso, somente o movimento angular é de interesse. Portanto, a função objetiva é dada por

$$f(V) = E_2 \quad (19)$$

A especificação requer reformulação usando inversão ou cognação angular para facilitar a especificação na forma da equação (19) ou, alternativamente, por solução direta, substituindo θ_{4j} no lugar de γ_i na equação (10), [8].

2.5.5. COORDENAÇÃO ANGULAR DE DUAS BARRAS ADJACENTES

Este problema é um caso particular de geração de função. A diferença, como mostrado na figura 2.10, é que a relação angu-

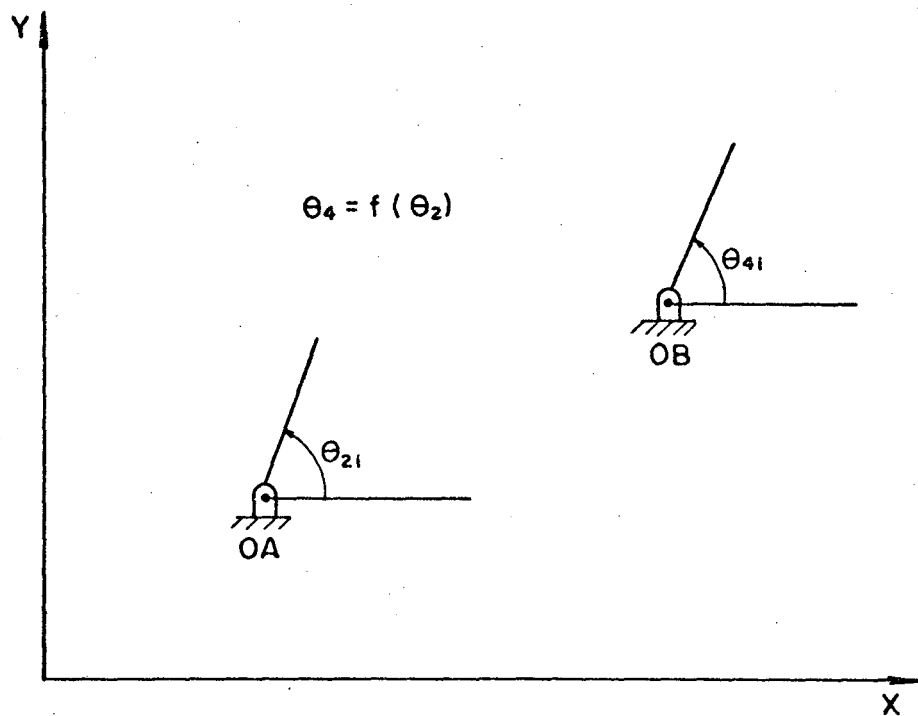


FIGURA 2.9 - O problema de geração de função

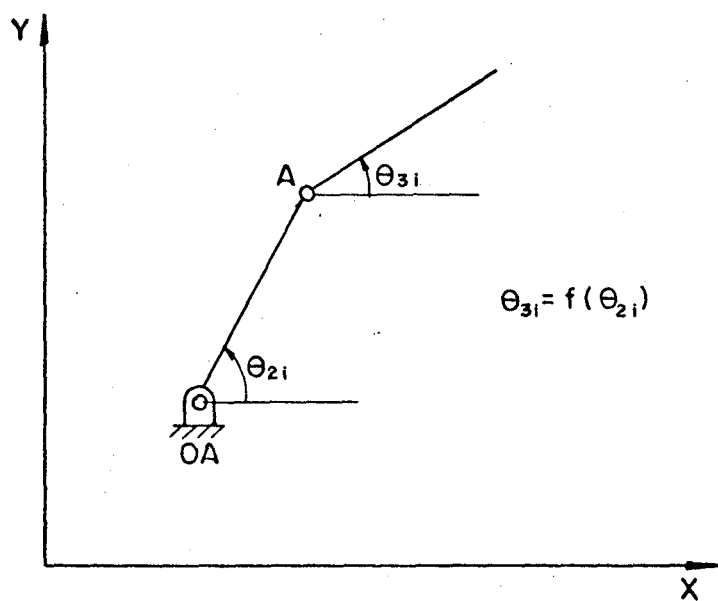


FIGURA 2.10 - Coordenação angular entre duas barras adjacentes

lar é agora entre a manivela e a barra acopladora. De maneira similar ao problema de geração de função, o interesse reside no movimento angular e a função objetiva é dada por

$$f(V) = E_2$$

Os ângulos θ_{3i} são relacionados diretamente com γ_i , considerando o plano móvel colocado no ponto A.

C A P Í T U L O I I I

A APLICAÇÃO DO SIMPLEX NA SÍNTESE
DE MECANISMOS3.1. INTRODUÇÃO

No desenvolvimento da teoria de otimização aplicada à síntese de mecanismos, o método Simplex desempenha papel de destaque, pois sua utilização tem sido explorada com sucesso, tornando-se, assim, um ponto de partida para o estudo e aplicação de novos métodos de programação não linear na solução dos problemas de síntese.

No decorrer dos anos, o método tem sido aperfeiçoado, e uma metodologia própria de abordagem dos problemas de síntese tem sido desenvolvida, melhorando, assim, a eficiência do método, e ainda, tornando simples a utilização de novos métodos na solução dos problemas de síntese de mecanismos.

Neste Capítulo será feito um estudo do método Simplex, como originalmente proposto, e ainda serão apresentadas as modificações introduzidas e seus reflexos no comportamento do método na solução dos problemas.

3.2. O MÉTODO SIMPLEX

O método foi proposto por Nelder e Mead [12] e é uma extensão do método de Spendley, Hext e Himsforth [14]. Este método

minimiza uma função de n variáveis independentes, usando $(n+1)$ vértices de um poliedro no espaço n -dimensional. Cada vértice é definido por um vetor V , que é composto pelos parâmetros definidores de $f(V)$. O vértice do poliedro que produz o maior valor de $f(V)$ é projetado através do centróide dos vértices restantes. Vértices que produzem valores inferiores da função objetiva são, então, encontrados e, substituindo, sucessivamente, os vértices que produzem os valores mais altos de $f(V)$, até que o mínimo seja encontrado. O procedimento para encontrar um vértice, que produza um valor menor de $f(V)$, envolve quatro operações: reflexão, expansão, contração e redução.

A reflexão é definida por

$$V_* = \bar{V} + a(\bar{V} - V_h) \quad (21)$$

onde V_* é o novo ponto refletido, \bar{V} é o centróide dos pontos (excluindo aquele com o maior valor da função), V_h é o ponto de erro máximo e a é uma constante positiva denominada coeficiente de reflexão.

A expansão ocorre quando o valor da função objetiva para o novo ponto V_* é menor do que aquele que leva o mínimo valor da função. É definida como

$$V_{**} = \bar{V} + c(V - \bar{V}) \quad (22)$$

onde V_{**} é o ponto expandido e c é o coeficiente de expansão cujo valor é maior que 1 (um).

Se, por outro lado, o ponto refletido V_* produz um valor maior do que o segundo maior valor da função objetiva, a contração faz-se necessária e o ponto passa a ser definido por

$$V_{***} = \bar{V} + b(V_h - \bar{V}) \quad (23)$$

onde V_{***} é o ponto contraído e b o coeficiente de contração que assume valores entre 0 e 1.

Para o caso em que o valor da função objetiva para o ponto contraído seja maior do que para o V_h anterior, todos os vértices são então reduzidos e suas coordenadas redefinidas pela expressão

$$V_i^* = V_\ell + 0,5(V_i + V_\ell) \quad ; \quad i = 1, \dots, n+1 \quad (24)$$

onde V_ℓ representa o vértice com o menor valor da função objetiva e V_i^* os novos vértices do poliedro contraído. As figuras 3.1, 3.2 e 3.3 ilustram as operações de reflexão, contração e expansão respectivamente, para um problema a duas variáveis.

Nelder e Mead recomendam que os valores dos coeficientes de reflexão, contração e expansão sejam $a = 1$, $b = 0,5$ e $c = 2$. Por outro lado, o critério utilizado para terminar a procura do mínimo consistia em determinar se

$$\left[\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} [f(V_i) - f(\bar{V})]^{+2} \right]^{1/2} \leq \epsilon \quad (25)$$

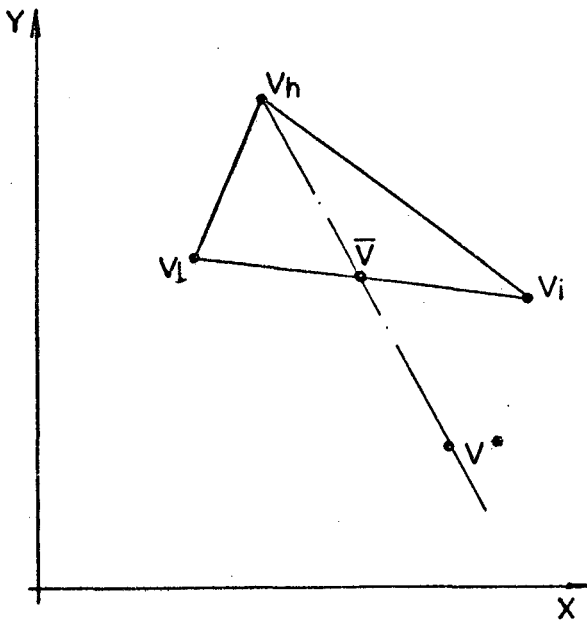


FIGURA 3.1 - Reflexão no Simplex

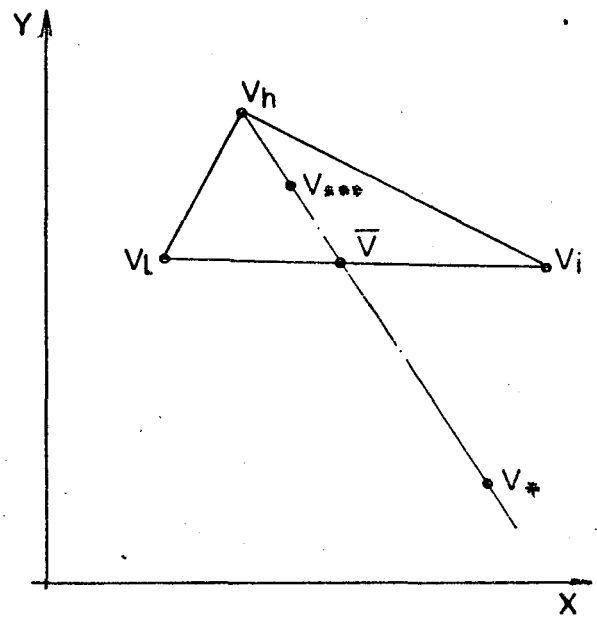


FIGURA 3.2 - Contração no Simplex

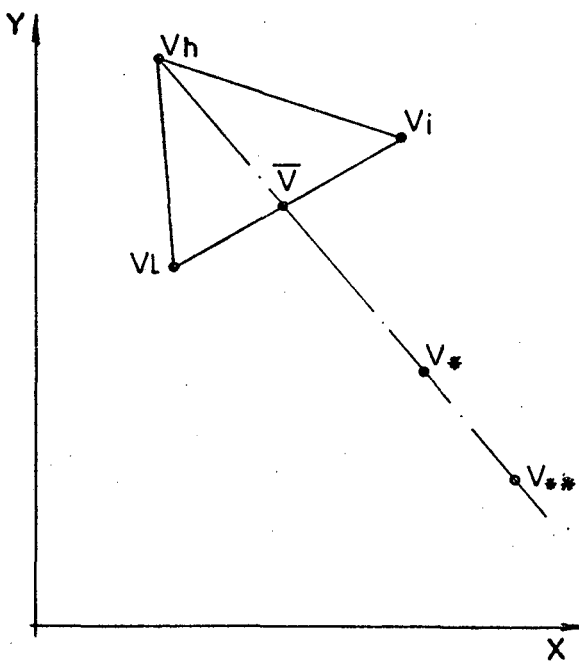


FIGURA 3.3 - Expansão no Simplex

onde ϵ é um número pequeno arbitrário e $f(\bar{V})$ é o valor da função objetiva no centróide, sendo que \bar{V} é definido por

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^{n+1} V_i \right) - V_h \right] \quad (26)$$

O poliedro inicial é constituído pelo ponto tomado como hipótese inicial e os seguintes pontos adicionais

$$V_i = V_1 + DV_{j,i} ; i = 2, 3, \dots, n+1 ; j = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

onde DV é determinado da seguinte tabela

i	DV _{1,i}	DV _{2,i}	...	DV _{n-1,i}	DV _{n,i}
2	p	q	...	q	q
3	q	p	...	q	q
4	q	q	...	q	q
.
.
.
n	q	q	...	p	q
n+1	q	q	...	q	p

onde p e q são dados pelas expressões

$$p = \frac{t}{n\sqrt{2}} (\sqrt{n+1} + n - 1) \quad (28)$$

$$q = \frac{t}{n\sqrt{2}} (\sqrt{n+1} - 1) \quad (29)$$

sendo t o tamanho do lado do poliedro.

3.3. MODIFICAÇÕES DO MÉTODO PARA A APLICAÇÃO EM SÍNTESE

Algumas modificações foram introduzidas no método de Nelder e Mead para que este, quando aplicado na solução de problemas de síntese, apresentasse um bom rendimento. Estas modificações introduzidas referem-se à geração dos vértices do poliedro inicial, critério de convergência e aceitação de restrições impostas ao problema.

A forma escolhida para a geração dos n vértices restantes do poliedro foi a mesma utilizada por M. J. Box [1] no método denominado Complex. Neste método, os vértices do poliedro são gerados de forma que os parâmetros se enquadrem dentro dos limites permissíveis, através da expressão

$$V_i = M_i + (H_i - M_i) \text{sen}^2 \lambda R \quad ; \quad i = 2, 3, \dots, n+1 \quad (30)$$

onde V_i são os parâmetros a serem otimizados e λR é qualquer número aleatório.

O critério de convergência utilizado foi uma combinação de dois critérios bastante utilizados em programação não linear. Com esta combinação, a convergência somente é obtida quando a mesma precisão relativa em um vetor V contendo os parâmetros a serem otimizados e $f(V)$, a função objetiva, é atingida, isto é, quando as seguintes relações forem satisfeitas

$$\left\| \frac{f(V_h) - f(V_l)}{f(V_l)} \right\| \leq \varepsilon \quad (31)$$

onde $f(V_h)$ é o valor da função objetiva que corresponde ao vértice que atinge o erro máximo; $f(V_l)$, o que atinge o erro mínimo.

$$\left\| \frac{V_h - V_l}{V_l} \right\| \leq \varepsilon \quad (32)$$

onde V_h corresponde a $f(V_h)$ e V_l a $f(V_l)$.

Com referência às restrições do problema, modificações foram introduzidas para que as restrições físicas inerentes ao mecanismo fossem incorporadas ao processo, bem como limitações de tamanho nos parâmetros a serem otimizados. As restrições físicas representadas pelo conjunto de equações (6) foram substituídas por uma única restrição de desigualdade, representada por

$$D \geq 0 \quad (33)$$

onde $D = P_1^2 + P_2^2 - P_4^2$ se refere à expressão

$$\theta_3 = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{P_1 \pm \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - P_4^2}}{P_2 + P_4}$$

apresentada no Apêndice III.

Quando, em algum ponto, a restrição acima é violada, faz-se a substituição deste ponto pelo obtido através da expressão

$$V_N = 0,25(3V + V_h) \quad (34)$$

onde V é a posição rejeitada que não satisfaz à restrição. Detalhes a respeito da aplicação desta expressão na reflexão, expansão e contração do simplex podem ser encontrados no Apêndice IV.

Para a violação de restrições referente a limitações do tamanho dos parâmetros, duas expressões são utilizadas

$$V_i = M_i + (H_i - M_i) \text{sen}^2 \lambda R \quad (35)$$

ou

$$V_i = H_i - (H_i - M_i) \text{sen}^2 \lambda R \quad (36)$$

$$i = 1, \dots, n$$

O uso de uma ou outra expressão dependerá exclusivamente de qual dos limites imposto à variável é violado. Para o caso em que a violação ocorra no limite inferior da variável, a equação (35) definirá o ponto a ser adotado, caso contrário, será utilizada a equação (36).

3.4. REPERCUSSÕES DO NOVO MÉTODO NA SOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DE SÍNTESE

Com a modificação introduzida no método Simplex, possibilitando que problemas com restrições pudessem ser resolvidos, tornou-se necessário que, de alguma forma, as suposições iniciais fossem geradas de modo a satisfazer as restrições impostas ao pró

blema. Em consequência, foi utilizada a geração descrita na seção 3.3, pois, como se pode observar pela equação (36), existe a garantia de que todos os parâmetros gerados se encontram dentro da faixa permissível, isto é, entre o limite inferior (M_i) e o superior (H_i) das variáveis a serem otimizadas, uma vez que, para qualquer valor de λR

$$0 \leq \sin^2 \lambda R \leq 1 \Rightarrow M_i \leq V_i \leq H_i$$

Por outro lado, enquanto o procedimento de geração proposto por Nelder e Mead levava, em vários problemas, a uma degeneração do mecanismo, este procedimento tem fornecido bons resultados.

Uma forma mais criteriosa de convergência foi adotada, pois aquela proposta por Nelder e Mead não se adaptou ao problema de síntese, provocando uma terminação prematura da busca do mínimo. Portanto, a combinação de critérios apresentada na seção 3.3 foi necessária, uma vez que, usada somente a equação (31), o algoritmo pode terminar prematuramente num patamar plano da função objetiva, como mostrado na figura 3.4. Se, por outro lado, somente for utilizada a equação (32), o algoritmo pode terminar prematuramente em um declive acentuado como ilustrado na figura 3.5.

De uma forma geral, o novo método contribuiu para um melhoramento nas soluções dos problemas de síntese de mecanismos, possibilitando ainda a imposição de restrições nos parâmetros a serem otimizados.

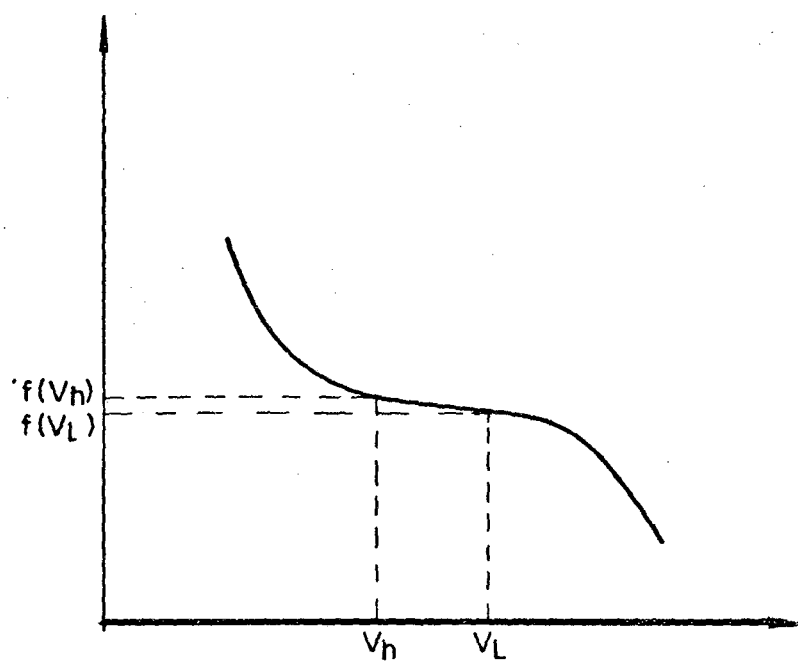


FIGURA 3.4 - Critério baseado na equação (31)

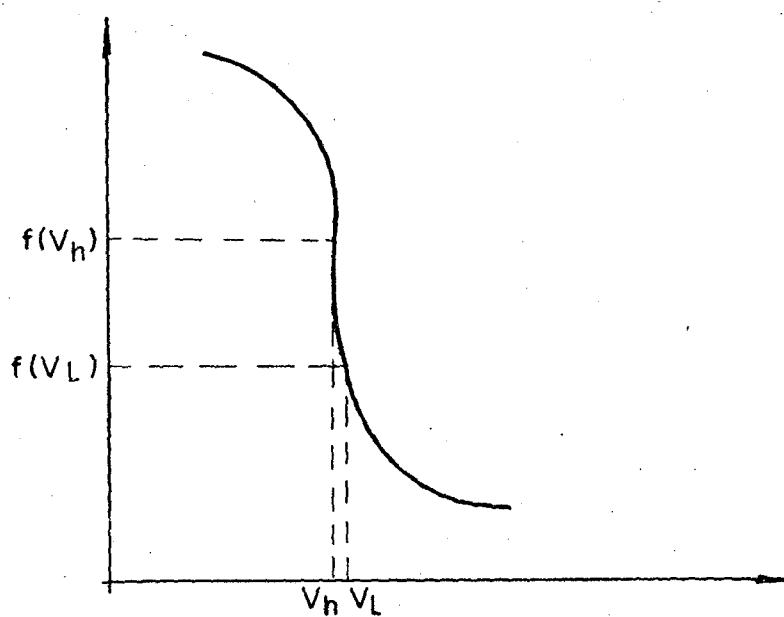


FIGURA 3.5 - Critério baseado na equação (32)

3.5. O PROGRAMA SIMPLEX

O programa foi desenvolvido por Zanini [20] para utilização em computador CDC 7600 e atualmente adaptado para uso no computador IBM 4341 da UFSC. Sua estruturação pode ser observada através do diagrama de blocos da figura 3.6.

Como procedimento geral na utilização do programa, deve-se especificar o tipo de problema a ser resolvido, o conjunto de especificações α_i^* , β_i^* e γ_i^* desejado, fatores de peso, etc. e um conjunto de parâmetros iniciais, representando o mecanismo a ser otimizado. O programa então gera aleatoriamente os n conjuntos de parâmetros necessários para a minimização, avaliando o erro para cada um dos n conjuntos, verificando se as condições de existência do mecanismo são obedecidas (restrições físicas). Caso estas condições não sejam obedecidas, um novo conjunto de parâmetros é gerado, como discutido na seção 3.3, até ser encontrado um mecanismo. O processo de otimização é então iniciado e somente encerrado quando o critério de convergência for satisfeito. O resultado final é então fornecido através de relatório impresso. Detalhes referentes à entrada de dados são fornecidos no Apêndice VII.

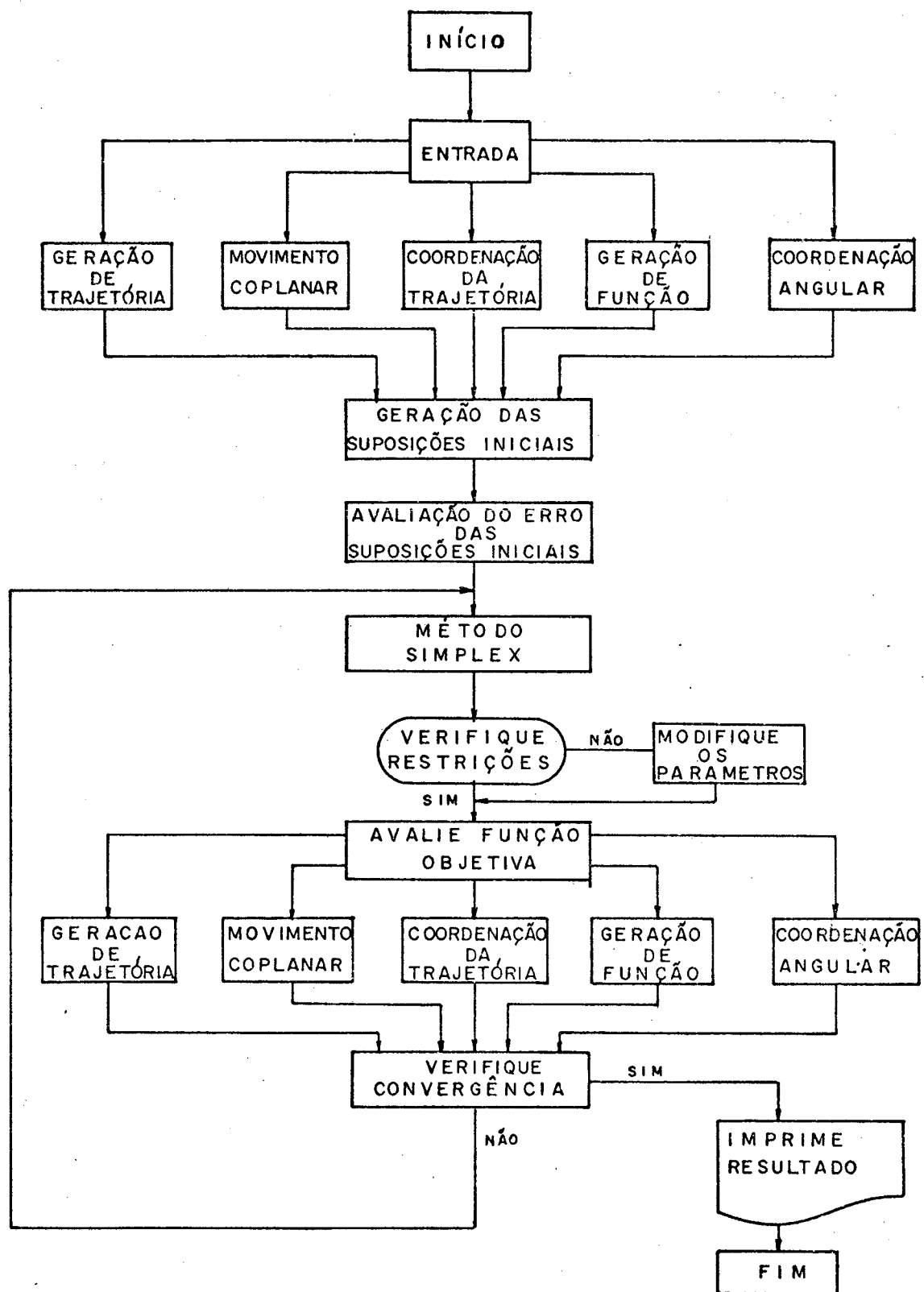


FIGURA 3.6 - Diagrama de blocos para o programa SIMPLEX

C A P Í T U L O I V

NOVOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA
APLICAÇÃO EM SÍNTESE4.1. INTRODUÇÃO

As técnicas de otimização de funções não lineares encontram-se devididas em dois grupos distintos, a saber: técnicas que empregam derivadas e técnicas que não as empregam, comumente denominadas de procura direta. Nas técnicas que empregam derivadas torna-se necessário calcular as primeiras e, em certos casos, as segundas derivadas, a fim de poder determinar o extremo da função. As técnicas de procura direta não requerem avaliações de derivadas.

Os métodos envolvendo derivadas, na prática, encontram duas barreiras principais para sua implementação:

1) A primeira, refere-se a problemas com um grande número de variáveis, tornando laborioso ou, até mesmo, impossível prover funções analíticas para as derivadas necessárias ao algoritmo. Embora a avaliação das derivadas, por diferenças finitas, possa ser substituída pela avaliação analítica das mesmas, o erro numérico introduzido, particularmente na vizinhança do extremo, pode enfraquecer o uso desta substituição;

2) A segunda, diz respeito ao grau de dificuldade, por parte do usuário, na preparação do problema para introdução no algoritmo, quando comparado com os algoritmos de procura direta.

Pelo exposto, as técnicas de procura direta tornam-se atrativas para a utilização em síntese de mecanismos, uma vez que não se tem garantias de regularidade e continuidade da função erro, que representa o problema de síntese. Por outro lado, experiências anteriores, tal como a do método Simplex, tem demonstrado que as técnicas de procura direta, tem fornecido resultados eficientes aos problemas da síntese de mecanismos.

Técnicas de procura direta, tais como: método de Rosenbrock, método de Hooke e Jeeves, método de Powell, método Flexplex, etc., tem sido idealizadas e suas aplicações estimuladas com o advento dos computadores digitais. Entre essas técnicas, os métodos de Powell e Flexplex foram os escolhidos para utilização neste trabalho. Informações sobre os mesmos são fornecidas neste capítulo.

4.2. MÉTODO DE POWELL COM USO DE FUNÇÕES PENALIDADE

O procedimento é uma combinação do método de procura direta de Powell [13] com a técnica de Funções Penalidade, proposta por Carroll [9]. Neste procedimento, o problema de minimização com restrições, definido na seção 2.2 pelas equações de (1) a (3), é convertido em um problema sem restrição, representado pela função paramétrica

$$U(V, r_j) = f(V) + G(g, r_j) + H(h, r_j) \quad (37)$$

denominada função penalidade. As funções $G(g, r_j)$ e $H(h, r_j)$ são obtidas através da combinação das restrições de desigualdade ($g_i(V)$)

e igualdade ($h_i(V)$) respectivamente.

A solução do problema com restrição é obtida minimizando-se, através do método de Powell, uma sequência de problemas sem restrições, caracterizados pela equação (37) e pela variação de r_j . O vetor solução obtido na minimização de $U(V, r_j)$ é usado como um ponto de partida para a solução de $U(V, r_{j+1})$. Este procedimento se repete até ser encontrada uma solução aceitável.

4.2.1. MÉTODO DE POWELL

O método de procura direta proposto por Powell localiza o mínimo de uma função quadrática, por sucessivas buscas unidimensionais ao longo de um conjunto de direções conjugadas*, geradas no decorrer do processo. O método é de utilidade geral e é particularmente atrativo, uma vez que não requer derivação da função objetiva.

A transição de um ponto $V_0^{(k)}$ para um ponto $V_n^{(k)}$ é dada por

$$V_n^{(k)} = V_0^{(k)} + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i^{(k)} S_i^{(k)} \quad (38)$$

onde λ é o tamanho do passo em cada direção e S_i o vetor direção.

A essência do procedimento é a seguinte:

1) Providenciar um conjunto de direções linearmente independentes S_i , com $i = 1, 2, 3, \dots, n$, e, de um ponto base $V_0^{(k)}$, determinar $\lambda_1^{(k)}$ por uma procura unidimensional, de modo que

* duas direções de procura, S_j e S_i , são conjugadas se,

$$(S_j)^T Q S_i = 0 ; i \neq j \text{ e } (S_j)^T Q S_i \geq 0 ; i = j \text{ onde } Q = \nabla^2 f(x^k)$$

$f(V_0^{(k)} + \lambda_1^{(k)} S_1^{(k)})$ seja mínima e fazer $V_1^{(k)} = V_0^{(k)} + \lambda_1^{(k)} S_1^{(k)}$. De $V_1^{(k)}$, determinar $\lambda_2^{(k)}$, de modo que $f(V_1^{(k)} + \lambda_2^{(k)} S_2^{(k)})$ seja mínima e fazer $V_2^{(k)} = V_1^{(k)} + \lambda_2^{(k)} S_2^{(k)}$. A procura continua, sequencialmente, em cada direção até que todos os λ_i sejam determinados;

2) Após minimizar $f(V)$ em cada uma das n direções, procurar a direção $(V_n^{(k)} - V_0^{(k)})$. Esta direção é testada para ver se será vantajoso trocar uma das direções atuais $S_i^{(k)}$ pela nova direção $(V_n^{(k)} - V_0^{(k)})$. Um passo igual a $(V_n^{(k)} - V_0^{(k)})$ é tomado para produzir o ponto $(2V_n^{(k)} - V_0^{(k)})$. Uma nova direção é introduzida somente se o determinante da matriz das direções de procura aumenta;

3) Fazer a maior redução em $f(V)$ durante o estágio k ser representado por

$$\Delta^{(k)} = \max \{f(V_{i-1}^{(k)}) - f(V_i)\} \quad ; \quad i = 1, \dots, n$$

A direção de procura que corresponde a esta máxima variação em $f(V)$ será designada $S_m^{(k)}$. Fazer $f_1 = f(V_0^{(k)})$, $f_2^{(k)} = f(V_n^{(k)})$ e $f_3 = f(2V_n^{(k)} - V_0^{(k)})$. Se $f_3 \geq f_2$, e/ou $(f_1 - 2f_2 + f_3)(f_1 - f_2 - \Delta^{(k)}) \geq 0,5\Delta^{(k)}(f_1 - f_3)^2$, então a nova direção não é vantajosa e as direções $S_1^{(k)}$, $S_2^{(k)}$, ..., $S_n^{(k)}$ são repetidas no estágio $(k+1)$, isto é, $S_i^{(k+1)} = S_i^{(k)}$, para $i = 1, 2, \dots, n$;

4) Se o teste no passo 3 não é satisfeito, o conjunto de direções no estágio $(k+1)$ é o mesmo do estágio k , com exceção da direção S_m , que é trocada por $S^{(k)} = (V_n^{(k)} - V_0^{(k)})$. Contudo, $S^{(k)}$ é colocado na última coluna da matriz de direção, no lugar de $S_m^{(k)}$, como mostrado abaixo

$$\left[S_1^{(k+1)}, S_2^{(k+1)}, \dots, S_n^{(k+1)} \right] =$$

$$= \left[s_1^{(k)}, s_2^{(k)}, \dots, s_{m-1}^{(k)}, s_{m+1}^{(k)}, \dots, s_n^{(k)}, s^{(k)} \right] ;$$

5) A procura é concluída no fim de algum estágio em que a variação em cada variável independente, é menor do que a precisão requerida ϵ_i , para $i = 1, \dots, n$ ou quando

$$\|V_n^{(k)} - V_0^{(k)}\| \leq 0,1 \epsilon$$

4.2.2. FUNÇÃO PENALIDADE INTERIOR DE DESIGUALDADE

As restrições de desigualdade podem ser consideradas com a função penalidade na seguinte forma

$$U(V, r_j) = f(V) - r_j \sum_{i=1}^p \frac{1}{g_i(V)} \quad (39)$$

O efeito do termo referente às restrições de desigualdade pode ser melhor observado pela figura 4.1. A linha inferior representa a função sem restrição $f(V)$, com um mínimo fora da região possível. O mínimo da função que satisfaz às restrições localiza-se no contorno da região possível, determinado pela restrição de desigualdade $g_i(V)$.

Observando a figura 4.1, vê-se que, na medida que decresce o valor de r a função $U(V, r_j)$ aproxima-se de $f(V)$ na região possível, mas aumenta rapidamente próximo ao contorno. Como r se aproxima de zero, a procura encontra uma mudança muito brusca na curvatura e não pode aproximar-se mais do contorno. Várias propostas para a mudança do valor de r , em sucessivas minimizações, tem

side apresentadas. A utilizada neste trabalho é

$$r = (\text{FAC})^{1-\text{IR}} \quad (40)$$

onde IR assume o valor da unidade no início do processo e é incrementado pela unidade após cada sub-ótimo encontrado. O fator FAC pode ser estabelecido arbitrariamente; FAC = 10 é sugerido para uso normal

4.2.3. FUNÇÃO PENALIDADE EXTERIOR DE DESIGUALDADE

Neste caso, a função penalidade é formada por

$$U(V, r_j) = f(V) + \frac{1}{r_j} \sum_{i=1}^p [g_i(V)]^2 \quad (41)$$

onde $g_i(V)$ é igual a zero, se a desigualdade for satisfeita. Portanto, para $r > 1$, o mínimo restrito pode se encontrar em uma região não possível, como mostrado na figura 4.2. Como r decresce, $1/r$ aumenta e a função modificada tende a inclinar-se para cima, criando, assim, uma série de sub-ótimos, que se aproximam do contorno restritivo da região possível, por fora.

4.2.4. FUNÇÃO PENALIDADE DE IGUALDADE

As restrições de igualdade são acomodadas por uma função penalidade geral, como a da equação (37).

Assumindo uma função penalidade de desigualdade interior, a função objetiva modificada torna-se

$$U(V, r_j) = f(V) - r_j \sum_{i=1}^p \frac{1}{g_i(V)} + \frac{1}{r_j} \sum_{k=1}^m [h_k(V)]^2 \quad (42)$$

4.2.5. O PROGRAMA POWELL

O programa é uma adaptação do algoritmo de Powell, juntamente com a técnica de funções penalidade, na estrutura desenvolvida no programa SIMPLEX. Sua forma final é ilustrada pelo diagrama de blocos da figura 4.3.

Os mesmos conjuntos básicos de especificações do problema utilizados no programa SIMPLEX, são considerados. O programa, então, verifica se a hipótese inicial satisfaz as restrições impostas ao problema. Caso estas restrições sejam satisfeitas, a minimização de $U(V, r_j)$, pelo método de Powell, é iniciada com função penalidade interior. Se, por outro lado, estas restrições não forem satisfeitas, duas situações podem ocorrer:

- 1) O programa procura por um ponto possível. Neste caso, a minimização de $U(V, r_j)$ inicia com função penalidade interior;
- 2) O programa utiliza a hipótese inicial e a minimização de $U(V, r_j)$ inicia com função penalidade exterior.

Em qualquer um dos casos acima mencionados, o programa normaliza automaticamente as funções restrições e fixa uma proporção determinada de penalidade no início do problema. Este procedimento é projetado para prevenir o domínio de uma ou mais restrições sobre a função objetiva no início da procura do mínimo.

No decorrer do processo de otimização, cada ponto é testado, verificando-se assim, as condições de existência do mecanismo. Caso estas condições não sejam satisfeitas, um novo conjunto de parâmetros é gerado, como feito no programa SIMPLEX, até

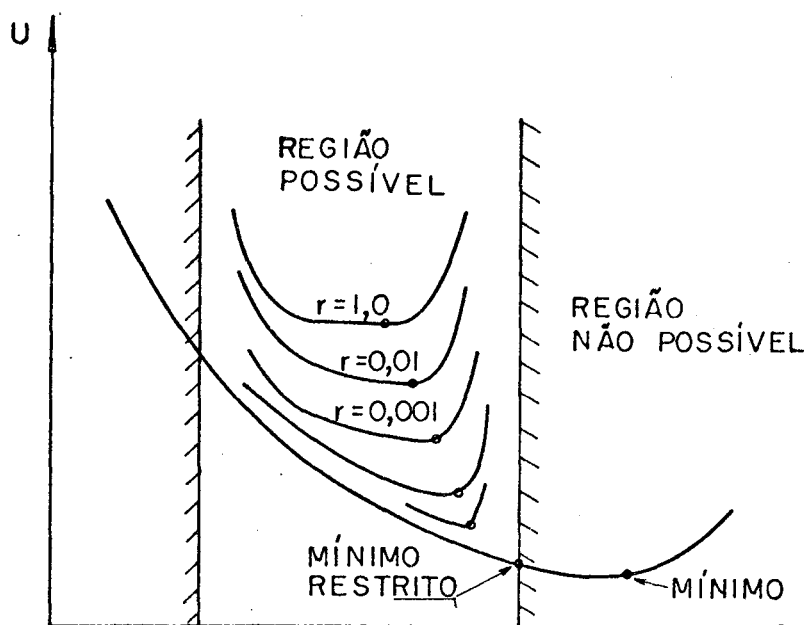


FIGURA 4.1 - Função penalidade interior

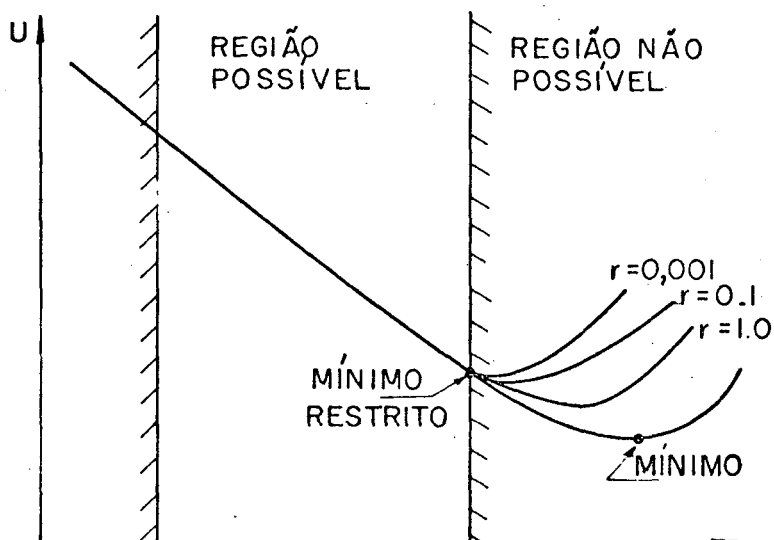


FIGURA 4.2 - Função penalidade exterior

ser encontrado um novo mecanismo.

O encerramento do processo de otimização somente ocorrerá quando tanto o critério de convergência, como as restrições impostas ao problema, forem satisfeitas. Se isto não ocorrer, o valor de r_j é modificado e o processo de minimização de $J(V, r_j)$ é reiniciado. O resultado é fornecido através de relatório impresso e as informações de entrada de dados no programa são encontradas no Apêndice VII.

4.3. O MÉTODO FLEXPLEX

Em vários métodos de programação não linear, uma parte considerável de tempo de computação é gasta para satisfazer as restrições impostas ao problema. O algoritmo de tolerância flexível (FLEXPLEX), por outro lado, melhora o valor da função objetiva usando informações tanto de pontos possíveis, como de pontos não possíveis que estejam próximos de pontos possíveis. Os limites de proximidade são gradualmente restringidos, com o procedimento de busca da solução do problema, até que, no limite, somente os valores possíveis dos parâmetros sejam aprovados. Como resultado desta estratégia, o problema de programação não linear, definido na seção 2.2 pelas equações (1), (2) e (3), pode ser substituído por uma formulação simples dando a mesma solução, ou seja,

$$\text{Minimize } f(V) \quad ; \quad V \in E^n$$

(43)

$$\text{Submetida a : } \phi^{(k)} - T(V) \geq 0$$

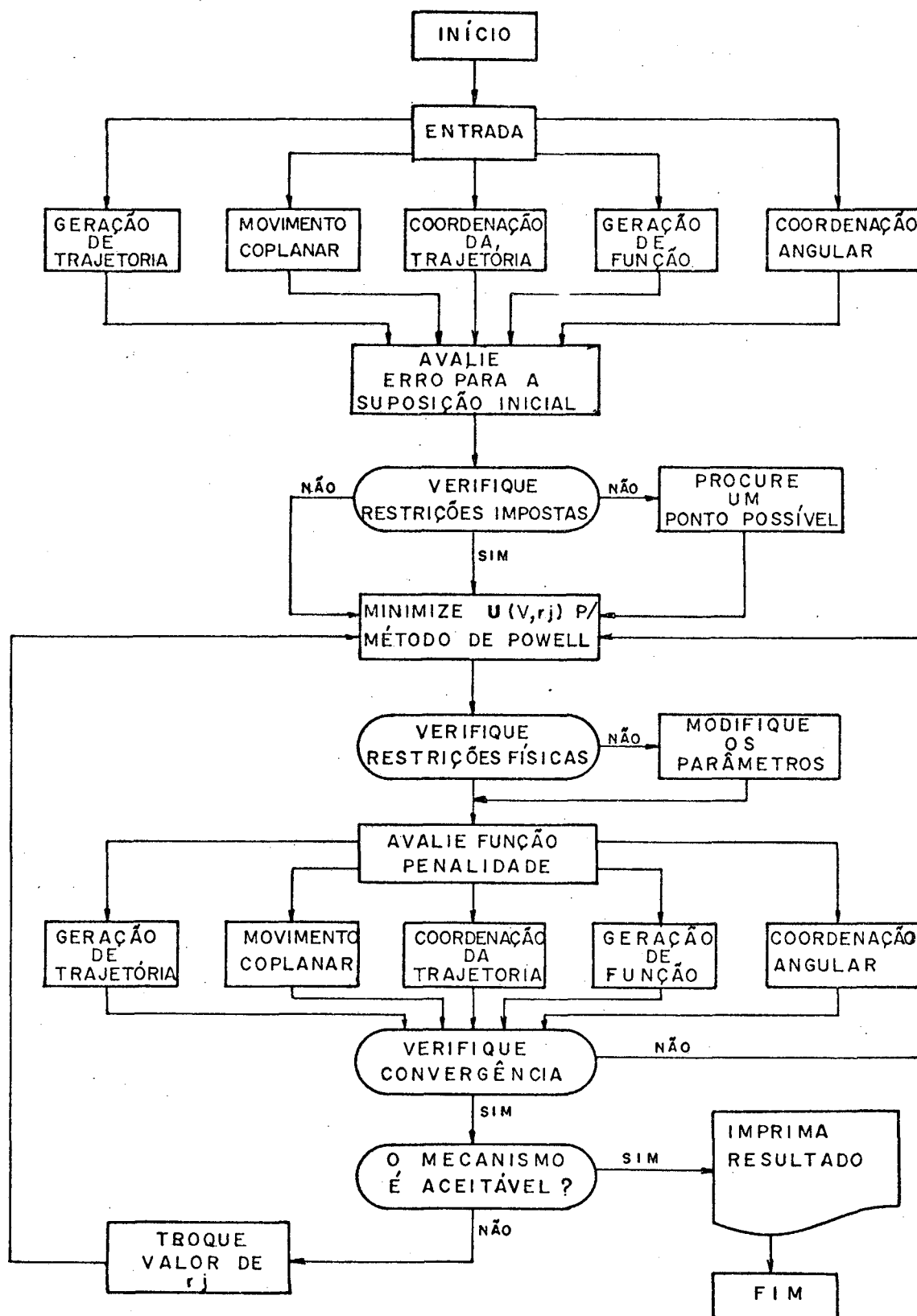


FIGURA 4.3 - Diagrama de blocos para o programa POWELL

onde $\phi^{(k)}$ é o valor do critério de tolerância para a proximidade no estágio k da busca e $T(V)$ um funcional positivo de todas as restrições de igualdade e/ou desigualdade do problema.

O critério de tolerância é escolhido para ser uma função positiva decrescente dos vértices do poliedro no espaço n -dimensional. Esta função atua como um critério de tolerância para violação de restrições, do início ao fim da busca. A definição de $\phi^{(k)}$ é

$$\phi^{(k)} = \min \left\{ \phi^{(k-1)}, \frac{m+1}{r+1} \sum_{i=1}^{r+1} \|V_i^{(k)} - \bar{V}^{(k)}\| \right\} \quad (44)$$

$$\phi^{(0)} = 2(m+1)t$$

onde m é o número de restrições de igualdade,

$V_i^{(k)}$ é o i -ésimo vértice do poliedro,

\bar{V} é o centróide dos vértices, como definido na equação (26),

com $n = r$,

k é o índice que computa o número de estágios da busca,

$\phi^{(k-1)}$ é o valor do critério de tolerância do estágio anterior ao estágio k , e, finalmente,

t é definido por

$$t = \min \left\{ \left[\frac{0,2}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - M_i) \right], (H_1 - M_1), \dots, (H_n - M_n) \right\} \quad (45)$$

onde $(H_i - M_i)$ é a diferença entre o limite superior e o inferior de V_i .

O funcional $T(V)$ é definido como sendo a raiz quadrada positiva da soma dos quadrados dos valores de todas as restrições

de igualdade e/ou desigualdade. Sua representação matemática é dada pela expressão

$$T(V) = + \left[\sum_{i=1}^m h_i^2(V) + \sum_{i=m+1}^p u_i g_i^2(x) \right]^{1/2} \quad (46)$$

onde $u_i = 0$ para $g_i(V) \geq 0$ e $u_i = 1$ para $g_i(V) < 0$. u_i é denominado de operador de Heaviside.

4.3.1. A ESTRATÉGIA DO ALGORITMO

O método Simplex, descrito no Capítulo III, é utilizado para minimizar $f(V)$ quando a restrição em (43) é não ativa, e é também utilizado para minimizar $T(V)$, para que seja satisfeita a única restrição em (43). A estratégia geral é a de reduzir $\phi^{(k)}$ com o progresso da busca, estreitando assim, a região permissível definida pela equação (43) e, ainda, separar a minimização de $f(V)$ do caminho tomado para satisfazer a restrição. Na minimização de $f(V)$ são considerados $(r+1)$ vértices iniciais, onde $r = n-m$ é o número de graus de liberdade do problema, enquanto que, na minimização de $T(V)$, são utilizados $(n+1)$ vértices.

Para um dado valor de $\phi^{(k)}$, o valor de $T(V)$ em $V^{(k+1)}$ será um dos dois:

- 1) $T(V^{(k+1)}) \leq \phi^{(k)}$. Neste caso, $V^{(k+1)}$ é um ponto possível ou quase possível e será aceito como uma mudança permitida;
- 2) $T(V^{(k+1)}) > \phi^{(k)}$. Neste caso, $V^{(k+1)}$ é classificado como não possível e um vetor V , bem próximo ou na região possível, tem que ser encontrado. A forma utilizada pelo método, para encontrar um ponto próximo à região possível, é a de minimizar o valor de $T(V)$ até que $T(V) \leq \phi^{(k)}$.

O procedimento de Nelder e Mead pode encontrar dificuldades na minimização de $T(V)$, quando for envolvido um número muito grande restrições não lineares de igualdade e desigualdade na definição de $T(V)$. Neste caso, o algoritmo realiza uma procura unidimensional, por "Golden Section", ao longo de cada uma das direções paralelas aos eixos coordenados, até que o tamanho do intervalo, que contém \hat{V}_j^* , seja reduzido a um valor menor do que 1% de $\phi^{(k)}$. O vetor \hat{V}_j^* representa o mínimo de $T(V)$ ao longo de cada direção j , paralela aos eixos coordenados.

No fim de cada procura unidimensional, é executado um teste para determinar se $T(\hat{V}_j^*) \leq \phi^{(k)}$. Neste caso, $V_i^{(k+1)}$ é substituído por \hat{V}_j^* e a minimização de $T(V)$ é terminada. Se, depois de procurar em todas as direções coordenadas, um ponto possível ou próximo da região possível não for encontrado, o algoritmo promove uma nova minimização de $T(V)$, pelo método de Nelder e Mead, utilizando como hipótese inicial o vetor \hat{V}_n^* , que corresponde ao ponto localizado na direção paralela à coordenada n e onde $T(V)$ é um mínimo. Este procedimento é repetido por três vezes consecutivas e, se, no final, nenhum ponto possível ou próximo da região possível for encontrado, a minimização termina com uma falha.

Por outro lado, se somente restrições de desigualdade forem consideradas no problema, a minimização de $T(V)$ pode ser ineficiente, pois uma sequência alternada de pontos possíveis e não possíveis pode ser repetida várias vezes sem que $f(V)$ seja aperfeiçoada substancialmente. Para aliviar essa ineficiência, uma interpolação quadrática é levada a cabo, entre pontos interiores e exteriores, para que um vetor V , próximo do contorno formado pelas restrições, seja encontrado.

O algoritmo termina sob duas circunstâncias:

1) Quando $\Phi^{(k)} \leq \epsilon$. Neste caso, a procura é considerada completada com sucesso;

2) Quando um ponto possível ou, então, próximo do contorno, não puder ser obtido pela minimização de $T(V)$. Neste caso a procura é encerrada e o usuário é instruído a escolher um mecanismo diferente para iniciar a busca.

O diagrama de blocos da figura 4.4 ilustra o procedimento do método.

4.3.2. O PROGRAMA FLEXPLEX

O programa FLEXPLEX, como o programa POWELL, tem a mesma estrutura computacional que o programa SIMPLEX; a única diferença reside no procedimento de otimização, que, neste caso, é o descrito na seção 4.3.1. Detalhes sobre a utilização do programa são fornecidos no Apêndice VII.

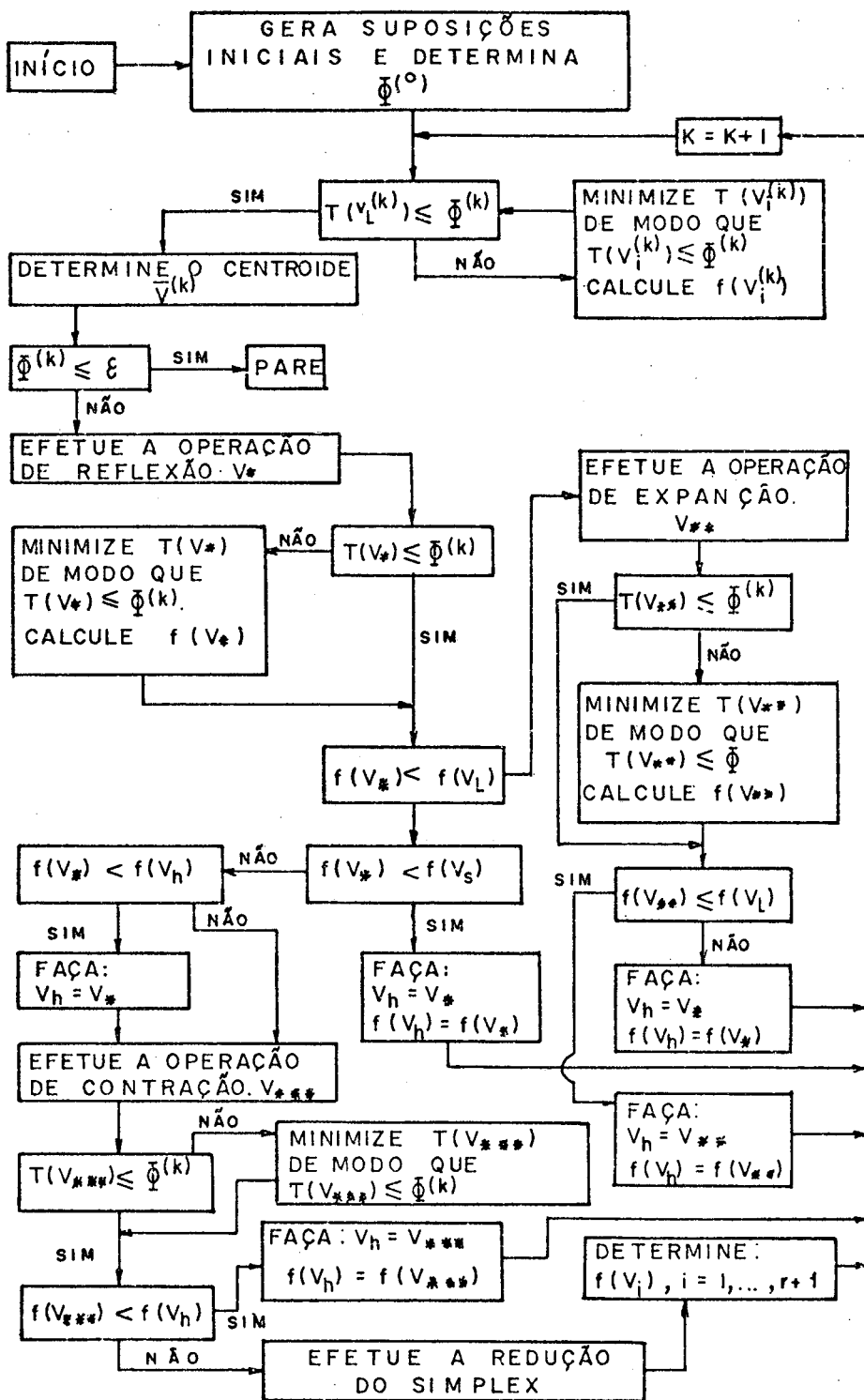


FIGURA 4.4 - Diagrama de blocos para o algoritmo Flexplex

C A P Í T U L O V

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA
TEORIA DE OTIMIZAÇÃO5.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentados exemplos de aplicação da teoria de otimização. Estes são casos práticos da síntese de mecanismos e foram solucionados utilizando-se os três métodos de programação não linear estudados no decorrer do trabalho.

O conjunto de parâmetros utilizados na especificação dos problemas foi o mesmo para os três métodos e os mecanismos, tomados como suposições iniciais, foram selecionados através da análise das características de cada problema e, ainda, por observações feitas em projetos anteriores.

5.2. MECANISMO DE ALIMENTAÇÃO DA LINHA EM UMA
MÁQUINA DE COSTURA

O mecanismo para alimentação da linha em uma máquina de costura é normalmente do tipo came-seguidor oscilante. A came é cilíndrica, desenvolvendo uma velocidade de rotação permitida da ordem de 800 rpm.

Pretende-se substituir o mecanismo tradicional de came por um mecanismo articulado podendo-se, desta forma, atingir maiores velocidades de rotação. O mecanismo articulado proporcio-

nará uma melhora substancial em termos de desempenho e oferece outras vantagens, tais como: menor custo, possibilidade de utilização de metais mais leves na fabricação, forças de inércia menores, etc.

Uma solução para esta substituição só é possível através da análise do mecanismo original, estabelecendo-se que certos desvios dos movimentos originais não irão produzir desvantagens. A figura 5.1 mostra as principais características que o mecanismo articulado deverá apresentar para que a substituição tenha êxito.

O problema foi formulado considerando a trajetória descrita pelo olhal da barra que alimenta a linha. Nesta trajetória foi selecionado um conjunto de vinte pontos, enquanto que, no processo de otimização, somente os parâmetros L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , R , σ_1 e σ_2 foram utilizados, pois X_0 e Y_0 foram considerados fixos e iguais a zero.

Caracterizando o problema como um de geração de trajetória, a função objetiva poderá ser obtida da equação (11) ou, alternativamente, pela equação (16) da seção 2.5.1. Para este caso, utilizou-se a equação (11), ou seja,

$$f(V) = E_1$$

Para garantir que o mecanismo obtido pudesse operar no espaço limitado pelo cabeçote da máquina de costura, foi suficiente especificar um conjunto de quatro restrições, representado pelas seguintes desigualdades

$$5 \text{ mm} \leq L_2 \leq 30 \text{ mm}$$

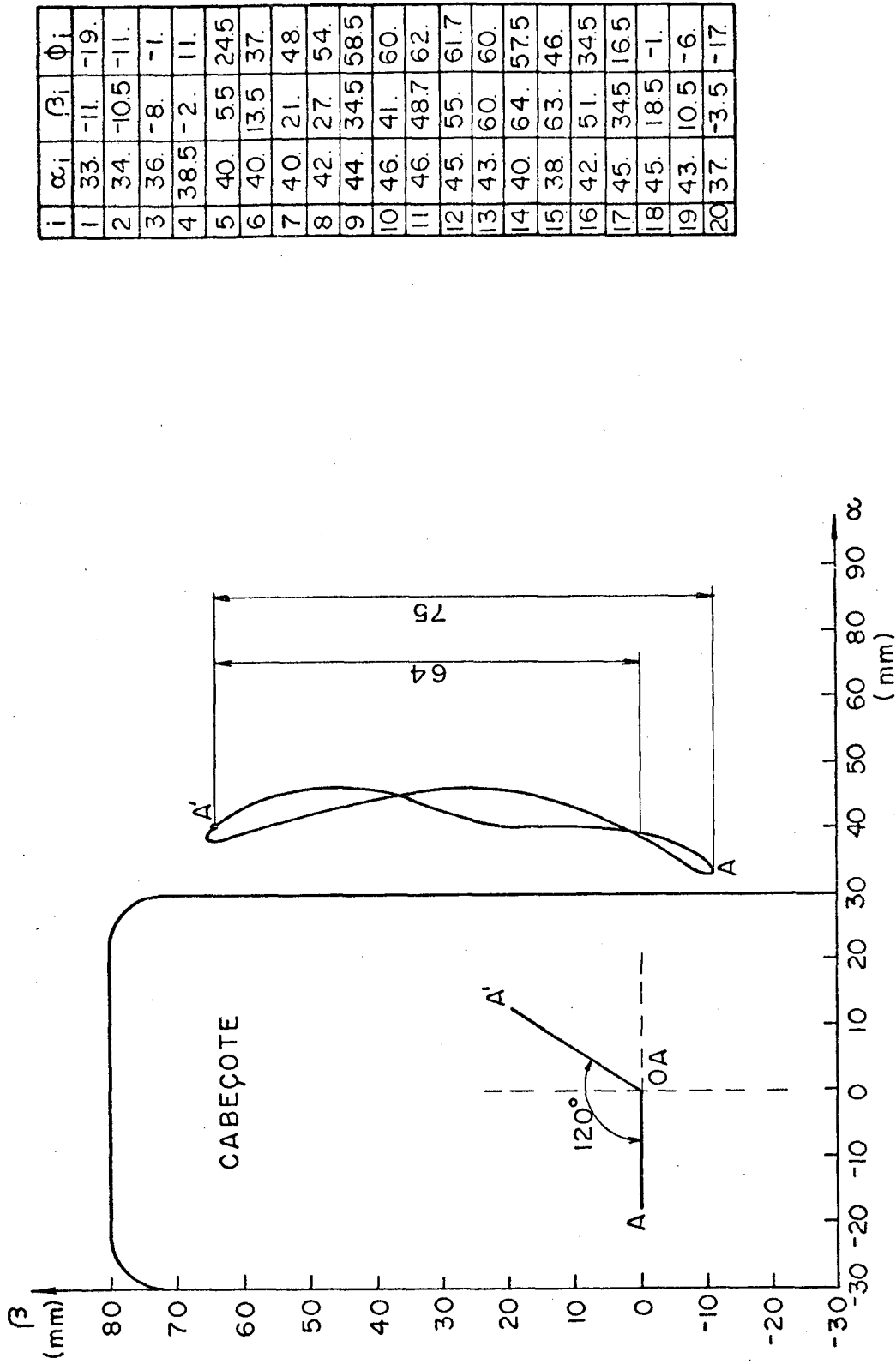
$$90^\circ \leq \sigma_1 \leq 150^\circ$$

Os resultados obtidos pelos métodos Simplex, Powell e Flexplex são mostrados pelas figuras 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente.

5.3. MECANISMO PARA MOVIMENTAÇÃO DE UM PRODUTO DO ALIMENTADOR PARA UM TRANSPORTADOR DE CORREIA EM UMA LINHA DE MONTAGEM

O problema está associado ao processamento automático em máquinas, onde partes preparadas em outro local devem entrar na linha de montagem. As partes acima referidas estão sobre um alimentador de onde o mecanismo deve tomar uma unidade por vez e colocá-la sobre o transportador de correia no tempo disponível para o ciclo. Um dispositivo de garra (ponto c, figura 5.5), fixado na barra acopladora, retira o produto do alimentador. Para garantir que nenhum dano venha a ocorrer sobre o produto, a condição de velocidade zero é especificada na posição de recebimento do produto no alimentador. Esta condição pressupõe a existência de uma cúspide na trajetória, no ponto c, significando que o centro instantâneo de rotação está momentaneamente localizado no centro da garra.

Uma análise do problema mostra que o interesse maior na movimentação do ponto c localiza-se no espaço entre o alimentador e o transportador de correia, onde, além do ponto ocupar posições pré-estabelecidas, o dispositivo de garra, fixado em c, deverá realizar deslocamentos angulares de forma a permitir que o produto seja depositado verticalmente no transportador, a menos de peque-



i	α_i	β_i	ϕ_i
1	33	-11	-19
2	34	-10.5	-11
3	36	-8	-1
4	38.5	-2	11
5	40	5.5	24.5
6	40	13.5	37
7	40	21	48
8	42	27	54
9	44	34.5	58.5
10	46	41	60
11	46	48.7	62
12	45	55	61.7
13	43	60	60
14	40	64	57.5
15	38	63	46
16	42	51	34.5
17	45	34.5	16.5
18	45	18.5	-1
19	43	10.5	-6
20	37	-3.5	-17

FIGURA 5.1 - Especificação para o mecanismo de alimentação da linha em uma máquina de costura

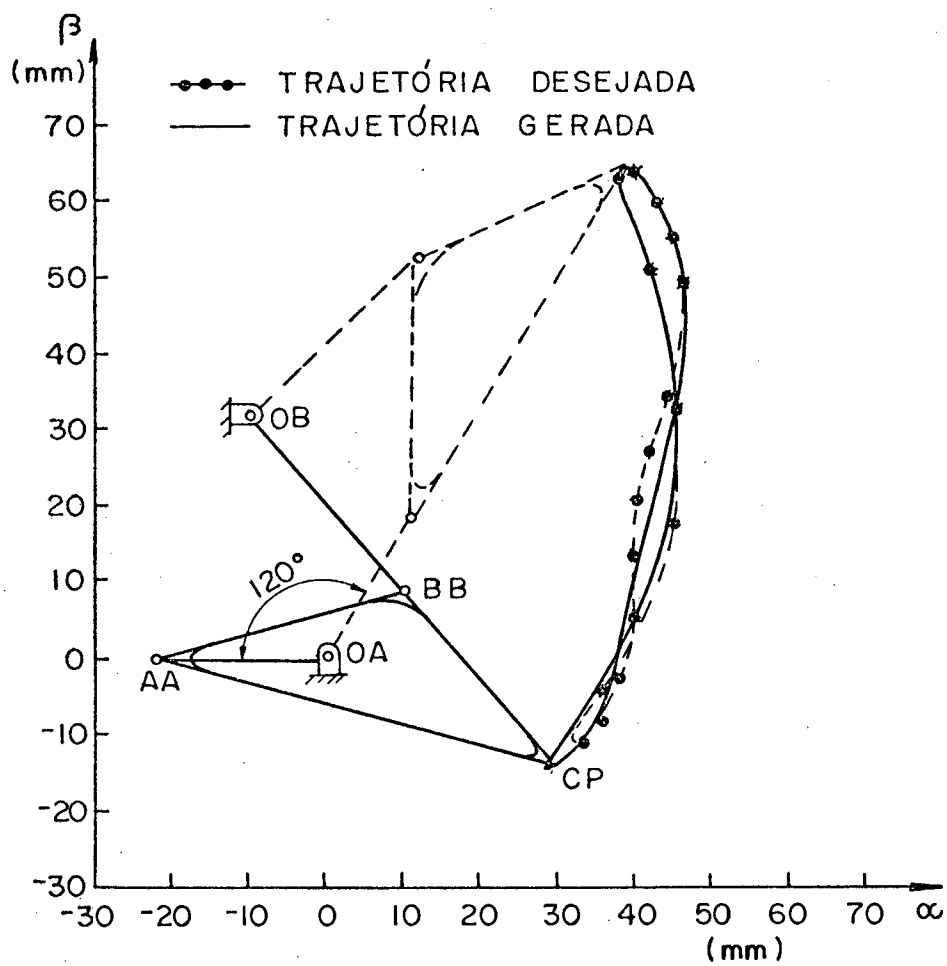


FIGURA 5.2 - Mecanismo alimentador da linha em uma máquina de costura obtido pelo método Simplex

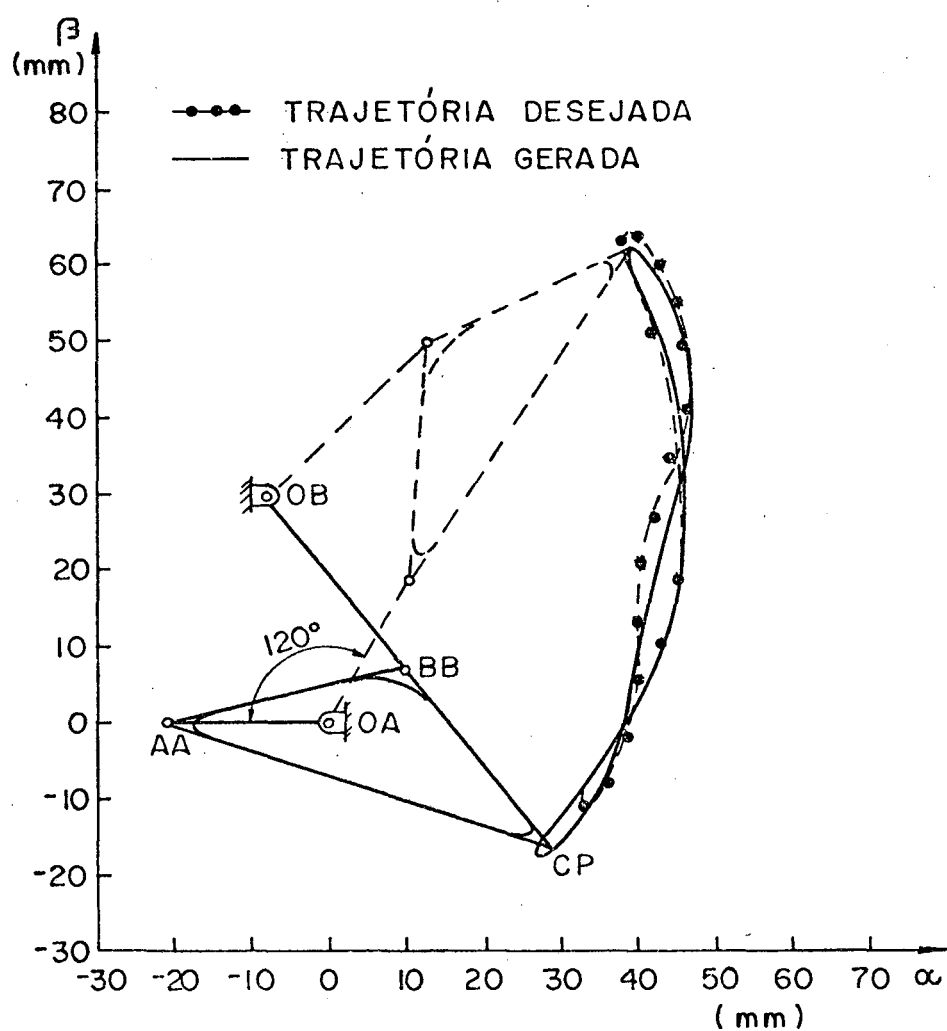


FIGURA 5.3 - Mecanismo alimentador da linha em uma máquina de costura obtido pelo método de Powell

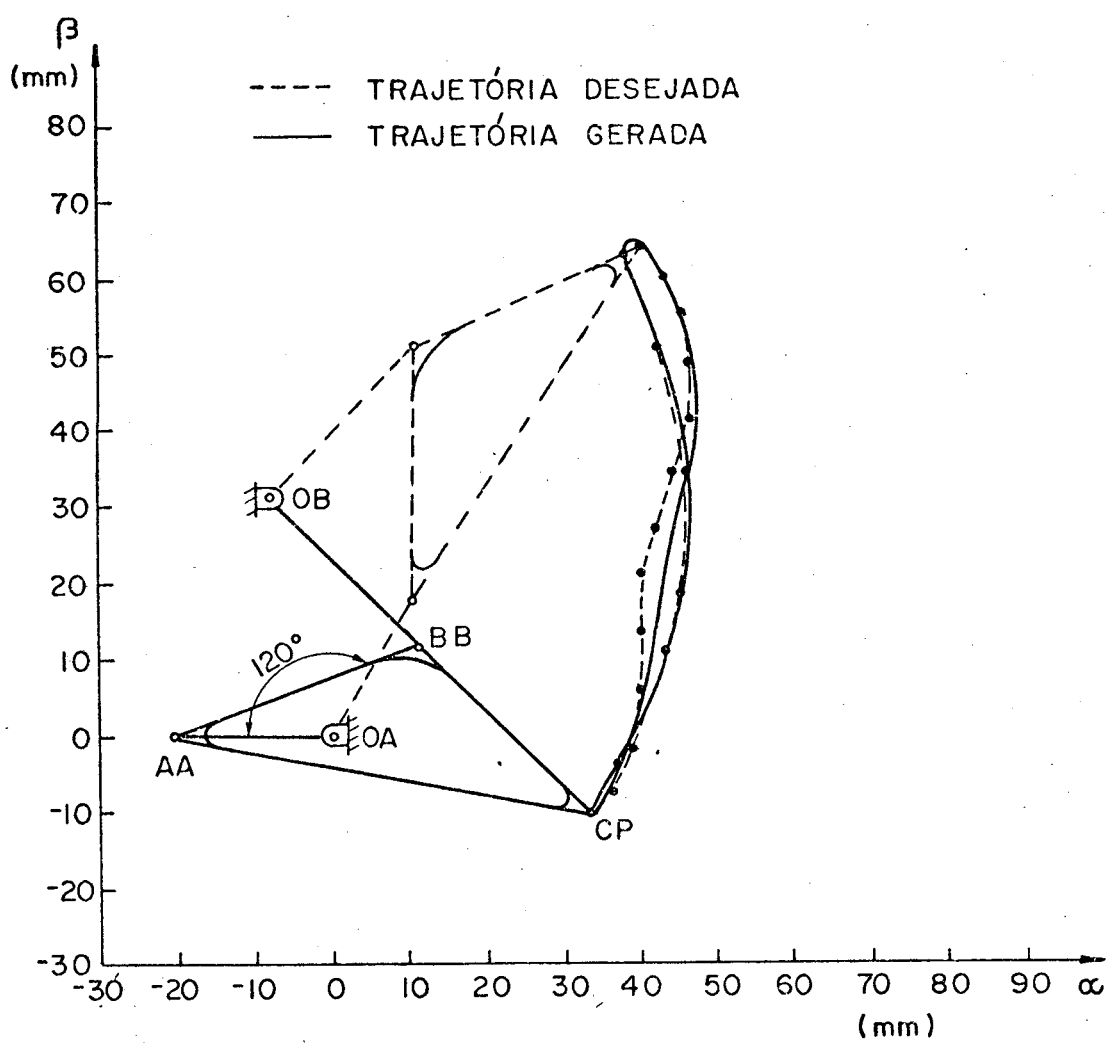


FIGURA 5.4 - Mecanismo alimentador da linha em uma máquina de costura obtido pelo método Flexplex

i	α_i (mm)	β_i (mm)	θ_i (°)
1	-12.	10	14.5
2	-11.	5.	7.
3	-9.	1.	-0.5
4	-6.	-1.	-5.5
5	0.	0.	-8.
6	7.5	5.	-7.
7	16.	15.	-1.
8	22.5	27.5	8.5
9	25.5	37.	17.5
10	26.	39.	23.
11	24.5	37.	27.
12	22.	32.	29.
13	17.	27.	29.75
14	9.8	23.	30.25
15	3.	20.	30.
16	-4.	19.	29.5
17	-9.	17.	26.5
18	-11.5	14.5	21.

OBS: A FIGURA É UMA REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA, SEM PREOCUPAÇÃO DE ESCALA.

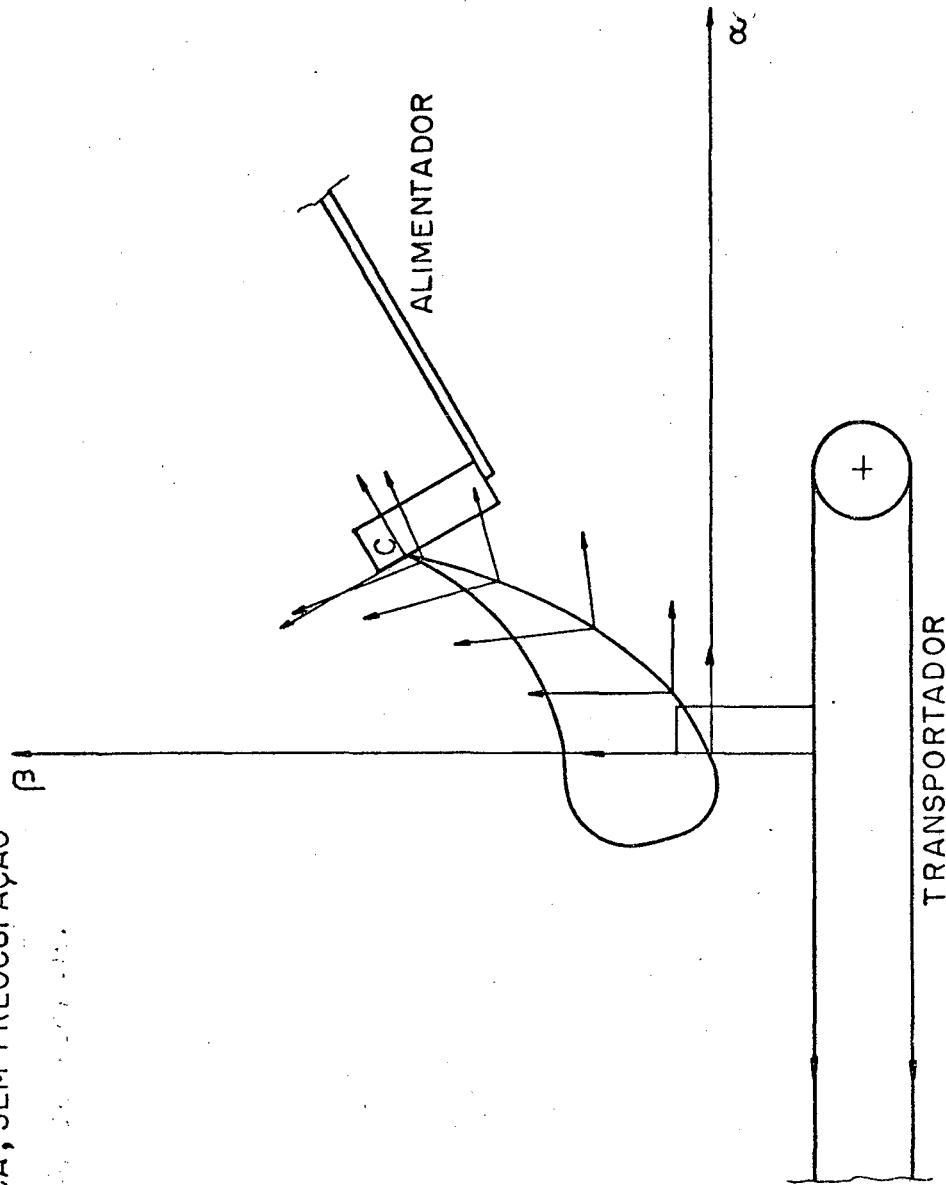


FIGURA 5.5 - Especificação para o mecanismo de movimentação do produto

nos desvios que, porventura, possam ocorrer. Entretanto, a especificação de um total de dezoito conjuntos de parâmetros α_i , β_i e γ_i ao longo da trajetória especificada para o ponto c foi necessária, uma vez que a condição de velocidade nula, representada pela cúspide na trajetória de c, tinha de ser obtida.

Pelo exposto, o problema caracteriza-se como um de movimento coplanar e a função objetiva, como visto no Capítulo II, na seção 2.5.2, é dada por:

$$f(V) = E_1 + E_2$$

Neste problema, os parâmetros X_0 , Y_0 , L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , R , σ_1 e σ_2 foram considerados na otimização, e os resultados obtidos para os três métodos são apresentados nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8.

5.4. MECANISMO PARA CONFECCÃO DE TAPETES

Na confecção de tapetes, a coordenação entre a posição da agulha e o movimento do tecido é tradicionalmente obtida por meio de um mecanismo de came. As agulhas são mantidas em uma mesma inclinação constante, enquanto que a trajetória percorrida por elas é definida pelas exigências do ponto utilizado na confecção.

Uma substituição do mecanismo tradicional de came pode ser efetivada utilizando-se um mecanismo articulado de seis barras, que, por sua vez, pode ser obtido tomando-se como base um de quatro barras. O problema é, então, reduzido a um de coordenação de trajetória, no qual deverá ser obtido um mecanismo de quatro barras, com as seguintes características:

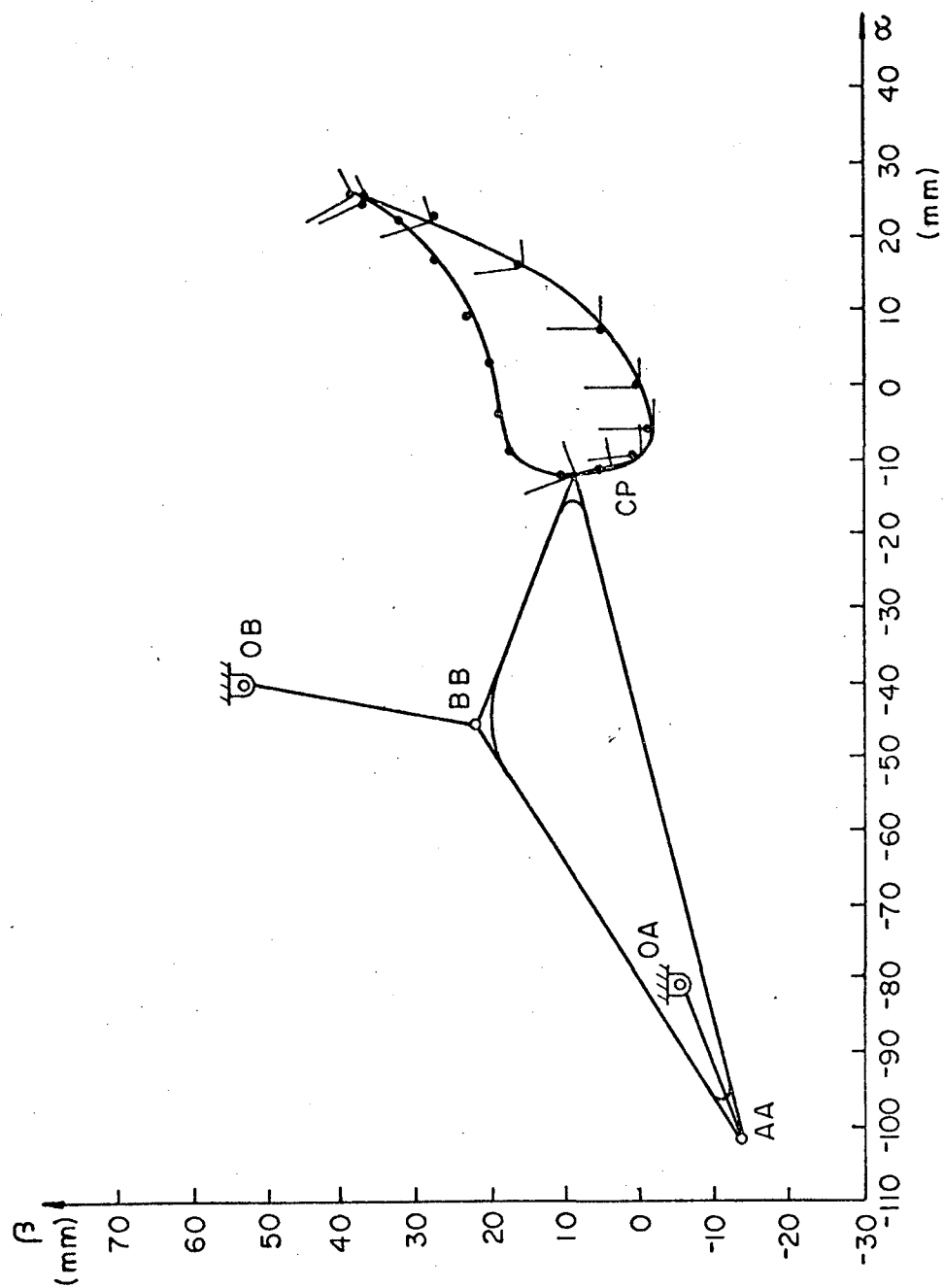


FIGURA 5.6 - Mecanismo de movimentação obtido pelo método Simplex

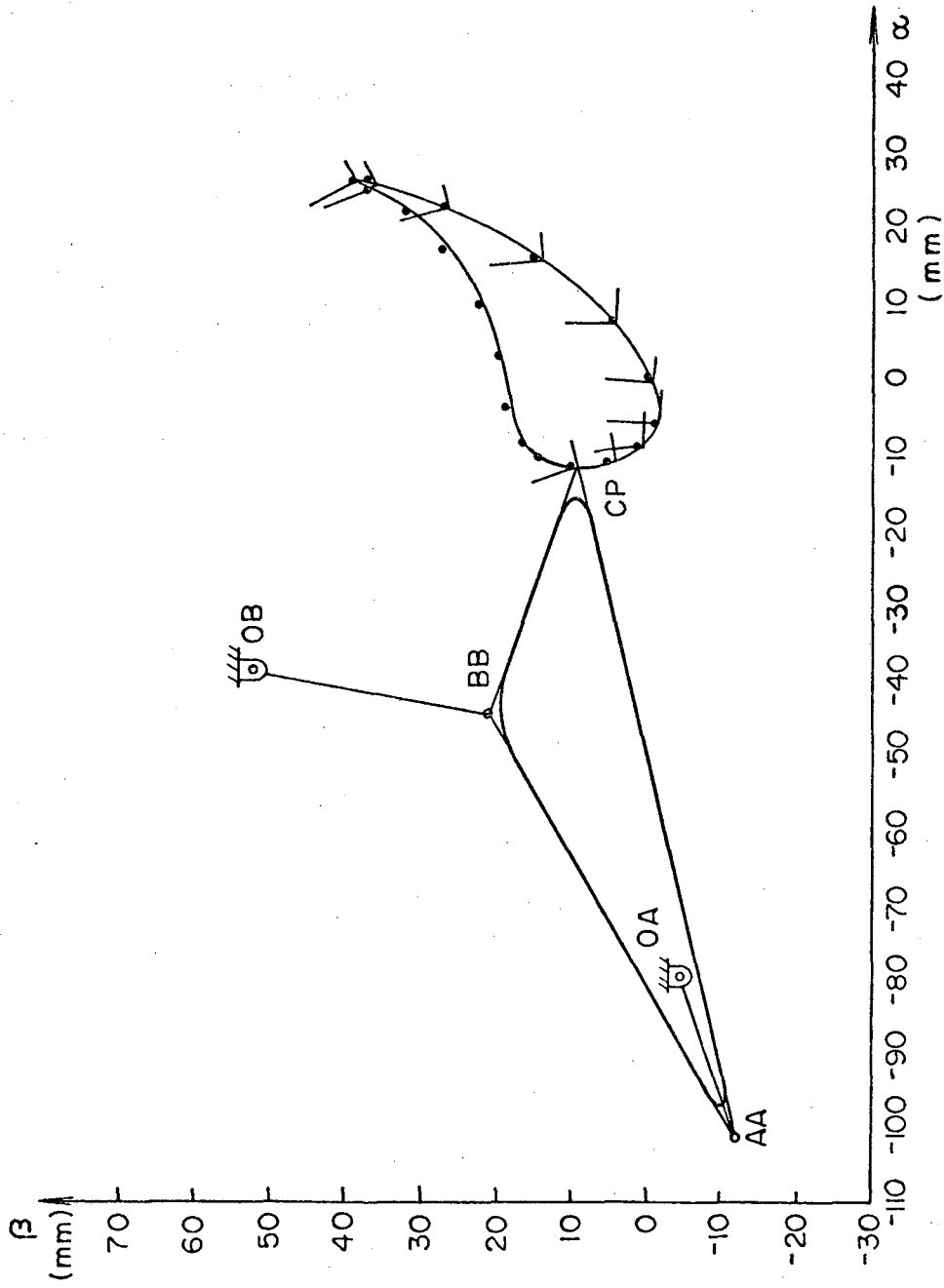


FIGURA 5.7 - Mecanismo de movimentação obtido pelo método de Powell

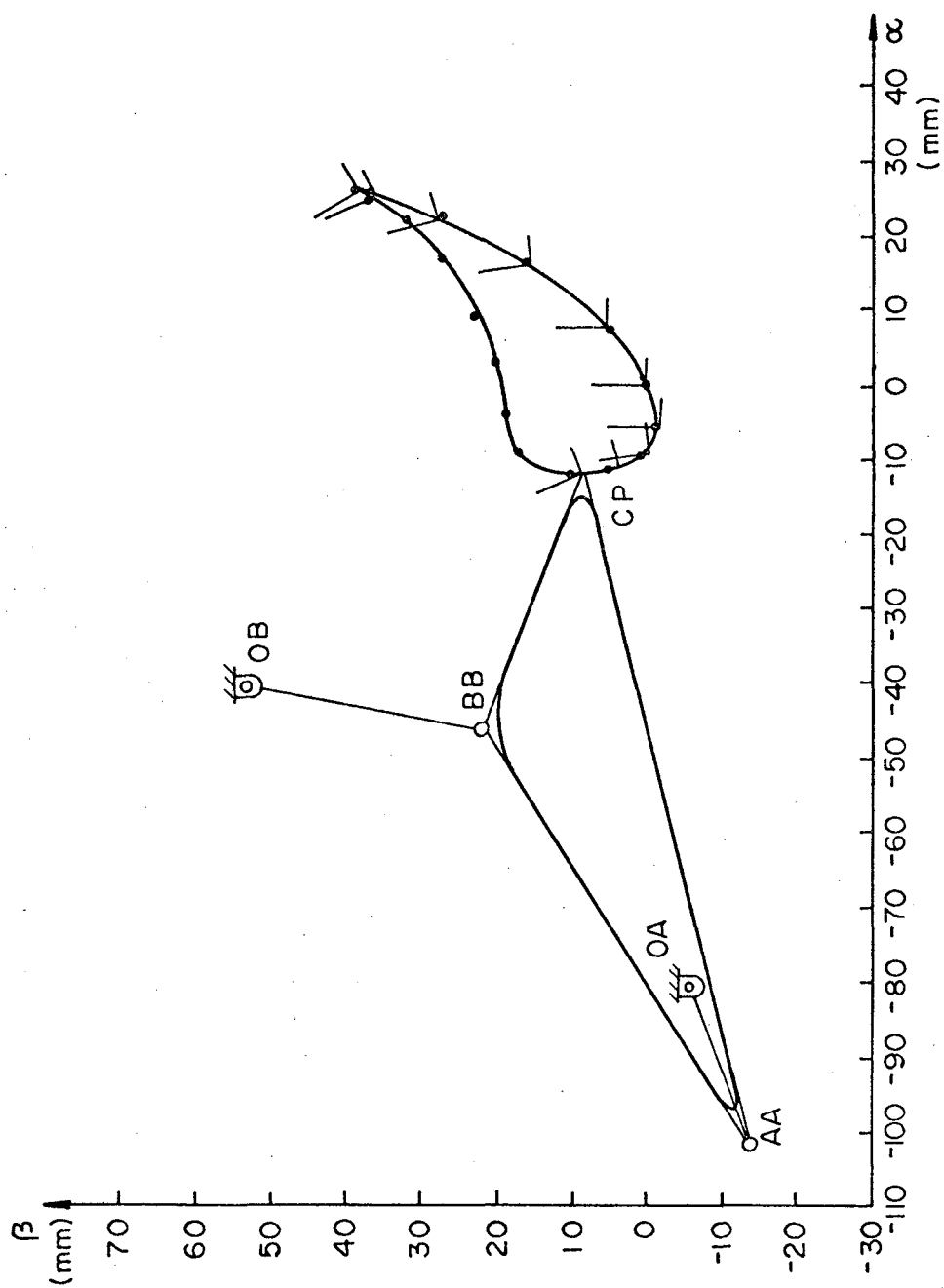


FIGURA 5.8 - Mecanismo de movimentação obtido pelo método Flexplex

- a barra acionadora (manivela) deverá girar completamente em torno do pivô fixo OA;
- nenhuma parte que compõe o mecanismo deverá entrecortar o plano do tecido ou intervir com os outros elementos;
- o comprimento das barras não deverá ultrapassar 325 mm.

A especificação para o problema foi feita, utilizando-se a figura 5.9, retirada da referência (20). Um total de 16 pontos, correspondendo a um mesmo deslocamento angular da manivela, foram selecionados para representar a trajetória descrita pela agulha.

A função objetiva, neste caso, é dada por

$$f(V) = E_1 + E_2$$

onde

$$E_2 = W_2 \sum_{i=1}^{m-1} \left[\Delta\theta_{2i}^* - \Delta\theta_{2i} \right]^2$$

sendo que

$$\Delta\theta_{2i}^* = \theta_{2i+1}^* - \theta_{2i}^*$$

são os deslocamentos angulares desejados da manivela e

$$\Delta\theta_{2i} = \theta_{2i+1} - \theta_{2i}$$

os deslocamentos angulares reais. Os parâmetros considerados na otimização foram: X_0 , Y_0 , L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , R , σ_1 e σ_2 .

As figuras 5.10, 5.11 e 5.12 mostram os resultados obtidos por cada um dos três métodos de otimização.

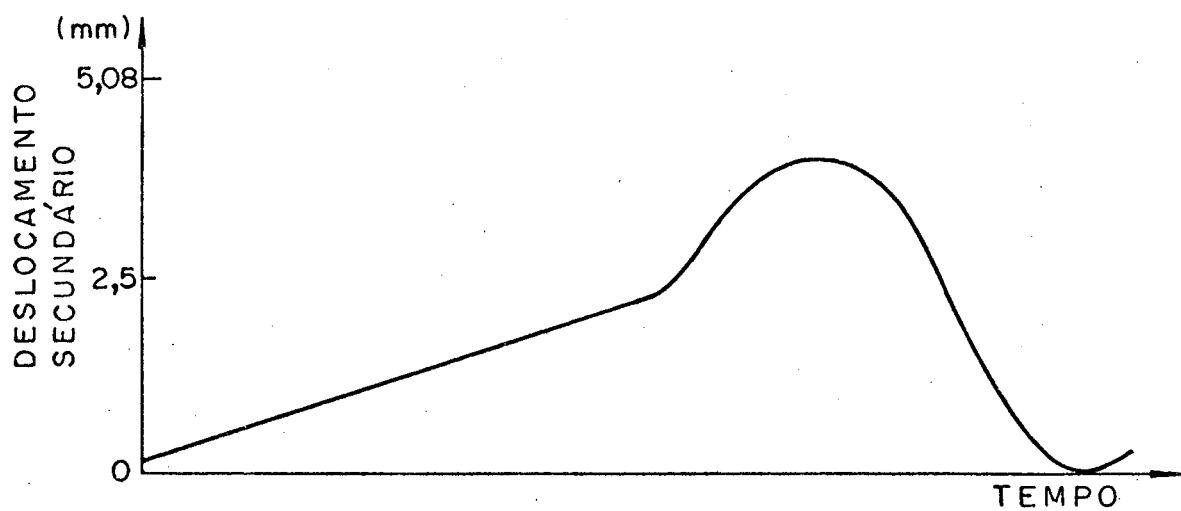
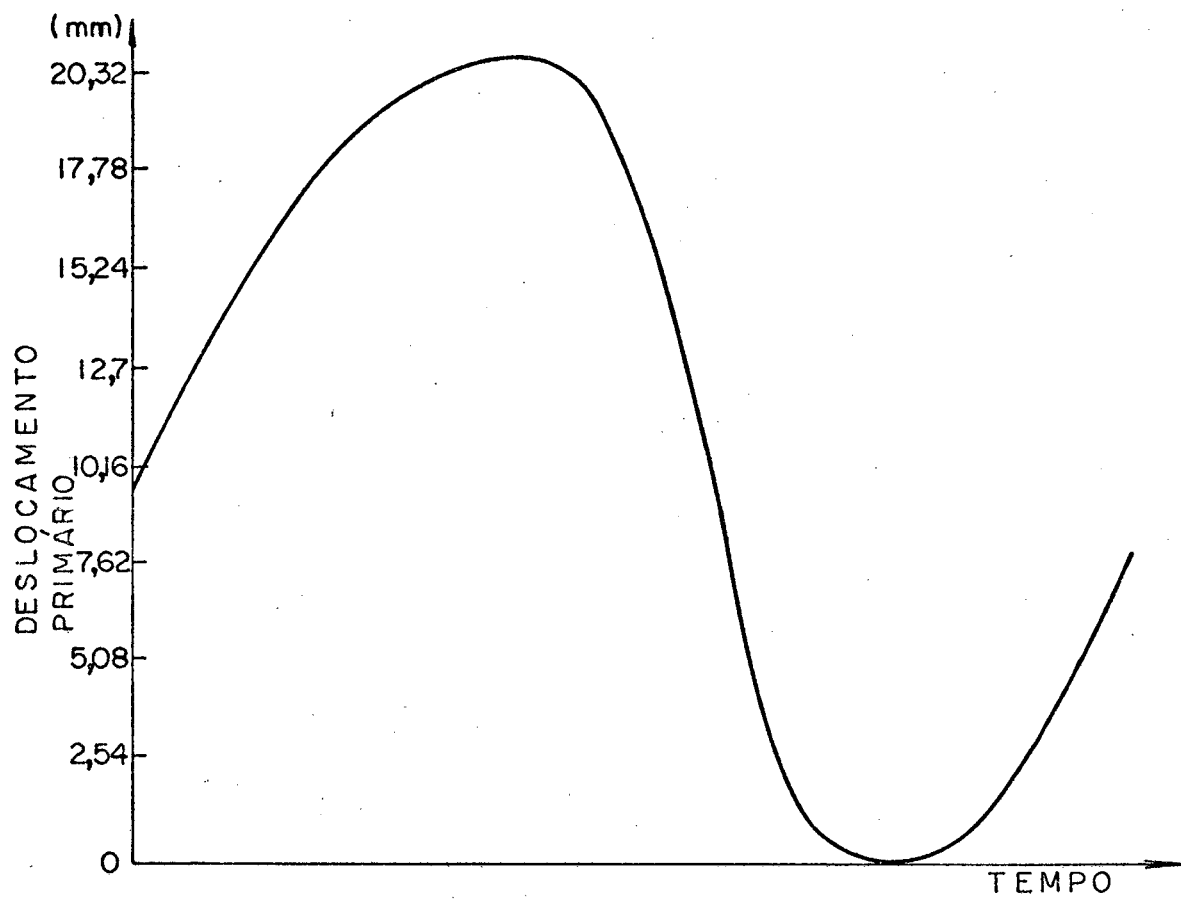
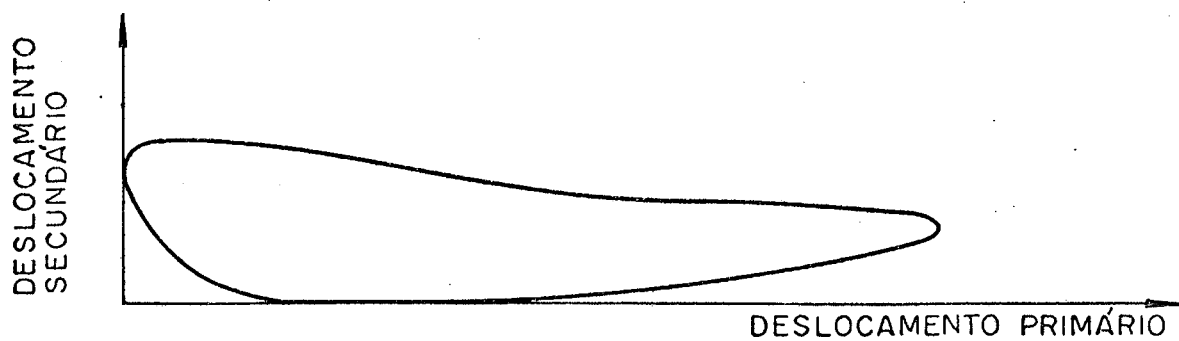


FIGURA 5.9 - Deslocamento da agulha como definido pelas equações da came

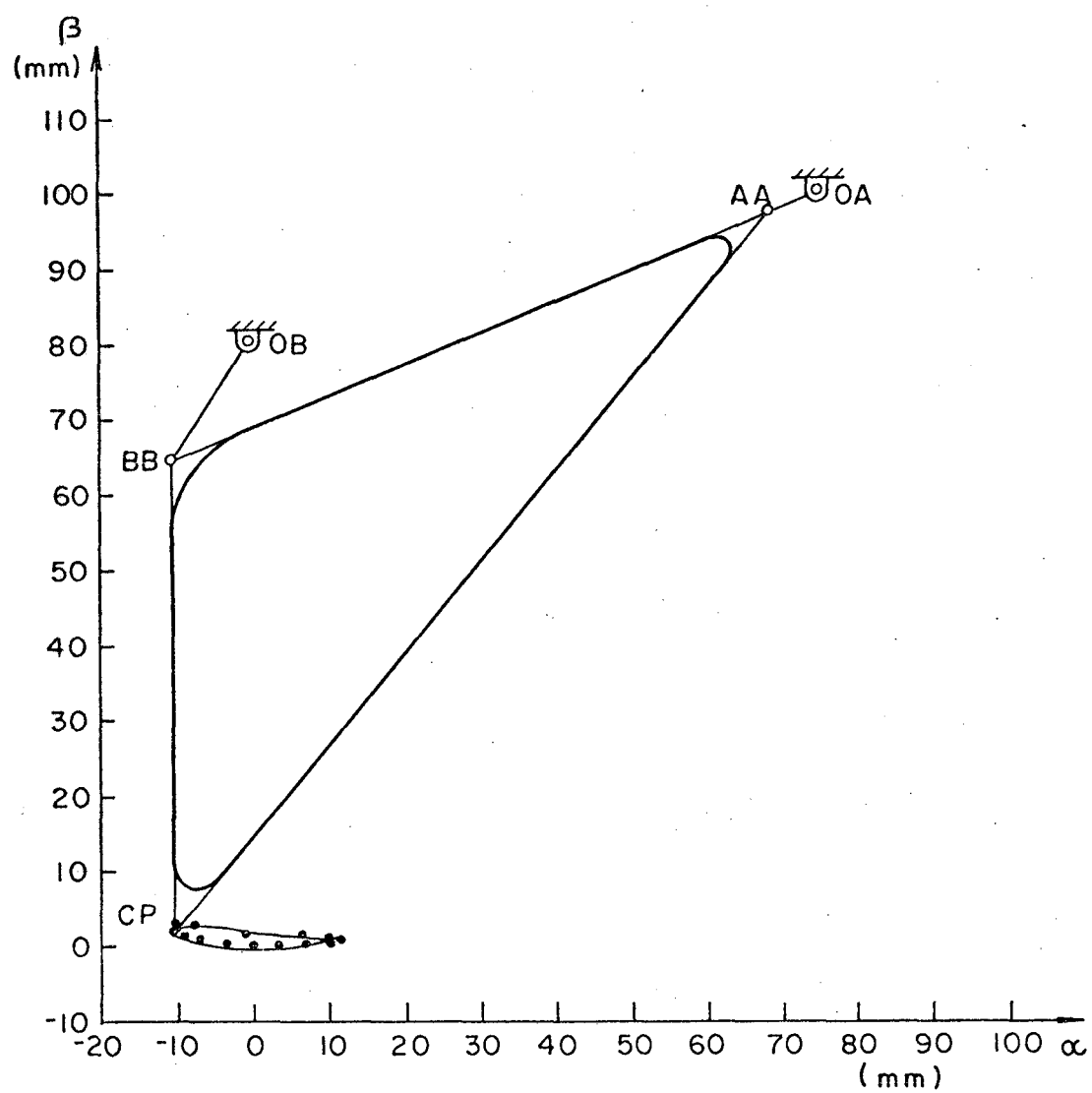


FIGURA 5.10 - Mecanismo para confecção de tapetes obtido pelo método Simplex

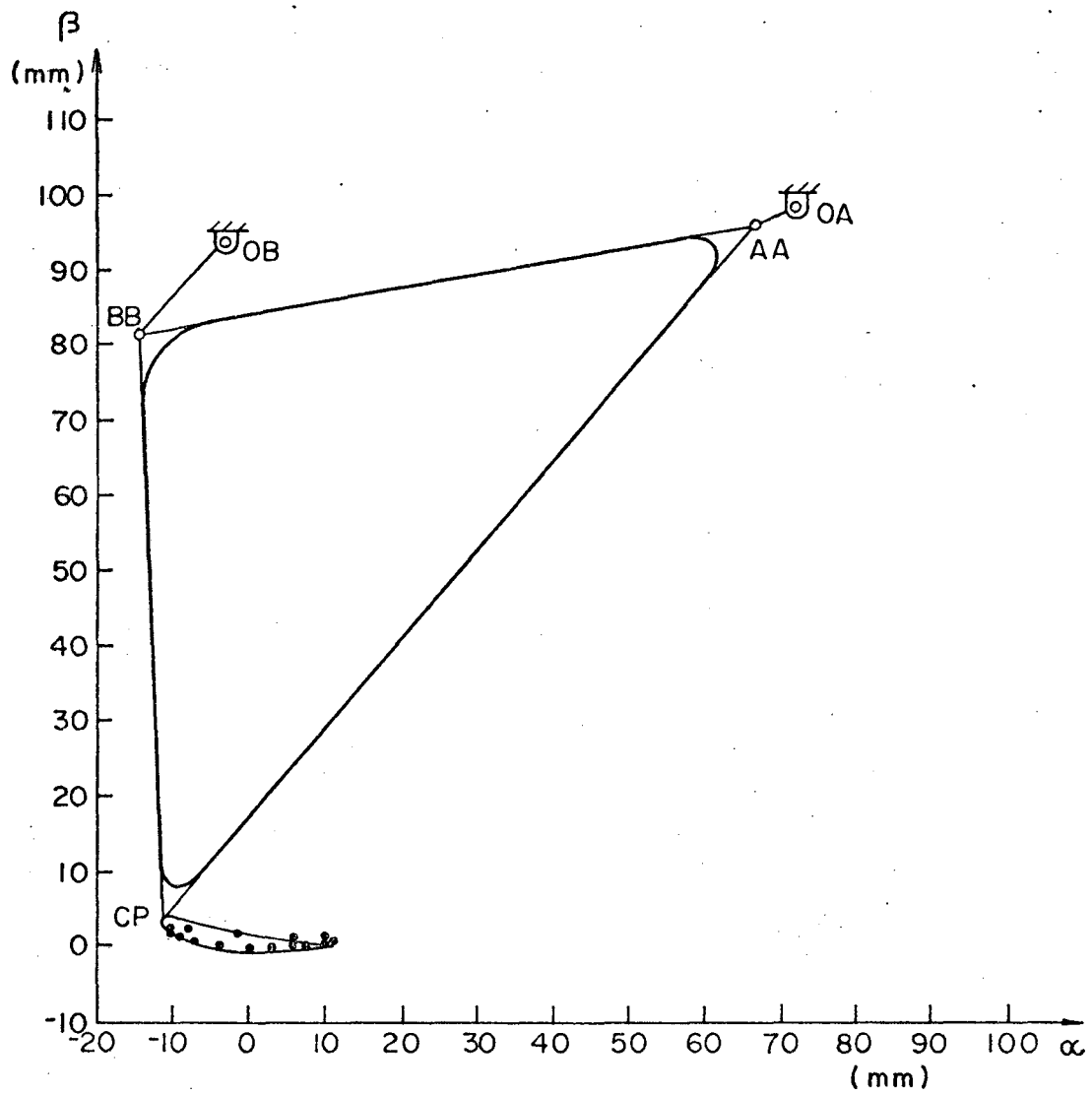


FIGURA 5.11 - Mecanismo para confecção de tapetes obtido pelo método de Powell

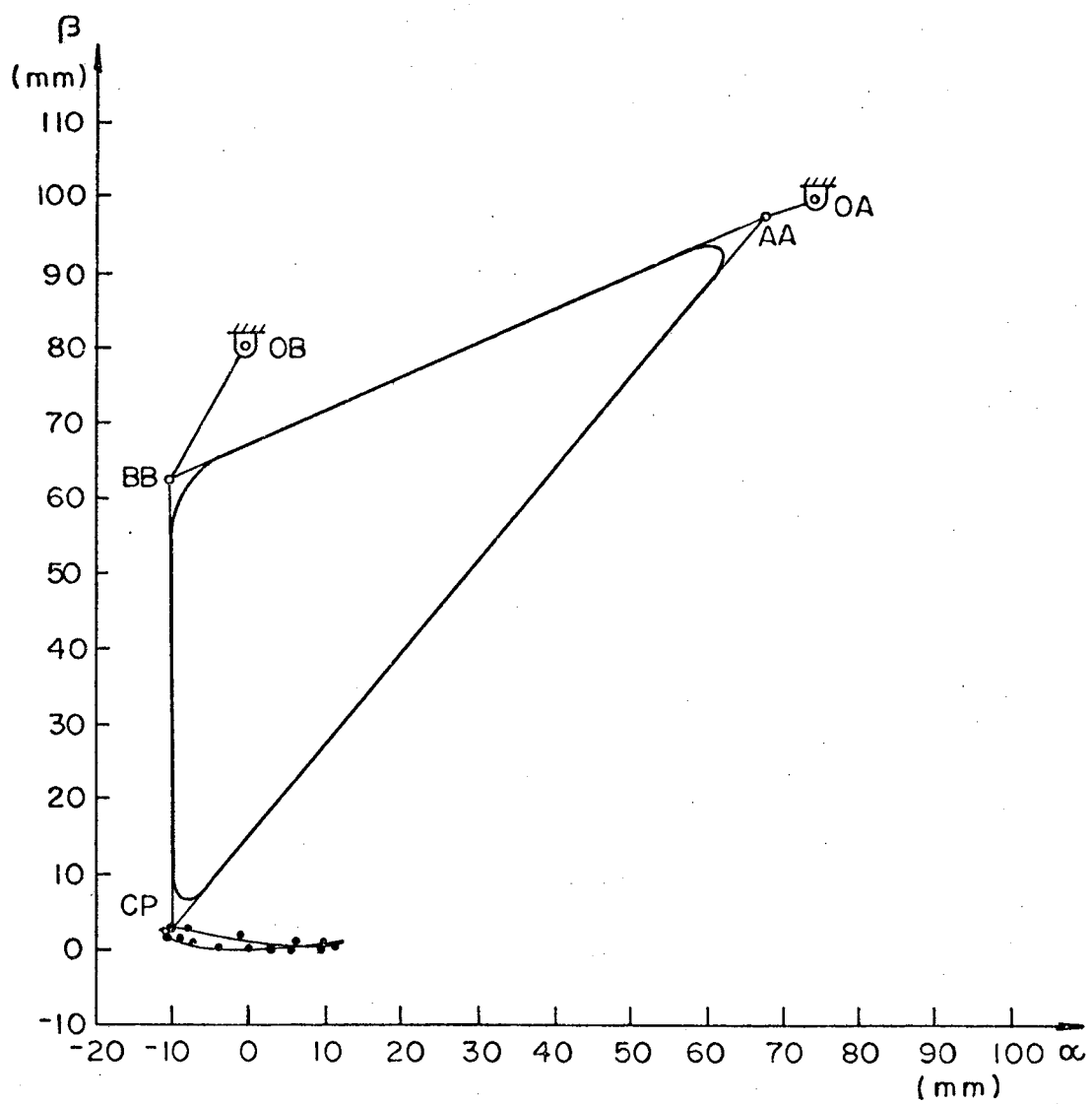


FIGURA 5.12 - Mecanismo para confecção de tapetes obtido pelo método Flexplex

5.5. MECANISMO DA CADEIRA PARA PARAPLÉGICOS

O problema tem sua origem no projeto de uma cadeira desenvolvida para assistir uma pessoa inválida a elevar-se totalmente e retornar à posição sentada. Trata-se, essencialmente, da coordenação angular entre o assento e o encosto da cadeira para acomodar a posição confortável do paciente, quando ele se desloca da posição sentada a uma determinada posição elevada. O mecanismo básico é mostrado na figura 5.13, reproduzida da referência (20).

Existem limitações nos comprimentos das barras ditadas pela necessidade de adaptação à forma de uma cadeira convencional, levando em conta que se deve produzir um mecanismo leve e compacto.

Considerando a figura 5.13, as seguintes condições deverão ser satisfeitas:

$$O_A A = L_2 = 460$$

$$80 \leq AB = L_3 \leq 230$$

$$380 \leq O_B B = L_4 \leq 460$$

$$80 \leq O_A O_B = L_1 \leq 230$$

$$180^\circ \leq \phi_B = \sigma_1 \leq 270^\circ$$

onde as dimensões das barras estão consideradas em milímetro.

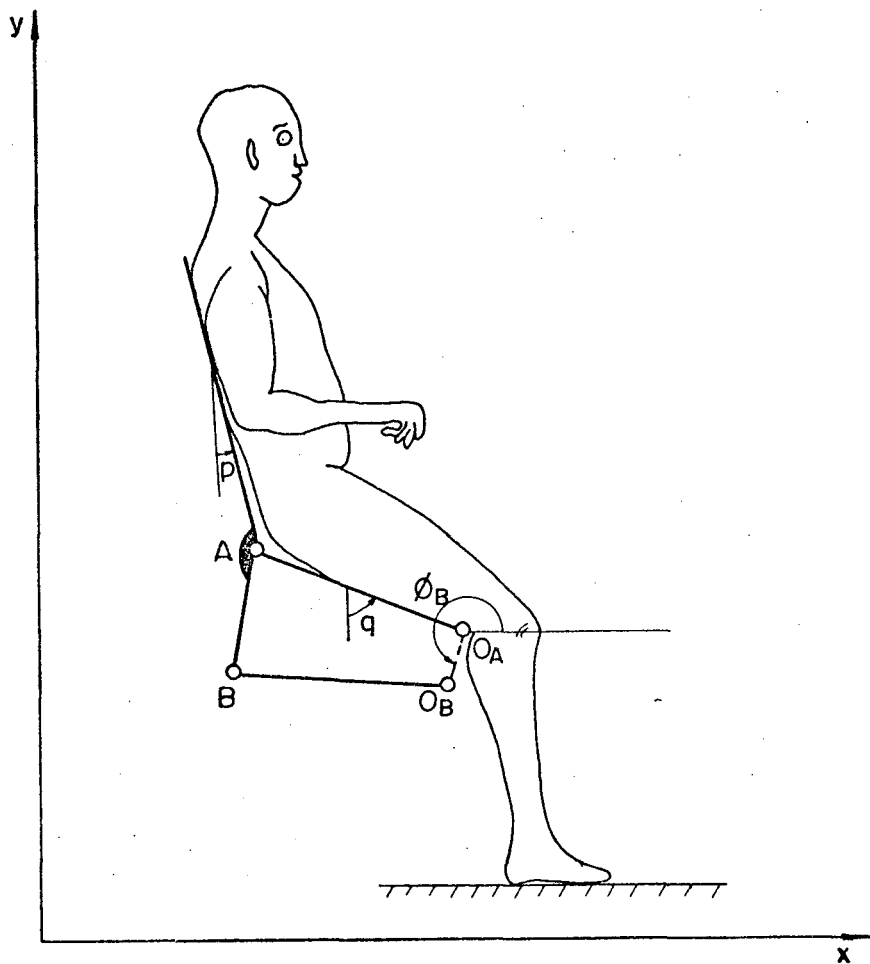


FIGURA 5.13 - Mecanismo base para a cadeira de paraplégicos

A relação funcional entre a barra de entrada (assento) e a de saída, ou seja, a barra acopladora (encosto), está representada pela curva da figura 5.14, reproduzida da referência (20). Um total de 19 (dezenove) pontos foram selecionados para representar esta curva.

A função objetiva, neste caso, é dada por

$$f(V) = E_2$$

onde E_2 é definido por

$$E_2 = W_2 \sum_{i=1}^{m-1} \left[\Delta\theta_{3i}^* - \Delta\theta_{3i} \right]^2$$

com

$$\Delta\theta_{3i}^* = \theta_{3i+1}^* - \theta_{3i}^*$$

que são os deslocamentos angulares desejados para a barra acopladora, e

$$\Delta\theta_{3i} = \theta_{3i+1} - \theta_{3i}$$

são os deslocamentos angulares reais.

No processo de otimização foram considerados somente os parâmetros L_1 , L_3 , L_4 e σ_1 , submetidos às restrições representadas pelas desigualdades anteriormente mencionadas, uma vez que os demais parâmetros foram considerados constantes, obedecendo às seguintes igualdades

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
q	0.	-5.	-10.	-15.	-20.	-25.	-30.	-35.	-40.	-45.	-50.	-55.	-60.	-65.	-70.	-75.	-80.	-85.	-90.
p	135	102	7.	4.	1.8	0.	-1.5	-2.7	-3.7	-4.5	-5.5	-6.0	-6.5	-6.6	-6.5	-6.0	-5.3	-3.5	0.

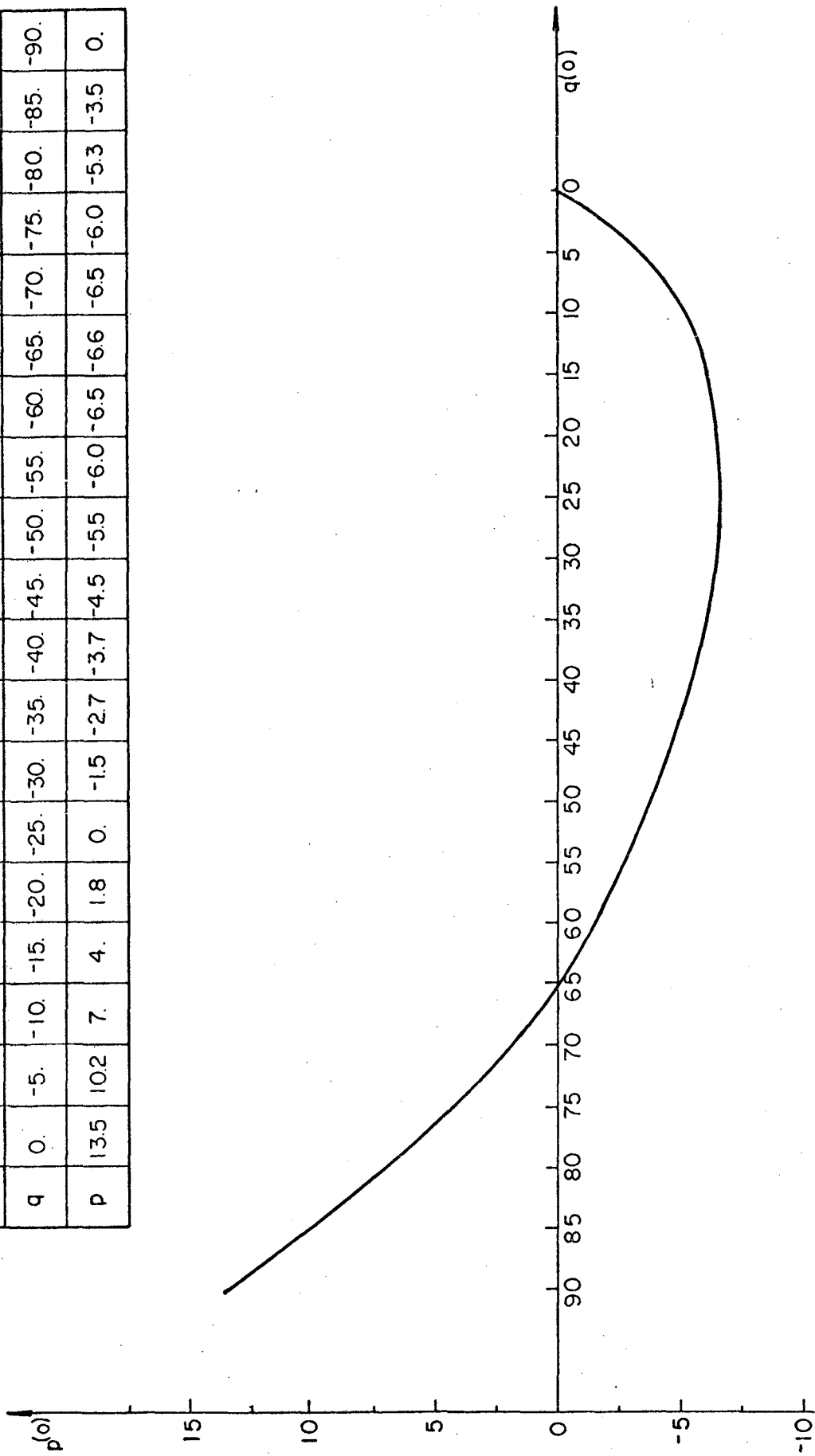


FIGURA 5.14 - Movimento ótimo para assento x encosto e o conjunto de 19 pontos escolhidos para representar a relação funcional

$$X_0 = 0$$

$$\sigma_1 = 0$$

$$Y_0 = 0$$

$$L_2 = 460$$

As figuras 5.15, 5.16 e 5.17 mostram a comparação entre a relação funcional desejada e a gerada pelos mecanismos obtidos nos três métodos de otimização, enquanto que as figuras 5.18, 5.19 e 5.20 ilustram algumas das posições ocupadas pelo assento e encosto da cadeira, representada por cada um dos mecanismos.

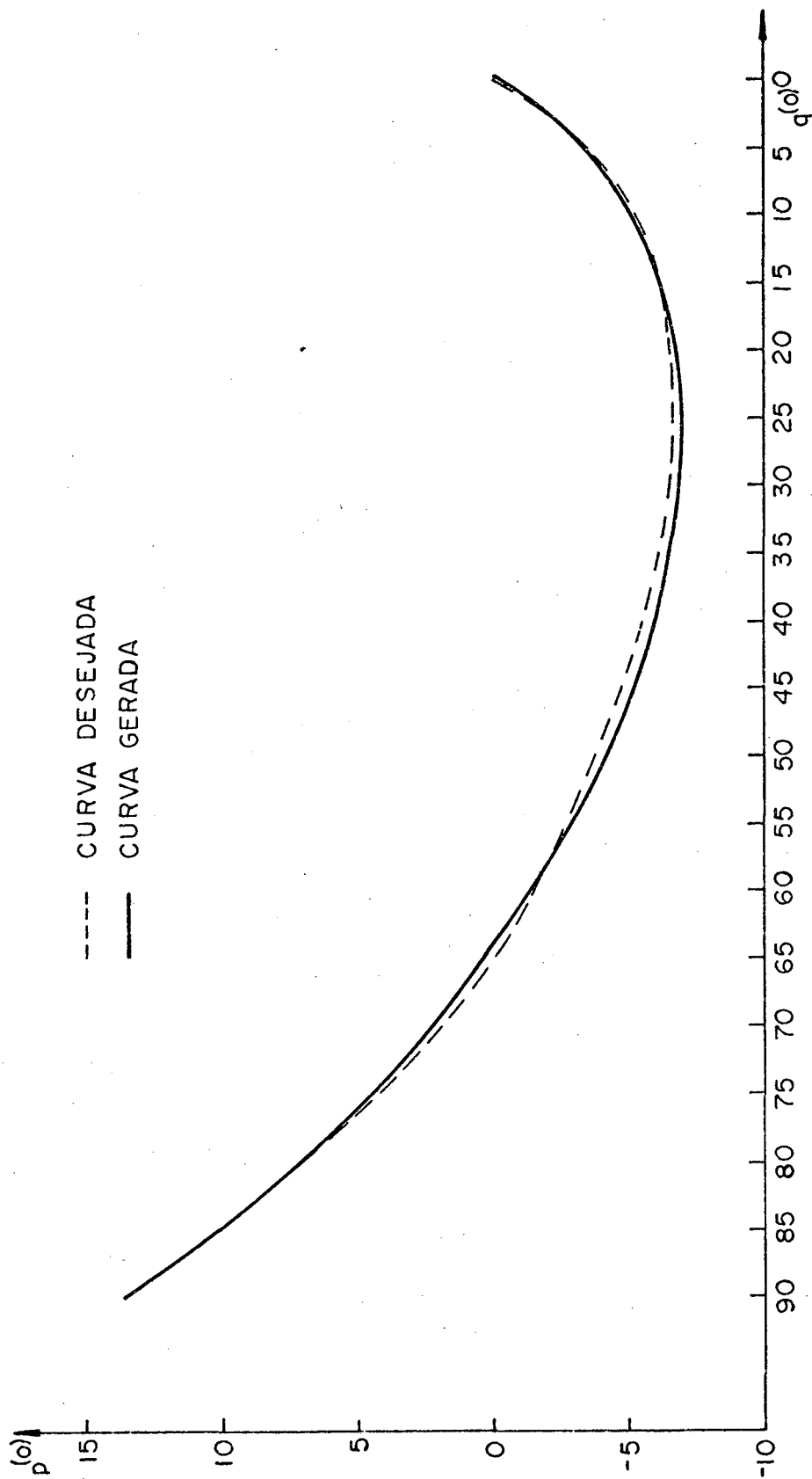


FIGURA 5.15 - Comparação entre a relação funcional desejada e a gerada pelo mecanismo obtido pelo método Simplex

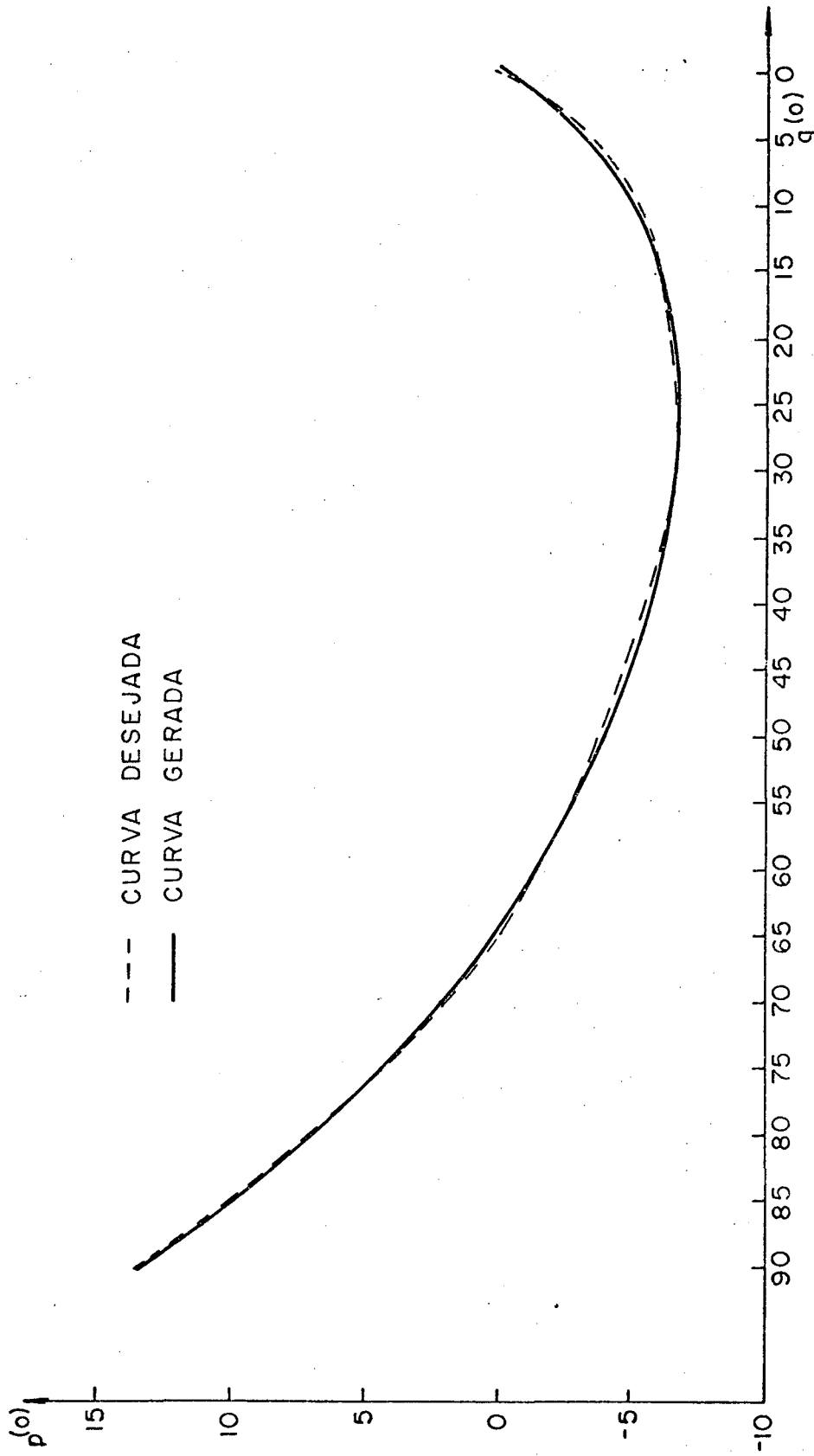


FIGURA 5.16 - Comparação entre a relação funcional desejada e a gerada pelo mecanismo obtido pelo método de Powell

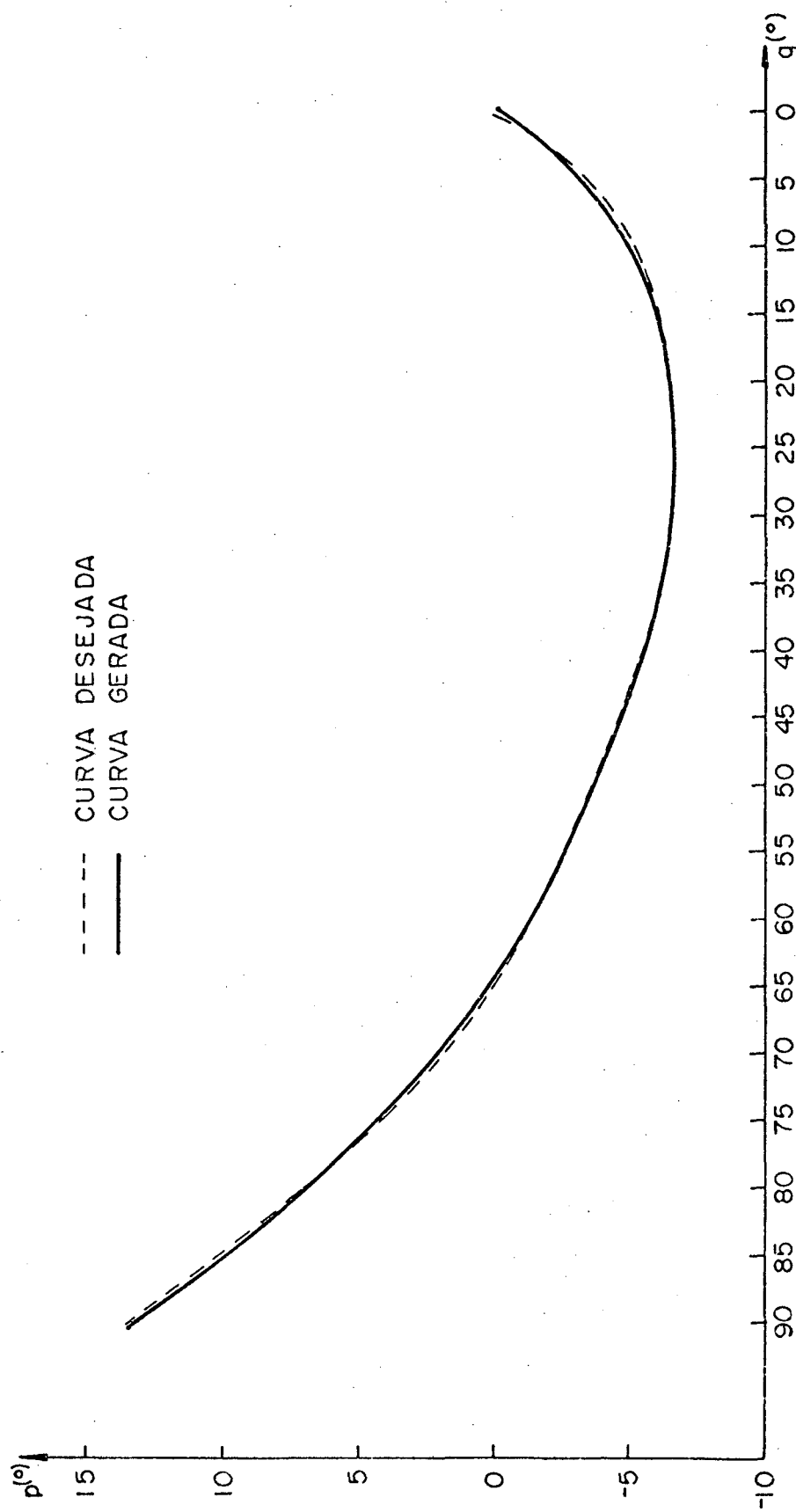


FIGURA 5.17 - Comparação entre a relação funcional desejada e a gerada pelo mecanismo obtido pelo método Flexplex

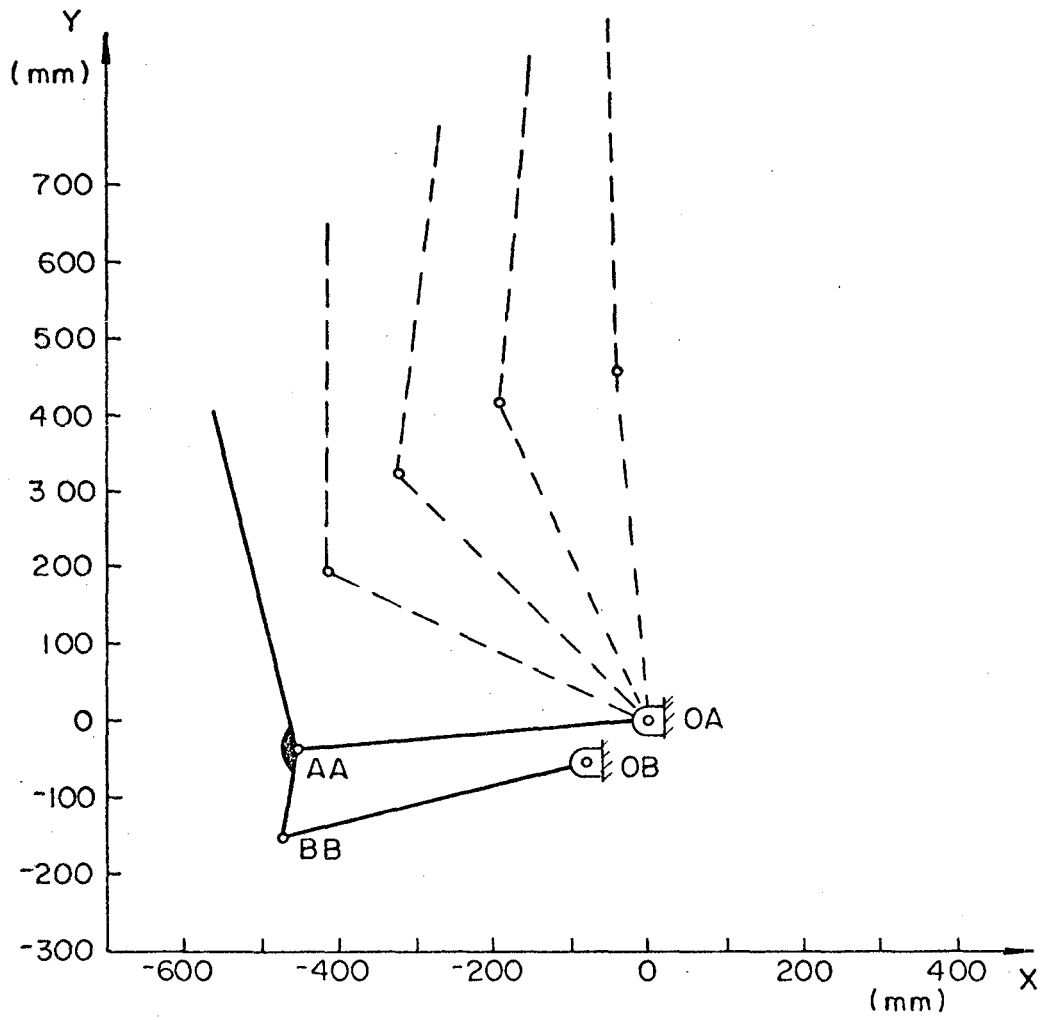


FIGURA 5.18 - Mecanismo obtido pelo método Simplex

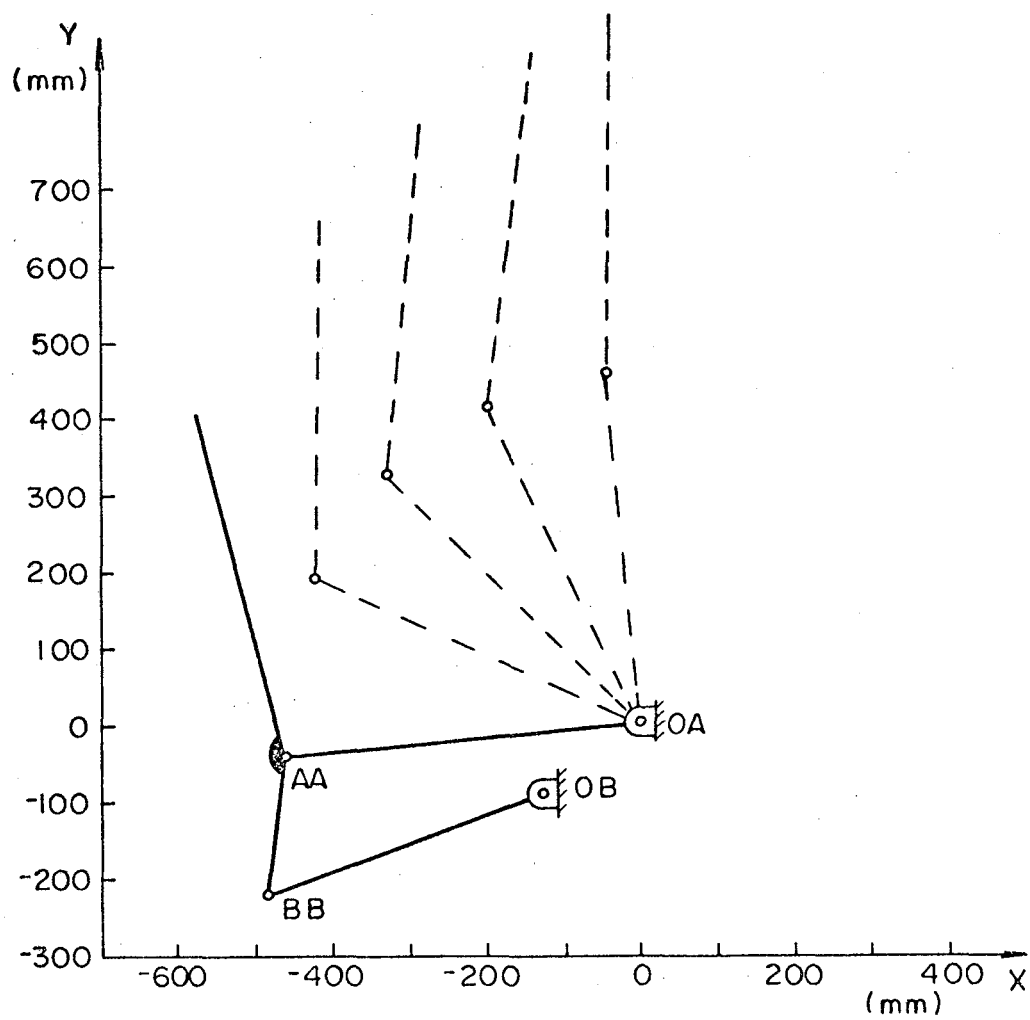


FIGURA 5.19 - Mecanismo obtido pelo método de Powell

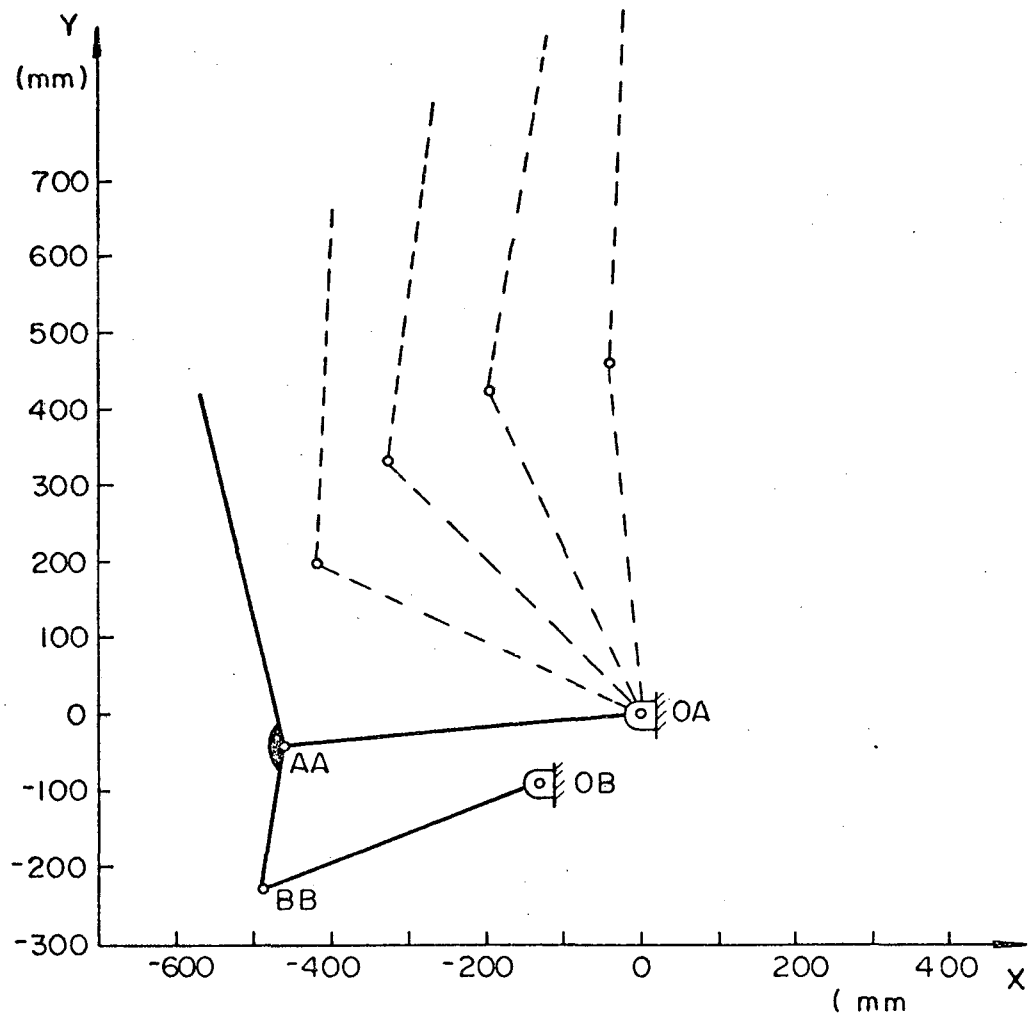


FIGURA 5.20 - Mecanismo obtido pelo método Flexplex

C A P Í T U L O VI

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES

A teoria de otimização, aplicada à síntese de mecanismos, demonstrou ser uma técnica eficiente na solução dos problemas da síntese. Existem, entretanto, determinados parâmetros, tais como número de pontos, critério de convergência e utilização de fator peso, que exercem maior influência sobre a qualidade da solução.

O número de pontos influencia sobremaneira a resolução do problema, uma vez que, quanto maior o número de pontos selecionados, melhor será a aproximação final obtida, mas, em contrapartida, tal procedimento demanda um maior tempo de processamento computacional. A fim de conciliar estes dois aspectos, a prática aconselha que seja utilizado um número de pontos compreendido entre 15 e 20.

O critério de convergência, por sua vez, é um outro fator que deve ser considerado, dado que pode ocorrer uma terminação prematura do processo. Neste trabalho foram utilizados os critérios propostos por cada método de otimização, pois os mesmos demonstraram ser um bom caminho para efetivar a parada iterativo.

A utilização do fator peso está, basicamente, ligada à necessidade de se obter uma maior precisão entre a solução desejada e a obtida em determinadas regiões da trajetória. Entretanto, sua utilização é difícil, dado que a melhora de partes da trajetória é feita em detrimento do restante da mesma, obrigando a uma escolha cuidadosa dos pontos em que se der sua aplicação.

A análise dos resultados obtidos permite concluir que os métodos de otimização utilizados possibilitam a obtenção de soluções bastante satisfatórias, dado que a tendência geral é a de levar à soluções próximas, com valores de erro aceitáveis para a especificação do problema, como ficou demonstrado nos exemplos apresentados.

Para problemas com restrição, os métodos de Powell e Flexplex fornecem uma maior flexibilidade na especificação de conjuntos de restrições, quando comparados com o método Simplex, uma vez que este último apenas permite especificar as restrições em termos da faixa de variação dos parâmetros que representam o mecanismo.

Com relação ao método de Powell, observou-se que, em alguns casos, quando são especificadas suposições iniciais que caracterizam um comportamento bastante adverso do desejado, o método pode apresentar dificuldades na obtenção da solução do problema. Nestes casos, uma nova especificação deve ser adotada ou, alternativamente, pode-se usar o método Simplex para efetuar uma primeira aproximação, e, a partir deste resultado, proceder-se a aplicação dos mesmos no método de Powell.

Um procedimento de grande eficácia para a obtenção de soluções no processo de otimização é o de utilizar, como suposições iniciais, mecanismos obtidos através dos métodos analítico e grá-

fico. Nestes casos, uma convergência rápida é obtida e a solução encontrada, bastante expressiva.

6.2. RECOMENDAÇÕES

A realização deste trabalho evidenciou possibilidades de ampliações, sugerindo-se como desenvolvimentos futuros:

a) Estender os programas para acomodar as características dinâmicas do mecanismo articulado plano de quatro barras, permitindo, desta forma, que restrições referentes a velocidades, acelerações e forças nas barras sejam especificadas pelo projetista;

b) Utilizar os métodos de otimização já implantados para solucionar problemas da síntese de mecanismos espaciais;

c) Elaborar um novo método de otimização, utilizando-se o método Simplex, juntamente com a técnica de funções penalidade, possibilitando, desta forma, uma maior flexibilidade na especificação de restrições de igualdade e desigualdade. Este novo método poderia ser utilizado nos itens a e b.

A P Ê N D I C E I

TEOREMA DE ROBERT-CHEBYSHEV

Uma propriedade singular do quadrilátero articulado plano é encontrada no teorema de Robert-Chebyshev. Este teorema garante que, a partir de um mecanismo dado, é possível obter-se dois outros mecanismos, de tal forma que ambos gerem a mesma trajetória do mecanismo original. Estes dois mecanismos são denominados de cognados da trajetória e são construídos por meio de uma sucessão de paralelogramos relacionados ao mecanismo original, como mostrado na figura I.1.

O procedimento para localização dos pontos B', C', A', A'', O_a, descrito abaixo, foi retirado do trabalho apresentado por Zanini [20].

Considerar o sistema de coordenadas (X,Y) passando por O_bO_c (figura I.2). Os dois sistemas de coordenadas (X,Y) e (U,V) são relacionados pela transformação

$$U_i = X_i \cos \psi - Y_i \operatorname{sen} \psi + U_1 \quad (I.1)$$

$$V_i = X_i \operatorname{sen} \psi + Y_i \cos \psi + V_1$$

onde
$$\psi = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[(V_2 - V_1) / (U_2 - U_1) \right] \quad (I.2)$$

Invertendo as equações (I.1), segue-se que

$$X_i = (U_i - U_1) \cos \psi + (V_i - V_1) \operatorname{sen} \psi \quad (\text{I.3})$$

$$Y_i = (U_i - U_1) \operatorname{sen} \psi + (V_i - V_1) \cos \psi$$

$$i = 1, 2, \dots, 5$$

As dimensões de todas as barras e as direções angulares podem ser calculadas por

$$R_{ij} = \left[(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{I.4})$$

$$\phi_{ij} = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[(Y_j - Y_i) / (X_j - X_i) \right]$$

onde $i \neq j$

As coordenadas dos pontos desconhecidos, para $i = 6, 7, \dots, 10$, são determinadas pelas expressões abaixo relacionadas

$$X_6 = R_{35} \cos \phi_{35}$$

$$Y_6 = R_{35} \operatorname{sen} \phi_{35}$$

$$X_7 = X_6 + \frac{R_{13} R_{35}}{R_{34}} \cos (\phi_{13} + \phi_{35} - \phi_{34})$$

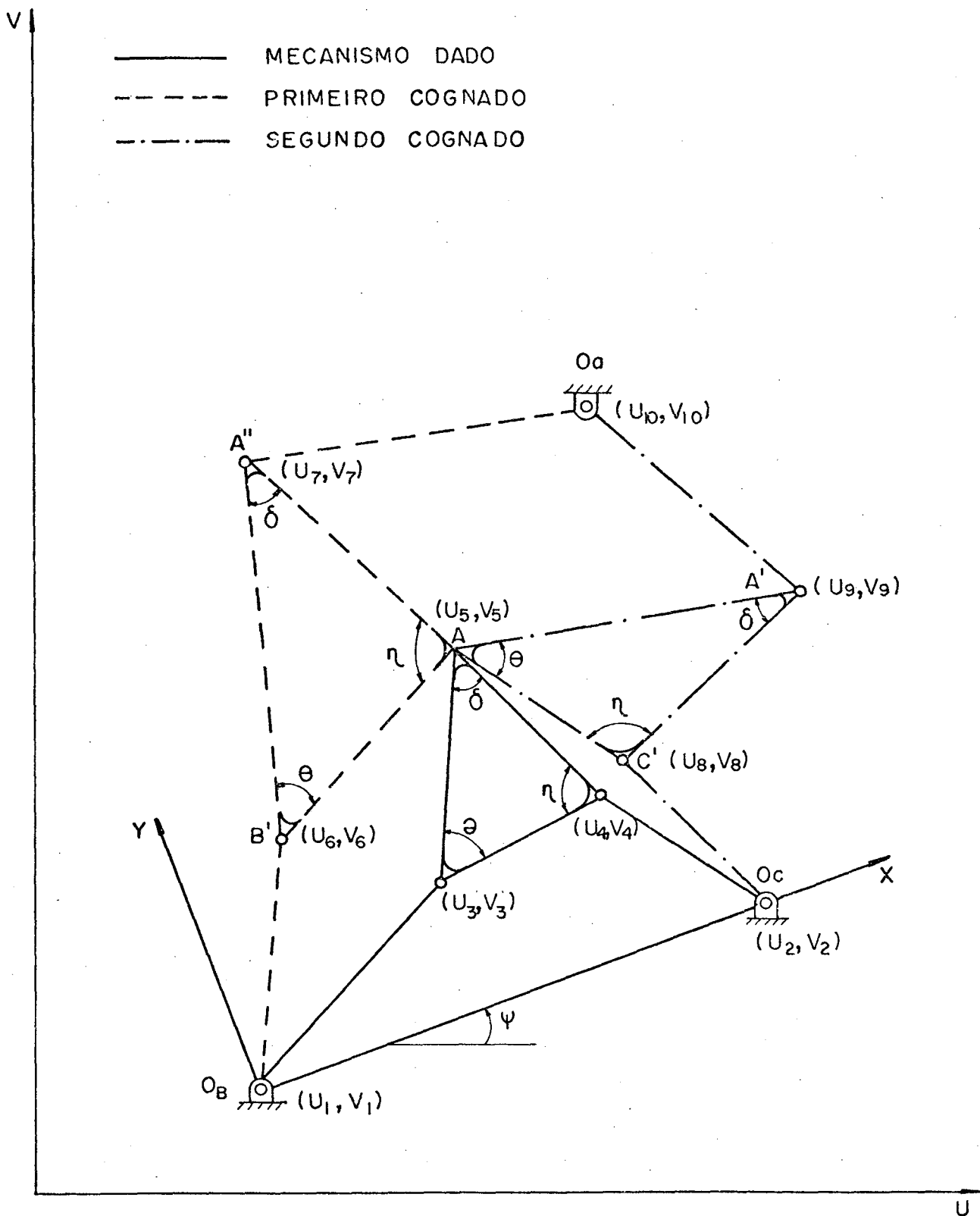


FIGURA I.1 - Os mecanismos cognados

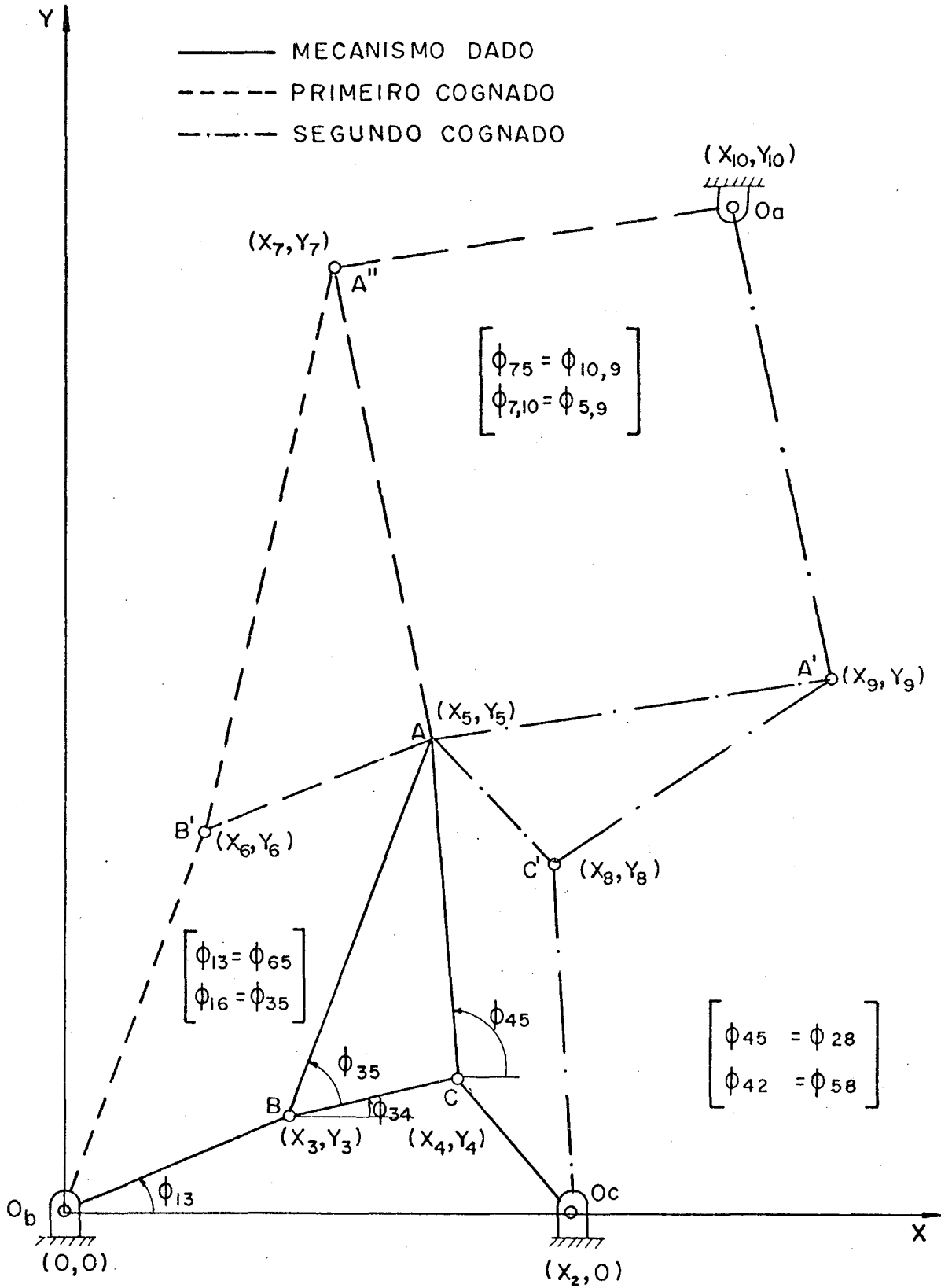


FIGURA I.2 - Mecanismos cognados no sistema de referênci especial

$$Y_7 = Y_6 + \frac{R_{13} R_{35}}{R_{34}} \text{sen } (\phi_{13} + \phi_{35} - \phi_{34})$$

$$X_8 = X_2 + R_{45} \cos \phi_{45}$$

$$Y_8 = Y_2 + R_{45} \text{sen } \phi_{45}$$

$$X_9 = X_5 + \frac{R_{42} R_{35}}{R_{34}} \cos (\phi_{42} + \phi_{35} - \phi_{34})$$

$$Y_9 = Y_5 + \frac{R_{42} R_{35}}{R_{34}} \text{sen } (\phi_{42} + \phi_{35} - \phi_{34})$$

$$X_{10} = \frac{X_2 R_{35}}{R_{34}} \cos (\phi_{35} - \phi_{34})$$

$$Y_{10} = \frac{Y_2 R_{35}}{R_{34}} \text{sen } (\phi_{35} - \phi_{34})$$

Após todos os pontos terem sido encontrados, a equação (I.1) pode ser usada para obter-se as coordenadas dos pontos no sistema de coordenadas (U,V).

A P Ê N D I C E II

MÉTODO DE ZANINI DE SELEÇÃO DE PONTOS
NA CURVA GERADA

Considerando-se a figura II.1, vê-se que a curva gerada é cercada por um retângulo de lados A e B, onde

$$A = \alpha_{MÁX} - \alpha_{MÍN} \quad (II.1)$$

$$B = \beta_{MÁX} - \beta_{MÍN}$$

O ponto 1, na curva desejada, será considerado em um dos dois extremos da curva, o direito ou o esquerdo.

Fazendo

$$C = A - B \quad (II.2)$$

dois casos práticos resultarão:

a) $C > 0$

Neste caso, o ponto 1 será em $\alpha_{MÍN}$ e (α_i, β_i) serão redefinidos de acordo com este ponto escolhido;

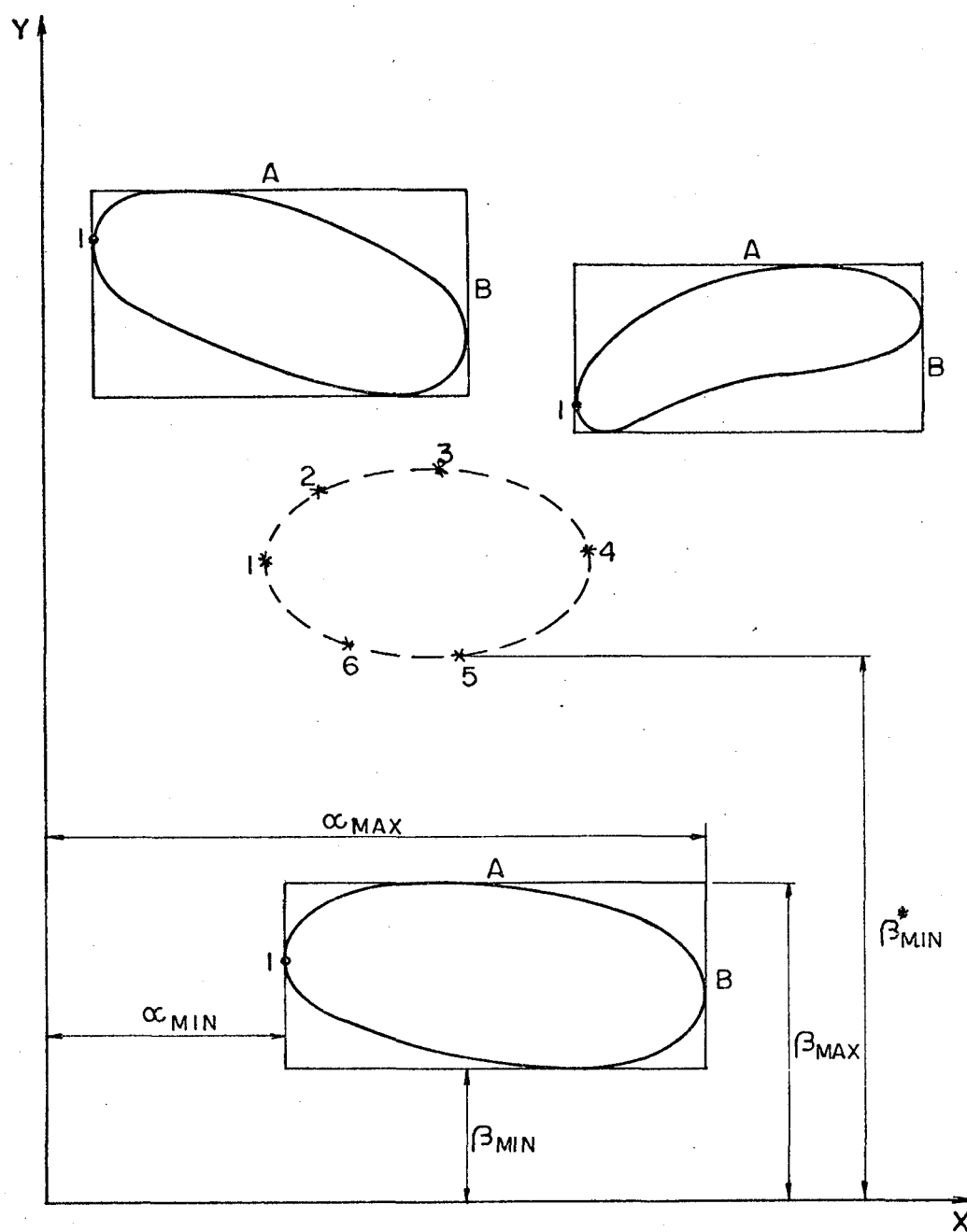


FIGURA II.1 - O ponto 1 é selecionado em α_{MIN}

b) $C < 0$

Neste caso, podem ocorrer duas situações:

$$b.1) \beta_{M\acute{I}N} - \beta_{M\acute{I}N}^* \geq 0$$

$$\text{Se } \alpha_{(\beta_{M\acute{A}X})} - \alpha_{(\beta_{M\acute{I}N})} > 0 ,$$

o ponto 1 será em $\beta_{M\acute{I}N}$, como mostrado na figura II.2.

$$\text{Se } \alpha_{(\beta_{M\acute{A}X})} - \alpha_{(\beta_{M\acute{I}N})} \leq 0 ,$$

o ponto 1 será em $\beta_{M\acute{A}X}$, como mostrado na figura II.3;

$$b.2) \beta_{M\acute{I}N} - \beta_{M\acute{I}N}^* < 0$$

$$\text{Se } \alpha_{(\beta_{M\acute{A}X})} - \alpha_{(\beta_{M\acute{I}N})} > 0 ,$$

o ponto 1 será em $\beta_{M\acute{I}N}$, como mostrado na figura II.4.

$$\text{Se } \alpha_{(\beta_{M\acute{A}X})} - \alpha_{(\beta_{M\acute{I}N})} \leq 0 ,$$

o ponto 1 será em $\beta_{M\acute{A}X}$, como mostrado na figura II.5.

Escolhido o ponto 1, testa-se o ponto 2 contra todos os pontos da curva gerada, usando a expressão

$$D_2 = \left\{ \left[(\alpha_2^* - \alpha_j)^2 + (\beta_2^* - \beta_j)^2 \right] + \left[\phi_{j+1} - \phi_j - \Delta\phi_1^* \right] \right\}^{1/2} \quad (II.3)$$

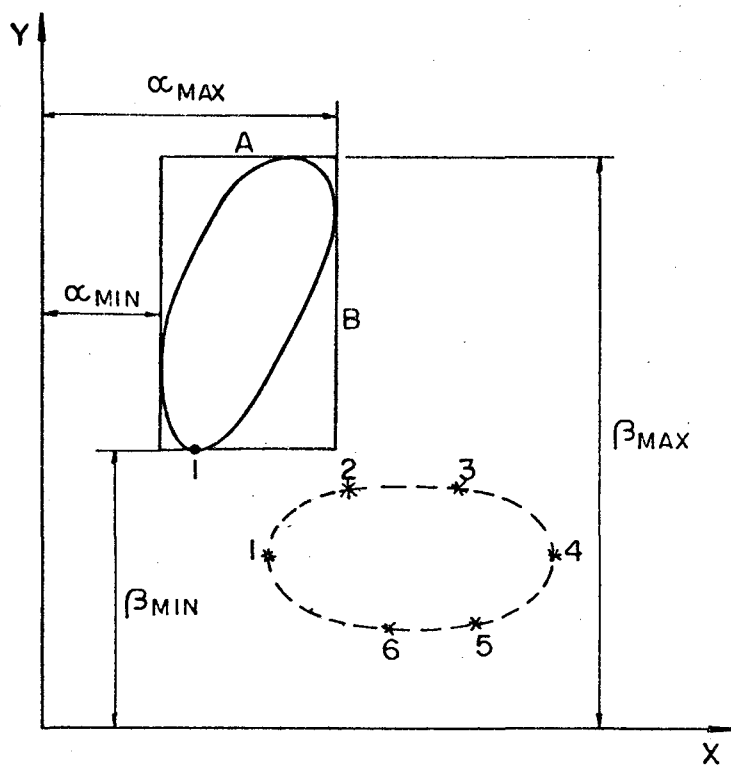


FIGURA II.2 - O ponto 1 é escolhido em β_{MIN}

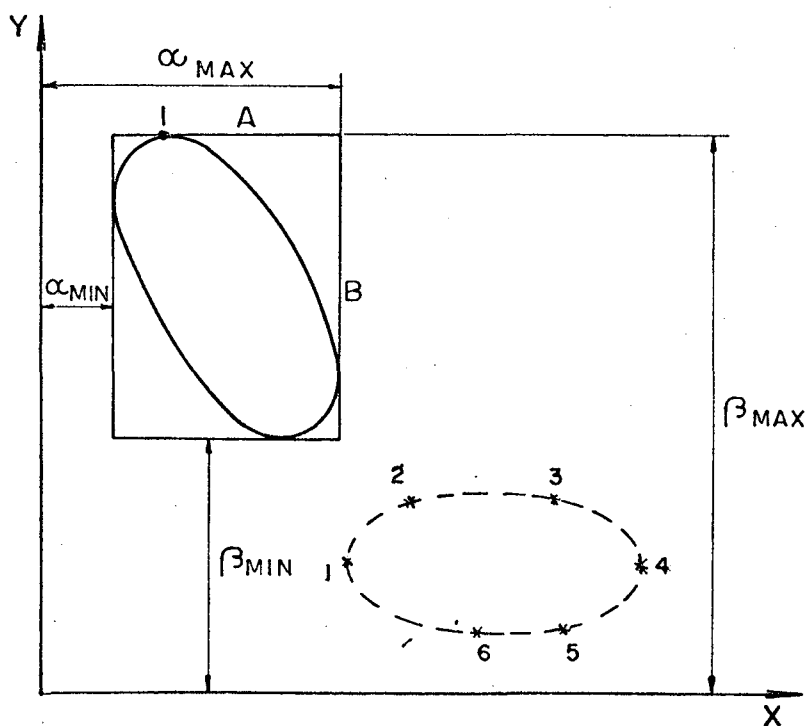


FIGURA II.3 - O ponto e é selecionado em β_{MAX}

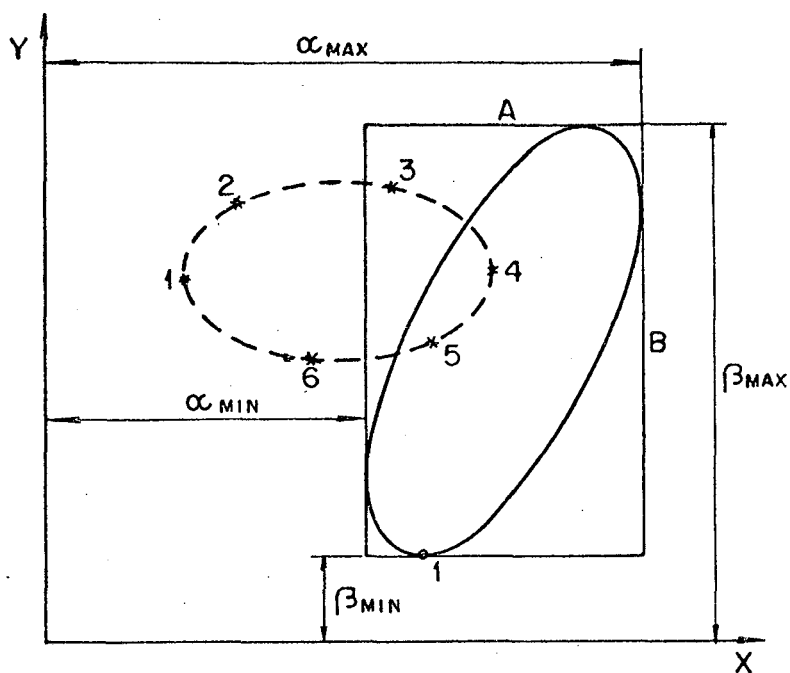


FIGURA II.4 - O ponto \tilde{e} selecionado em β_{MIN}

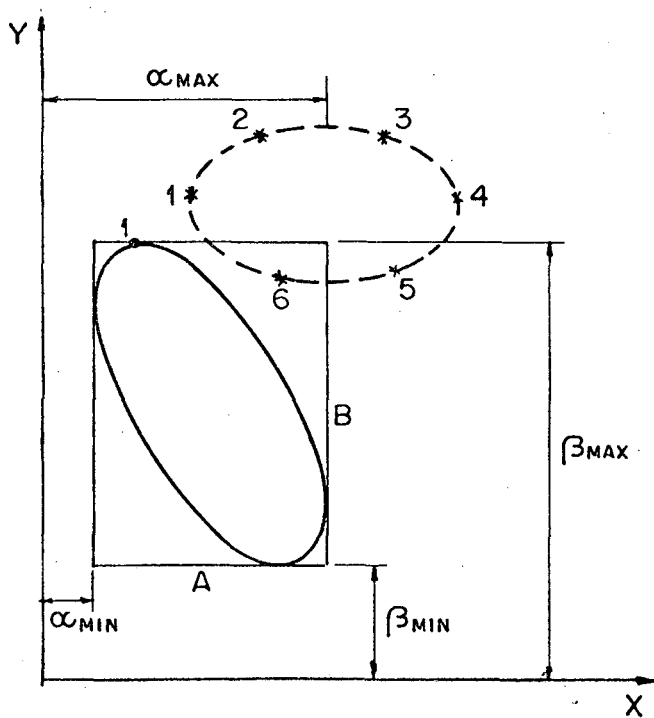


FIGURA II.5 - O ponto \tilde{e} selecionado em β_{MAX}

onde D_2 é a "distância" entre o ponto 2, na trajetória desejada, e o ponto correspondente, na curva gerada; $j = 2, \dots, p$, onde p é limitado de acordo com o número total de pontos M na curva real e ϕ_k^* são deslocamentos angulares arbitrários, providos pelo projetista, para serem comparados com os ângulos do acoplador ϕ_j do mecanismo real. $\Delta\phi_k^* = \phi_{k+1}^* - \phi_k^*$, com $k = 1, \dots, m-1$. O ponto que produz o menor valor para a equação (II.3) será escolhido para representar o ponto 2 da curva gerada. Os pontos subsequentes são determinados pelo mesmo método. Isto é feito circulando a curva gerada nos sentidos horário e anti-horário, como ilustrado na figura II.6. A configuração que proporciona o menor erro é, então, considerada.

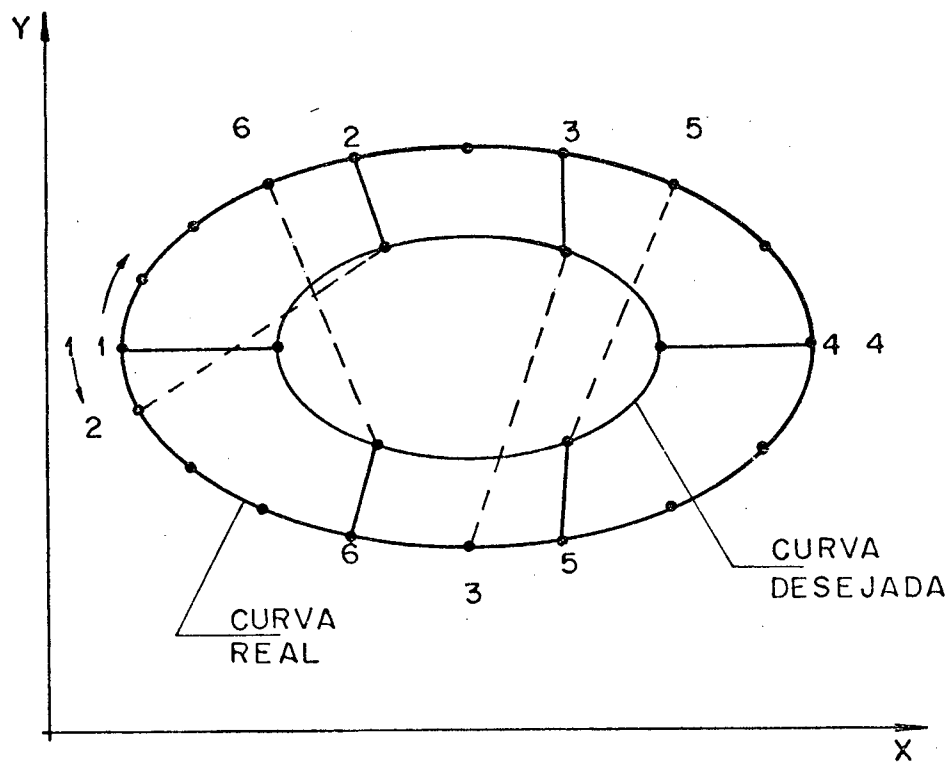


FIGURA II.6 - Seleção de pontos na curva gerada

A P Ê N D I C E III

A EQUAÇÃO DA MALHA

As coordenadas dos pivôs móveis A e B, do mecanismo da figura III.1, são dadas por

$$x_A = L_2 \cos \theta_2 \quad ; \quad x_B = L_1 + L_4 \cos \theta_4$$

$$y_A = L_2 \sin \theta_2 \quad ; \quad y_B = L_4 \sin \theta_4$$

Seja L_3 o comprimento da barra acopladora, logo

$$L_3^2 = (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2$$

desenvolvendo, obtêm-se

$$\cos (\theta_4 - \theta_2) - r_1 \cos \theta_4 = r_3 - r_2 \cos \theta_2 \quad (\text{III.1})$$

onde

$$r_1 = \frac{L_1}{L_2} \quad , \quad r_2 = \frac{L_1}{L_4}$$

e

$$r_3 = \frac{L_1^2 + L_2^2 - L_3^2 + L_4^2}{2 L_2 L_4}$$

A equação (III.1) pode então ser escrita da seguinte forma

$$P_1 \sin \theta_4 + P_2 \cos \theta_4 = P_3 \quad (\text{III.2})$$

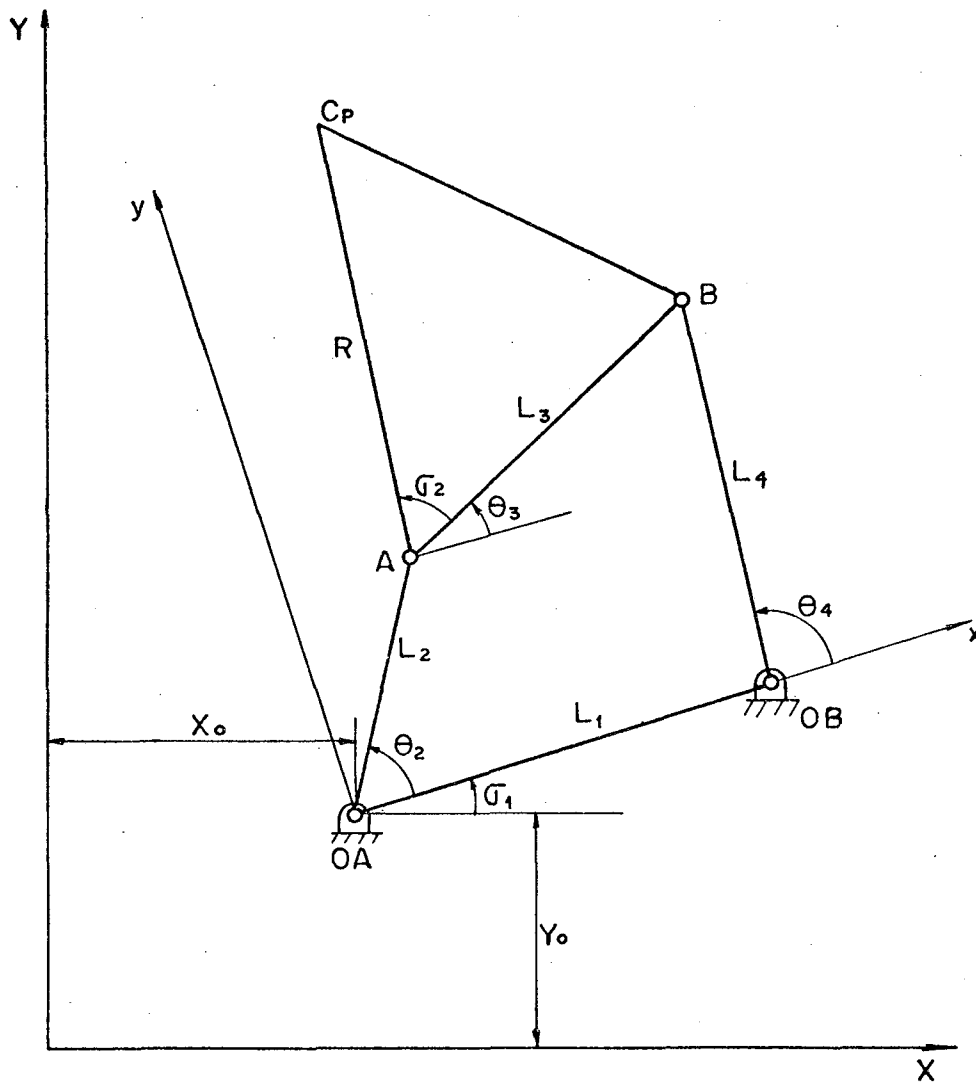


FIGURA III.1 - Configuração geral do quadrilátero articulado

onde
$$P_1 = \text{sen } \theta_2 \quad , \quad P_2 = \text{cos } \theta_2 - r_1$$

e
$$P_3 = r_3 - r_2 \text{cos } \theta_2$$

Expressando $\text{sen } \theta_4$ e $\text{cos } \theta_4$ em função do arco metade, tem-se

$$\text{sen } \theta_4 = \frac{2 \text{tg } \theta_4/2}{1 + \text{tg}^2 \theta_4/2} \quad ; \quad \text{cos } \theta_4 = \frac{1 - \text{tg}^2 \theta_4/2}{1 + \text{tg}^2 \theta_4/2}$$

Substituindo estes valores na equação (III.2), tem-se

$$(P_2 + P_3) \text{tg}^2 \theta_4/2 - 2P_1 \text{tg } \theta_4/2 + (P_3 - P_2) = 0 \quad (\text{III.3})$$

A equação (III.3) é uma equação do segundo grau em $\text{tg } \theta_4/2$, cuja solução é

$$\text{tg } \theta_4/2 = \frac{P_1 \pm \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - P_3^2}}{P_2 + P_3}$$

Portanto, θ_4 é dado por

$$\theta_{4,1,2} = 2 \text{arc tg } \left[\frac{P_1 \pm \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - P_3^2}}{P_2 + P_3} \right] \quad (\text{III.4})$$

Um resultado similar pode ser encontrado, considerando θ_3 como o parâmetro desconhecido. Neste caso,

$$L_4^2 = \left[L_1 - (L_2 \text{cos } \theta_2 + L_3 \text{cos } \theta_3) \right]^2 + \left[L_2 \text{sen } \theta_2 + L_3 \text{sen } \theta_3 \right]^2$$

Desenvolvendo, obtêm-se

$$P_1 \operatorname{sen} \theta_3 + P_2 \operatorname{cos} \theta_3 = P_4 \quad (\text{III.5})$$

onde

$$P_4 = r_4 \operatorname{cos} \theta_2 - r_5$$

e

$$r_4 = \frac{L_1}{L_3}, \quad r_5 = \frac{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 - L_4^2}{2 L_2 L_3}$$

Considerando $\operatorname{sen} \theta_3$ e $\operatorname{cos} \theta_3$ expressos pelos seus ângulos metade, tem-se a seguinte expressão final para θ_3

$$\theta_{3_{1,2}} = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[\frac{P_1 \pm \sqrt{P_1^2 + P_2^2 - P_4^2}}{P_2 + P_4} \right] \quad (\text{III.6})$$

Observando as equações (III.4) e (III.6), verifica-se que tanto θ_4 como θ_3 podem assumir dois valores. Esses valores correspondem às duas configurações do mecanismo.

A P Ê N D I C E IV

DETERMINAÇÃO DE V_N NA REFLEXÃO, EXPANSÃO
E CONTRAÇÃO DO SIMPLEX

A expressão genérica é dada por

$$V_N = 0,25(3V + V_h) \quad (\text{IV.1})$$

Sua aplicação será, agora, analisada para cada uma das três operações utilizadas no simplex.

REFLEXÃO

Na reflexão do ponto com valor máximo da função (figura IV.1), V_* é o ponto refletido que não satisfaz as restrições. Neste caso, V_N é determinado por

$$\left[V_* \quad V_N \right] = \frac{1}{4} \left[V_* \quad V_h \right]$$

$$\frac{V_* - V_h}{V_N - V_h} = \frac{4}{3}$$

Portanto,

$$V_N = 0,25(3V_* + V_h) \quad (\text{IV.2})$$

Como mostrado na equação (IV.2), na operação de reflexão, o V da equação (IV.1) representa o ponto refletido V_* .

EXPANSÃO

No caso em que a expansão falha, o novo valor de V_N é determinado como segue (figura IV.2):

$$\left[V_{**} \quad V_N \right] = \frac{1}{4} \left[V_{**} \quad V_* \right]$$

$$\frac{V_{**} - V_*}{V_N - V_*} = \frac{4}{3}$$

que, desenvolvendo, fornece

$$V_N = 0,25(3V_{**} + V_*) \quad (\text{IV.3})$$

Neste caso, o V da equação (IV.1) representa V_{**} e V_h representa V_* .

CONTRAÇÃO

Quando o ponto contraído não satisfaz as restrições, duas situações podem ocorrer:

1) O ponto refletido, ponto anterior à contração, alcançou um valor da função objetiva, menor do que V_h . Neste caso, V_h é substituído por V_* , o ponto refletido, e o novo valor, determinado como segue (figura IV.3)

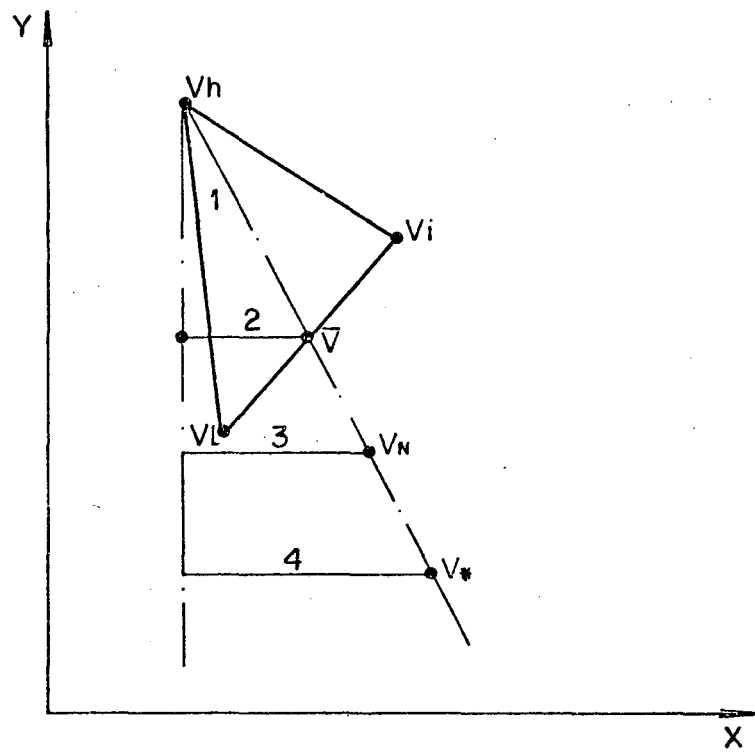


FIGURA IV.1 - V_N na reflexão

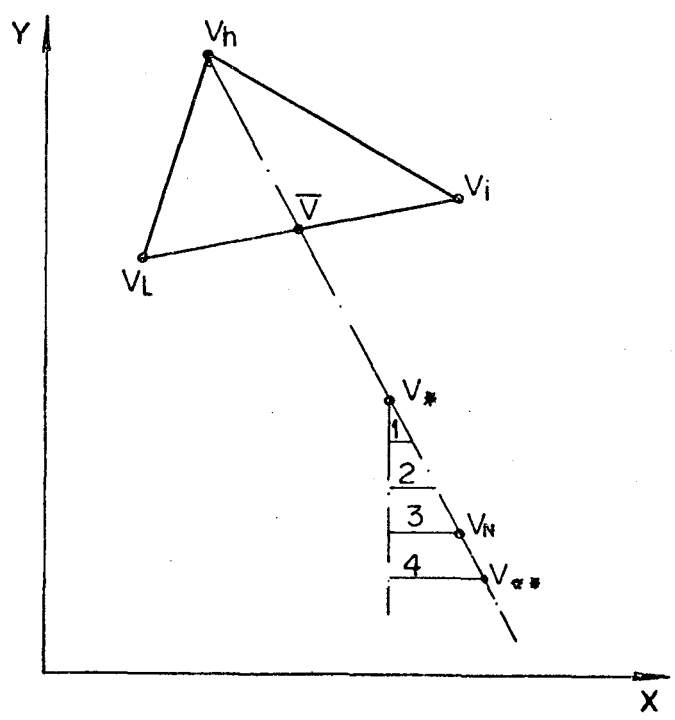


FIGURA IV.2 - V_N na expansão

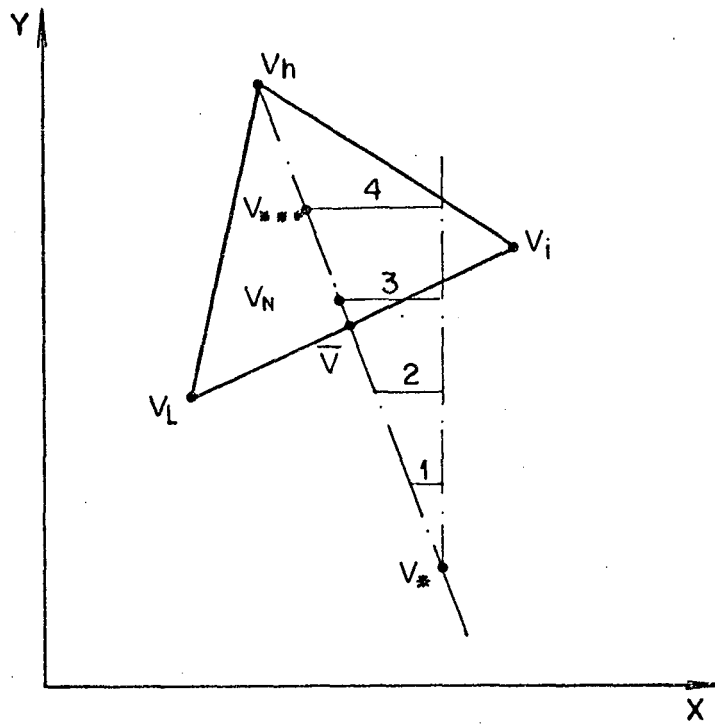


FIGURA IV.3 - V_N na contração

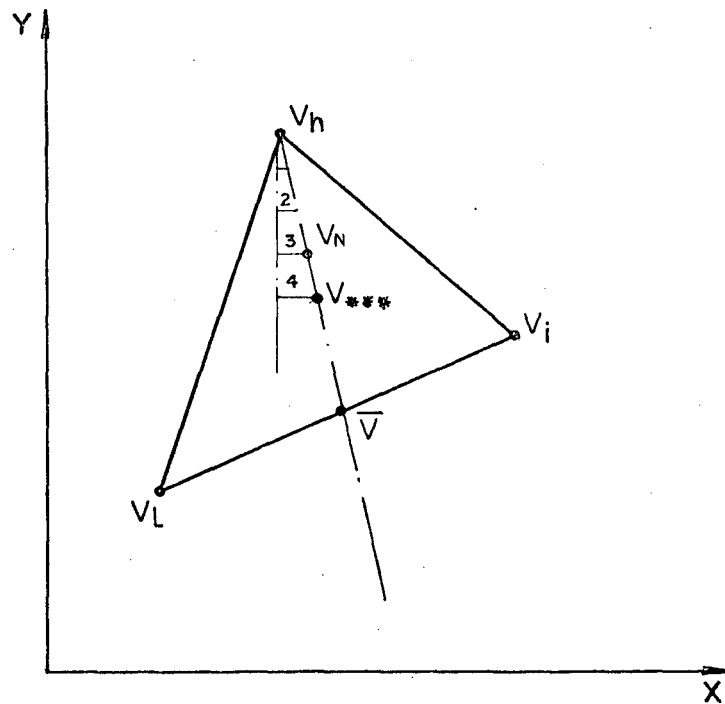


FIGURA IV.4 - V_N na contração

$$\begin{bmatrix} V_{***} & V_N \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} V_{***} & V_* \end{bmatrix}$$

$$\frac{V_N - V_{***}}{V_* - V_{***}} = \frac{1}{4}$$

onde

$$V_N = 0,25 (3V_{***} + V_*) \quad (\text{IV.4})$$

2) O ponto refletido anteriormente era maior do que V_h . Neste caso, o novo ponto contraído é dado por (figura IV.4)

$$\begin{bmatrix} V_{***} & V_N \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} V_{***} & V_h \end{bmatrix}$$

$$\frac{V_N - V_h}{V_{***} - V_h} = \frac{3}{4}$$

logo,

$$V_N = 0,25 (3V_{***} + V_h) \quad (\text{IV.5})$$

A P Ê N D I C E V

PROCURA UNIDIMENSIONAL POR
"GOLDEN SECTION"

A teoria consiste na determinação do mínimo de uma função, através de reduções sucessivas de um intervalo inicial $\Delta^{(0)}$ conhecido.

A procura é baseada na divisão do intervalo inicial em dois outros intervalos, um maior e outro menor, de tal forma que a razão entre o intervalo inicial e o maior seja a mesma entre o intervalo maior e o menor. Duas frações de Fibonacci são empregadas

$$F_1 = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \approx 0,38$$

$$F_2 = \frac{\sqrt{5} - 1}{2} \approx 0,62$$

É necessário iniciar a procura em uma direção, a fim de minimizar $f(X)$. Para tal, considerar os três últimos valores de X , utilizados na procura do mínimo de $f(X)$, designados por $X_3^{(0)}$, $X_2^{(0)}$ e $X_1^{(0)}$, onde $f(X_3^{(0)}) \geq f(X_2^{(0)})$ e $X_3^{(0)}$ é maior que $X_1^{(0)}$ e $X_2^{(0)}$, e fazer $\Delta^{(k)} = X_3^{(k)} - X_1^{(k)}$ (ver figura V.1). Isto posto, determinar o próximo intervalo para o estágio $(k+1)$ da seguinte forma

$$Y_1^{(k)} = X_1^{(k)} + F_1 \Delta^{(k)}$$

$$Y_2^{(k)} = X_1^{(k)} + F_2 \Delta^{(k)} = X_3^{(k)} - F_1 \Delta^{(k)}$$

Se $f(Y_1^{(k)}) < f(Y_2^{(k)})$, então

$$\Delta^{(k+1)} = Y_2^{(k)} - Y_1^{(k)}$$

e

$$X_1^{(k+1)} = X_1^{(k)}, \quad X_3^{(k+1)} = Y_2^{(k)}$$

Se $f(Y_1^{(k)}) > f(Y_2^{(k)})$, então

$$\Delta^{(k+1)} = X_3^{(k)} - Y_1^{(k)}$$

e

$$X_1^{(k+1)} = Y_1^{(k)}, \quad X_3^{(k+1)} = X_3^{(k)}$$

Se $f(Y_1^{(k)}) = f(Y_2^{(k)})$, então

$$\Delta^{(k+1)} = Y_2^{(k)} - X_1^{(k)} = X_3^{(k)} - Y_1^{(k)}$$

e

$$X_1^{(k+1)} = X_1^{(k)}, \quad X_3^{(k+1)} = Y_2^{(k)}$$

ou

$$X_1^{(k+1)} = Y_1^{(k)}, \quad X_3^{(k+1)} = Y_1^{(k)}$$

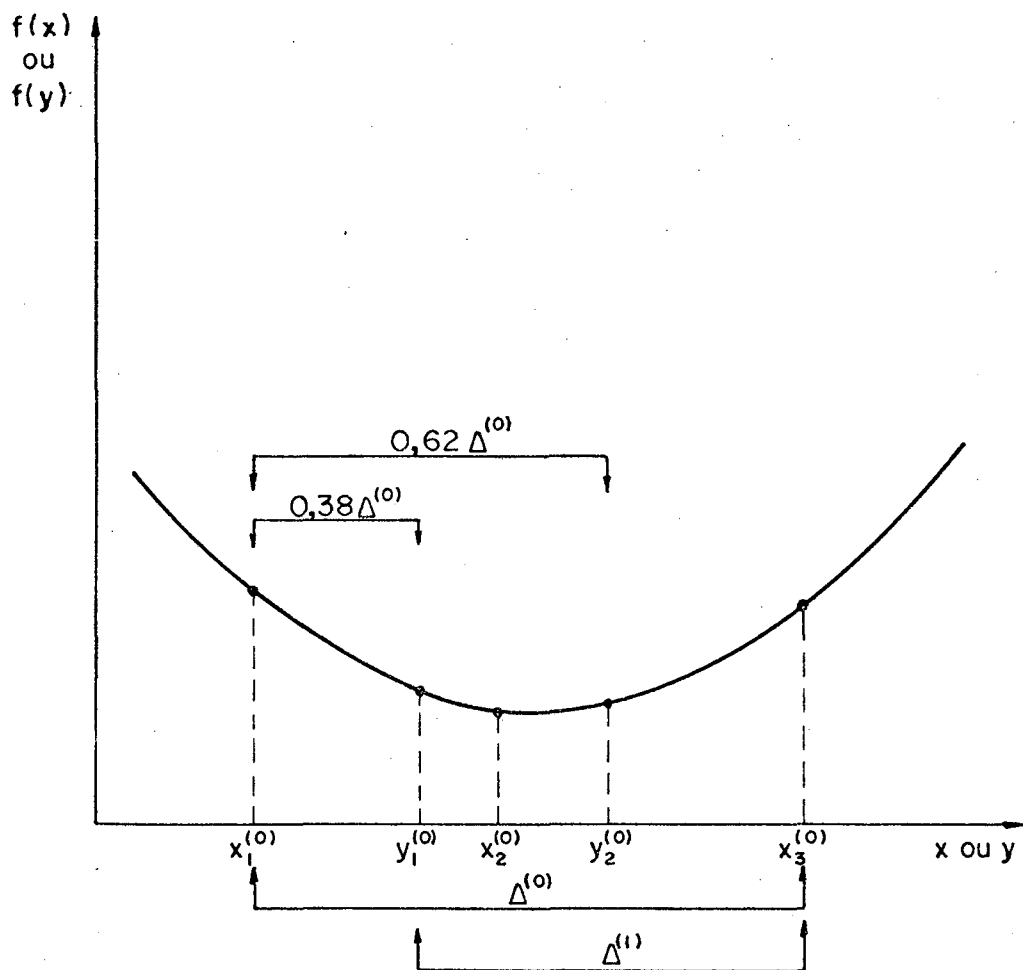


FIGURA V.1 - Procura por "Golden Section" no estágio inicial

O procedimento é concluído quando a redução feita no intervalo inicial atinge o valor especificado. No método Flexplex isto ocorre quando o tamanho do intervalo, que contém o mínimo de $T(V)$, é reduzido para um valor menor do que 1% do valor do critério de tolerância $\phi^{(k)}$.

A P Ê N D I C E VI

INTERPOLAÇÃO QUADRÁTICA

Considerar um vetor X_q e uma direção qualquer, representada pelo vetor unitário \hat{S} . Um vetor X , localizado nesta direção, será dado por

$$X = X_q + \lambda \hat{S}$$

Seja $f(X)$ uma função qualquer; então

$$f(X) = f(X_q + \lambda \hat{S}) = f(\lambda)$$

logo, f pode ser considerada uma função de λ (X_q e \hat{S} são considerados fixos).

Assumir que a função f pode ser aproximada por uma função quadrática em λ , na forma

$$f(\lambda) = a + b\lambda + c\lambda^2$$

então, o valor de λ para o qual $f(\lambda)$ é mínima será

$$\frac{df(\lambda)}{d\lambda} = b + 2c\lambda = 0$$

ou

$$\lambda^* = - \frac{b}{2c}$$

As constantes b e c podem ser avaliadas tomando-se três valores distintos para λ , ou seja, λ_1 , λ_2 e λ_3 , o que fornece

$$f_1 = f(\lambda_1) = a + b\lambda_1 + c\lambda_1^2$$

$$f_2 = f(\lambda_2) = a + b\lambda_2 + c\lambda_2^2$$

$$f_3 = f(\lambda_3) = a + b\lambda_3 + c\lambda_3^2$$

para $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = t/2$ e $\lambda_3 = t$, tem-se

$$f_1 = a$$

$$f_2 = a + \frac{b}{2}t + \frac{c}{4}t^2$$

$$f_3 = a + bt + ct^2$$

o que fornece

$$a = f_1$$

$$b = \frac{4f_2 - f_3 - 3f_1}{t}$$

$$c = \frac{2f_1 - 4f_2 + 2f_3}{t}$$

$$\text{Portanto } \lambda^* \approx \frac{f_3 - 4f_2 + 3f_1}{4f_1 - 8f_2 + 4f_3} \times t$$

e o vetor X para o qual $f(X)$ é um mínimo será dado por

$$X = X_q + \lambda^* \hat{S}$$

No método Flexplex, o tamanho de t é tomado como sendo

$$t = \left[\sum_{i=1}^n (v_{q,j} - v_{s,j}) \right]^{1/2}$$

e a direção \hat{S} determinada por

$$\hat{S} = \frac{(V_q - V_s)}{t}$$

onde V_q representa um ponto interior ao contorno formado pelas restrições impostas ao problema, e V_s , um ponto exterior.

A função $f(X)$ é representada por

$$Z(V) = \sum_{i=1}^p [g_i(V)]^2$$

onde p é o número total de restrições violadas em V_s .

Os valores de f_1 , f_2 e f_3 são dados por

$$f_1 = Z(V_q) \quad , \quad f_2 = Z(V_q + 0,5t\hat{S})$$

$$f_3 = Z(V_q + t\hat{S})$$

A P Ê N D I C E VII

OS PROGRAMAS DE OTIMIZAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Os métodos Simplex, Flexplex e Powell estão programados em linguagem FORTRAN IV e, atualmente, disponíveis para utilização, via terminal de vídeo, no sistema IBM 4341 da UFSC, utilizando precisão dupla para as variáveis reais.

Os programas foram elaborados de modo a permitir ao usuário solucionar os cinco problemas básicos da síntese de mecanismos. A variável ITYPE é utilizada para caracterizar o tipo de problema que deverá ser solucionado, isto é,

ITYPE = 1	para geração de trajetória
ITYPE = 2	para movimento coplanar
ITYPE = 3	para coordenação da trajetória
ITYPE = 4	para geração de função
ITYPE = 5	para coordenação angular

Informações referentes a subrotinas, entrada de dados e exemplos de relatórios de saída, são fornecidas para cada um dos programas.

2. PROGRAMA SIMPLEX

No programa principal são lidos alguns dados de entrada e é exercido o controle geral sobre todo o programa.

A subrotina PATH lê e imprime os dados de entrada para o problema de geração de trajetória.

A subrotina COPCRK lê e imprime os dados de entrada para os problemas de movimento coplanar e coordenação da trajetória.

A subrotina FUNANG lê e imprime os dados de entrada para os problemas de geração de função e coordenação angular.

A subrotina função ERROR controla a avaliação da função objetiva para os cinco problemas da síntese de mecanismos.

A subrotina KINEM determina os parâmetros de movimento para o mecanismo gerado no processo de otimização, quando da solução dos problemas de geração de trajetória, movimento coplanar e coordenação da trajetória.

A subrotina KINFUN determina os parâmetros de movimento do mecanismo gerado para os problemas de geração de função e coordenação angular.

A subrotina START gera aleatoriamente n dos $n+1$ mecanismos necessários no processo de otimização.

A subrotina SIMPLX procede à procura do mínimo (solução otimizada), através do procedimento de Nelder e Mead modificado.

A subrotina CONSTR verifica a condição de existência do mecanismo e restrições impostas aos parâmetros, modificando-os se necessário.

A subrotina ERPGC determina o valor da função objetiva para os problemas de geração de trajetória, movimento coplanar e coordenação da trajetória.

A subrotina ERFUNC determina o valor da função objetiva para os problemas de geração de função e coordenação angular.

A subrotina COORD determina as coordenadas dos pivôs do mecanismo solução do problema.

A subrotina COG determina as coordenadas dos pivôs dos mecanismos cognados e realiza impressão dos mesmos.

A subrotina OUTPC calcula os valores máximo e mínimo do ângulo de transmissão do mecanismo solução e imprime os resultados finais para os problemas de geração de trajetória, movimento coplanar e coordenação da trajetória.

A subrotina OUTFUN calcula os valores máximo e mínimo do ângulo de transmissão do mecanismo solução e imprime os resultados finais para os problemas de geração de função e coordenação angular.

2.1. ENTRADA DE DADOS

2.1.1. GERAÇÃO DE TRAJETÓRIA

CARTÃO N°	COLUNAS E FORMATOS	DEFINIÇÃO	VARIÁVEL
1	1-3*	Tipo de síntese	ITYPE
	4-6*	Fator de peso sobre (α_i, β_i) ? (=0) p/ não; (=1) p/ sim	IW1
	7-9*	Fator de peso sobre γ_i ? (=0) p/ não; (=1) p/ sim	IW2
	10-12*	Seleção de pontos na curva gerada pode ser "0" ou "1"	IDECIS

	13-15*	Seleciona a função objetiva; (=0) p/ critério dos mínimos quadrados; (=1) p/ área entre a curva gerada e a curva desejada	IOP
2	1-3*	Número de parâmetros que definem o mecanismo	N
	4-6*	Número de pontos da curva desejada	M
	7-9*	Número de pontos da curva gerada	MA
	10-12*	Parâmetros utilizados na seleção de pontos na curva gerada	ICP
3	1-3*	Todas as suposições iniciais fornecidas? (-1) p/ sim e (1) p/ não	NGUESS
	4-6*	Restrições externas? (1) p/ sim e (-1) p/ não	LEXT
4 ⁺	1-8	Parâmetros para geração das soluções iniciais	RANDOM
	9-16		DRANDM
5	1-8	Coeficiente de reflexão	ALFA
	9-16	Coeficiente de contração	BETA
	17-24	Coeficiente de expansão	GAMA
6A ⁺⁺	1-8 ,... (9F8.0)	Parâmetros que definem o mecanismo inicial	V(I) I=1,N
7A	1-8 ,... (9F8.0)	Limite inferior para os valores de V	VLOW(I) I=1,N
8A	1-8 ,... (9F8.0)	Limite superior para os valores de V	VHIGH(I) I=1,N
6B	1-8 ,... (9F8.0)	N+1 conjuntos de suposições iniciais fornecidas	V(I) ⁺⁺⁺⁺ I=1,NP
9A ⁺⁺⁺ ou 7B	1-8 ,... (9F8.0)	Limite inferior para as restrições externas	PLOW(I) I=1,N
10A ⁺⁺⁺ ou 8B	1-8 ,... (9F8.0)	Limite superior para as restrições externas	PHIGH(I) I=1,N
11A ou 9B	1-8 ,... (9F8.0)	α_i desejado	XDES(I) I=1,M
12A ou 10B	1-8 ,... (9F8.0)	β_i desejado	YDES(I) I=1,M

13A ou 11B	1-8 , ... (9F8.0)	Ângulos do acoplador fornecidos p/ melhor seleção dos pontos na curva gerada	TETA(I) I=1,M
14A ou 12B	1-8	Valor inicial para o ângulo da manivela	TINITL
	9-16	Valor final para o ângulo da manivela	TFINAL
15A ou 13B	1-8 , ... (9F8.0)	Se IW1=1 fator peso nos parâmetros do movimento (α_i, β_i)	WF1(I) I=1,M
16A ou 14B	1-8 , ... (9F8.0)	Se IW2=1 fator peso nos ângulos do plano do acoplador	WF2(I) I=1,M

⁺ O cartão nº 4 somente será usado, se NGUESS=1, ou LEXT=-1, ou, tanto LEXT como NGUESS=1

⁺⁺ Se NGUESS=1, a seqüência de cartões é 6A, ..., 16A, caso contrário, a seqüência a ser utilizada será 6B, ..., 14B

⁺⁺⁺ Os cartões 9A ou 7B e 10A ou 8B somente serão utilizados se LEXT=1

⁺⁺⁺⁺ O valor de NP é dado por: $NP=N*(N+1)$

* Formato inteiro

2.1.2. MOVIMENTO COPLANAR

A seqüência de cartões é, basicamente, a mesma utilizada no problema de geração de trajetória. A diferença é que, no cartão 1, a variável IOP é deixada em branco e a variável TETA, no cartão 13A ou 11B, representa a posição angular desejada para o plano da barra acopladora.

2.1.3. COORDENAÇÃO DA TRAJETÓRIA

A seqüência de cartões é a mesma utilizada no problema de movimento coplanar. A única diferença, neste caso, é que a variável TETA representa os ângulos da manivela.

2.1.4. GERAÇÃO DE FUNÇÃO

A sequência de cartões é a mesma utilizada para o problema de geração de trajetória até o cartão de nº 10A ou 8B, requerendo algumas modificações. Por exemplo, no cartão nº 1, IW2, IDE CIS e IOP são deixados em branco. No cartão nº 2, a variável MA é tomada igual ao valor de M e ICP é deixado em branco. Todos os ângulos são fornecidos em graus.

CARTÃO Nº	COLUNAS E FORMATOS	DEFINIÇÃO	VARIÁVEL
11A ou 9B	1-8	Ângulo entre o eixo x do sistema de referência e a posição inicial da manivela	ZETA
	9-16 ,...	Ângulos da manivela	DELT(I) I=1,M
12A ou 10B	1-8 , ... (9F8.0)	Ângulos de saída	TETA(I)
13A ou 11B	1-8 , ... (9F8.0)	Fator de peso nos ângulos de saída, se IW1=1	WF1(I) I=1,M

2.1.5. COORDENAÇÃO ANGULAR

A sequência de cartões é a mesma utilizada no problema de geração de função. Entretanto, a variável TETA representa, neste caso, os ângulos desejados para o movimento do acoplador.

2.2. SIGNIFICADO DE ALGUMAS VARIÁVEIS

2.2.1. SIGNIFICADO DE ICP

ICP é o parâmetro utilizado na seleção de pontos na curva gerada. Este valor determina quantos pontos na curva gerada são considerados no momento em que são selecionados os pares de pontos que melhor se aproximam daqueles da curva desejada. O número de pontos é determinado por

$$\text{Nº de pontos} = \frac{MA}{M} \times \text{ICP}$$

onde MA é o número de pontos na curva gerada e M, o número de pontos na curva desejada. O parâmetro ICP é utilizado nos problemas de geração de trajetória, movimento coplanar e coordenação da trajetória.

2.2.2. SIGNIFICADO DE IDECIS

IDECIS é o parâmetro que decide o modo como o primeiro ponto da curva gerada será escolhido. Se IDECIS = 0, o ponto 1, na curva gerada, é determinado por conceitos geométricos, como mostrado no Apêndice II. Se IDECIS = 1, o ponto 1 é, então, determinado, usando o conceito de distância mínima entre dois pontos. IDECIS é utilizado para os três casos de síntese mencionados na seção 2.2.1.

2.2.3. SIGNIFICADO DE TINITL E TFINAL

Como mostrado na figura VII.1, TINITL e TFINAL são respectivamente as posições angulares inicial e final da manivela em relação à barra fixa. Para o mecanismo manivela-balancim, os valores 0° e 360° são adotados para TINITL e TFINAL, respectivamente.

2.2.4. SIGNIFICADO DE ZETA

A variável ZETA é utilizada nos problemas de geração de função e coordenação angular. Ela representa o ângulo entre a manivela e o eixo X de referência. Este ângulo determina a posição inicial do movimento da manivela, de tal maneira, que o parâmetro DELT, que define os ângulos da manivela, assume sempre o valor zero na primeira posição. Os valores restantes de DELT são considerados tendo $DELT(1) = 0$ como a origem (figura VII.2).

3. PROGRAMA FLEXPLEX

No programa principal, são lidos alguns dados de entrada e é exercido o controle geral sobre todo o programa.

As subrotinas PATH, COPCRK, FUNANG, ERROR, KINEM, KINFUN, ERPGC, ERFUNC, COORD, COG, OUTPGC e OUTFUN são utilizadas e não serão aqui comentadas, pois já o foram na seção 2.

A subrotina FLEX minimiza o valor da função objetiva $F(V)$, verificando se as restrições violadas estão dentro dos limites permissíveis pelo critério de tolerância $\phi^{(k)}$. Caso este limite seja ultrapassado, a subrotina FEAS é chamada.

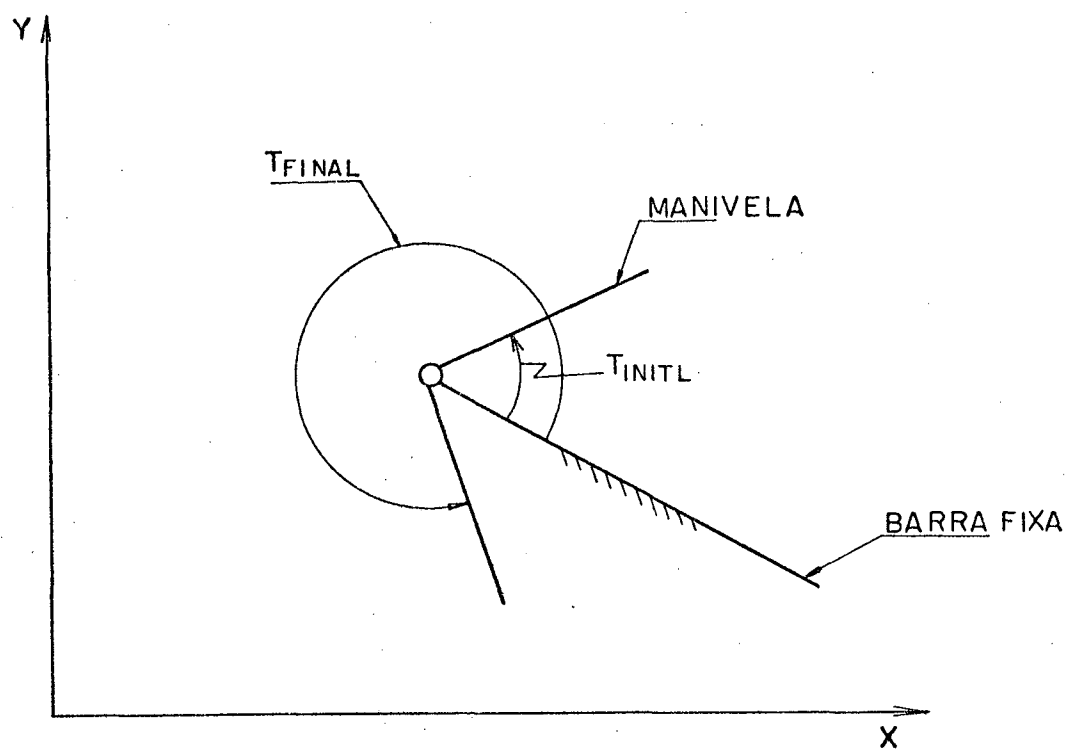


FIGURA VII.1 - Os ângulos T_{INITL} e T_{FINAL}

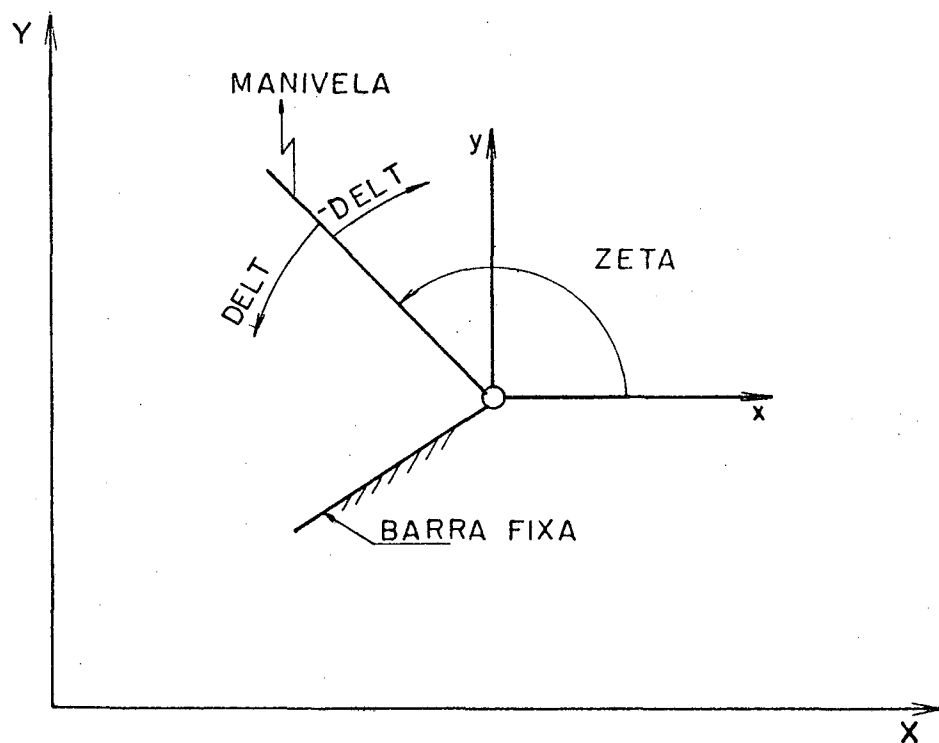


FIGURA VII.2 - Os ângulos $ZETA$ e $DELT$

A subrotina FEAS minimiza o valor do funcional de restrições $T(V)$ para que um mecanismo próximo ou dentro da região possível, seja encontrado.

A subrotina START1 gera os $r = N - NC$ conjuntos de suposições iniciais necessárias na minimização da função objetiva $F(V)$.

A subrotina START2 gera os N conjuntos de suposições iniciais necessárias na minimização de $T(V)$.

A subrotina WRITEX avalia e imprime os valores das restrições de igualdade e desigualdade, bem como o da função objetiva.

A subrotina SUMR calcula a soma dos quadrados dos valores das restrições violadas para comparar com o critério de tolerância $\phi^{(k)}$.

A subrotina PROB é utilizada para introduzir as restrições de igualdade e desigualdade impostas ao problema, bem como para fazer a chamada para a avaliação da função objetiva $F(V)$.

A subrotina TROCA permite que sejam fixados valores constantes para os parâmetros do mecanismo, fazendo uma mudança de variáveis, quando da avaliação de $F(V)$.

A subrotina REFAZ retorna com os valores dos parâmetros a serem otimizados.

3.1. ENTRADA DE DADOS

3.1.1. GERAÇÃO DE TRAJETÓRIA

Um asterisco no número da coluna indica formato inteiro. Todos os ângulos são considerados em graus.

CARTÃO Nº	COLUNAS E FORMATOS	DEFINIÇÃO	VARIÁVEL
1	1-3*	Tipo de síntese	ITYPE
	4-6*	Fator peso sobre (α_i, β_i) ? (=0) p/ não e (=1) p/ sim	IW1
	7-9*	Fator de peso sobre γ_i ? (=0) p/ não e (=1) p/ sim	IW2
	10-12*	Seleção de pontos na curva gerada, pode ser "0" ou "1"	IDECIS
	13-15*	Seleciona a função objetiva; (=0) p/ critério dos mínimos quadrados, (=1) p/ área entre a curva gerada e a desejada	IOP
2	1-3*	Número de parâmetros que definem o mecanismo	N
	4-6*	Número de pontos da curva desejada	M
	7-9*	Número de pontos da curva gerada	MA
	10-12*	Parâmetro utilizado na seleção de pontos da curva gerada	ICP
	13-15*	Número de parâmetros a serem otimizados	NMM
3	1-8	Parâmetros utilizados na geração das suposições iniciais necessárias na minimização de F(V)	RANDOM
	9-16		DRANDM
4	1-8	Coeficiente de reflexão	ALFA
	9-16	Coeficiente de contração	BETA
	17-24	Coeficiente de expansão	GAMA
5	1-8 , ... (9F8.0)	Parâmetros a serem otimizados	V(I) I=1, NMM
6	1-8 , ... (9F8.0)	Limite inferior nos parâmetros a serem otimizados	VLOW(I) I=1, NMM
7	1-8 , ... (9F8.0)	Limite superior nos parâmetros a serem otimizados	VHIGH(I) I=1, NMM
8	1-8 , ... (9F8.0)	α_i desejado	XDES(I) I=1, M

9	1-8 ,... (9F8.0)	β_i desejado	YDES(I) I=1,M
10	1-8 ,... (9F8.0)	Ângulos do acoplador fornecidos p/ melhor seleção dos pontos na curva gerada	TETA(I) I=1,M
11	1-8	Valor inicial do ângulo da manivela	TINITL
	9-16	Valor final do ângulo da manivela	TFINAL
12	1-8 ,... (9F8.0)	Fator de peso nos parâmetros (α_i, β_i), se IW1=1	WF1(I) I=1,M
13	1-8 ,... (9F8.0)	Fator de peso nos ângulos do acoplador, se IW2=1	WF2(I) I=1,M
14	1-3*	Número de restrições de igualdade	NC
	4-6*	Nº de restrições de desigualdade	NIC
	7-15	Limite de convergência	CONVER

O valor utilizado para a variável CONVER é geralmente o valor 0,001.

3.1.2. MOVIMENTO COPLANAR

Para este caso, a mesma sequência de cartões do problema de geração de trajetória é utilizada. Entretanto, a variável IOP, no cartão de nº 1, é deixada em branco e a variável TETA, no cartão de nº 7, representa a posição angular desejada para a barra acopladora.

3.1.3. COORDENAÇÃO DA TRAJETÓRIA

Utiliza-se a mesma sequência de cartões do problema de movimento coplanar. A diferença reside na variável TETA que, nes-

te caso, representa os ângulos da manivela.

3.1.4. GERAÇÃO DE FUNÇÃO

A mesma sequência de cartões utilizada no problema de geração de trajetória é adotada até o cartão de nº 10. Entretanto, algumas modificações devem ser introduzidas. Por exemplo, no cartão de nº 1, IW2, IDECIS e IOP são deixados em branco. No cartão de nº 2, a variável MA é tomada igual ao valor de M e ICP é deixado em branco. Os cartões restantes são

CARTÃO Nº	COLUNAS E FORMATOS	DEFINIÇÃO	VARIÁVEL
8	1-8	Ângulos entre o eixo X do sistema de referência e posição inicial da manivela	ZETA
	9-16 , ... (8F8.0)	Ângulos da manivela	DELT(I) I=1,M
9	1-8 , ... (9F8.0)	Ângulos da barra de saída	TETA(I) I=1,M
10	1-8 , ... (9F8.0)	Fator de peso em TETA, se IW1=1	WF1(I) I=1,M
11	1-3*	Nº de restrições de igualdade	NC
	4-6*	Nº de restrições de desigualdade	NIC
	7-14	Limite de convergência	CONVER

* Formato inteiro

3.1.5. COORDENAÇÃO ANGULAR

A mesma sequência de cartões do problema de geração de função é utilizada. Entretanto, a variável TETA representa os ângulos desejados para a barra acopladora.

3.2. UTILIZAÇÃO DA SUBROTINA PROB

A subrotina PROB, como mencionado anteriormente, é utilizada para introduzir as restrições de igualdade e desigualdade impostas ao problema.

O parâmetro INQ, utilizado na subrotina, serve para identificar os conjuntos de restrições.

INQ = 1 restrições de igualdade

INQ = 2 restrições de desigualdade

As restrições de igualdade e desigualdade são representadas pela variável real indexada R(I) e são introduzidas na subrotina da seguinte forma:

1) Depois do cartão comentário "RESTRICOES DE IGUALDADE", coloca-se o conjunto de restrições de igualdade na forma

$$\begin{aligned} R(1) &= h_1(V) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ R(NC) &= h_{NC}(V) \end{aligned}$$

2) Depois do cartão comentário "RESTRICOES DE DESIGUALDADE", coloca-se o conjunto de restrições de desigualdade na forma

$$\begin{aligned} R(NC+1) &= g_1(V) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ R(NIC) &= g_{NIC}(V) \end{aligned}$$

Se o problema não contém restrições de igualdade, $NC = 0$ e, neste caso, nenhuma declaração deve ser colocada após os cartões comentário que indicam as restrições de igualdade. Similarmente, se não existirem restrições de desigualdade, $NIC = 0$ e nenhuma declaração deve ser colocada após os cartões comentários que indicam as restrições de desigualdade.

3.3. UTILIZAÇÃO DAS SUBROTINAS TROCA E REFAZ

É comum que, em determinados problemas da síntese de mecanismos, queira-se um mecanismo, de tal modo que o comprimento de uma barra ou outro parâmetro qualquer que o define assuma um valor constante pré-estabelecido. Nestes casos, um número menor de variáveis será utilizado no processo de otimização.

A avaliação da função objetiva exige que o conjunto de nove parâmetros $[L_1, L_2, L_3, L_4, R, X_0, Y_0, \sigma_1, \sigma_2]$ seja fornecido. Por outro lado, um número menor de parâmetros está sendo utilizado no processo de otimização, sendo, portanto, necessário que, de alguma forma, o conjunto de nove parâmetros acima mencionado seja obtido quando da avaliação da função objetiva.

A subrotina TROCA é utilizada na obtenção dos parâmetros necessários para a avaliação da função objetiva. Estes parâmetros são designados pela variável $V(I)$, $I = 1, N$ e $VC(I)$, $I = 1, N$, onde $V(I)$ representa os parâmetros que definem o mecanismo e $VC(I)$, os utilizados para satisfazer as restrições físicas do problema. Os valores de $V(I)$ e $VC(I)$ são, então, obtidos através das variáveis, oriundas do processo de otimização, $X(I)$ e $VX(I)$, $I = 1, NMM$, e dos valores constantes estabelecidos na especificação do problema.

Após a avaliação da função objetiva, deve-se retornar com as variáveis $X(I)$ para que o processo de otimização tenha continuidade. Este procedimento é feito na subrotina REFAZ.

A seguir é apresentado um exemplo ilustrativo da utilização das subrotinas PROB, TROCA e REFAZ.

3.4. EXEMPLO ILUSTRATIVO DE UTILIZAÇÃO DAS SUBROTINAS PROB, TROCA E REFAZ

Seja o conjunto de parâmetros

$$V(1) = L_1 \quad V(4) = L_4 \quad V(7) = Y_0 = 0$$

$$V(2) = L_2 \quad V(5) = R \quad V(8) = \sigma_1 = 0$$

$$V(3) = L_3 \quad V(6) = X_0 = 0 \quad V(9) = \sigma_2$$

e o conjunto de restrições de desigualdade

$$20 \leq L_1 \leq 60 \quad 20 \leq L_3 \leq 60$$

$$10 \leq L_2 \leq 30 \quad 10 \leq L_4 \leq 50$$

Para este caso, temos

$N = n^\circ$ de parâmetros representativos do mecanismo = 9

$NMM = n^\circ$ de parâmetros a otimizar = 6

NC = nº de restrições de igualdade = 0

NIC = nº de restrições de desigualdade = 8

Então, as variáveis a serem otimizadas, $X(I)$, $I = 1, 6$,
são

$$X(1) = L_1 \qquad X(4) = L_4$$

$$X(2) = L_2 \qquad X(5) = R$$

$$X(3) = L_3 \qquad X(6) = \sigma_2$$

O conjunto de 8 restrições é dado por

$$R(NC+1) = R(1) = X_1 - 20 \qquad R(5) = X_3 - 20$$

$$R(2) = 60 - X_1 \qquad R(6) = 60 - X_3$$

$$R(3) = X_2 - 10 \qquad R(7) = X_4 - 10$$

$$R(4) = 30 - X_2 \qquad R(8) = 50 - X_4$$

A determinação de $V(I)$ e $VC(I)$ será dada por

$$V(1) = X(1) \qquad V(4) = X(4) \qquad V(7) = 0$$

$$V(2) = X(2) \qquad V(5) = X(5) \qquad V(8) = 0$$

$$V(3) = X(3) \quad V(6) = 0 \quad V(9) = X(6)$$

$$e \quad VC(1) = VX(1) \quad VC(4) = VX(4) \quad VC(7) = 0$$

$$VC(2) = VX(2) \quad VC(5) = VX(5) \quad VC(8) = 0$$

$$VC(3) = VX(3) \quad VC(6) = 0 \quad VC(9) = VX(6)$$

O retorno dos parâmetros a serem otimizados, $X(I)$, é feito por

$$X(1) = V(1) \quad X(4) = V(4)$$

$$X(2) = V(2) \quad X(5) = V(5)$$

$$X(3) = V(3) \quad X(6) = V(6)$$

As subrotinas PROB, TROCA e REFAZ, para este exemplo, são ilustradas pelas listagens apresentadas a seguir.

4. PROGRAMA POWELL

No programa principal são lidos alguns dados de entrada e é exercido o controle geral sobre todo o programa.

As subrotinas PATH, COPCRK, FUNANG, KINEM, KINFUN, ERPGC, ERFUNC, COORD, COG, OUTPGC, OUTFUN, TROCA, REFAZ e o subprograma função ERROR são considerados no programa e possuem as características mencionadas anteriormente.

FILEO A A A1 NUCLEO DE PROCESSAMENTO DE DADOS - UFSC

```

SUBROUTINE PROB(INQ,INL)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
INTEGER RS,W
COMMON /P/STEP,FDIFER,SEQL,X,V1,V2,R,SUM,F,SR,ROLD,SCALE,FOLD,VX,
*CLINK,N,NC,NIC,IN,INF,K1,K2,K3,K4,K5,K6,K7,K8,K9
COMMON /S/R1A,R2A,R3A,LFEAS,L5,L6,L7,L8,L9
COMMON /CUT/NOUT1,NOUT2,IPOG
COMMON /RANGE/VLOW(20),VHIGH(20)
COMMON /EXT/RANDOM,DRANDM
COMMON /PIPS/RS,W
COMMON /SIMPX/ALFA,BETA,GAMA
DIMENSION X(50),V1(50,50),V2(50,50),R(100),SUM(50),F(50),SR(50),
IROLD(100),H(50),VX(20),V(50),VC(20)

```

```

C
GO TO (1,2,3),INQ
1 CONTINUE

```

```

C
C*****
C RESTRICOES DE IGUALDADE
C*****

```

```

C
GO TO 5
2 CONTINUE

```

```

C
C*****
C RESTRICOES DE DESIGUALDADE
C*****

```

```

C
R(1)=X(1)-20.
R(2)=60.-X(1)
R(3)=X(2)-10.
R(4)=30.-X(2)
R(5)=X(3)-20.
R(6)=60.-X(3)
R(7)=X(4)-10.
R(8)=50.-X(4)
GO TO 5

```

```

C
C*****
C FUNCAO OBJETIVA
C*****

```

```

C
3 CONTINUE
CALL TROCA(X,VX,N,V,VC)
R(K9)=ERROR(V,0,VC,CLINK)
CALL REFAZ(V,N,X)
DO 6 I=1,N
V2(INL,I)=X(I)
6 CONTINUE
5 RETURN
END

```

FILEO B

B

A1 NUCLEO DE PROCESSAMENTO DE DADOS - UFSC

```

SUBROUTINE TROCA(X,VX,N,V,VC)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION V(50),VC(20),X(50),VX(20)
IF(N.NE.9)GO TO 2
DO 1 I=1,9
V(I)=X(I)
VC(I)=VX(I)
1 CONTINUE
GO TO 3
2 CONTINUE
C*****
C DETERMINA OS NOVES PARAMETROS DO MECANISMO
C PARA QUE SEJA AVALIADA A FJNCAD OBJETIVA.
C*****
V(1)=X(1)
V(2)=X(2)
V(3)=X(3)
V(4)=X(4)
V(5)=X(5)
V(6)=0.
V(7)=0.
V(8)=0.
V(9)=X(6)
VC(1)=VX(1)
VC(2)=VX(2)
VC(3)=VX(3)
VC(4)=VX(4)
VC(5)=VX(5)
VC(6)=0.
VC(7)=0.
VC(8)=0.
VC(9)=VX(6)
3 RETURN
END

C
SUBROUTINE REFAZ(V,N,X)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION V(50),X(50),VX(20)
IF(N.NE.9)GO TO 2
DO 1 I=1,9
X(I)=V(I)
1 CONTINUE
GO TO 3
2 CONTINUE
C*****
C RETORNA COM O VALOR DOS PARAMETROS A SEREM MINIMIZADOS
C*****
X(1)=V(1)
X(2)=V(2)
X(3)=V(3)
X(4)=V(4)
X(5)=V(5)
X(6)=V(9)
3 RETURN
END

```

A subrotina POWELL combina o método de otimização de Powell com a técnica de funções penalidade de Carroll.

A subrotina OTIMO realiza a minimização da função objetiva modificada com os termos de penalidade.

O subprograma função GIN determina a função penalidade interior de desigualdade.

O subprograma função GEX determina o valor da função penalidade externa de desigualdade, bem como os fatores peso para as funções penalidade interior e exterior.

O subprograma função H determina o valor da função penalidade de igualdade e os valores dos fatores peso na função penalidade de igualdade.

A subrotina GFUN é utilizada para introduzir, no problema, as restrições de desigualdade.

A subrotina HFUN é utilizada para introduzir as restrições de igualdade.

4.1. ENTRADA DE DADOS

A sequência de cartões é, basicamente, a mesma utilizada no programa FLEXPLEX. Entretanto, nos problemas de geração de trajetória, movimento coplanar e coordenação da trajetória, os cartões de números 3, 4, 6, 7 e 14 não são considerados, enquanto que nos problemas de geração de função e coordenação angular, os cartões não considerados serão 3, 4, 6, 7 e 11.

Para que a especificação seja completada é necessário fornecer, em todos os cinco problemas da síntese de mecanismo, os seguintes cartões:

CARTÃO N°	COLUNAS E FORMATOS	DEFINIÇÃO	VARIÁVEL
A	1-5*	Nº de restrições de desigualdade	MG
	6-10*	Nº de restrições de igualdade	MH
	11-15*	Limite no número de iterações	MAXIT
	16-20*	Controla a impressão dos parâmetros no decorrer da otimização	ISW
	21-25*	Todo conjunto EPS(I) fornecido? (=0) p/ não e (=1) p/ sim	IEPS
	26-30*	Imprimir fator peso das restrições? (=0) p/ não e (=1) p/ sim	IPRNT
	31-35*	Número de vezes em que IR é incrementado pela unidade	NRUN
	36-40*	Parâmetros que indicam qual a função penalidade que será usada	ISRCH
B	1-8	Parâmetro utilizado na determinação da máxima movimentação dos parâmetros a serem otimizados	ESCALE
	9-16	Limite para a convergência	EPS1
	17-24	Fator exponencial na função penalidade escolhido entre 4 e 10. Para uso normal FAC=10	FAC
	25-32	Parâmetro utilizado na determinação dos fatores peso para a função penalidade exterior. Escolhido entre 1 e 5. Inicie com 1	GFAC
	33-40	Parâmetro utilizado na determinação dos fatores peso para a função penalidade de igualdade. Escolhido entre 1 e 5. Inicie com 1	HFAC
C	1-8 , ... (9F8.0)	Tamanho do passo em cada uma das direções, se ISW=1	EPS(I) I=1, NMM

Para o caso em que nenhuma restrição seja especificada, os parâmetros após ISW, no cartão A, podem ser deixados em branco.

4.2. SIGNIFICADO DE ALGUMAS VARIÁVEIS

4.2.1. SIGNIFICADO DE ISW

A variável ISW é utilizada para controle de impressão no decorrer do processo de otimização e pode assumir quatro valores:

- ISW = 0 imprime somente o resultado final
- ISW = 1 imprime o resultado após cada iteração
- ISW = 2 imprime o resultado após a procura ao longo de uma linha
- ISW = 4 imprime o resultado após dez iterações

4.2.2. SIGNIFICADO DE ISRCH

ISRCH decide qual a função penalidade que será utilizada no processo de otimização e pode assumir três valores:

- ISRCH = 0 no caso em que a suposição inicial não é possível, procura por uma possível, pela minimização de $\sum_{i=1}^{MG} (G(I)+100.*EPS1)^2$
- ISRCH = 1 obriga o uso de função penalidade exterior
- ISRCH = 2 utiliza função penalidade interior, se as suposições iniciais são possíveis, doutra sorte, usa função penalidade exterior

4.3. UTILIZAÇÃO DA SUBROTINA GFUN

A subrotina GFUN introduz as restrições de desigualdade do problema. As restrições são consideradas como sendo $g_i(X) \leq 0$.

A variável indexada $G(I)$, $I = 1, MG$, é utilizada para representar as restrições de desigualdade, que devem ser introduzidas após o cartão comentário "RESTRICOES DE DESIGUALDADE".

4.4. UTILIZAÇÃO DA SUBROTINA HFUN

As restrições de igualdade são introduzidas no problema através da subrotina HFUN e a variável indexada $H(I)$, $I = 1, MG$, é utilizada para representar estas restrições.

As restrições deverão ser colocadas após o cartão comentário "RESTRICOES DE IGUALDADE".

A listagem apresentada a seguir mostra a forma final de GFUN e HFUN, para o seguinte exemplo:

$$10 \leq X(1) \leq 30$$

$$10 \leq X(2) \leq 30$$

$$X(1) - X(2) = 0$$

FILED C C A1 NUCLEO DE PROCESSAMENTO DE DADOS. - UFSC

```

SUBROUTINE GFUN(G,X)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  DIMENSION G(30),X(30)

```

C *****

C RESTRICOES DE DESIGUALDADE

C *****

G(1)=10.-X(1)

G(2)=X(1)-30.

G(3)=10.-X(2)

G(4)=X(2)-30.

RETURN

END

C

```

SUBROUTINE HFUN(H,X)
  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
  DIMENSION H(30),X(30)

```

C *****

C RESTRICOES DE IGUALDADE

C *****

H(1)=X(1)-X(2)

RETURN

END

PROBLEMA DE GERACAO DE TRAJETORIA
ITYPE=1

ITYPE= 1 IM1= 0 IM2= 0 IDECIS= 1 IDP= 0

N= 9 M= 20 MA= 72 ICP= 3

ANGULO INICIAL= 0.0 ANGULO FINAL= 360.000

RANDOM= 0.4119 DRANDM= 0.0999

ALFA= 1.0 BETA= 0.5 GAMA= 2.0

LIMITE INFERIOR (VLOW)
20.00 5.00 20.00 15.00 5.00 90.00 360.00

LIMITE SUPERIOR (VHIGH)
60.00 30.00 60.00 40.00 100.00 150.00 360.00

XDES	YDES	TETA
33.000	-11.000	-19.000
34.000	-10.500	-11.000
36.000	-8.000	-1.000
38.500	-2.000	11.000
40.000	5.500	24.500
40.000	13.500	37.000
40.000	21.000	48.000
42.000	27.000	54.000
44.000	34.500	58.500
46.000	41.000	60.000
46.000	48.700	62.000
45.000	55.000	61.700
43.000	60.000	60.000
40.000	64.000	57.500
38.000	63.000	46.000
42.000	51.000	34.500
45.000	34.500	16.500
45.000	16.500	-1.000
43.000	10.500	-6.000
37.000	-3.500	-17.000

FATOR PESO (WF1)
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

FATOR PESO (WF2)
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

 *** PROCEDIMENTO DO POLIEDRO FLEXIVEL ***

 FLEXPLEX

NUMERC DE PARAMETROS A OTIMIZAR= 7
 NUMERO DE RESTRICOES DE IGUALDADE= 0
 NUMERO DE RESTRICOES DE DESIGUALDADE= 4
 A CONVERGENCIA DESEJADA EH= 0.10000D-02

0 PRIMEIFC VERTICE EH
 0.380000D+02 0.250000D+02 0.360000D+02 0.300000D+02 0.500000D+02
 0.100000D+03 0.450000D+02

VALOR INICIAL DO CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.57429D+02
 VALOR DAS RESTRICOES VIOLADAS= 0.0

NUMERO DE ESTAGIOS= 1 CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.574286D+02

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.1580142D+04

OS VETORES INDEPENDENTES SAQ

0.380000D+02 0.250000D+02 0.3600000D+02 0.3000000D+02 0.500000D+02
0.100000D+03 -0.450000D+02

VALORES DAS RESTRICOES DE DESIGUALDADE

0.200000D+02 0.500000D+01 0.100000D+02 0.500000D+02

CONJUNTO DE SUPCSICOES INICIAIS

0.380D+02 0.250D+02 0.360D+02 0.300D+02 0.500D+02 0.100D+03-D.450D+02
0.264D+02 0.110D+02 0.332D+02 0.257C+02 0.550D+02 0.127D+03 0.157D+03
0.521D+02 0.269D+02 0.574D+02 0.394D+02 0.997D+02 0.900D+02-0.353D+03
0.216D+02 0.718D+01 0.261D+02 0.207D+02 0.352D+02 0.115D+03 0.554D+01
0.445D+02 0.227D+02 0.517D+02 0.367D+02 0.931D+02 0.148D+03 0.356D+03
0.439D+02 0.143D+02 0.344D+02 0.259D+02 0.497D+02 0.111D+03-0.445D+02
0.327D+02 0.154D+02 0.406D+02 0.303D+02 0.722D+02 0.138D+03 0.265D+03
0.571D+02 0.293D+02 0.598D+02 0.400D+02 0.500D+01 0.906D+02-0.332D+03

VALORES INICIAIS DAS FUNCOES,F(1),...,F(NX1+1)

0.15801D+04 0.27231D+05 0.35292D+05 0.29353D+05 0.94215D+05
0.28607D+04 0.16242D+05 0.19963D+05

NUMERO DE ESTAGIOS= 100

CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.108976D+00

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.3056457D+02

OS VETORES INDEPENDENTES SAQ

0.328985D+02 0.212316D+02 0.341763D+02 0.282774D+02 0.554526D+02
0.103800D+03 -0.281977D+02

VALORES DAS RESTRICOES DE DESIGUALDADE

0.162316D+02 0.876835D+01 0.137996D+02 0.462004D+02

NUMERO DE ESTAGIOS= 200 CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.176704D-02

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.2929343D+02

OS VETORES INDEPENDENTES SAO

0.325105D+02 0.209277D+02 0.339806D+02 0.281117D+02 0.552850D+02
0.103947D+03 -0.282017D+02

VALORES DAS RESTRIÇÕES DE DESIGUALDADE

0.159277D+02 0.907232D+01 0.139472D+02 0.460528D+02

NUMERO DE ESTAGIOS= 300

CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.148774D-02

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.2732928D+02

OS VETORES INDEPENDENTES SAO

0.325187D+02 0.209385D+02 0.340093D+02 0.280154D+02 0.551783D+02
0.104209D+03 -0.286585D+02

VALORES DAS RESTRIÇÕES DE DESIGUALDADE

0.159385D+02 0.906154D+01 0.142087D+02 0.457913D+02

CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.148774D-02

NUMERO DE ESTAGIOS= 400

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.2423765D+02

OS VETORES INDEPENDENTES SAO

0.326192D+02 0.209227D+02 0.338745D+02 0.275878D+02 0.550802D+02
0.104915D+03 -0.306549D+02

VALORES DAS RESTRICcoes DE DESIGUALDADE

0.159227D+02 0.907731D+01 0.149145D+02 0.450855D+02

CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.148774D-02

NUMERO DE ESTAGIOS= 500

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.2260171D+02

OS VETORES INDEPENDENTES SAO

0.325020D+02 0.207540D+02 0.337037D+02 0.273487D+02 0.549675D+02
0.105230D+03 -0.311025D+02

VALORES DAS RESTRICcoes DE DESIGUALDADE

0.157540D+02 0.924596D+01 0.152298D+02 0.447702D+02

CRITERIO DE TOLERANCIA= 0.148774D-02

NUMERO DE ESTAGIOS= 600

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.2252026D+02

OS VETORES INDEPENDENTES SAO

0.324422D+02 0.207392D+02 0.336531D+02 0.273269D+02 0.549539D+02
0.105201D+03 -0.310545D+02

VALORES DAS RESTRICOES DE DESIGUALDADE

0.157392D+02 0.926080D+01 0.152009D+02 0.447991D+02

RESULTADO FINAL *****

NUMERO TOTAL DE ESTAGIOS= 601 LIMITE DE CONVERGENCIA= 0.743869D-03

VALOR DA FUNCAO OBJETIVA= 0.2252026D+02

OS VETORES INDEPENDENTES SAO

0.324422D+02 0.207392D+02 0.336531D+02 0.273269D+02 0.549539D+02
0.105201D+03 -0.310545D+02

VALORES DAS RESTRICOES DE DESIGUALDADE

0.157392D+02 0.926080D+01 0.152009D+02 0.447991D+02

TOTAL DE FUNCOES AVALIADAS = 991

X REAL	Y REAL	ANG. DO	ACOPLAOR				
32.743	-10.322	271.255	46.452	44.876	347.599		
32.977	-10.196	273.314	46.381	46.831	347.954		
33.340	-9.842	275.614	46.209	48.768	348.241		
33.799	-9.286	278.108	45.934	50.674	348.465		
34.326	-8.551	280.761	45.556	52.537	348.625		
34.896	-7.654	283.543	45.075	54.344	348.721		
35.488	-6.613	286.426	44.498	56.082	348.753		
36.084	-5.443	289.388	43.830	57.736	348.718		
36.670	-4.158	292.410	43.081	59.290	348.609		
37.235	-2.772	295.473	42.264	60.730	348.421		
37.768	-1.300	298.559	41.395	62.037	348.143		
38.264	0.247	301.654	40.492	63.195	347.760		
38.720	1.856	304.741	39.581	64.182	347.253		
39.134	3.513	307.806	38.693	64.974	346.597		
39.507	5.209	310.832	37.865	65.541	345.755		
39.844	6.932	313.805	37.147	65.844	344.678		
40.151	8.672	316.710	36.595	65.831	343.295		
40.435	10.420	319.529	36.301	65.424	341.509		
40.705	12.171	322.249	36.352	64.512	339.180		
40.971	13.918	324.855	36.867	62.924	336.115		
41.245	15.659	327.332	37.961	60.405	332.058		
41.533	17.393	329.669	39.681	56.607	326.716		
41.846	19.120	331.856	41.880	51.151	319.865		
42.187	20.846	333.886	44.070	43.865	311.577		
42.558	22.573	335.755	45.511	35.133	302.421		
42.958	24.307	337.463	45.653	25.938	293.353		
43.382	26.056	339.013	44.519	17.371	285.277		
43.822	27.824	340.411	42.572	10.109	278.705		
44.268	29.616	341.663	40.347	4.322	273.755		
44.705	31.437	342.780	38.225	-0.123	270.299		
45.122	33.287	343.772	36.409	-3.463	268.120		
45.503	35.166	344.647	34.973	-5.929	266.992		
45.837	37.074	345.416	33.920	-7.710	266.716		
46.109	39.005	346.088	33.217	-8.947	267.124		
46.308	40.954	346.671	32.815	-9.747	268.084		
46.425	42.914	347.173	32.676	-10.186	269.489		

I REAL

MANIVELA	0.65000D+02	0.33000D+02	0.32743D+02	-0.11000D+02	-0.10322D+02
	0.80000D+02	0.34000D+02	0.33799D+02	-0.10500D+02	-0.92864D+01
	0.95000D+02	0.36000D+02	0.35488D+02	-0.80000D+01	-0.66128D+01
	0.11500D+03	0.38500D+02	0.37768D+02	-0.20000D+01	-0.12997D+01
	0.13500D+03	0.40000D+02	0.39507D+02	0.55000D+01	0.52091D+01
	0.16000D+03	0.40000D+02	0.40971D+02	0.13500D+02	0.13918D+02
	0.18000D+03	0.40000D+02	0.42187D+02	0.21000D+02	0.20846D+02
	0.19500D+03	0.42000D+02	0.43382D+02	0.27000D+02	0.26056D+02
	0.21500D+03	0.44000D+02	0.45122D+02	0.34500D+02	0.33287D+02
	0.23500D+03	0.46000D+02	0.46308D+02	0.41000D+02	0.40954D+02
	0.25500D+03	0.46000D+02	0.46209D+02	0.48700D+02	0.48768D+02
	0.27000D+03	0.45000D+02	0.45075D+02	0.55000D+02	0.54344D+02
	0.28500D+03	0.43000D+02	0.43081D+02	0.60000D+02	0.59290D+02
	0.30500D+03	0.40000D+02	0.39581D+02	0.64000D+02	0.64182D+02
	0.34000D+03	0.38000D+02	0.36867D+02	0.63000D+02	0.62924D+02
	0.35500D+03	0.42000D+02	0.41880D+02	0.51000D+02	0.51151D+02
	0.50000D+01	0.45000D+02	0.45511D+02	0.34500D+02	0.35133D+02
	0.15000D+02	0.45000D+02	0.44519D+02	0.18500D+02	0.17371D+02
	0.20000D+02	0.43000D+02	0.42572D+02	0.10500D+02	0.10109D+02
	0.35000D+02	0.37000D+02	0.36409D+02	-0.35000D+01	-0.34634D+01

ERRO TOTAL, FORMA DO MEC. ARTICULADO
 0.2252D+02 0.1000D+01

VARIACAO DO MOVIMENTO DO PONTO DO ACPPLADOR
 X MINIMO= 32.676 X MAXIMO= 46.452
 Y MINIMO= -10.322 Y MAXIMO= 65.844

ANG. DE TRANSMISSAO (MINIMO)= 18.685 ANG. DE TRANSMISSAO (MAXIMO)= 121.061

MECANISMO INICIAL	PRIMEIRO COGNADO	SEGUNDO COGNADO	PONTO DO ACPPLADOR
AA1 -20.437, 3.530)	AA1 -14.409, 53.031)	AA1 12.399, 7.923)	(32.743, -10.322)
OA1 0.0, 0.0)	OA1 0.0, 0.0)	OA1 -8.506, -31.307)	
BB1 11.838, 13.063)	BB1 -20.902, 19.793)	BB1 2.230, -42.883)	
OB1 -8.506, 31.307)	OB1 -51.415, -12.768)	OB1 -51.415, -12.768)	

PROBLEMA DE SINTESE COPLANAR
 ITYPE=2

ITYPE= 2 IM1= 0 IM2= 0 N= 9 M= 18 MA= 72

NGUESS= 1 LEXT=-1 ICP= 2 IDECIS= 1

ANGULO INICIAL= 0.0 ANGULO FINAL= 360.000

RANDOM= 0.3006 DRANDM= 0.0707

ALFA= 1.0 BETA= 0.5 GAMA= 2.0

LIMITE INFERIOR (VLOW)
 20.00 10.00 20.00 20.00 20.00 -10.00 -20.00 10.00 -360.00

LIMITE SUPERIOR (YHIGH)
 200.00 100.00 200.00 100.00 300.00 -150.00 150.00 120.00 360.00

XDES	YDES	TETA			
-12.000	10.000	14.500	26.000	39.000	23.000
-11.000	5.000	7.000	24.500	37.000	27.000
-9.000	1.000	-0.500	22.000	32.000	29.000
-6.000	-1.000	-5.500	17.000	27.000	29.750
0.0	0.0	-8.000	9.800	23.000	30.250
7.500	5.000	-7.000	3.000	20.000	30.000
16.000	15.000	-1.000	-4.000	19.000	29.500
22.500	27.500	8.500	-9.000	17.000	26.500
25.500	37.000	17.500	-11.500	14.500	21.000

FATOR PESO (WF1)
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

FATOR PESO (WF2)
 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00

```

L1      L2      L3      L4      R      X0      Y0      ALF1      ALF2
0.715D+02 0.200D+02 0.625D+02 0.310D+02 0.950D+02 0.825D+02 0.800D+01 0.550D+02 0.160D+02
0.356D+02 0.218D+02 0.529D+02 0.392D+02 0.105D+03 0.618D+02 0.547D+02 0.661D+02 0.579D+02
0.887D+02 0.435D+02 0.101D+03 0.568D+02 0.170D+03 0.100D+03 0.737D+02 0.847D+02 0.163D+03
0.788D+02 0.266D+02 0.699D+02 0.403D+02 0.114D+03 0.755D+02 0.362D+02 0.646D+02 0.416D+02
0.704D+02 0.357D+02 0.849D+02 0.517D+02 0.153D+03 0.904D+02 0.727D+02 0.823D+02 0.156D+03
0.114D+03 0.560D+02 0.123D+03 0.667D+02 0.199D+03 0.111D+03 0.181D+02 0.452D+02 0.593D+02
0.280D+02 0.170D+02 0.416D+02 0.336D+02 0.832D+02 0.502D+02 0.740D+02 0.564D+02 0.554D+01
0.915D+02 0.464D+02 0.105D+03 0.605D+02 0.181D+03 0.103D+03 0.808D+02 0.858D+02 0.169D+03
0.819D+02 0.384D+02 0.753D+02 0.454D+02 0.129D+03 0.792D+02 0.421D+02 0.642D+02 0.360D+02
0.662D+02 0.350D+02 0.817D+02 0.509D+02 0.149D+03 0.866D+02 0.691D+02 0.782D+02 0.130D+03

```

FIM DA SUBROTINA START

```

*****
***
***
***
***
***
PROCEDIMENTO DE NELDER E HEAD
SIMPLEX
***
***
***
*****

```

```

VALORES INICIAIS DA FUNCAO, F1, ..., F(N+1) SAO
0.30655D+03 0.30042D+06 0.13180D+06 0.11625D+06
0.22640D+06 0.13966D+05 0.12369D+06 0.28217D+06

```

```

INTERACCES = 100
PARAMETROS PARA F(MAX)
0.752591D+02 0.225156D+02 0.714189D+02 0.332239D+02 0.105293D+03
-0.910686D+02 -0.131488D+02 0.555308D+02 -0.148914D+02

```

```

VALOR MAXIMO DO ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
0.651616D+02
PARAMETROS PARA F(MIN)
0.763434D+02 0.228392D+02 0.718761D+02 0.333448D+02 0.105851D+03
-0.915212D+02 -0.135676D+02 0.554554D+02 -0.154531D+02
VALOR MINIMO DO ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
0.478544D+02

```

INTERACCES= 200
 PARAMETROS PARA F(MAX)
 0.746870D+02 0.221395D+02 0.696552D+02 0.327949D+02 0.103247D+03
 -0.893230D+02 -0.121408D+02 0.553719D+02 -0.154986D+02
 VALOR MAXIMO DC ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.4C8894D+02
 PARAMETROS PARA F(MIN)
 0.747499D+02 0.221916D+02 0.697077D+02 0.328107D+02 0.103292D+03
 -0.893445D+02 -0.121435D+02 0.553715D+02 -0.155471D+02
 VALOR MINIMO DC ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.4C5871D+02

INTERACCES= 300
 PARAMETROS PARA F(MAX)
 0.671779D+02 0.221366D+02 0.627671D+02 0.308013D+02 0.922932D+02
 -0.799309D+02 -0.560662D+01 0.554801D+02 -0.170344D+02
 VALOR MAXIMO DC ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.235672D+02
 PARAMETROS PARA F(MIN)
 0.673148D+02 0.221125D+02 0.629047D+02 0.308466D+02 0.925421D+02
 -0.801366D+02 -0.574139D+01 0.554762D+02 -0.169838D+02
 VALOR MINIMO DC ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.238864D+02

INTERACCES= 400
 PARAMETROS PARA F(MAX)
 0.677158D+02 0.221316D+02 0.631715D+02 0.309412D+02 0.928812D+02
 -0.803222D+02 -0.577750D+01 0.554845D+02 -0.170326D+02
 VALOR MAXIMO DC ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.228305D+02
 PARAMETROS PARA F(MIN)
 0.676875D+02 0.221725D+02 0.631315D+02 0.309068D+02 0.926747D+02
 -0.801801D+02 -0.570335D+01 0.554916D+02 -0.171593D+02
 VALOR MINIMO DC ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.222295D+02

INTERACCES = 500

PARAMETROS PARA F(MAX)
 0.669541D+02 0.2229060+02 0.6253960+02 0.3052930+02 0.9000790+02
 -0.7794890+02 -0.410817D+01 0.5569950+02 0.1816250+02
 VALOR MAXIMO DO ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.1347720+02
 PARAMETROS PARA F(MIN)
 0.680011D+02 0.2261980+02 0.6346080+02 0.3059800+02 0.9001630+02
 -0.7808700+02 -0.4238650+01 0.5585900+02 -0.1858110+02
 VALOR MINIMO DO ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.1218970+02

INTERACCES = 600

PARAMETROS PARA F(MAX)
 0.6994620+02 0.2250080+02 0.6514210+02 0.3096490+02 0.9166580+02
 -0.7952460+02 -0.5179980+01 0.5596590+02 -0.1863440+02
 VALOR MAXIMO DO ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.6461870+01
 PARAMETROS PARA F(MIN)
 0.7045950+02 0.2241180+02 0.6552560+02 0.3103900+02 0.9192410+02
 -0.7973940+02 -0.5290300+01 0.5600870+02 -0.1868880+02
 VALOR MINIMO DO ERRO NA CORRENTE SIMPLEX
 0.5934420+01

SUCESSO NA CONVERGENCIA

INTERACCES = 680

VALORES FINAIS DOS PARAMETROS DO MECANISMO ARTICULADO
 0.7117340+02 0.2250030+02 0.6619120+02 0.3122810+02 0.9290800+02
 -0.8056650+02 -0.5847590+01 0.5600570+02 -0.1860130+02
 ERRO MINIMO
 0.5600390+01

TOTAL DE FUNCOES AVALIADAS = 1040

0.712D+02 0.225D+02 0.662D+02 0.312D+02 0.929D+02 0.806D+02 0.585D+01 0.560D+02 0.100D+02

X REAL	Y REAL	ANG. ACPLADOR	DO
-11.699	9.643	337.283	38.944
-11.551	8.334	335.271	38.691
-11.348	7.040	333.253	38.192
-11.093	5.779	331.250	37.486
-10.787	4.571	329.279	36.613
-10.425	3.433	327.358	35.606
-10.002	2.380	325.501	34.499
-9.509	1.427	323.726	33.320
-8.938	0.588	322.048	32.095
-8.277	-0.121	320.484	30.850
-7.517	-0.688	319.049	29.606
-6.644	-1.096	317.762	28.381
-5.648	-1.331	316.639	27.195
-4.518	-1.375	315.699	26.061
-3.245	-1.210	314.962	24.993
-1.824	-0.817	314.446	24.003
-0.252	-0.176	314.170	23.099
1.469	0.734	314.153	22.287
3.330	1.930	314.411	21.571
5.312	3.430	314.957	20.951
7.393	5.246	315.800	20.424
9.536	7.379	316.944	19.983
11.695	9.820	318.380	19.616
13.820	12.541	320.093	19.307
15.855	15.493	322.051	19.034
17.746	18.605	324.212	18.767
19.447	21.786	326.520	18.474
20.927	24.929	328.911	18.120
22.174	27.921	331.317	17.670
23.190	30.659	333.673	17.095
23.957	33.058	335.924	16.379
24.621	35.060	338.026	15.518
25.089	36.637	339.956	14.521
25.426	37.789	341.701	13.408
25.648	38.534	343.263	12.206
25.765	38.905	344.651	10.942
25.780			345.880
25.692			346.965
25.498			347.922
25.192			348.768
24.770			349.517
24.226			350.180
23.559			350.768
22.764			351.290
21.843			351.753
20.797			352.165
19.629			352.528
18.343			352.849
16.946			353.128
15.446			353.370
13.853			353.574
12.177			353.740
10.432			353.870
8.631			353.960
6.790			354.008
4.927			354.010
3.060			353.961
1.210			353.852
-0.600			353.674
-2.346			353.415
-4.003			353.060
-5.543			352.590
-6.940			351.987
-8.171			351.230
-9.218			350.303
-10.071			349.194
-10.732			347.902
-11.214			346.436
-11.537			344.814
-11.724			343.060
-11.800			341.202
-11.786			339.268

ANG. DA MANIVELA	X DESEJADO	X REAL	Y DESEJADO	Y REAL	ANG. DESEJADO DIFERENCA	ANG. REAL DIFERENCA
C.145000+03	-0.120000+02	-0.116990+02	0.100000+02	0.964290+01	-0.750000+01	-0.800330+01
C.125000+03	-0.110000+02	-0.107870+02	0.500000+01	0.457110+01	-0.750000+01	-0.723090+01
C.105000+03	-0.900000+01	-0.893790+01	0.100000+01	0.588480+00	-0.500000+01	-0.540950+01
C.850000+02	-0.600000+01	-0.564750+01	-0.100000+01	0.133100+01	-0.250000+01	-0.246900+01
C.650000+02	0.0	-0.251640+00	0.0	0.175560+00	0.100000+01	0.163050+01
C.450000+02	0.750000+01	0.739350+01	0.500000+01	0.524600+01	0.600000+01	0.625040+01
C.250000+02	0.160000+02	0.158550+02	0.150000+02	0.154930+02	0.950000+01	0.926650+01
C.500000+01	0.225000+02	0.221740+02	0.275000+02	0.279210+02	0.900000+01	0.863840+01
C.345000+03	0.255000+02	0.250890+02	0.370000+02	0.366370+02	0.550000+01	0.592380+01
C.325000+03	0.260000+02	0.257800+02	0.390000+02	0.389440+02	0.400000+01	0.363700+01
C.305000+03	0.245000+02	0.247700+02	0.370000+02	0.366130+02	0.200000+01	0.223670+01
C.285000+03	0.220000+02	0.218430+02	0.320000+02	0.320950+02	0.750000+00	0.137500+01
C.265000+03	0.170000+02	0.165460+02	0.270000+02	0.271950+02	0.500000+00	0.741390+00
C.245000+03	0.980000+01	0.104320+02	0.230000+02	0.230990+02	-0.250000+00	0.909650-01
C.225000+03	0.300000+01	0.306000+01	0.200000+02	0.204240+02	-0.500000+00	-0.900720+00
C.205000+03	-0.400000+01	-0.400260+01	0.190000+02	0.190340+02	-0.300000+01	-0.275750+01
C.185000+03	-0.900000+01	-0.921800+01	0.170000+02	0.176700+02	-0.550000+01	-0.548880+01
C.165000+03	-0.115000+02	-0.115370+02	0.145000+02	0.145210+02		

ERRO TOTAL, FORMA DO MEC. ARTICULADO
0.550000+01 0.100000+01

VARIACAO DO MOVIMENTO DO PONTO DO ACOPLADOR
X MINIMO= -11.800 X MAXIMO= 25.780
Y MINIMO= -1.375 Y MAXIMO= 38.944

ANG. DE TRANSMISSAO (MINIMO)= 43.728 ANG. DE TRANSMISSAO (MAXIMO)= 145.778

MECANISMO INICIAL	PRIMEIRO COGNADO	SEGUNDO COGNADO	PONTO DO ACOPLADOR
AA(-101.571, -13.913)	AA(-28.621, 71.182)	AA(-6.231, 40.388)	
OA(-80.566, -5.848)	OA(-80.566, -5.848)	OA(-40.773, -53.162)	(-11.699, 9.643)
BB(-46.241, 22.416)	BB(-51.445, 49.353)	BB(-21.265, 52.414)	
OB(-40.773, 53.162)	OB(-61.031, 92.125)	OB(-61.031, 92.125)	

COORDENACAO ANGULAR DE DUAS BARRAS
 ITYPE=5

ITYPE= 5 IWL= 0 N= 9 M= 19 MA= 19

ZETA = 165.000

DIFERENCA ANG. DA MANIVELA DELT(I)	ANG. DO BALANCIM DESJADO TETA(I)	FATOR PESO WF(I)
0.0	13.500	1.000
-5.000	10.200	1.000
-10.000	7.000	1.000
-15.000	4.000	1.000
-20.000	1.800	1.000
-25.000	0.0	1.000
-30.000	-1.500	1.000
-35.000	-2.700	1.000
-40.000	-3.700	1.000
-45.000	-4.500	1.000
-50.000	-5.500	1.000
-55.000	-6.000	1.000
-60.000	-6.500	1.000
-65.000	-6.600	1.000
-70.000	-6.500	1.000
-75.000	-6.000	1.000
-80.000	-5.300	1.000
-85.000	-3.500	1.000
-90.000	0.0	1.000

IR = 1 ITERACOES = 1 FUNC. AVALIADAS = 74 SUBTOTAL = 74
 U-INICIAL = 0.2363083D+02 U-FINAL = 0.4312191D+01
 F-INICIAL = 0.1969236D+02 F-FINAL = 0.2407982D+01
 G-INT = -0.7232447D+01 G-EXT = 0.4076441D-10 H = 0.0

VARIAVEIS

0.926820D+01 C.1108950+02 0.404114D+02 0.210174D+03

RESTRICCOES DE DESIGUALDADE

-0.126820D+01 -0.137318D+02 -0.308951D+01 -0.119105D+02 -0.241145D+01
 -0.558855D+01 -0.301743D+02 -0.598257D+02

***** INICIA COM IR = 2 *****

IR = 2 ITERACOES = 16 FUNC. AVALIADAS = 214 SUBTOTAL = 288
 U-INICIAL = 0.2456142D+01 U-FINAL = 0.6242151D+00
 F-INICIAL = 0.2407982D+01 F-FINAL = 0.5593034D+00
 G-INT = -0.1078276D+02 G-EXT = 0.0 H = 0.0

VARIAVEIS

0.143120D+02 0.166013D+02 0.385920D+02 0.214493D+03

RESTRICCOES DE DESIGUALDADE

-0.631202D+01 -0.868798D+01 -0.860126D+01 -0.639874D+01 0.591950D+00
 -0.740805D+01 -0.344931D+02 -0.555069D+02

***** INICIA COM IR = 3 *****

IR = 3 ITERACOES = 11 FUNC. AVALIADAS = 153 SUBTOTAL = 441
 U-INICIAL = 0.5641193D+00 U-FINAL = 0.5451928D+00
 F-INICIAL = 0.5593034D+00 F-FINAL = 0.5371069D+00
 G-INT = -0.1343180D+02 G-EXT = 0.0 H = 0.0

VARIAVEIS

0.156726D+02 0.181617D+02 0.330936D+02 0.215126D+03

RESTRICCOES DE DESIGUALDADE

-0.767262D+01 -0.732738D+01 -0.101617D+02 -0.483830D+01 0.936037D-01
 -0.790640D+01 -0.351257D+02 -0.548743D+02

***** INICIA COM IR = 4 *****

IR = 4 ITERACOES = 0 FUNC. AVALIADAS = 25 SUBTOTAL = 466
 U-INICIAL = 0.5375885D+00 U-FINAL = 0.5375885D+00
 F-INICIAL = 0.5371069D+00 F-FINAL = 0.5371069D+00
 G-INI = 0.8000000D+01 G-EXT = 0.0 H = 0.0

VARIAVEIS
 0.156726D+02 0.181617D+02 0.380936D+02 0.215126D+03

RESTRICCOES DE DESIGUALDADE
 -0.767262D+01 -0.732739D+01 -0.101617D+02 -0.483830D+01 -0.936037D+01
 -0.790640D+01 -0.351257D+02 -0.548743D+02

***** MINIMO RESTRITO ENCONTRADO *****

RELACAO DE TRCCA CORRENTE MENOR DO QUE 0.100D-02 PARA TODO X(I)

TOTAL DE FUNCCEES AVALIADAS = 466

L1	L2	L3	L4	R	X0	Y0	ALF1	ALF2
0.157D+02	0.460D+02	0.182D+02	0.381D+02	0.0	0.0	0.0	0.215D+03	0.0

ANG. DA MANIVELA	ANG. DESEJADO	ANG. REAL	DIF. DESEJADA	ANG. REAL	DIF. REAL
0.32990+C3	0.13500+02	0.45930+02	-0.33000+01	-0.33000+01	-0.34540+01
0.32490+C3	0.10200+02	0.42470+02	-0.32000+01	-0.32000+01	-0.29960+01
0.31990+C3	0.70000+01	0.39480+02	-0.30000+01	-0.30000+01	-0.25940+01
0.31490+C3	0.40000+01	0.36880+02	-0.22000+01	-0.22000+01	-0.22410+01
0.30990+C3	0.18000+01	0.34640+02	-0.18000+01	-0.18000+01	-0.19300+01
0.30490+C3	0.0	0.32710+02	-0.15000+01	-0.15000+01	-0.16540+01
0.29990+C3	-0.15000+01	0.31060+02	-0.12000+01	-0.12000+01	-0.14060+01
0.29490+C3	-0.27000+01	0.29650+02	-0.10000+01	-0.10000+01	-0.11800+01
0.28990+C3	-0.37000+01	0.28470+02	-0.80000+00	-0.80000+00	-0.96850+00
0.28490+C3	-0.45000+01	0.27500+02	-0.10000+01	-0.10000+01	-0.76530+00
0.27990+C3	-0.55000+01	0.26740+02	-0.50000+00	-0.50000+00	-0.56290+00
0.27490+C3	-0.60000+01	0.26170+02	-0.50000+00	-0.50000+00	-0.52300+00
0.26990+C3	-0.65000+01	0.25820+02	-0.10000+00	-0.10000+00	-0.12120+00
0.26490+C3	-0.66000+01	0.25700+02	0.10000+00	0.10000+00	0.14920+00
0.25990+C3	-0.65000+01	0.25850+02	0.50000+00	0.50000+00	0.49130+00
0.25490+C3	-0.60000+01	0.26340+02	0.70000+00	0.70000+00	0.97060+00
0.24990+C3	-0.53000+01	0.27310+02	0.18000+01	0.18000+01	0.17510+01
0.24490+C3	-0.35000+01	0.29060+02	0.35000+01	0.35000+01	0.34540+01
0.23990+C3	0.0	0.32520+02			

ERRO TOTAL, FORMA DO QUADRILATERO
0.53710+00 0.10000+01

ANG. DE TRANSMISSAO (MIN)= 61.206 ANG. DE TRANSMISSAO (MAXIMO)= 160.502

MECANISMO INICIAL	COGNADO ANGULAR	PUNTO DO ACOPLADOR
AA(-45.825, -4.009)	AA(-9.994, 8.923)	(-45.825, -4.009)
OA(0.0, 0.0)	OA(-12.819, -9.018)	
BB(-48.650, -21.950)	BB(-45.825, -4.009)	
OB(-12.819, -9.018)	OB(0.0, 0.0)	

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Box, M. J., A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods. Computer Journal, Vol. 8, pp. 42-52, 1965.
- [2] Dixon, L. C. W., "Nonlinear Optimization". English Universities Press, Londres, 1972.
- [3] Fiacco, A. V.; McCormik, G. P., "Nonlinear Programming: Sequential Unconstrained Minimization Techniques". John Wiley, New York, 1968.
- [4] Fielding, B. J.; Zanini, J. C., The Assessment of an Optimization Technique Used for the Design of a Packaging Mechanism. IFTOMM - International Symposium Machines and Mechanisms, University Research Work and its Application to Industry, 1974.
- [5] Fox, R. L.; Willmert, K. D., Optimum Design of Curve Generating Linkages with Inequality Constraints. Journal of Engineering for Industry, 89, Trans. ASME, Series B, pp. 144-152, 1967.
- [6] Fox, R. L., "Optimization Methods for Engineering Design". Addison-Wesley, London, 1971.
- [7] Golinski, J., An Adaptive Optimization System Applied to Machine Synthesis. Mechanism and Machine Theory, Vol. 8, pp. 419-436, 1973.

- [8] Hartenberg, R. S.; Denavit, J., "Kinematic Synthesis of Linkages". McGraw-Hill, New York, 1964.
- [9] Himmelblau, D.M., "Applied Nonlinear Programming". McGraw-Hill, New York, 1972.
- [10] Johnson, R. C., "Optimum Design of Mechanical Elements". John Wiley, New York, 1980.
- [11] Kuester, J. L.; Mize, J. H., "Optimization Techniques with Fortran". McGraw-Hill, New York, 1973.
- [12] Nelder, J. A.; Mead, R., A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal, Vol. 7, pp. 308-313, 1964.
- [13] Powell, M. J. D., An Efficient Method for Finding the Minimum of a Function of Several Variables without Calculating Derivatives. Computer Journal, Vol. 7, pp. 155-162, 1964.
- [14] Spendley, W.; Hext, G. R.; Himsworth, F. R., Sequential Applications of Simplex Designs in Optimization and Evolutionary Operation. Technometrics, Vol. 1, pp. 441-461, 1962.
- [15] Suh, C. H.; Mecklenburg, A. W., Optimal Design of Mechanisms with the Use of Matrices and Least Square. Mechanism and Machine Theory, Vol. 8, pp. 479-495, 1973.
- [16] Suh, C. H.; Radcliffe, C. W., "Kinematics and Mechanisms Design". John Wiley, New York, 1978.

- [17] Tao, D. C., "Fundamentals of Applied Kinematics". Addison Wesley, London, 1967.
- [18] Tesar, D., The Generalised Concept of Three Multiply Separated Positions in Coplanar Motion. . Journal of Mechanics, Vol. 2, pp. 461-474, 1967.
- [19] Tomas, J., The Synthesis of Mechanisms as a Nonlinear Programming Problem. Journal of Mechanism, Vol. 3, pp. 119-130, 1968.
- [20] Zanini, J. C., "Investigation of Methods of Linkage Synthesis". Tese de Doutorado, Victoria University of Manchester, junho, 1975.