

Das variáveis acima,  $\rho_{\min}$  corresponde ao menor valor fornecido,  $\rho_r$  é o raio do rolete,  $R$  corresponde à distância entre o centro de rotação da came e o centro do rolete do seguidor,  $\theta$  é o ângulo de rotação da came,  $v(\theta)$  é a função velocidade e  $a(\theta)$ , a função aceleração.

### **3. CONCLUSÃO**

Como pôde-se observar, a entrada e a saída de dados do programa apresentam-se de forma bastante simples e objetiva. Deste modo, a partir do programa desenvolvido, torna-se mais fácil para o estudante de engenharia mecânica o entendimento a cerca do projeto de cames, assim como a compreensão de conceitos básicos e características relacionadas ao assunto. Por exemplo, na disciplina de Mecanismos ministrada no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, o aluno a conclui ciente da existência das curvas cicloidal, harmônica e polinomial de oitava ordem e que uma combinação apropriada destas funções pode resultar um movimento característico para o seguidor. No entanto, no decorrer da mesma, o aluno não dispõe de uma ferramenta que o auxilie na visualização da came a qual irá garantir ao seguidor tal movimento característico. O programa surge, então, como ferramenta de apoio visando a auxiliar as disciplinas da área de Projeto e principalmente a disciplina de Mecanismos.

### **6. AGRADECIMENTOS**

Ao PET – Programa Especial de Treinamento.

### **5. REFERÊNCIAS**

- Erdman, A. T., 1993, Modern Kinematics: Developments in the Last Forty Years, John Wiley & Sons, New York
- Grosjean, J., 1991, Kinematics and Dynamics of Mechanisms, McGraw-Hill, Singapore
- Kimbrell, J. T., 1991, Kinematics Analysis and Synthesis, McGraw-Hill, New York
- Mabie, H. H. & Reinholtz, C. F., 1987, Mechanisms and Dynamics of Machinery, John Wiley & Sons, New York
- Martin, G. H., 1982, Kinematics and Dynamics of Machines, McGraw-Hill, London
- Norton, R. L., 1992, Design of Machinery, McGraw-Hill, Singapore
- Sandor, G. N. & Erdman, A. G., 1984, Mechanism Design: Analysis and Synthesis, Prentice-Hall, New York

Nas expressões acima,  $R_b$  corresponde ao raio de base da came,  $\theta$  é o ângulo da came e  $S(\theta)$  é a função que define um dado trecho de curva do movimento do seguidor.

### 2.3 Tabela de valores

Ao final, são fornecidos valores da elevação, velocidade e aceleração do seguidor e do raio de curvatura e do ângulo de pressão da came para ângulos de giro da mesma de acordo com o passo a ser indicado (Ver Fig. 5).

Ângulo de Giro (graus)	Deslocamento (mm)	Velocidade (mm/s)	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )	Raio de Curvatura (mm)	Ângulo de Pressão (graus)
229,999981356306	19,7313213348389	-3,07690906524658	-17,5733165740967	41,4274635314941	-3,21769189834595
239,999979357052	18,9205278320313	-6,10671186447144	-17,0254440307617	40,9804611206055	-6,46049022674561
249,999977358397	17,609525680542	-8,96472549438477	-15,533659349976	40,5793266296387	-9,67038440704346
259,999975359943	15,8206233978271	-11,4539804498618	-12,7606983184814	40,4688568115234	-12,701135635376
269,999973362489	13,6465887615967	-13,3379607064819	-8,60398715057373	40,8631172180176	-15,3326034545898
279,999971364034	11,213493347168	-14,3869276046753	-3,24876022338867	41,9987831115723	-17,2921199798584
289,99996936558	8,68330860137939	-14,4300012588501	2,81874561309814	44,226806640625	-18,28005027771
299,999967367126	6,23892402648926	-13,4046325683594	8,85204792022705	48,1050415039063	-18,0066528320313
309,999965368671	4,06175756454468	-11,3868101272583	13,925106048584	54,260181427002	-16,263986875244
319,999963370217	2,30384230613708	-8,65676307678223	17,0613479614298	62,0955763244629	-13,0648622512817
329,999961371762	1,05852150917053	-5,6032133102417	17,4082355499268	66,0854949951172	-8,83267993383789
339,999959373308	0,335038632154465	-2,77315092086792	14,4577674865723	59,1256332397461	-4,48746728897095
349,999957374854	0,0437390357255936	-0,744122445583344	8,31292343139648	45,9186592102051	-1,21644186973572

**Figura 5.** Tela da tabela de valores

A partir dos valores do ângulo de pressão, pode-se verificar se o mesmo excede  $30^{\circ}$  ou  $35^{\circ}$ . Tais valores são estabelecidos como máximos para a maioria dos sistemas.

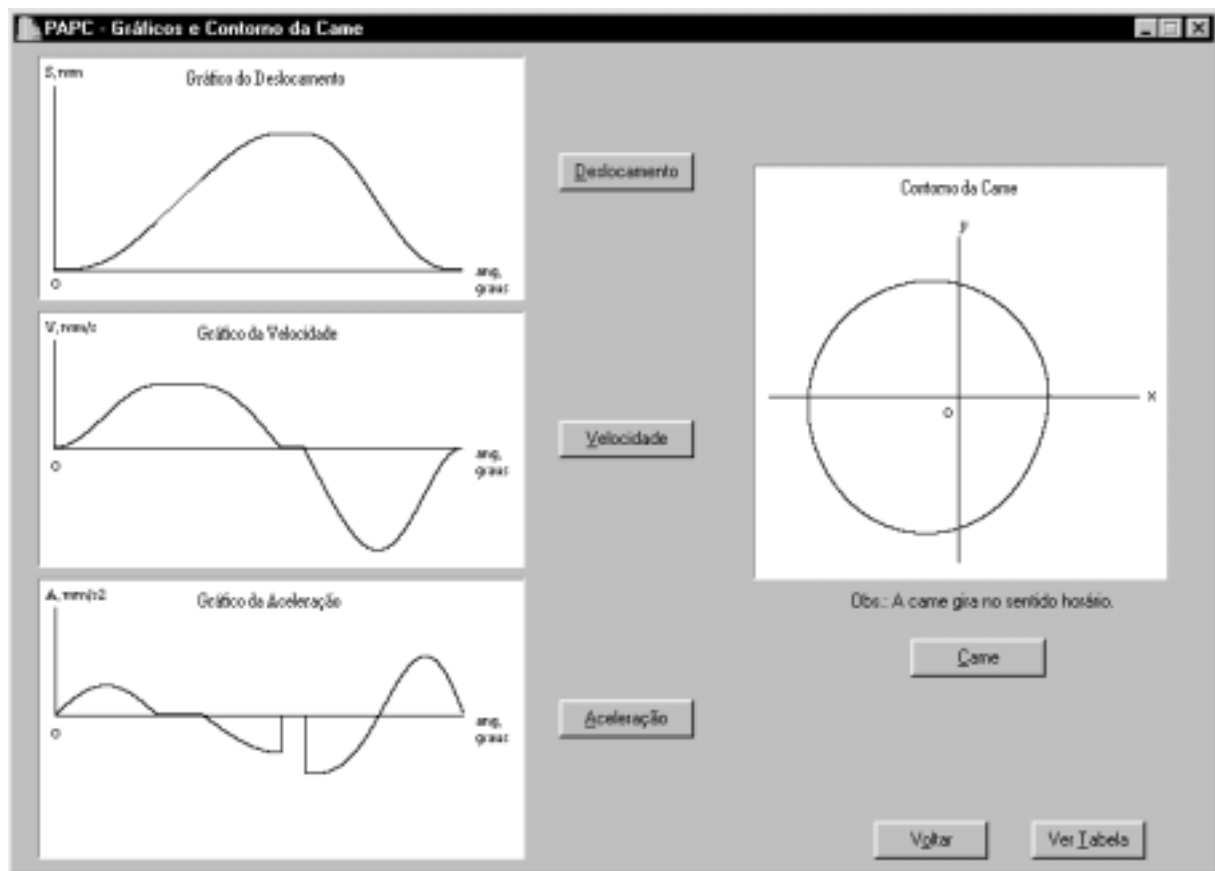
Sendo  $\theta$  o ângulo da came,  $S(\theta)$  a função que define um dado trecho de curva do movimento do seguidor,  $R$  a distância entre o centro de rotação da came e o centro do rolete do seguidor, para a determinação do ângulo de pressão  $\alpha$  utilizou-se a seguinte expressão (Kimbrell, 1991) :

$$\alpha = \arctan[dS/(Rd\theta)] \quad (3)$$

A partir dos valores do raio de curvatura da came (no caso do seguidor de rolete, tais valores se referem ao raio de curvatura da superfície primitiva), é possível verificar se a came já irá apresentar ponta ou rebaixo ( $\rho_{\min} < \rho_r$ ). Para o cálculo do raio de curvatura  $\rho$  utilizou-se a seguinte equação:

$$\rho = \{R^2 + [v(\theta)]^2\}^{3/2} / \{R^2 + 2[v(\theta)]^2 - R[a(\theta)]\} \quad (4)$$

Uma vez dispendo-se dos valores solicitados e dos tipos de curva a combinar, são traçados os gráficos do deslocamento, velocidade e aceleração do seguidor em função do ângulo de giro da came e o contorno da came (ver Fig. 4).



**Figura 4.** Valores da elevação do seguidor em função do ângulo da came

No caso do gráfico de deslocamento, o programa encarrega-se de combinar as curvas de forma a garantir uma perfeita concordância entre as mesmas.

O *jerk* ou segunda aceleração corresponde a taxa de variação da aceleração e é determinado pela terceira derivada do deslocamento. O *jerk*, então, é uma indicação da característica de impacto do carregamento e pode-se dizer que o impacto tem a segunda aceleração igual ao infinito. Assim, a partir do gráfico da aceleração é possível verificar se o movimento desejado para o seguidor irá resultar *jerk* infinito. Para tal, basta constatar a presença de segmentos de reta verticais no referido gráfico, os quais indicam que a aceleração está variando de um certo valor para outro instantaneamente, caracterizando o impacto. A partir do gráfico da aceleração da Fig. 4, então, conclui-se que o movimento escolhido para o seguidor irá resultar *jerk* infinito, mostrando-se, assim, indesejável.

Com relação ao contorno da came (ver Fig. 4), a interseção dos eixos indica o centro de rotação da mesma. Para a construção do contorno, utilizou-se, como base, as seguintes equações:

$$x = [R_b + S(\theta)] \cdot \cos\theta \quad (1)$$

$$y = [R_b + S(\theta)] \cdot \sen\theta \quad (2)$$

Ao iniciar o programa, o usuário primeiramente escolhe o tipo de movimento que irá caracterizar a elevação do seguidor. Como pode ser visto na Fig. 3, item 1, o usuário tem as opções de 1 a 9. Posteriormente, deve ser informado o ângulo de giro da came para cada trecho do movimento de elevação, conforme é mostrado na Fig. 3, item 2. Em seguida, pede-se ao usuário que informe o ângulo durante o qual o seguidor irá repousar após sua elevação (ver Fig. 3, item 3). Caso não seja desejado o repouso, basta que se digite o valor 0 (zero) para tal ângulo. Feito isto, o usuário escolhe o tipo de movimento que irá caracterizar o retorno do seguidor (ver Fig. 3, item 4). Sendo o movimento do seguidor caracterizado por apenas uma ou duas curvas, para as demais curvas deve-se entrar com o valor 0 (zero) para o ângulo de rotação da came. Isto vale tanto para o movimento de descida quanto para o de subida (ver Fig. 3, item 5). É importante salientar que a soma dos ângulos de entrada deve ser igual a 360 graus, pois todo o estudo é feito para um único ciclo do movimento do seguidor.

**PAPC - Entrada de Dados**

1. Para a elevação do seguidor, escolha a curva ou as curvas a combinar:

- [1] cicloide
- [2] harmônico
- [3] polinômio de oitavo grau
- [4] meio-cicloide + meio-harmônico
- [5] meio-harmônico + meio-cicloide
- [6] meio-cicloide + velocidade constante + meio-cicloide
- [7] meio-cicloide + velocidade constante + meio-harmônico
- [8] meio-harmônico + velocidade constante + meio-harmônico
- [9] meio-harmônico + velocidade constante + meio-cicloide

Opção desejada:

2. Informe o ângulo de rotação (em graus) da came para a:

primeira curva:

segunda curva:

terceira curva:

3. Com relação ao repouso do seguidor depois de sua elevação, entre com a variação do ângulo da came (em graus) durante o mesmo:

Variação do ângulo:

4. Para o retorno do seguidor, escolha a curva ou as curvas a combinar:

- [1] cicloide
- [2] harmônico
- [3] polinômio de oitavo grau
- [4] meio-cicloide + meio-harmônico
- [5] meio-harmônico + meio-cicloide
- [6] meio-cicloide + velocidade constante + meio-cicloide
- [7] meio-cicloide + velocidade constante + meio-harmônico
- [8] meio-harmônico + velocidade constante + meio-harmônico
- [9] meio-harmônico + velocidade constante + meio-cicloide

Opção desejada:

5. Informe o ângulo de rotação (em graus) da came para a:

primeira curva:

segunda curva:

terceira curva:

6. Valor da elevação total do seguidor (em mm):

7. Valor do raio da circunferência de base da came (em mm):

8. Valor do raio do rolete do seguidor (em mm):

9. Valor do deslocamento do seguidor (em mm):

**Figura 3.** Tela de entrada de dados

Escolhidas as curvas características do movimento do seguidor, pede-se para que o usuário informe a elevação total do seguidor, o raio de base da came, o raio do rolete do seguidor e a medida do deslocamento do seguidor com relação à linha vertical que passa pelo centro de rotação da came (caso o seguidor seja deslocado), como pode ser visto na Fig. 3, itens 6, 7, 8 e 9, respectivamente. Sendo o seguidor radial, à tal medida deve ser atribuído o valor 0 (zero).

## 2.2 Gráficos e contorno da came

O projeto de uma came pode ser elaborado de duas formas (Norton, 1992) (Sandor & Erdman, 1984):

- (a) partindo-se do movimento desejado para o seguidor, projeta-se a came para dar este movimento;
- (b) partindo-se da forma da came, determina-se que características de deslocamento, velocidade e aceleração serão obtidas pelo seu contorno.

Com base no primeiro método de projeto, foi desenvolvido um programa em linguagem C++ que permite a visualização do contorno da came de disco que irá garantir o movimento desejado para o seguidor. Para o movimento do seguidor, tanto na subida quanto na descida, o programa permite combinar trechos de curvas cicloidal, harmônica e polinomial de oitava ordem (Grosjean, 1991) (Kimbrell, 1991) (Mabie & Reinholtz, 1987) (Martin, 1982). Pode-se optar, também, por trechos de velocidade constante na elevação ou descida, assim como pelo repouso do seguidor ao final de sua elevação.

Além do contorno da came, é possível a visualização dos gráficos de deslocamento, velocidade e aceleração do seguidor. São impressos, também, valores destas grandezas, do raio de curvatura e do ângulo de pressão da came para ângulos de giro da mesma.

Nos anos recentes, poucos avanços foram verificados em programas voltados para o projeto de cames (Erdman, 1993). E embora outros programas existam, envolvendo a cinemática de cames, o programa desenvolvido apresenta vantagens, com relação aos mesmos, quanto à facilidade de entrada e saída de dados.

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA

Apresenta-se a seguir uma explanação das principais etapas do programa e a visualização das telas principais. Para tal, considera-se uma situação em que se deseja, para uma dada aplicação, que um seguidor radial de rolete apresente uma elevação total de 20 mm e seja acionado por uma came de disco de raio de base igual a 30 mm (ver Fig. 1). O movimento de elevação do seguidor deve ser caracterizado por trechos cicloidal, em 90 graus, de velocidade constante, em 40 graus, e harmônico, em 70 graus, nesta ordem. O seguidor deve repousar durante 20 graus e, então, retornar com movimento polinomial de oitava ordem em 140 graus. O raio do rolete do seguidor é de 5 mm.

### 2.1 Entrada de dados

Antes do usuário entrar com os dados pedidos, é apresentada ao mesmo uma tela inicial com o título do programa, conforme é mostrado na Fig. 2 .



**Figura 2.** Tela de apresentação do programa

# DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA PARA DAR APOIO AO PROJETO DE CAMES

**Eduardo Castelo Branco Porto**

**Roberto de Araújo Bezerra**

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: dem@ufc.br

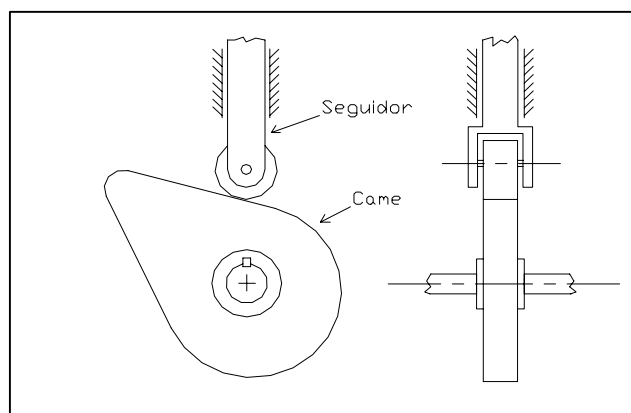
## Resumo

Neste trabalho é apresentado um programa em C++ Builder, a partir do qual, são geradas as curvas de deslocamento, velocidade e aceleração do seguidor de uma came, assim como o respectivo contorno da mesma. O programa foi desenvolvido de tal forma que possibilita ao usuário a escolha dos tipos de curvas – cicloidal, harmônica e polinomial de oitava ordem – que caracterizarão os diagramas de movimento e a forma da came. De posse dos dados fornecidos pelo usuário, o perfil de deslocamento é traçado de tal forma que há uma perfeita concordância entre as curvas que o compõem, fornecendo-se ainda os gráficos da velocidade e aceleração do seguidor, o contorno da came e valores do raio de curvatura e do ângulo de pressão para ângulos da came durante um ciclo. Observou-se que o programa é de fácil utilização e o mesmo será usado como apoio didático.

**Palavras-chave:** Came, Ângulo de Pressão, Contorno da Came

## 1. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Uma came consiste em um membro de máquina de forma irregular o qual atua como uma peça motriz e imprime movimento a uma peça movida chamada seguidor (ver Fig. 1). As cames desempenham um papel muito importante na maquinaria moderna e são bastante utilizadas em motores de combustão interna, máquinas operatrizes, computadores mecânicos, instrumentos e muitas outras aplicações.



**Figura 1.** Came de disco com seguidor radial de rolete