


ESCOLA POLITÉCNICA –USP
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PROJETO E FABRICAÇÃO

Projeto de Otimização de um Mecanismo Limpador de Pára-Brisa

Frederico Bergonzoni Battaglia

10,0 (dez)


São Paulo, Dezembro de 1998

ESCOLA POLITÉCNICA –USP

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA – PROJETO E FABRICAÇÃO

PROJETO MECÂNICO – PMC 580 / PMC 581

Projeto de Otimização de um Mecanismo Limpador de Pára-Brisa

Tatiana Mendes Catta Preta

Bacharel em Engenharia

Orientador:

Prof. Dr. Tarcisio A. Hess Coelho

Frederico Bergonzoni Battaglia

Ao Prof Tarcísio

Aos meus pais, avós e irmãos

Aos amigos

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 5 |
| 2. ESTUDO DE VIABILIDADE | 6 |
| 2.1 ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE | 6 |
| 2.2 FORMULAÇÃO DO PROJETO | 8 |
| 2.3 SELEÇÃO DO MECANISMO | 12 |
| 2.4 MODELAGEM DO MECANISMO | 16 |
| 2.5 OTIMIZAÇÃO | 25 |
| 3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO | 30 |
| 4. MODELAGEM DO MECANISMO | 31 |
| 4.1 MODELAGEM NO ALGOR | 31 |
| 4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA | 32 |
| 4.3 SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO MECANISMO | 34 |
| 5. MODELO PARA CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO MECANISMO | 38 |
| 5.1 CÁLCULO DA ÁREA DE LIMPEZA | 38 |
| 5.2 CÁLCULO DA ÁREA DO VIDRO | 41 |
| 5.3 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA | 42 |
| 6. PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO | 43 |
| 6.1 VARIÁVEIS DE PROJETO | 43 |

| | | |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 6.2 | FUNÇÃO OBJETIVO | 44 |
| 6.3 | RESTRIÇÃO | 45 |
| 7. | OTIMIZAÇÃO | 48 |
| 8. | REFINAMENTO | 49 |
| 9. | RESULTADO FINAL | 50 |
| 9.1 | AUMENTO DA EFICIÊNCIA | 50 |
| 9.2 | MECANISMO ÓTIMO | 52 |
| 10. | DISCUSSÃO DOS RESULTADOS: | 54 |
| 11. | CONCLUSÃO | 56 |
| 12. | BIBLIOGRAFIA | 58 |
| 13. | ANEXOS | 59 |

1. INTRODUÇÃO

Ao escolher um tema para este trabalho, ficou decidido que seria algo relacionado com mecanismos. A sugestão do tema limpador de pára-brisa veio ao encontro de todas as expectativas quanto à aplicação do estudo de mecanismos.

O limpador de pára-brisa é um componente do automóvel que talvez não atraia muito a atenção, tanto do ponto de vista estético quanto do ponto de vista de projeto. Por isso, não tem apresentado uma evolução muito grande ao longo do tempo. Os mecanismos utilizados nos automóveis são baseados sempre nos mesmos tipos construtivos, sem muita variação. Os avanços conquistados em sua performance tem sido esporádicos e obtidos através de tentativa e erro.

Devido a este histórico, existe um amplo campo de pesquisa relacionado com o desenvolvimento da performance do mecanismo gerador do movimento da haste que faz a limpeza do vidro, de forma a maximizar a relação entre a área total do vidro e sua área de limpeza.

O limpador de pára-brisa pode ser uma excelente aplicação para o desenvolvimento de uma metodologia de projeto para a determinação de um mecanismo além da aplicação de um método de otimização.

2. ESTUDO DE VIABILIDADE

2.1 ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

OBJETIVO

O projeto que é apresentado neste relatório tem o seguinte objetivo:

- **aumentar a eficiência de um limpador de pára-brisa.**

O universo de abordagem do trabalho abrange os limpadores de pára-brisa para automóveis de passeio e restringe-se ao vidro dianteiro.

EFICIÊNCIA

A eficiência do limpador de pára-brisa é definida como a porcentagem da área do vidro que é percorrida durante o movimento da palheta, ou seja:

$$eficiência = \frac{\text{ÁREA DE LIMPEZA DO VIDRO}}{\text{ÁREA TOTAL DO VIDRO}}$$

NECESSIDADE

Atualmente, a eficiência média dos limpadores de pára-brisa ainda está longe de atingir um valor próximo de 100%. A maioria dos limpadores tem eficiência entre 60 e 70 %.

Portanto, um limpador de pára-brisa mais eficiente é uma necessidade real, pois melhora a visão do motorista através do vidro enquanto está chovendo e mesmo com tempo seco. Durante a chuva, aumenta o campo de visão, permitindo maior visibilidade e diminuindo o risco de acidentes. Com o tempo seco, permite uma melhor limpeza do vidro, pois a palheta tem um alcance maior. Além disso, as marcas deixadas no vidro localizam-se em uma região mais periférica.

Um limpador de pára-brisa mais eficiente pode constituir uma necessidade percebida pelo cliente. Pode ser um dos diferenciais para o carro, agregando valor de sofisticação a um modelo de luxo.

2.2 FORMULAÇÃO DO PROJETO

Para obter um limpador de pára-brisa mais eficiente, o método escolhido foi a **otimização**.

Para um mesmo conjunto de soluções que determinam um mecanismo, podem existir várias soluções que satisfaçam estas mesmas condições e que apresentem desempenhos diferenciados. Alterando-se as condições, é possível, também, melhorar a performance do mecanismo.

Como os mecanismos limpadores de pára-brisa apresentam uma baixa eficiência atualmente, entre 60 e 70%, possuem um alto potencial para otimização.

Além disso, uma vez desenvolvido, o processo de otimização para este tipo de mecanismo pode ser utilizado para outras aplicações. A otimização é um processo que tem se tornado muito importante, à medida que o aumento de eficiência tem sido cada vez mais valorizado em várias áreas.

Este método pode ser utilizado para otimizar a área ocupada por máquinas em uma fábrica, filas de banco, carteira de investimentos e diversos modelamentos matemáticos.

CRITÉRIOS DE PROJETO

Para iniciar o processo de otimização, foram estabelecidas algumas características principais as quais o mecanismo otimizado deve atender:

- **n.º de peças < 6**

baixo grau de complexidade

- **1 palheta**

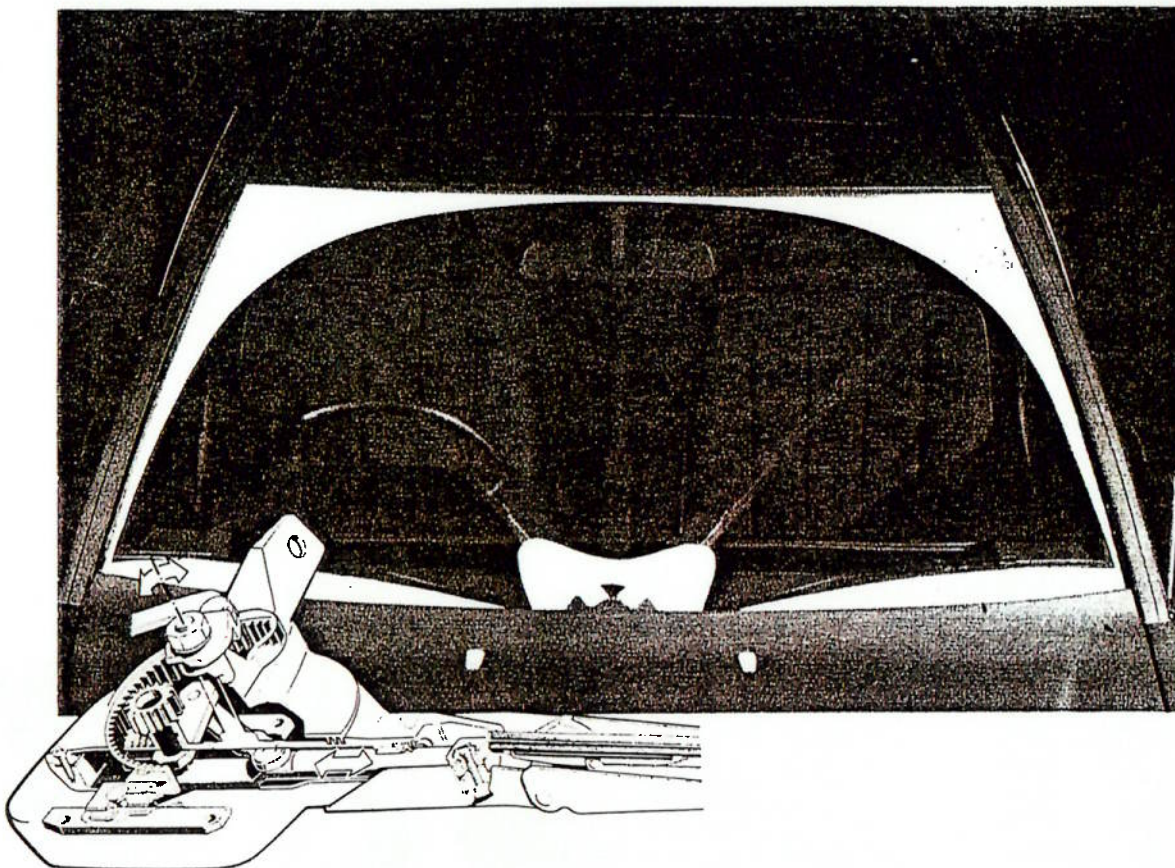
toda a área do vidro é percorrida por 1 palheta

- **trajetória do limpador contida na área do vidro**

a extremidade da palheta não pode ultrapassar o perímetro do vidro

- **eficiência > 86%**

eficiência dos limpadores nos modelos W124 da Mercedes



O baixo grau de complexidade foi estabelecido como um critério de projeto para facilitar o processo de otimização. Ao restringir o número de peças, são limitadas as variáveis de projeto que têm o valor alterado na otimização.

Assim, é possível realizar mais alterações em um conjunto menor de variáveis, tornando o processo de otimização mais eficiente. Ao contrário, um conjunto muito grande de peças poderia levar à perda de foco na otimização e prejudicar a convergência para a obtenção de um bom resultado.

O mecanismo deve atender, também, a um conjunto de especificações técnicas:

ESPECIFICAÇÕES FUNCIONAIS

- **desempenho**

O movimento da palheta deve abranger a maior porcentagem da área do pára-brisa.

- **conforto**

É sugerido na norma da SAE, em anexo, porcentagens mínimas de limpeza para cada região do pára-brisa, baseando-se nas regiões com maior probabilidade de serem encontrados os olhos do motorista.

- **segurança**

O mecanismo deve garantir limpeza mesmo sujeito à chuva de alta intensidade, de modo a não prejudicar a visibilidade do motorista.

ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS

- **durabilidade**

De acordo com a recomendação da SAE, o mecanismo do limpador de pára-brisa deve ser capaz de executar 1.500.000 ciclos de operação, e a palheta deve apresentar um mínimo de 75% da eficiência original após 500.000 ciclos

- **confiabilidade**

O mecanismo não deve apresentar falhas, com exceção do desgaste da palheta, nos primeiros 10 anos de operação.

ESPECIFICAÇÕES CONSTRUTIVAS BÁSICAS

- o mecanismo deve estar localizado na parte inferior do pára-brisa
- o conjunto do mecanismo deve ocupar o menor espaço possível

É importante ressaltar que, inicialmente, será priorizada a estrutura cinemática do mecanismo. Um conjunto de características dimensionais deve ser estabelecido, de modo que a área de limpeza do vidro seja maximizada. Outros aspectos serão considerados para um eventual refinamento da solução encontrada, ou, para uma avaliação de possíveis soluções.

2.3 SELEÇÃO DO MECANISMO

Para iniciar o processo de otimização, deve ser selecionado um mecanismo dentre os tipos de limpador de pára-brisa já existentes. Este mecanismo, deve atender aos critérios gerais de projeto já estabelecidos.

Foi realizada uma pesquisa para familiarização com os tipos de mecanismo que são utilizados atualmente, e uma avaliação preliminar do seu potencial de otimização. As principais fontes de pesquisa foram as seguintes:

- Artigos em revistas especializadas
- INTERNET

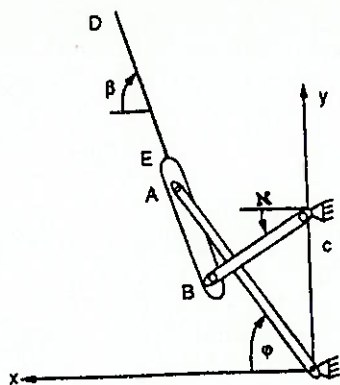
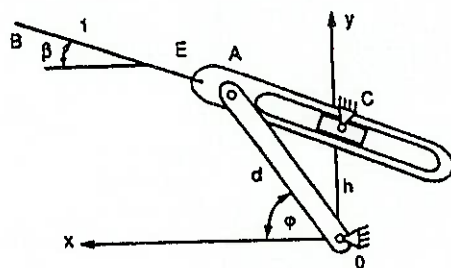
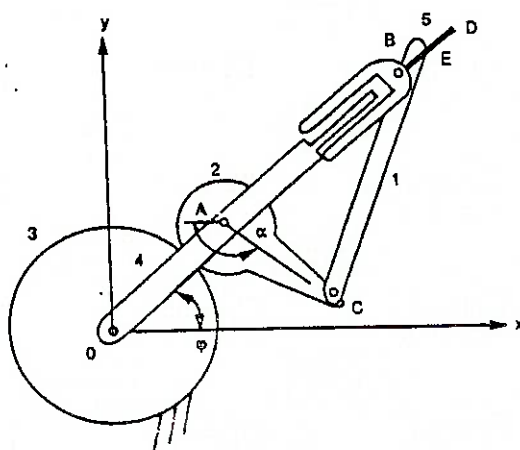
Como base para o projeto, foi tomado um trabalho publicado em uma revista *Mech.Mach.Theory*. Neste artigo, é proposta a síntese de mecanismo através da separação entre o seu esquema cinemático e função. Primeiro, através da teoria de grafos são geradas várias possíveis estruturas para o limpador de pára-brisa, que atendem a um conjunto de especificações:

- mecanismos planos, com um grau de mobilidade e com *loop* fechado.
- utilização de pares de rotação, prismáticos ou de engrenagens.
- número de pares prismáticos igual ou inferior a dois e de pares de engrenagens igual ou inferior a um.
- estruturas capazes de movimento devido a dimensões especiais não são consideradas.
- nenhuma peça com mais de uma junta deslizante.

- movimento da palheta simétrico para as duas metades do vidro.
- 1 palheta apenas cobre o vidro todo.

Em seguida, são analisados os aspectos funcionais.

Os mecanismos que foram gerados podem ser classificados em três tipos básicos, que são aqueles utilizados na maioria dos automóveis de passeio.

QUADRILÁTERO**COM JUNTA DESLIZANTE****COM PAR DE ENGRENAGENS**

O tipo mais simples de mecanismo é formado por um quadrilátero articulado. Um outro tipo constituído por uma biela manivela apresenta um par prismático. A utilização de uma junta deslizante permite um deslocamento no sentido longitudinal da palheta. Isto torna o movimento mais complexo em relação ao quadrilátero, no qual a palheta é articulada em dois pontos. O terceiro tipo de mecanismo, que inclui um par de engrenagens apresenta o movimento mais complexo de todos. Além do deslocamento longitudinal da palheta, a presença do par de engrenagens introduz um carácter oscilatório ao movimento.

Para iniciar o processo de otimização, foi escolhido o mecanismo com um par de engrenagens, devido a possibilidade de movimento da palheta mais complexo. Dentre os mecanismos apresentados com esta característica foi selecionado o mecanismo com par de engrenagens. Entre os mecanismos submetidos a um método de otimização numérica através do conceito de *penalty-function*, este foi o que alcançou maior eficiência, 89.9%, demonstrando um grande potencial para otimização. Maiores detalhes sobre a aplicação do método de otimização, entretanto, não foram revelados no artigo.

As pesquisas na INTERNET, que serão realizadas ao longo de toda a duração do projeto, obtiveram resultados diferentes. As informações conseguidas dizem respeito a especificações dimensionais para o vidro e para o limpador, velocidades para a palheta e para o motor, instruções de fixação e esquemas construtivos.

Além destas especificações, será utilizada a norma SAE para limpadores de pára-brisa, que se encontra anexa.

2.4 MODELAGEM DO MECANISMO

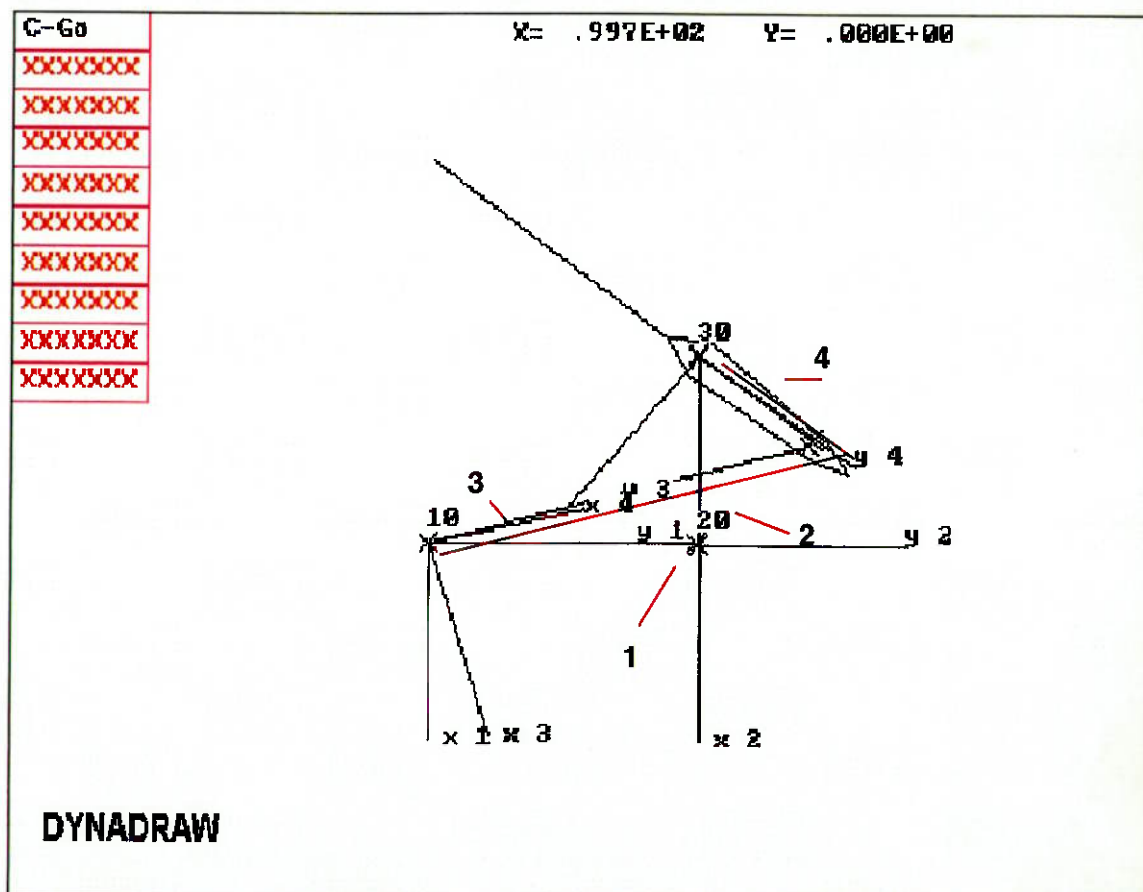
O ALGOR, *software* que possibilita a realização de análises mecânicas, foi utilizado no projeto para a elaboração do esquema cinemático do mecanismo, visualização do movimento e análises estática e dinâmica.

Para a familiarização com esta ferramenta, foi feita a análise de um mecanismo limpador de pára-brisa do tipo quadrilátero, desde a inserção do seu esquema cinemático até a visualização da trajetória da extremidade da palheta, utilizando diversos módulos do ALGOR.

DYNADRAW

Este módulo do ALGOR tem algumas ferramentas gráficas que permitem o desenho das peças do mecanismo e definição das juntas. As juntas são ligadas por linhas, formando o esquema cinemático. Depois, é possível montar o mecanismo na posição inicial escolhida, unindo as peças através das juntas e da criação de díadas. Em uma díada de rotação, que foi a utilizada para a montagem do quadrilátero, determina-se uma peça movida e um seguidora.

O esquema cinemático do mecanismo quadrilátero obtido é apresentado a seguir. A palheta foi a única peça a ser desenhada, para facilitar a compreensão do movimento do mecanismo e a área do vidro percorrida.



DYNACODE

Este módulo do ALGOR é formado por um conjunto de tabelas, nas quais constam propriedades de cada peça e do mecanismo como um todo. Para as peças, é possível definir a massa, momento de inércia, baricentro, forças externas e também, modificar a localização das juntas.

| JOINT NUMBER | JOINT TYPE | BODY 1 | XJ1 | YJ1 | DELTA1 |
|-----------------|---------------|-----------|---------|---------|--------|
| 1 | R | 1 | .0000 | .0000 | |
| 2 | R | 1 | 20.0000 | .0000 | |
| 3 | R | 2 | 15.0000 | .0000 | |
| 4 | R | 3 | .0000 | 30.0000 | |
| JOINT NUMBER | | BODY 2 | XJ2 | YJ2 | DELTA2 |
| 1 | | 3 | .0000 | .0000 | |
| 2 | | 2 | .0000 | .0000 | |
| 3 | | 4 | .0000 | .0000 | |
| 4 | | 4 | .0000 | 12.0000 | |

joint description - DYNACODE

Podem ser inseridos elementos como molas, que têm uma componente elástica e outra de amortecimento; ou geradores, que tornam possível a simulação do movimento através do acionamento de uma peça. Para o quadrilátero escolhido, inseriu-se um gerador de movimento rotativo:

| GEN NUM | BODY 1 | BODY 2 | GEN TYP | XG1 | YG1 | XG2 | YG2 |
|------------|-----------|-----------|------------|--------|-------|--------|-------|
| 1 | 1 | 2 | 1 | 1.0000 | .0000 | 1.0000 | .0000 |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |

| GEN NUM | DISPLACEMENT | VELOCITY | ACCELERATION |
|------------|--------------|----------|--------------|
| 1 | 3.3000 | 2.0000 | .0000 |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |

automatic generator - DYNACODE

DYNASOLV

Para realizar as análises estática e dinâmica do mecanismo é utilizado este módulo do ALGOR. Pode-se listar diversos parâmetros, como velocidade, aceleração ou posição angular de qualquer um dos componentes do mecanismo. Para o quadrilátero, foi listada a posição angular da barra motora do mecanismo durante a análise estática. Este é o parâmetro *lin 2 phi*, que consta da listagem da análise, além das posições, velocidades e acelerações das barras para a posição inicial do mecanismo.

| VELOCITIES AND DISPLACEMENTS | | | | | |
|------------------------------|------------|------------|-----------|-----------|------------|
| DX | DY | DPH | X | Y | PHI |
| .0000E+00 | .0000E+00 | .2000E+01 | .2000E+02 | .0000E+00 | .3300E+01 |
| .0000E+00 | .0000E+00 | .8049E+00 | .0000E+00 | .0000E+00 | -.1843E+01 |
| -.4732E+01 | .2962E+02 | .1076E+01 | .3481E+02 | .2366E+01 | .2148E+02 |
| ACCELERATIONS | | | | | |
| AX | AY | ALPHA | | | |
| .0000E+00 | .0000E+00 | .0000E+00 | | | |
| .0000E+00 | .0000E+00 | -.6486E+00 | | | |
| -.5925E+02 | -.9465E+01 | .2725E+01 | | | |
| TIME | LIN 2, PHI | | | | |
| .00000E+00 | .330E+01 | | | | |

análise estática - DYNASOLV

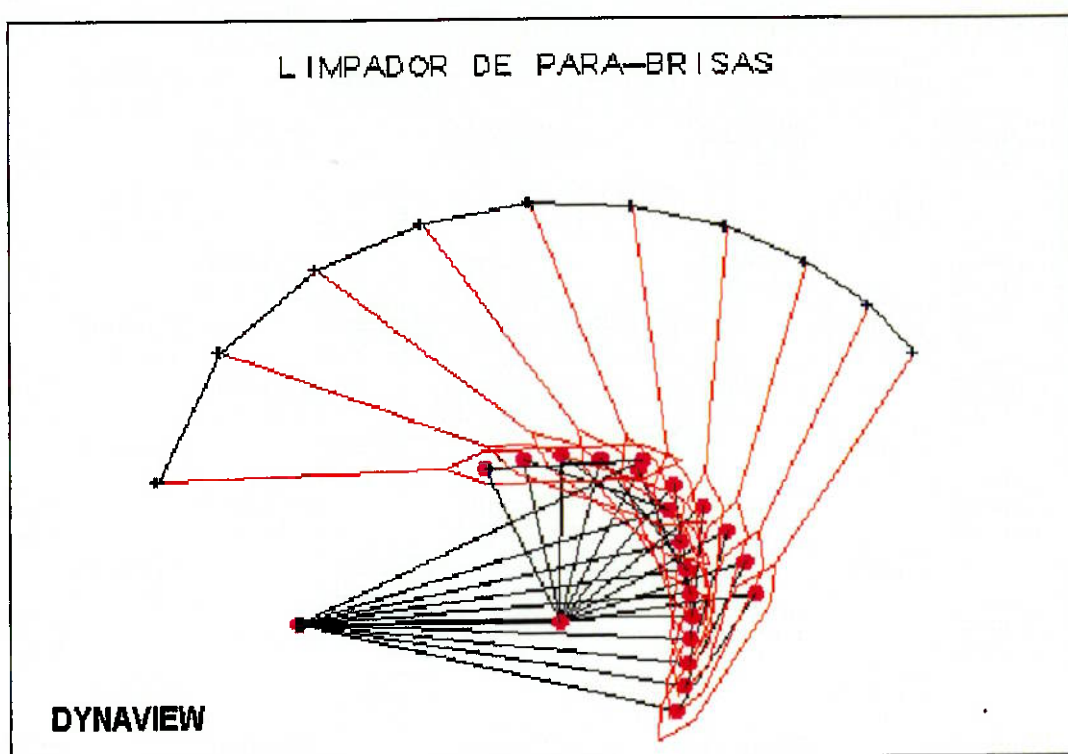
Para a análise dinâmica, foi determinado um tempo de 2s para o movimento do mecanismo. A saída corresponde a uma listagem do parâmetro escolhido em todas posições (2ª coluna) ao longo do tempo estabelecido (2ª coluna). Os critérios da integração numérica são estabelecidos no DYNACODE.

| | |
|-------------|----------|
| . 94030E-01 | .349E+01 |
| .10403E+00 | .351E+01 |
| .11403E+00 | .353E+01 |
| .12403E+00 | .355E+01 |
| .13403E+00 | .357E+01 |
| .14403E+00 | .359E+01 |
| .14403E+00 | .359E+01 |

análise dinâmica (parte) - DYNASOLV

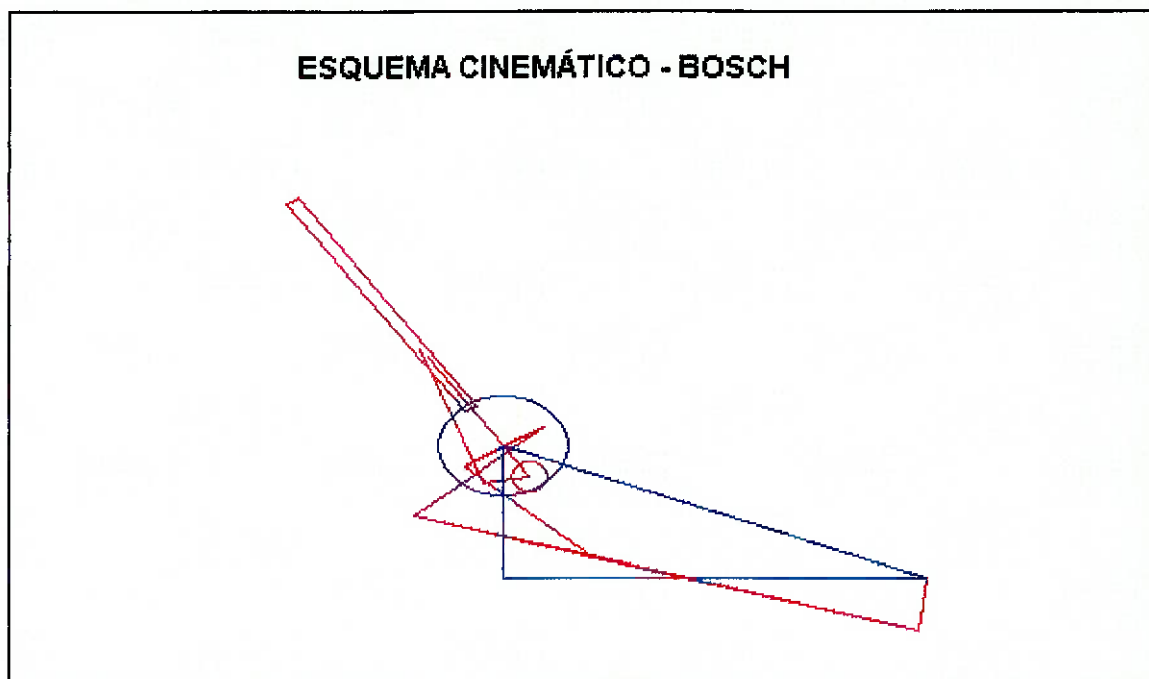
DYNAVIEW

Neste módulo é feita a visualização do movimento do mecanismo e da trajetória de qualquer ponto escolhido. A seguir, está apresentada a sequência de posições do mecanismo ao longo do movimento. Também é possível acompanhar o movimento em tempo real ou submetido a um fator de atraso.



Durante a simulação do mecanismo, é constatado que, através do acionamento da peça 2 apenas, não é possível gerar o movimento de oscilação da palheta. É necessária a utilização de um mecanismo de quatro barras auxiliar (outro quadrilátero articulado), vinculado a barra 2, que produza o movimento oscilatório.

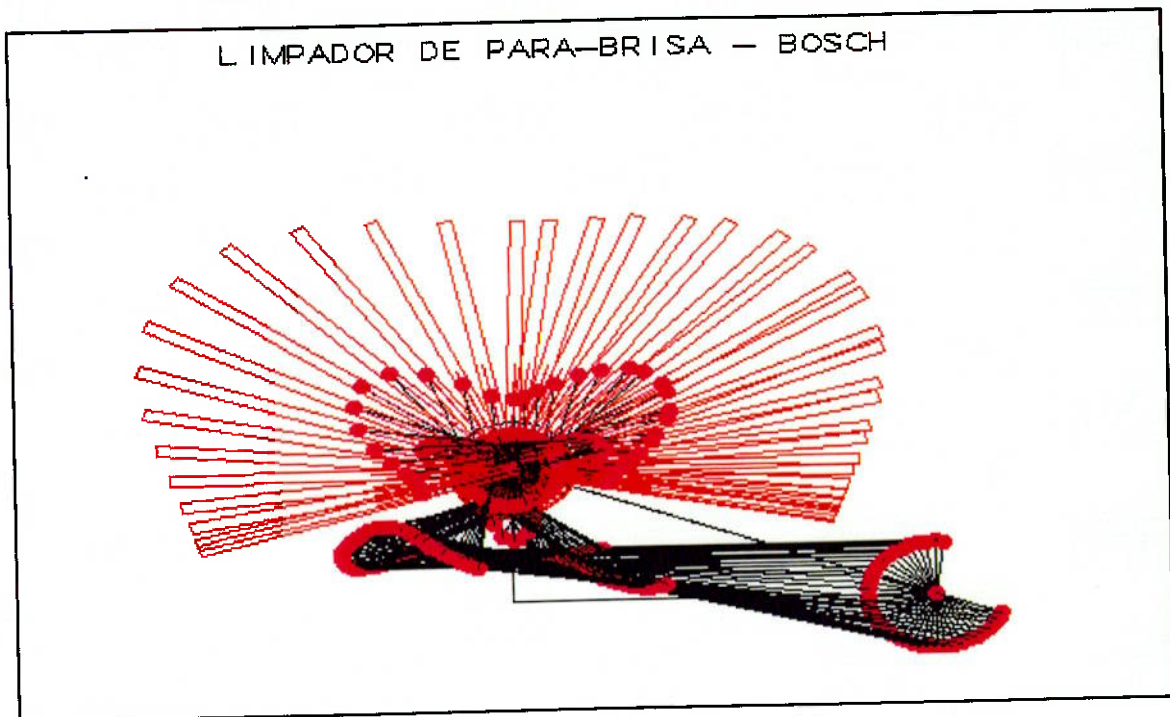
Este tipo de construção é utilizada em um mecanismo exemplo do ALGOR, que reproduz o esquema de um limpador de pára-brisa da BOSCH. A parte azul do mecanismo transforma o movimento de rotação do motor em oscilação para o limpador de pára-brisa.



Embora seja um mecanismo complexo, serve como referência, também, para a modelagem do mecanismo com um par de engrenagens no ALGOR. Não está disponível no software a utilização de engrenagem, entretanto, com a utilização de um recurso semelhante ao empregado neste mecanismo, isto é possível.

O mecanismo da BOSCH apresentado tem apenas um grau de mobilidade. No entanto utiliza dois geradores. Um deles simula o movimento do motor, fazendo o acionamento do limpador de pára-brisa. O outro gerador está vinculado a uma das engrenagens e tem imposta uma velocidade nula. A segunda engrenagem do par é desenhada como uma peça fixa. Este arranjo simula o engrenamento.

Pode ser verificado, ainda, que este mecanismo, que contém um par de engrenagens cobre uma área do vidro maior do que o formado apenas por um quadrilátero articulado.



O ALGOR será utilizado como instrumento de avaliação dos resultados do processo de otimização.

2.5 OTIMIZAÇÃO

Para a otimização do mecanismo é necessária uma formulação matemática do sistema em questão, que deve ser feita da seguinte maneira:

FUNÇÃO OBJETIVO

A função objetivo do projeto é definida como a maximização da área de limpeza do vidro e pode ser expressa desta forma:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\text{AREA LIMPA}}{\text{AREATOTAL}} * 100$$

Deseja-se que esta função seja maximizada. As variáveis x_1, x_2, \dots, x_n são as **variáveis de projeto** e correspondem aos comprimentos das barras e posições das articulações fixas.

Para a definição da função objetivo é necessário o desenvolvimento de um modelo matemático para a área do vidro e para o movimento do mecanismo, que permita medir a área do vidro que é coberta pela palheta em um ciclo do limpador de pára-brisa. Esta modelagem será desenvolvida na segunda parte do trabalho.

RESTRIÇÕES

Os critérios de projeto para o funcionamento do mecanismo devem ser formulados através de igualdades ou desigualdades matemáticas, que serão as restrições as quais a função objetivo estará sujeita. A imposição de que a extremidade da palheta não pode ultrapassar o perímetro do vidro é um exemplo de uma restrição que pode ser formulada através do confinamento do conjunto de posições da palheta a uma região formada por algumas retas, que delimitam o vidro.

OPT3

A partir da função objetivo e das restrições elaboradas, o mecanismo será otimizado com a utilização do programa OPT3. Esta rotina é baseado no Método do Gradiente Reduzido, cuja teoria básica encontra-se em anexo, para a realização do processo de otimização. O programa foi feito em FORTRAN.

Para familiarização com programa, foi realizada a otimização de uma função simples, com duas variáveis e sujeita a uma restrição apenas. Este exemplo é descrito a seguir.

EXEMPLO DE FUNÇÃO OTIMIZADA COM OPT3

função objetivo

$$f(x) = x_1^2 + x_2^2$$

esta função deve ser minimizada

variáveis de projeto

$[x_1, x_2]$

restrição

$$h(x) = 2 * x_1 + x_2 - 1 = 0$$

programa OPT3

A seguir, encontra-se a listagem de saída do programa OPT3 aplicado para o exemplo em questão. A execução da otimização pode ser dividida em duas partes:

- A primeira parte é composta pela elaboração de um subprograma FUNCTION, que contém a função objetivo, uma subrotina CONST, que contém as restrições e o programa principal MAIN, que contém os valores iniciais e parâmetros necessários para chamar o programa OPT3
- A segunda parte consiste na aplicação do Método do Gradiente Reduzido, no programa OPT3.

resultados

Como a função a ser otimizada era simples, a convergência para os valores das variáveis que minimizam a função sujeita à restrição apresentada ocorreu após uma iteração. A seguir, estão apresentados os principais itens da saída do programa

STARTING INFORMATION

| | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| OBJECTIVE FUNCTION. | LFUNCT = 0 NL |
| NUMBER OF DESIGN VARIABLES | N = 2 |
| NUMBER OF EQUALITY CONSTRAINTS | NE = 1 |
| LINEAR EQUALITY CONSTRAINTS | LNE = 0 |
| NUMBER OF INEQUALITY CONSTRAINTS | NI = 0 |
| LINEAR INEQUALITY CONSTRAINTS | LNI = 0 |
| LINE SEARCH CRITERIA | EPSLS = .10000E-02 |
| BOUND TIGHTNESS | .EPSBD = .10000E-02 |
| VARIABLE CONVERGENCE CRITERIA | XTOL= .10000E-02 |
| GRADIENT CONVERGENCE CRITERIA. | GTOL = .10000E-02 |
| FORWARD DIFFERENCE PARAMETER | EPS = .10000E-03 |
| OUTPUT PARAMETER | .IPR = 1 |
| INITIAL OUTPUT PARAMETER | IDATA = 1 |
| MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS | MAXM = 10 |
| SCALING PARAMETER | NSCALE = 2 AUTO |
| SEARCH PARAMETER | ISEARC = 1 BFS |
| MAXIMUM NEWTON ITERATIONS | MAXNEW = 10 |
| NUMERICAL DIFFERENCING OPTION | IDIF = 1 FOR |

parâmetros de entrada: tipo de função objetivo, tipos de restrições e critérios d convergência

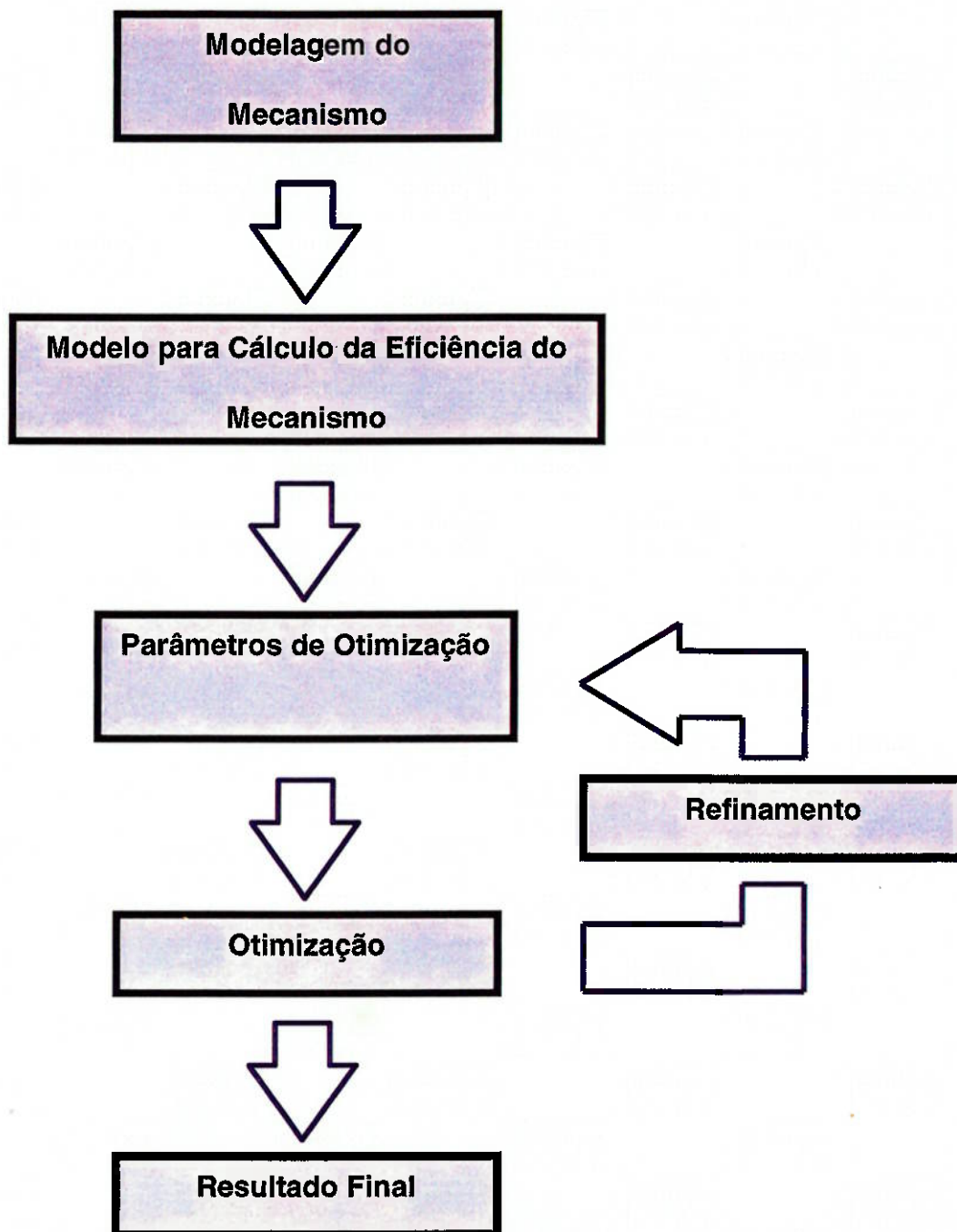
| | | | |
|--|-------------|----------------------|------------------------|
| OBJECTIVE F(X) = .20000E-01 | | | |
| INDEX | X(I) | EQUALITY H(I) | INEQUALITY G(I) |
| 1 | .10000E+00 | -.70000E+00 | |
| 2 | .10000E+00 | | |
| CONVERGENCE ACHIEVED MAXIMUM ELEMENT OF RELATIVE REDUCED GRADIENT VECTOR < GTOL | | | |
| *** OPTIMUM FOUND TO BE *** | | | |
| OBJECTIVE F(X) = .20000E+00 | | | |
| ITERATION 1 | | | |
| INDEX | X(I) | EQUALITY H(I) | INEQUALITY G(I) |
| 1 | .40000E+00 | -.46629E-13 | |
| 2 | .20000E+00 | | |

valores iniciais e finais (otimizados após 1 iteração) do problema

Pode-se verificar que os valores obtidos para as variáveis, $x_1=0.2$ e $x_2=0.4$, são aqueles que realmente minimizam a função sujeita à restrição apresentada, confrontando-se estes valores com aqueles obtidos através de outros métodos, como o gráfico, por exemplo.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O desenvolvimento de uma metodologia de otimização que inclui a integração dos dois softwares apresentados, ALGOR e OPT3 é o objetivo do projeto a ser conduzido de acordo com o fluxograma abaixo:



4. MODELAGEM DO MECANISMO

4.1 MODELAGEM NO ALGOR

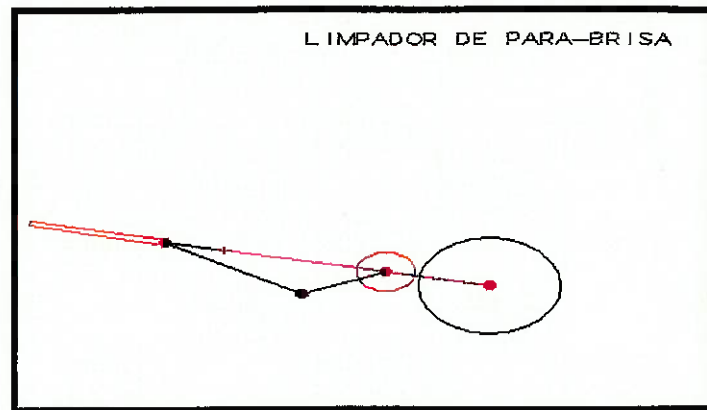
Inicialmente, decidiu-se modelar o mecanismo selecionado no ALGOR, tendo como objetivo principal o estudo de seu funcionamento e do movimento de cada peça que o compõe.

Utilizando o módulo DYNADRAW, inseriu-se o esquema cinemático do limpador e sobre ele foi desenhada a palheta. Através do artifício utilizado no mecanismo da BOSCH, apresentado no estudo de viabilidade, foi possível simular o comportamento de um par de engrenagens no módulo DYNACODE.

Realizando-se as análises estática e dinâmica, no módulo DYNASOLV, pode ser visualizado o movimento do mecanismo e sua trajetória no módulo DYNAVIEW. Além disso, a partir da análise dinâmica, foram obtidas as posições angulares da barra principal e da engrenagem móvel.

Estes são os fatores determinantes do movimento. A posição angular da engrenagem móvel pode ser obtida em função da posição angular da barra principal, demonstrando que o mecanismo possui grau de liberdade igual a 1.

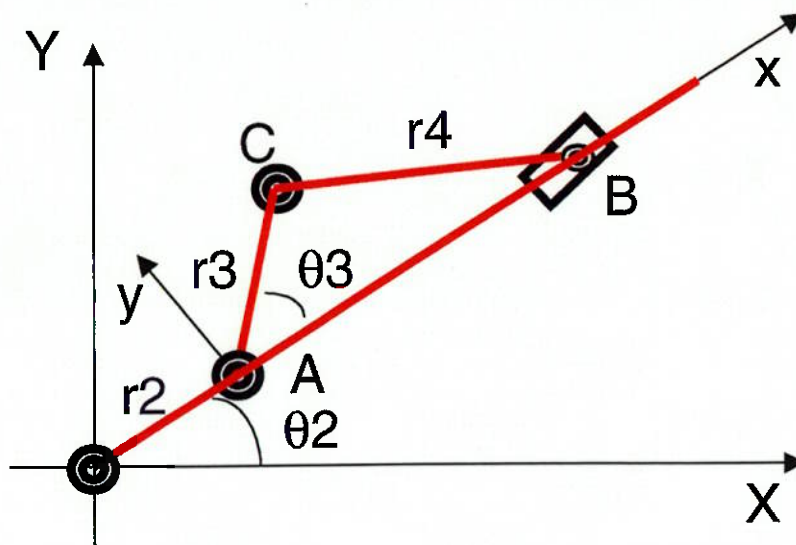
Durante esta etapa, não houve preocupação com as dimensões do mecanismo, que não estavam de acordo com as dimensões reais de um limpador de pára-brisa. A seguir é apresentado o esquema cinemático do mecanismo no ALGOR:



4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

A partir do modelo obtido no ALGOR, foi elaborado um conjunto de equações que descrevem o funcionamento do mecanismo. Este modelo matemático permite obter a posição das extremidades da palheta em função da posição angular da barra principal (θ_2) e da engrenagem móvel (θ_3).

Para isto adotou-se um sistema de coordenadas local e outro global. A posição angular da barra principal é descrita em relação ao sistema global, cuja origem está no centro da engrenagem fixa. A posição angular da engrenagem móvel é descrita em relação ao sistema local, cuja origem está localizada no centro desta e abscissa está alinhada com a barra principal.



É importante notar que o mecanismo possui 4 articulações e uma junta deslizante.

As equações apresentadas abaixo descrevem a trajetória dos pontos A, B e C:

$$X_a = r_2 \cdot \cos(\theta_2)$$

$$Y_a = r_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

$$X_b = (r_2 + r_3 \cdot \cos(\theta_3) + \sqrt{r_4^2 - r_3^2 \cdot \sin^2(\theta_3)}) \cdot \cos(\theta_2)$$

$$Y_b = (r_2 + r_3 \cdot \cos(\theta_3) + \sqrt{r_4^2 - r_3^2 \cdot \sin^2(\theta_3)}) \cdot \sin(\theta_2)$$

$$X_c = r_2 \cdot \cos(\theta_2) + r_3 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$Y_c = r_2 \cdot \sin(\theta_2) + r_3 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

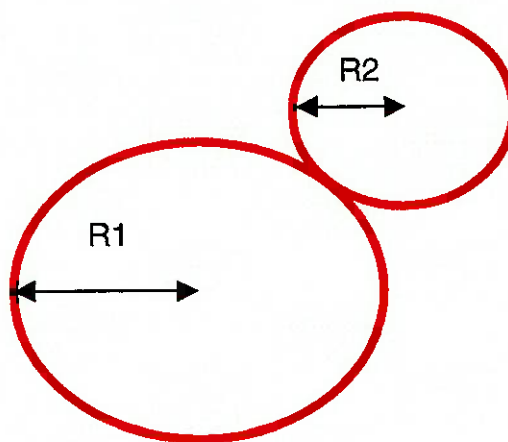
4.3 SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO MECANISMO

Foi desenvolvida uma ferramenta em EXCEL para que fosse simulado o funcionamento do mecanismo.

Em primeiro lugar, foi criada uma planilha para gerar as posições angulares θ_2 e θ_3 em função do tempo, de acordo com as equações abaixo:

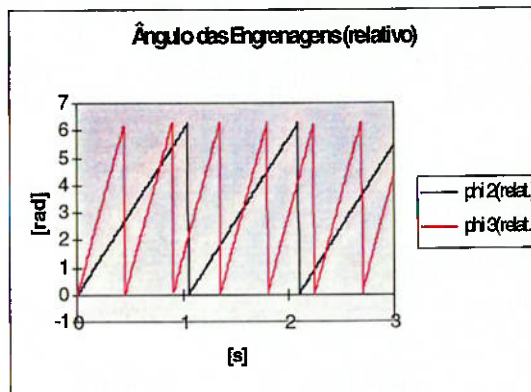
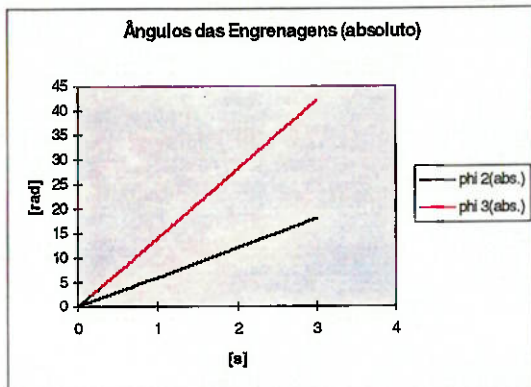
$$\theta_2 = \omega \cdot t$$

$$\theta_3 = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \theta_2$$

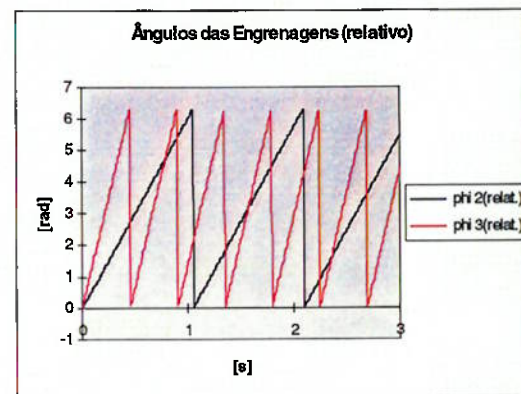
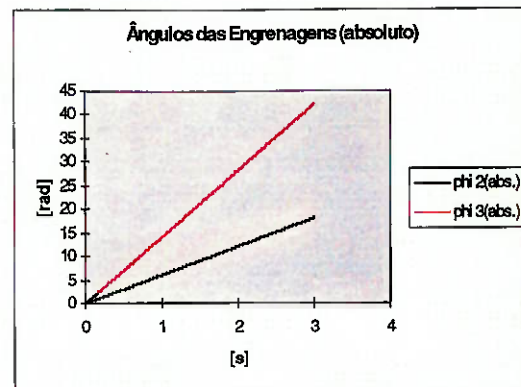


Com esses dados, elaborou-se dois gráficos: um para os valores absolutos dos ângulos e o outro para os valores relativos. Esses gráficos foram comparados com gráficos semelhantes gerados a partir dos dados de saída do ALGOR:

ALGOR



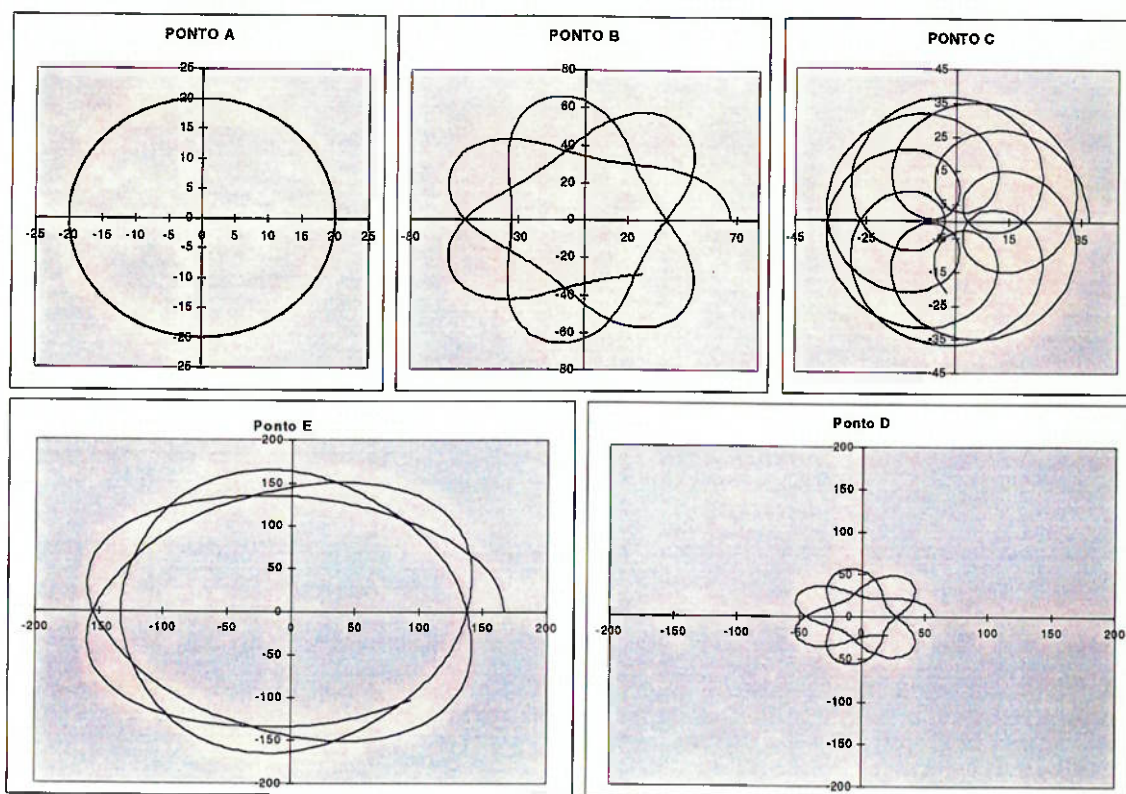
EXCEL



Observando os gráficos pode-se constatar que o modelo do EXCEL está compatível com o mecanismo modelado no ALGOR.

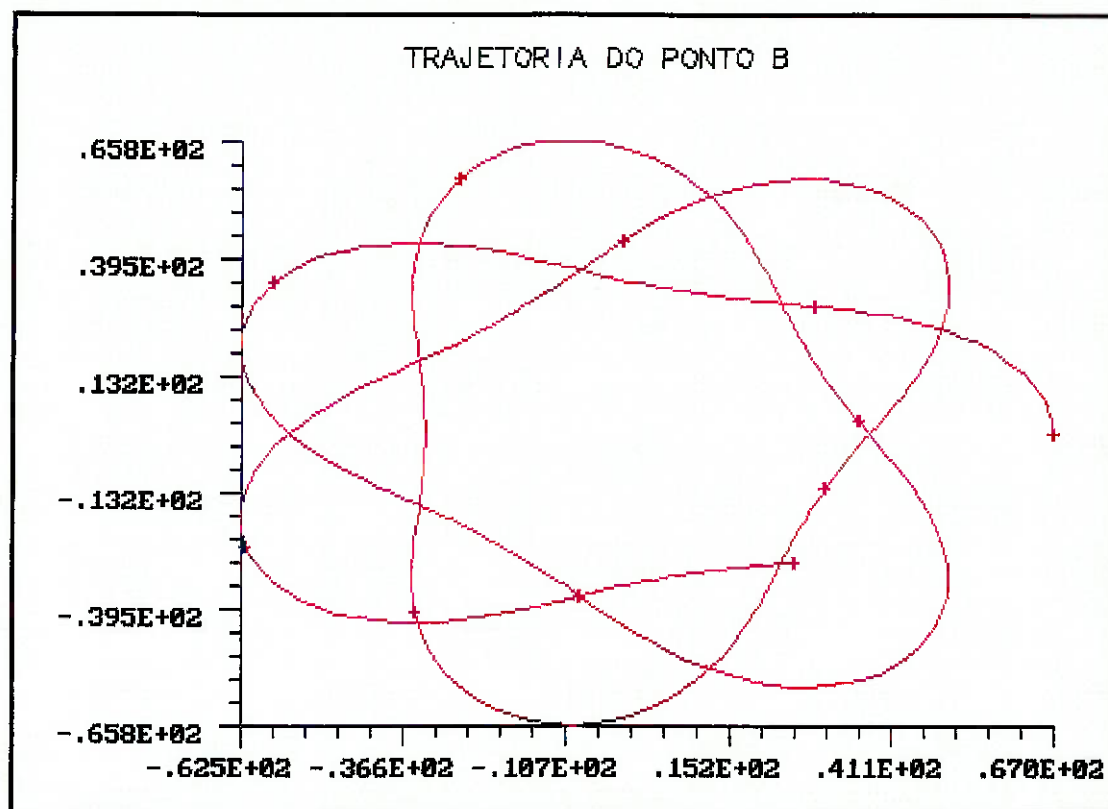
Depois foi criada uma planilha para gerar as trajetórias dos pontos A,B,C,D e E (D e E são as extremidades superior e inferior da palheta) a partir das posições angulares utilizando o modelo matemático. As equações para os pontos D e E são obtidas a partir da equação do ponto B.

Por meio dessas equações, foram gerados gráficos no EXCEL:



Através da comparação entre os gráfico gerados pelo EXCEL e os gráficos obtidos a partir do modelo no ALGOR, comprova-se que os dois modelos são realmente compatíveis.

A seguir é apresentado um dos gráficos gerado pelo ALGOR, a trajetória do ponto B:

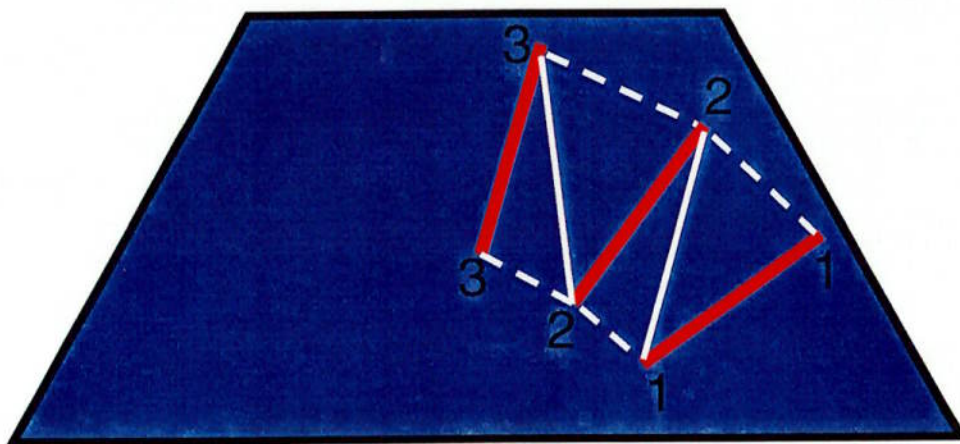


5. MODELO PARA CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO MECANISMO

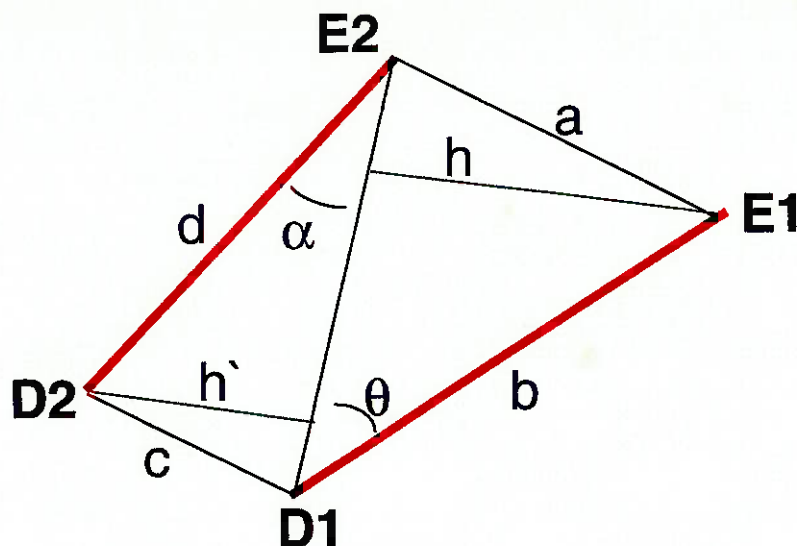
5.1 CÁLCULO DA ÁREA DE LIMPEZA

Após a aferição do modelo matemático com os resultados do ALGOR, utilizou-se primeiro para o cálculo da área de limpeza do limpador.

Para este cálculo, considerou-se um intervalo de 180° simétrico da trajetória da palheta. Neste intervalo, discretizou-se o movimento da palheta. Vários trapézios foram obtidos ligando-se as posições consecutivas das extremidades da palheta.



Depois, foram somadas as áreas de todos os trapézios, resultando na área total de limpeza. Este procedimento de cálculo foi incluído na planilha do EXCEL, tendo sido baseado nas seguintes equações:



- Cálculo da área do trapézio:

$$E_2 - D_1 = \sqrt{(X_{E_2} - X_{D_1})^2 + (Y_{E_2} - Y_{D_1})^2}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos(\theta)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{-a^2 + b^2 + c^2}{2 \cdot b \cdot c}\right)$$

$$a = E_2 - E_1 = \sqrt{(X_{E_2} - X_{E_1})^2 + (Y_{E_2} - Y_{E_1})^2}$$

$$b = E_1 - D_1 = \sqrt{(X_{E_1} - X_{D_1})^2 + (Y_{E_1} - Y_{D_1})^2}$$

$$c = E_2 - D_1 = \sqrt{(X_{E_2} - X_{D_1})^2 + (Y_{E_2} - Y_{D_1})^2}$$

$$h = c \cdot \sin(\theta)$$

$$A = \frac{b \cdot h}{2}$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{-e^2 + d^2 + c^2}{2 \cdot d \cdot c}\right)$$

$$e = D_2 - D_1 = \sqrt{(X_{D_2} - X_{D_1})^2 + (Y_{D_2} - Y_{D_1})^2}$$

$$d = E_2 - D_2 = \sqrt{(X_{E_2} - X_{D_2})^2 + (Y_{E_2} - Y_{D_2})^2}$$

$$h' = c \cdot \sin(\alpha)$$

$$A' = \frac{d \cdot h'}{2}$$

Onde:

$b=c$ =comprimento da palheta;

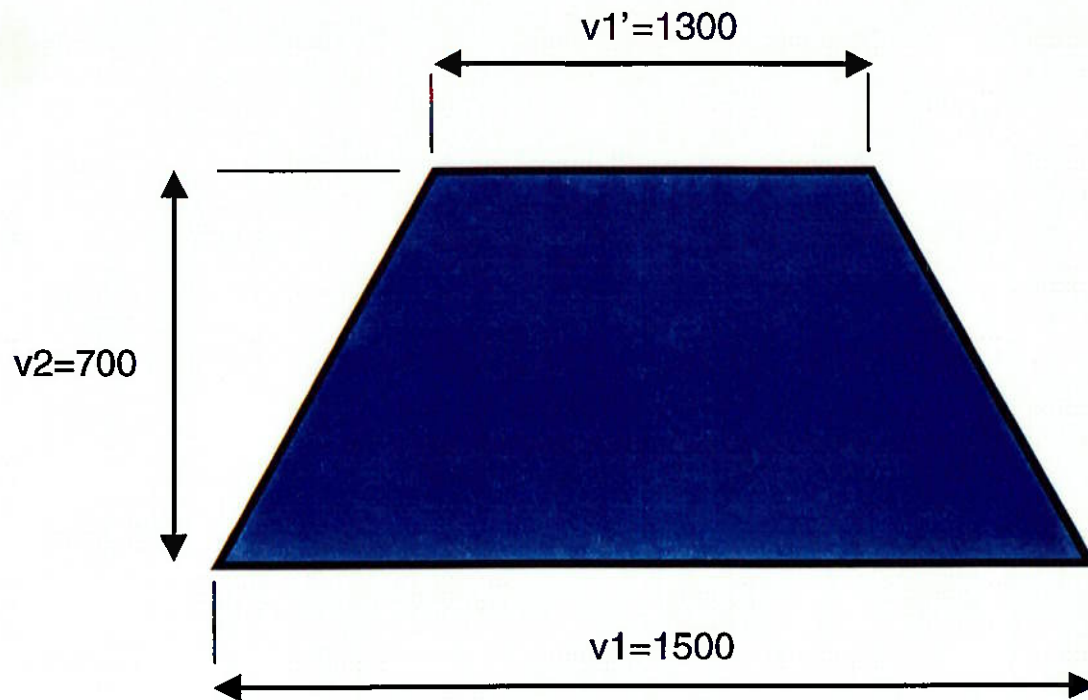
A =área do triângulo $E_1E_2D_1$;

A' = área do triângulo $D_1D_2E_2$;

$A+A'$ =área do trapézio.

5.2 CÁLCULO DA ÁREA DO VIDRO

O vidro adotado para o cálculo da eficiência possui a geometria abaixo:



O vidro foi considerado como plano. Dessa forma, sua área pode ser calculada por:

$$A = \frac{(V_1 + V_1')}{2} V_2$$

O cálculo resulta em uma área de 980.000mm².

5.3 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA

A eficiência do limpador de pára-brisa é definida como a razão entre a área de limpeza e a área do vidro.

Assim, o modelamento matemático do problema está encerrado. Deste ponto em diante, inicia-se a otimização propriamente dita e o aprimoramento do mecanismo.

6. PARÂMETROS DE OTIMIZAÇÃO

6.1 VARIÁVEIS DE PROJETO

Variáveis de projeto são os fatores determinantes do problema. Uma vez definidas, a rotina de otimização analisa uma série de combinações de valores para essas variáveis, buscando atingir o objetivo estabelecido.

Para o problema estudado, as variáveis de projeto selecionadas foram:

- X1.centro-a-centro** par de engrenagens
- X2.raio** engrenagem menor
- X3.comp.** da barra apêndice da engrenagem
- X4.comp.** da barra articulada à palheta
- X5.comp.** da articulação à extremidade sup. palheta
- X6.comp.** da articulação à extremidade inf. palheta

Para que se possa utilizar a rotina OPT3, é necessário criar uma rotina auxiliar em FORTRAN contendo os parâmetros de otimização.

Deve ser definido um valor inicial para cada uma das variáveis e o intervalo com os limites inferior e superior de variação. Um intervalo bem definido contribui para a convergência da otimização.

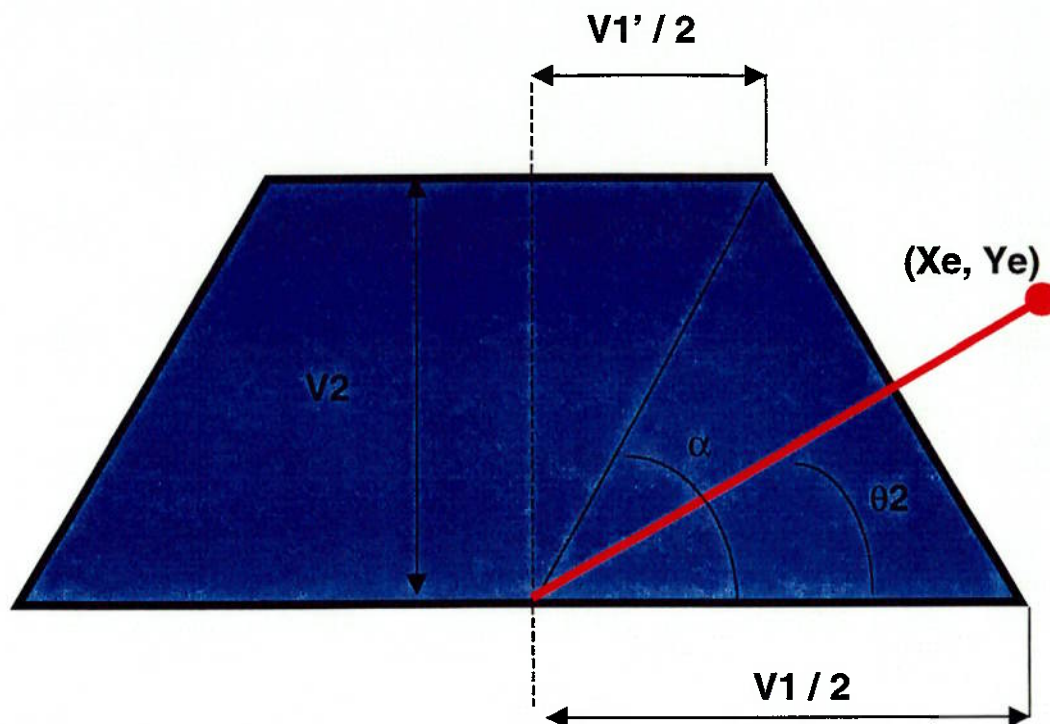
6.2 FUNÇÃO OBJETIVO

O objetivo do trabalho é a maximização da eficiência do limpador de pára-brisa. Para a definição da função objetivo, criou-se uma rotina de cálculo da eficiência em FORTRAN, baseada no modelo matemático.

Como o OPT3 busca uma minimização da função objetivo, foi necessário tornar o valor da eficiência negativo, para que esta fosse maximizada.

6.3 RESTRIÇÃO

Existe um modelo de restrição para ser incluído na rotina de parâmetros de otimização. No entanto, este modelo permite apenas restrições dimensionais às variáveis de projeto. Devido a este fato, não foi possível utilizar este modelo para limitar a trajetória da palheta à área do vidro (critério de projeto).



Assim, criou-se uma restrição dentro da função objetivo que funciona da seguinte maneira:

- Verifica se a palheta está ultrapassando os limites do vidro:
 - Em primeiro lugar é verificado se θ_2 é menor do que α . Caso isto ocorra (1), as coordenadas do ponto E serão comparadas com a equação da reta inclinada (2) que define o limite lateral do vidro. Caso contrário (3), serão comparadas com a

reta (4) que define o limite superior do vidro. Como o movimento é simétrico, basta fazer esta verificação até que θ_2 seja igual a 90° .

$$1) \alpha = \arctan\left(\frac{V_2}{V_1'/2}\right) > \theta_2$$

$$2) (y - y_0) = m(x - x_0)$$

$$(y - y_0) = m(x - x_0)$$

$$\left(\frac{V_1}{2} - \frac{V_1'}{2}\right) = m(0 + V_2)$$

$$m = -\frac{\left(\frac{V_1}{2} - \frac{V_1'}{2}\right)}{(0 + V_2)} = -\frac{(V_1 - V_1')}{2 \cdot V_2}$$

$$m = -\frac{(V_1 - V_1')}{2 V_2}$$

$$\left(y - \frac{V_1}{2}\right) = -\frac{(V_1 - V_1')}{2 V_2} (x - 0)$$

$$y = -\frac{(V_1 - V_1')}{2 V_2} x + \frac{V_1}{2}$$

$$ax + by + c = 0$$

$$a = -m$$

$$b = 1$$

$$c = -\frac{V_1}{2}$$

$$3) \alpha = \arctan\left(\frac{V_2}{V_1'/2}\right) < \theta_2$$

$$ax + by + c = 0$$

$$a = 1$$

$$b = 0$$

$$c = V_1$$

$$4) x = -V_1$$

- Caso a palheta tenha ultrapassado os limites do vidro:
 - Um acumulador conta quantas vezes isto ocorre. A cada vez, é calculada a distância da extremidade superior da palheta ao limite do vidro.

$$d = \frac{a \cdot x_E + b \cdot y_E + c}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

- Outro acumulador soma estas distâncias para diferentes posições.

- Penalização da eficiência:
 - Após o cálculo da eficiência, estes acumuladores são ponderados por fatores determinados pelo usuário. São, então, adicionados à função objetivo, dificultando sua maximização.
 - OPT3 é uma rotina iterativa e, desta forma, modifica as variáveis de projeto, calcula a função objetivo, checa as restrições e inicia o processo novamente se o resultado obtido não foi satisfatório. Com a penalização, a maximização da eficiência é prejudicada, indicando à rotina que a solução está se afastando do objetivo. Com isso, a otimização é redirecionada.

7. OTIMIZAÇÃO

Para iniciar o processo de otimização, aumentou-se linearmente as dimensões do mecanismo de forma a torná-lo compatível com as dimensões do vidro selecionado. Este mecanismo apresentava uma eficiência próxima de 70%. Em uma otimização preliminar, foi atingida uma eficiência de 76%.

Buscando atingir uma eficiência mínima de 86%, percebeu-se a necessidade da escolha de um conjunto de valores iniciais com maior potencial de otimização.

8. REFINAMENTO

Iniciou-se um estudo do conjunto de valores iniciais. O objetivo deste estudo era avaliar as tendências apontadas pela otimização do OPT3 na ferramenta desenvolvida no EXCEL.

Exagerando essas tendências no EXCEL, pode-se observar como a alteração de cada variável influencia no mecanismo como um todo. O resultado mais significativo foi a descoberta do efeito da variação da relação das engrenagens no movimento do mecanismo.

Variando-se esta relação em poucas unidades, constatou-se um grande deslocamento do eixo de simetria do movimento. Para algumas relações, esse eixo de simetria desapareceu, inviabilizando a utilização do mecanismo como limpador de pára-brisa.

Fazendo-se uma análise visual das diversas possibilidades de relação de transmissão, concluiu-se que a melhor relação era que o centro-a-centro fosse quatro vezes maior que o raio da engrenagem móvel. Para esta condição, o movimento tem período de 360° e o intervalo simétrico selecionado cobre o trecho de 90° a 270° .

A partir das tendências indicadas no OPT3, obteve-se novos conjuntos de valores iniciais, que foram novamente otimizados e assim sucessivamente até a obtenção de um conjunto com alto potencial de otimização.

9. RESULTADO FINAL

9.1 AUMENTO DA EFICIÊNCIA

Partindo de um conjunto de valores iniciais com eficiência de cerca de 71%, obteve-se um resultado de 86,2% de eficiência após a otimização. Este resultado satisfaz os critérios de projeto estabelecidos e comprova a grande capacidade de otimização da rotina OPT3.

Abaixo estão listados os valores iniciais e finais das variáveis de projeto:

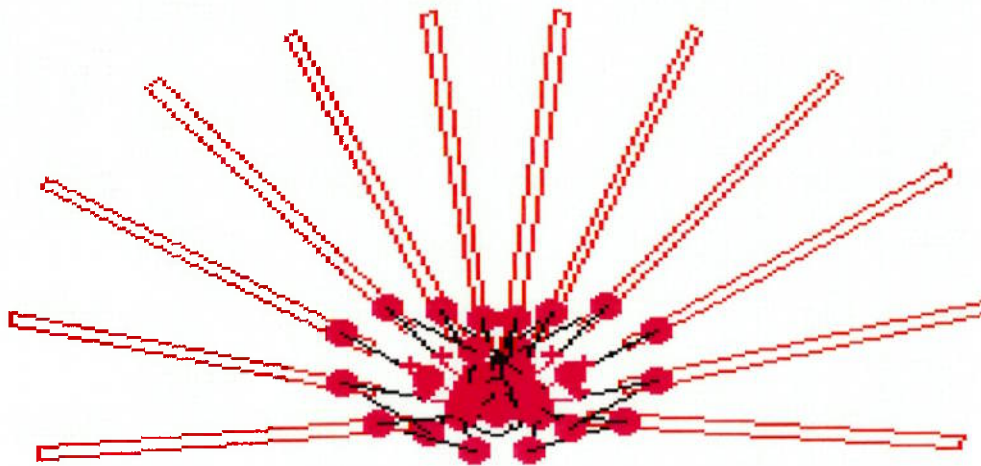
| | Chute 1 | Chute 2 | Resultado Final |
|-------------------|---------|---------|-----------------|
| X1 | 80 | 60 | 60 |
| X2 | 20 | 15 | 15 |
| X3 | 60 | 60 | 59,5 |
| X4 | 130 | 130 | 150 |
| X5 | 470 | 470 | 510 |
| X6 | 30 | 30 | 50 |
| Eficiência | 75% | 71% | 86% |

Com o refinamento, obteve-se um conjunto de valores iniciais com eficiência de 75%. Este conjunto apresentava alto potencial de otimização. No entanto, durante a otimização houve a tendência de um aumento excessivo do par de engrenagens.

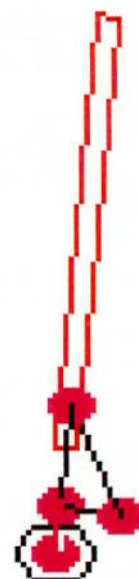
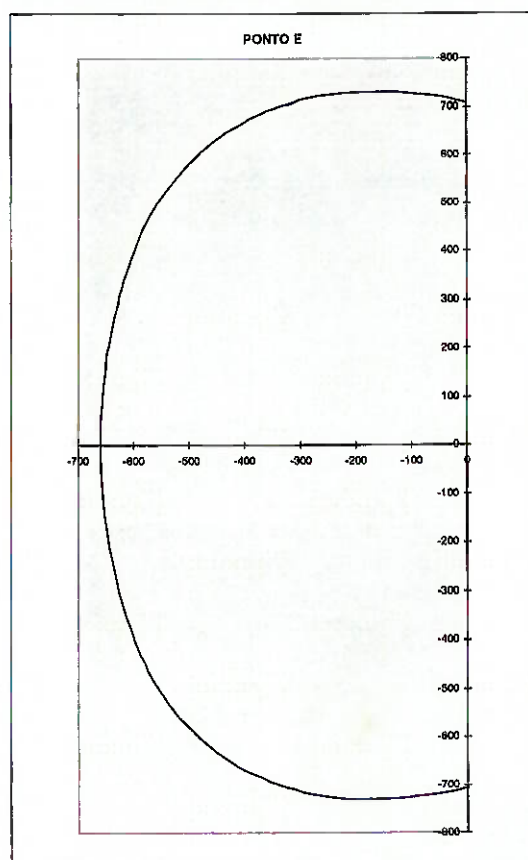
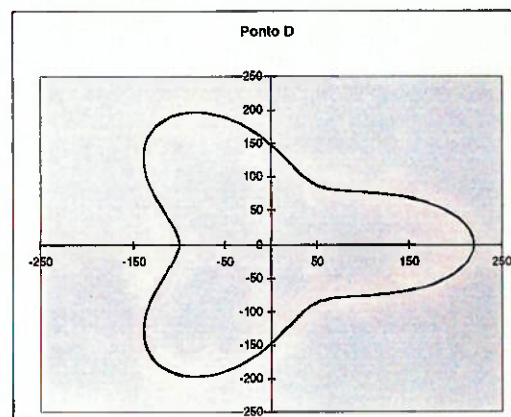
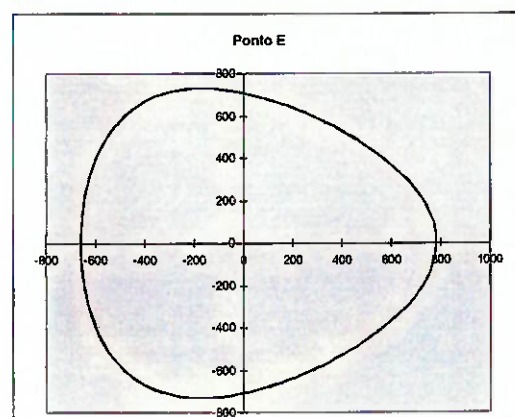
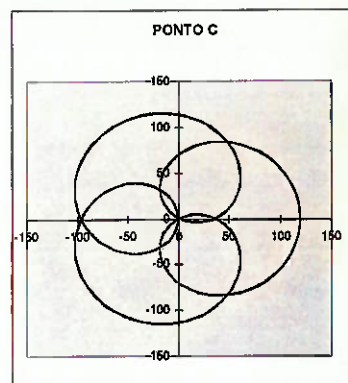
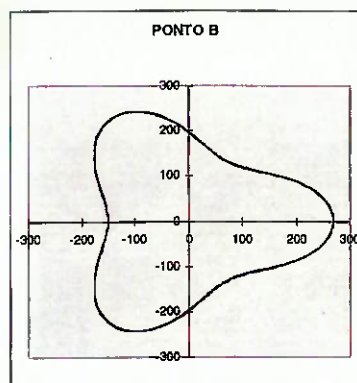
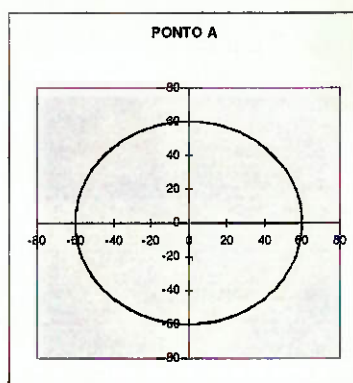
Por isso, optou-se por um novo conjunto com eficiência de 71%. As dimensões das engrenagens foram obtidas de outras otimizações anteriores que apresentaram bons resultados.

9.2 MECANISMO ÓTIMO

A seguir são apresentados alguns gráficos do ALGOR e EXCEL que ilustram o funcionamento do mecanismo otimizado:

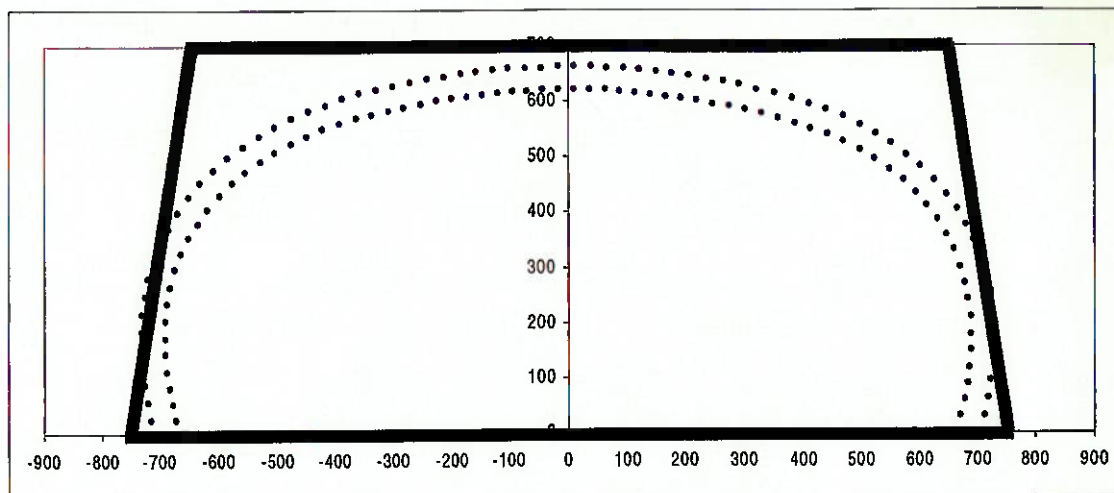


Movimento do Mecanismo no ALGOR



Trajetória dos Pontos e Esquema Cinemático do Mecanismo

10. Discussão dos resultados:

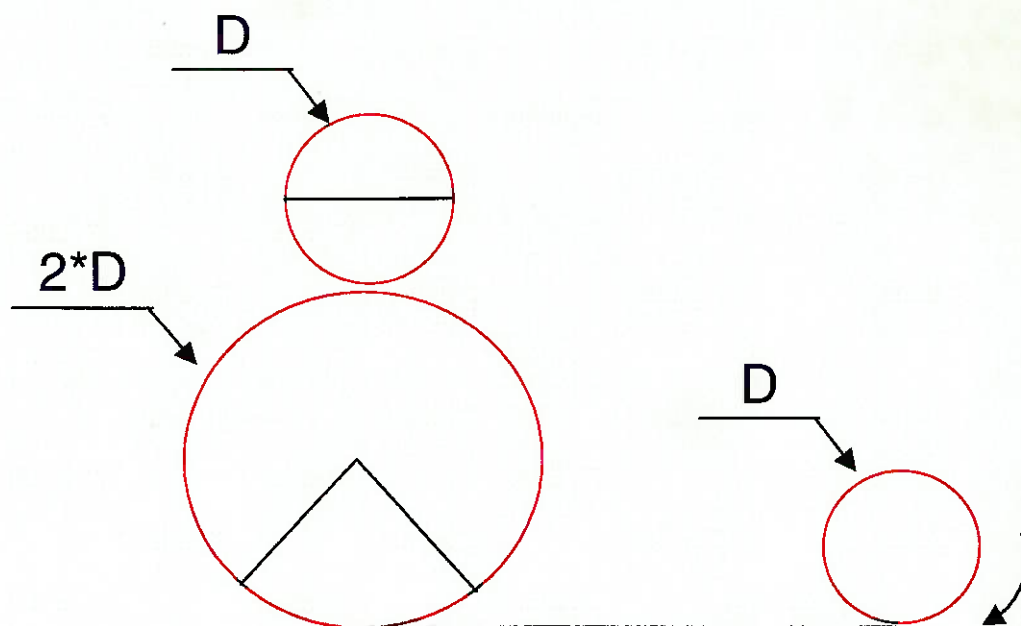


O gráfico acima ilustra a evolução obtida por meio da otimização. A curva preta mostra o vidro. A curva azul mais interna mostra o desempenho de um mecanismo intermediário. A curva azul mais externa é o mecanismo otimizado.

É possível notar a evolução obtida com o processo de otimização. Apesar da trajetória do mecanismo otimizado ultrapassar em poucos milímetros os limites do vidro, seu movimento não é prejudicado. Nos vidros reais, há uma região de folga opaca nas bordas do vidro. Nos carros, é comum que as palhetas invadam esta região em um pequeno trecho da trajetória.

Outro fato importante a ser colocado é a necessidade de um mecanismo auxiliar que permita a oscilação do mecanismo no intervalo de 180° anteriormente definido.

Esse mecanismo pode ser construído por meio de três engrenagens. A correta escolha de relações entre seus raios promove a movimentação desejada.



O mecanismo acima pode ser utilizado para essa aplicação. A engrenagem da direita representa o motor, que gira 360° . A engrenagem a ela ligada por meio de uma barra girará 90° no sentido horário e 90° no anti-horário, já que seu diâmetro é duas vezes maior. A engrenagem superior gira, assim, 180° , pois seu diâmetro é metade da maior provocando a oscilação do mecanismo.

Obs: As planilhas criadas no EXCEL, assim como a rotina de otimização encontram-se no disquete em anexo. A listagem do OPT3 encontra-se nos anexos deste relatório.

11. CONCLUSÃO

O resultado final do trabalho atingiu todos os critérios de projeto formulados e superou a meta de 86% de eficiência do mecanismo, o que foi plenamente satisfatório. O caráter ótimo do mecanismo foi comprovado pelo ajuste fino dos parâmetros de convergência do OPT3. Modificando os fatores GTOL, XTOL e ε , não ocorreram mudanças significativas no resultado final, indicando sua provável convergência para o ponto de máximo global da função.

No entanto, este mecanismo pode estar sujeito a algumas modificações que visam a melhorar seu desempenho e aprimorar aspectos construtivos. Para a otimização, o centro da engrenagem fixa foi colocado no centro da borda inferior do vidro, o que tornaria o conjunto de engrenagens aparente. Para contornar este problema, é possível deslocar este conjunto para uma posição abaixo da borda inferior e incliná-lo em relação ao plano do vidro. Um novo processo de otimização pode ser feito com base nestas alterações.

Outro ponto positivo do trabalho foi a integração entre as três ferramentas utilizadas: ALGOR, EXCEL e FORTRAN. O ALGOR é uma ferramenta poderosa para análise detalhada de mecanismos e permitiu um bom embasamento para o modelo matemático. No entanto, mostrou-se pouco ágil para alterações das variáveis de projeto. Neste ponto, a utilização do EXCEL foi fundamental para o refinamento da otimização, permitindo melhorar os chutes iniciais para a otimização. Quanto ao OPT3, seu desempenho na otimização foi muito bom. Os resultados obtidos com esta rotina apontaram tendências que não teriam sido descobertas através do método de tentativa e erro.

Por isso, o tempo gasto com a familiarização das ferramentas foi importante para o planejamento do trabalho, já que foi possível identificar a melhor aplicação para cada uma delas, facilitando a solução de problemas que surgiram no decorrer do projeto.

12. BIBLIOGRAFIA

- (1) F. Freudestein and D. Vucina, *Mech. Mach. Theory* **26**(6), 553-563 (1991).
- (2) "Manual de Referência - ALGOR (Dynapak)", Algor Interactive Systems, Inc.
(1990).
- (3) Anônimo. *Automotive Engineering*. **93** (7), 67-68 (1985)
- (4) Método do Gradiente Generalizado - Programa OPT3.2 Prof.:Valder Steffen Júnior,
Aluna: Sezimária F. P. Saramago - UFU
- (5) Metodologia Para Otimização da Área de Limpeza do Mecanismo do Limpador de
Pára-Brisa - Prof.: Tarcísio Hess Coelho - Alunos: Delson E. Ferraz da Silva Jr. E
Gilberto de Almeida Corrêa Jr.- (1996)

13. ANEXOS

PROGRAM MAIN

Otimização da Área de Limpeza do Para-Brisa

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

DIMENSION X(6), XMAX(6), XMIN(6), SCALE(6)

COMMON /OPTDAT/D(141)

COMMON /PARI/XTOL,GTOL,EPS,EPSLS,EPSBD,IPR,MAXM,IDATA,LFUNCT,
1 NE,LNE,NI,LNI,NCON,NSCALE,ISEARC,MAXNEW,IDIF,NOUT

NSCALE=2

IDATA=1

IPR=1

NOUT=6

XTOL=.0001

GTOL=.0001

EPSLS=.001

EPSBD=.001

IDF=1

EPS=.0001

ISEARC=1

N=6

NCON=1

LNE=1

NE=1

NI=0

LNI=0

LBD=0

IGDR=0

LFUNCT=0

MAXM=10

MAXNEW=10

ISIZE=125

X(1)= 60

c centro-a-centro do par de engrenagens

XMIN(1) =40

XMAX(1) =60

X(2)= 15

c raio da engrenagem menor

XMIN(2) =4

XMAX(2) =50

X(3)= 60

c comprimento da barra (3) apêndice da engrenagem

XMIN(3) =20

XMAX(3) =80

X(4)= 130

c comprimento da barra (4) articulada na palheta

XMIN(4) =80

XMAX(4) =150

```

C      comprimento palheta + haste
      XMIN(5) =460
      XMAX(5) =510

      X(6)= 30
C      comprimento da haste
      XMIN(6) =25
      XMAX(6) =50

      OPEN(6,FILE='c:\meusdo~1\tati\tf\optim\saida\otim.out',
1      STATUS='old')
      CALL OPT3(X,XMAX,XMIN,SCALE,FSCALE,N,ISIZE)
      STOP
      END

      FUNCTION F(X)
C
C      *****
C
C      Cálculo da eficiência do limpador de pára-brisa
C
C      *****
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION X(6),TETA2(100),TETA3(100),XD(100),YD(100),XE(100),
1      YE(100)
      DOUBLE PRECISION n,i,inc,a,c,e,teta,alfa,h,hlin,a1,a2,alimp,avid,
1      eficiencia,v1,vllin,v2,m,cont,int,fat1,fat2
      INTEGER nout

C      número de posições do mecanismo em um intervalo de 180°
      n=45
C      dimensões do vidro
      v1=1500
      vllin=1300
      v2=700
      m=(vllin-v1)/2*v2
C      incremento de posição
      inc=3.14159/n
C      parâmetros de penalização
      cont=0
      int=0
      fat1=0
      fat2=0

      nout=6

C      posições angulares iniciais
      teta2(0)=7.85
      teta3(0)=(X(1)/X(2))*teta2(0)-teta2(0)

C      cálculo das posições angulares
      i=1
      do while (i.LE.n)

          teta2(i)=teta2(i-1) + inc
          teta3(i)=(X(1)/X(2))*teta2(i)-teta2(i)

```

end do

C cálculo das posições das extremidades da palheta

i=0

do while (i.LE.n)

u=X(1) + X(3) * cos(teta3(i))

v=SQRT(X(4)**2 - X(3)**2 * sin(teta3(i))**2)

XD(i)=(u + v - X(6)) * cos(teta2(i))

YD(i)=(u + v - X(6)) * sin(teta2(i))

XE(i)=(u + v + X(5)) * cos(teta2(i))

YE(i)=(u + v + X(5)) * sin(teta2(i))

C penalizações

if(abs(atan(v2/(v1lin/2))+7.85).GT.abs(teta2(i)))then

if(YE(i).GT.(m*XE(i)+(v1/2)))then

cont=cont+1

int=int+(-m*XE(i)+YE(i)-(v1/2))/sqrt(m**2+1)

end if

else

if(abs(atan(v2/(v1lin/2))+7.85).LT.abs(teta2(i)))then

if(teta2(i).LT.(7.85+(3.14159)/2))then

if(abs(XE(i)).GT.v2)then

cont=cont+1

int=int+(XE(i)+v2)

end if

end if

end if

end if

i=i+1

end do

cont=2*cont

int=2*int

alimp=0

C cálculo da área de limpeza

i=1

do while (i.LE.n)

a=SQRT((XE(i)-XE(i-1))**2 + (YE(i)-YE(i-1))**2)

c=SQRT((XE(i)-XD(i-1))**2 + (YE(i)-YD(i-1))**2)

e=SQRT((XD(i)-XD(i-1))**2 + (YD(i)-YD(i-1))**2)

teta=acos((-a**2)+(X(5)+X(6))**2+c**2)/(2*(X(5)+X(6))*c)

h=c*sin(teta)

alfa=acos((-e**2)+(X(5)+X(6))**2+c**2)/(2*(X(5)+X(6))*c)

hlin=c*sin(alfa)

a1=(X(5)+X(6))*h/2

a2=(X(5)+X(6))*hlin/2

alimp=alimp + a1 + a2

i=i+1

```

end do

C   cálculo da área do vidro
    avid= (v1+v1lin)*(v2-50)/2

C   cálculo da eficiência
    eficiencia=-alimp/avid

    write (nout,*) eficiencia,cont,int

    fat1=cont*cont/1000
    fat2=int*int/1000

C   função objetivo
    F=eficiencia+(fat1*fat2)

    write(*,*) 'F=',eficiencia
    return
end

      SUBROUTINE CONST(X,CON)
      *****
C
C   Restrições
C
C   *****
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
      DIMENSION X(1),CON(1)
      COMMON/one/NFE,NCE

C   relação das engrenagens
      CON(1)=X(2)-X(1)/4

      NCE=NCE+1
      RETURN

```


OUTPUT PARAMETER.....IPR = 1
 INITIAL OUTPUT PARAMETER.....IDATA = 1
 MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS.....MAXM = 10
 SCALING PARAMETER.....NSCALE = 2 AUTO
 SEARCH PARAMETER.....ISEARC = 1 BFS
 MAXIMUM NEWTON ITERATIONS.....MAXNEW = 10
 NUMERICAL DIFFERENCING OPTION....IDIF = 1 FOR

OBJECTIVE FUNCTION F(X) = - .716454E+00

| INDEX | X(I) | EQUALITY H(I) | INEQUALITY G(I) |
|-------|---------------|---------------|-----------------|
| 1 | .60000000E+02 | .00000000E+00 | |
| 2 | .15000000E+02 | | |
| 3 | .60000000E+02 | | |
| 4 | .13000000E+03 | | |
| 5 | .47000000E+03 | | |
| 6 | .30000000E+02 | | |

| INDEX | LOWER BOUND | UPPER BOUND | AUTO SCALE FACTOR |
|-------|---------------|---------------|-------------------|
| 1 | .40000000E+02 | .60000000E+02 | .10000000E+02 |
| 2 | .40000000E+01 | .50000000E+02 | .10000000E+02 |
| 3 | .20000000E+02 | .80000000E+02 | .10000000E+02 |
| 4 | .80000000E+02 | .15000000E+03 | .10000000E+03 |
| 5 | .46000000E+03 | .51000000E+03 | .10000000E+03 |
| 6 | .25000000E+02 | .50000000E+02 | .10000000E+02 |

CONSTRAINT SCALE FACTORS

.100000E+01

TOP OF D ARRAY AT 125

1

OPTIMIZATION USING THE REDUCED GRADIENT METHOD OPT3.2

| | |
|-------------------------|--------------------|
| -7.165654339643014E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.131854946621677 | |
| -7.165623630529364E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.128814687409052 | |
| -7.165584625698046E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.130283990476400 | |
| -7.165826679402498E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.130426620939158 | |
| -7.166667758066143E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.130685133030021 | |
| -7.165605961373355E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.130309508623901 | |

*** SINGULAR MATRIX IN CALCT ***

FOUND ZERO ROW = 1

FOUND DESIGN 6 IN STATES

MAXIMUM ELEMENT OF RELATIVE REDUCED GRADIENT = .107876E+03

| | |
|-------------------------|--------------------|
| -7.482563792798692E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.256842644360735 | |
| -7.805317451613675E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.382681459614412 | |
| -8.133926785520130E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.507937775757069 | |
| -8.340604609890494E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.574802772483662 | |
| -8.503861485610326E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627068868395549 | |
| -8.503995309107819E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627078013405228 | |
| -8.504129117194208E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627087157963953 | |

| | |
|-------------------------|--------------------|
| -8.504262909869504E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627096302071733 | |
| -8.504396687133493E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627105445728582 | |
| -8.504530448986131E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627114588934508 | |
| -8.504664195427639E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627123731689523 | |
| -8.504797926457592E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627132873993637 | |
| -8.504931642076309E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627142015846864 | |
| -8.505065342283481E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627151157249210 | |
| -8.505199027079140E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627160298200691 | |
| -8.505332696463190E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627169438701315 | |
| -8.505466350435729E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627178578751093 | |
| -8.50559988996619E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627187718350038 | |
| -8.505733612145777E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627196857498159 | |
| -8.505867219883163E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627205996195468 | |
| -8.506000812208732E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627215134441975 | |
| -8.506134389122432E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627224272237692 | |
| -8.506267950624404E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627233409582627 | |
| -8.506401496714345E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627242546476796 | |
| -8.506535027392230E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627251682920207 | |
| -8.506668542658160E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627260818912871 | |
| -8.506802042511960E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627269954454798 | |
| -8.506935526953541E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627279089546000 | |
| -8.507068995983139E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627288224186489 | |
| -8.507202449600452E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627297358376274 | |
| -8.507335887805432E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627306492115368 | |
| -8.507469310597992E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627315625403781 | |
| -8.507602717978392E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627324758241523 | |
| -8.507736109946232E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627333890628605 | |
| -8.507869486501571E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627343022565039 | |
| -8.508002847644536E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627352154050837 | |
| -8.508136193374873E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627361285086008 | |
| -8.508269523692528E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627370415670563 | |
| -8.508402838597702E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.627379545804512 | |

| | |
|-------------------------|--------------------|
| -8.617942324516277E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635109502132869 | |
| -8.618062274137379E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635118246049963 | |
| -8.618182208304548E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635126989525599 | |
| -8.618302127017748E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635135732559783 | |
| -8.618422030276756E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635144475152528 | |
| -8.618541918081657E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635153217303841 | |
| -8.618661790432518E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635161959013735 | |
| -8.618781647329069E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635170700282219 | |
| -8.618901488771396E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635179441109303 | |
| -8.619021314759431E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635188181494999 | |
| -8.619141125293284E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635196921439315 | |
| -8.619260920372549E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635205660942261 | |
| -8.61938069997322E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635214400003847 | |
| -8.619500464167699E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635223138624085 | |
| -8.619620212883571E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635231876802986 | |
| -8.619739946144929E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635240614540557 | |
| -8.619859663951509E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635249351836809 | |
| -8.619979366303603E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635258088691754 | |
| -8.620099053200830E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635266825105401 | |
| -8.620218724643394E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635275561077759 | |
| -8.620338380630938E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635284296608840 | |
| -8.620458021163715E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635293031698654 | |
| -8.620577646241654E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635301766347208 | |
| -8.620697255864475E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635310500554518 | |
| -8.620816850032447E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635319234320590 | |
| -8.620936428745435E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635327967645434 | |
| -8.621055992003304E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635336700529062 | |
| -8.621175539805890E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635345432971483 | |
| -8.621295072153162E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635354164972707 | |
| -8.621414589045389E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635362896532745 | |
| -8.621534090482435E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635371627651606 | |
| -8.621653576463862E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635380358329303 | |

| | |
|-------------------------|--------------------|
| -8.621773046989960E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635389088565843 | |
| -8.621892502060822E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635397818361235 | |
| -8.622011941676008E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635406547715496 | |
| -8.622131365835896E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635415276628629 | |
| -8.622250774540025E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635424005100647 | |
| -8.622370167788521E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635432733131559 | |
| -8.622489545581348E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635441460721377 | |
| -8.622608907918433E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635450187870109 | |
| -8.622728254799872E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635458914577767 | |
| -8.622847586225378E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635467640844359 | |
| -8.622966902195240E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635476366669899 | |
| -8.623086202709007E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635485092054393 | |
| -8.623205487766891E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635493816997854 | |
| -8.623324757368714E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635502541500291 | |
| -8.623444011514427E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635511265561712 | |
| -8.623563250204295E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635519989182130 | |
| -8.623682473437861E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635528712361555 | |
| -8.623801681215272E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635537435099996 | |
| -8.623920873536417E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635546157397465 | |
| -8.624040050401315E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635554879253968 | |
| -8.624159211809774E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635563600669520 | |
| -8.624278357762012E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635572321644129 | |
| -8.624397488257671E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635581042177804 | |
| -8.624516603296943E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635589762270556 | |
| -8.624635702879803E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635598481922398 | |
| -8.624754787005862E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635607201133334 | |
| -8.624811045280515E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635615919903381 | |
| -8.624810654200300E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635624638232542 | |
| -8.624810852530075E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.635620218330810 | |

OBJECTIVE F(X) = -.8623540639E+00 FUNCTION

EVALUATIONS 0

ITERATION 1: ITERATIONS SINCE BFS RESET 0 CONSTRAINT

EVALUATIONS 971

| INDEX G(I) | | X(I) | EQUALITY H(I) | INEQUALITY |
|-------------------|---|-------------------------|--------------------|------------|
| 1 | U | .60000000E+02 | .00000000E+00 | |
| 2 | | .15000000E+02 | | |
| 3 | | .57543933E+02 | | |
| 4 | U | .15000000E+03 | | |
| 5 | U | .51000000E+03 | | |
| 6 | U | .50000000E+02 | | |
| | | -8.624889557680930E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.637101629957135 | | | | |
| | | -8.624845006836379E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.634180242532672 | | | | |
| | | -8.624811924895820E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.635596268057003 | | | | |
| | | -8.625112446521753E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.635745729452474 | | | | |
| | | -8.626089151597419E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.636023512344065 | | | | |
| | | -8.624839759185600E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.635615919903381 | | | | |

MAXIMUM ELEMENT OF RELATIVE REDUCED GRADIENT = .888475E-02

| | | | |
|-------------------|--|-------------------------|--------------------|
| | | -8.623762287709673E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.608113966599636 | | | |
| | | -8.624840229371409E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.622355809938060 | | | |
| | | -8.624962576282440E-001 | 2.0000000000000000 |
| 5.628684700572915 | | | |

OBJECTIVE F(X) = -.8623695293E+00 FUNCTION

EVALUATIONS 0

ITERATION 2: ITERATIONS SINCE BFS RESET 1 CONSTRAINT

EVALUATIONS 974

| INDEX G(I) | | X(I) | EQUALITY H(I) | INEQUALITY |
|-------------------|---|-------------------------|--------------------|------------|
| 1 | U | .60000000E+02 | .00000000E+00 | |
| 2 | | .15000000E+02 | | |
| 3 | | .59534162E+02 | | |
| 4 | U | .15000000E+03 | | |
| 5 | U | .51000000E+03 | | |
| 6 | U | .50000000E+02 | | |
| | | -8.625039212146525E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.630219873783643 | | | | |
| | | -8.624998295650140E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.627199711690053 | | | | |
| | | -8.624962568010137E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.628663560227956 | | | | |
| | | -8.625264880347467E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.628815305296747 | | | | |
| | | -8.626240696399475E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.629092293013599 | | | | |
| | | -8.624991291540499E-001 | 2.0000000000000000 | |
| 5.628684700572915 | | | | |

MAXIMUM ELEMENT OF RELATIVE REDUCED GRADIENT = .124707E-04

MAXIMUM ELEMENT OF RELATIVE REDUCED GRADIENT = .124707E-04

CONVERGENCE ACHIEVED
 MAXIMUM ELEMENT OF RELATIVE REDUCED GRADIENT VECTOR <
 GTOL

*** OPTIMUM FOUND TO BE ***

***** + FINAL DESIGN +

OBJECTIVE F(X) = -.8623695293E+00 TOTAL FUNCTION
 EVALUATIONS 0
 ITERATION 2 TOTAL CONSTRAINT
 EVALUATIONS 974

| INDEX | | X(I) | EQUALITY H(I) | INEQUALITY |
|-------|---|----------------|----------------|------------|
| G(I) | | | | |
| 1 | U | .600000000E+02 | .000000000E+00 | |
| 2 | | .150000000E+02 | | |
| 3 | | .59534162E+02 | | |
| 4 | U | .150000000E+03 | | |
| 5 | U | .510000000E+03 | | |
| 6 | U | .500000000E+02 | | |

LAGRANGE MULTIPLIERS OF ACTIVE CONSTRAINTS

| | | | |
|-------------|-------------------------|-----|---|
| .242586E-02 | EQUALITY CONSTRAINT | 1 = | - |
| .187221E-01 | UPPER BOUND OF VARIABLE | 1 = | |
| .574305E-02 | UPPER BOUND OF VARIABLE | 6 = | |
| .201497E+00 | UPPER BOUND OF VARIABLE | 4 = | |
| .250576E+00 | UPPER BOUND OF VARIABLE | 5 = | |