



Artigo

Análise do ângulo de transmissão de um mecanismo de quatro barras gerador de ondas de superfície

Carlos André Dias Bezerra^[1]

^[1] Universidade Federal do Ceará; cadbufc@gmail.com

Recebido: 28/02/2023;

Aceito: 07/06/2023;

Publicado: 21/06/2023.

Resumo: O mecanismo de quatro barras M4B é uma solução simples para a transmissão de potência devido a sua grande gama de saída de movimento a partir da entrada de um movimento de rotação pura conhecido. Para que um M4B possa ser usado para transmissão de movimento, ele primeiramente precisa ser sintetizado e depois, analisado. A síntese de M4B consiste na determinação dos comprimentos das quatro barras do mecanismo a partir do movimento desejado de saída. Já na análise, se determinam os parâmetros cinemáticos indicadores da qualidade do movimento do mecanismo sintetizado anteriormente. Dentre estes parâmetros está o ângulo de transmissão, que representa uma referência da qualidade de transmissão de movimento. Neste artigo é apresentado um estudo a respeito da qualidade de transmissão de força e movimento, através do ângulo de transmissão, para a geração de ondas de superfície em um tanque didático usando um M4B. A metodologia proposta foi implementada em um código escrito em Octave que permitiu gerar diversos M4B para diversas alturas de onda desejadas.

Palavras-chave: Análise de mecanismos; Tanque de ondas numérico; Mecanismo de quatro barras.

Abstract: The 4BL four-bar linkage is a simple solution for power transmission due to its large range of motion output from the input to a known pure rotational motion. In order for a 4BL to be used for motion transmission, it first needs to be synthesized and then analyzed. The synthesis of 4BL consists of determining the lengths of the four bars of the mechanism by using a specific input movement. In the analysis, the kinematic parameters indicating the quality of the movement of the previously synthesized mechanism are determined. Among these parameters is the transmission angle, which represents a reference of the quality of motion transmission. In this article is presented a study carried out regarding the quality of force and movement transmission, through the transmission angle, for the generation of surface waves in a teaching tank using 4BL. The proposed methodology was implemented in a code written in Octave that allowed generating several 4BL for different desired wave heights.

Key-words: Linkage analysis; Numerical wave flume; Four-bar linkage.

1. INTRODUÇÃO

O uso de mecanismos de quatro barras - M4B para a transmissão de movimento tem sido utilizado ao longo de séculos e o seu estudo ainda faz parte do interesse de diversos pesquisadores [1,2]. O M4B é uma solução simples para a transmissão de potência devido a sua grande gama de saída de movimento a partir da entrada de um movimento de rotação pura conhecido, por exemplo. Na indústria, diversos sistemas mecânicos utilizam M4B para a transformação de movimento rotativo, com velocidade angular constante, em movimento oscilatório ou de translação, ambos com velocidade e aceleração variadas. De acordo com a teoria de mecanismos[1,2], para que um M4B possa ser usado para transmissão de movimento, ele primeiramente precisa ser sintetizado e em seguida, analisado. A síntese de M4B consiste na determinação dos comprimentos de cada uma das quatro barras do mecanismo a partir de posições ou saídas de movimento desejadas. Já na análise, feita a partir do M4B sintetizado, se determina a posição, velocidade, aceleração e outros parâmetros cinemáticos indicadores da qualidade do movimento do mecanismo sintetizado anteriormente [2]. Dentre estes parâmetros está o ângulo de transmissão, que representa uma referência da qualidade de transmissão de movimento. Tal análise é justificada pela possibilidade de ocorrência de forças excessivas nas uniões entre as barras e até mesmo o travamento do M4B.

Por outro lado, o estudo de corpos submersos submetidos a ação das ondas de superfície do mar também tem sido cada vez mais estudado, proporcionalmente à demanda por fontes de energias alternativas aos

combustíveis fósseis. Devido as questões de custo e de segurança, quando comparados aos testes reais em mar aberto, o uso de tanques didáticos em escala reduzida em laboratórios para a reprodução das ondas de superfície aquosa tem-se mostrado ser uma solução viável economicamente e também segura [3]. Dentre as possíveis soluções para a geração de ondas em tanques didáticos, tem-se o uso de um M4B.

Neste artigo serão realizadas a análise do tipo de mecanismo e o estudo a respeito da qualidade de transmissão de força e movimento de um M4B sintetizado, utilizando os valores do ângulo de transmissão, para a geração de ondas de superfície em um tanque didático. Na Figura 1 tem-se uma representação de um M4B genérico com a nomenclatura a ser adotada nas análises neste artigo.

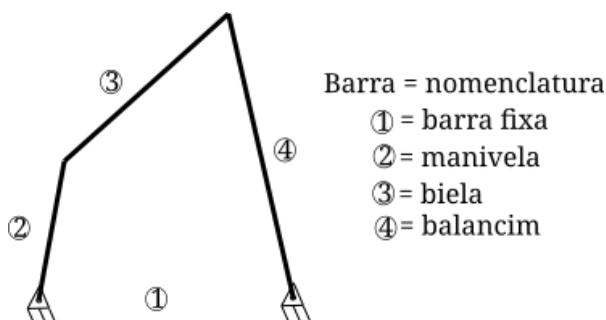


FIGURA 1. Representação de um mecanismo de quatro barras genérico e sua nomenclatura (autoria própria).

O objetivo da síntese de um M4B é obter as medidas de cada uma das quatro barras do mecanismo que efetivamente consigam gerar o movimento desejado, no caso, gerar ondas com a altura desejada no tanque de ondas. A metodologia apresentada aqui se inicia a partir das medidas dos comprimentos das quatro barras do M4B sintetizado previamente e de outros parâmetros obtidos através das restrições hidrodinâmicas. Tanto a síntese prévia como a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos são abordados aqui superficialmente e não se constituem como objetivo deste trabalho.

O objetivo da análise é o estudo do M4B para verificar o atendimento as restrições cinemáticas tais como evitar colidir com limites externos, não travar e não ocupar muito espaço. Neste trabalho serão analisados os valores máximos e mínimos para vários M4B, previamente sintetizados, cujos os respectivos balancins (barra 4) sejam capazes de oscilar, gerando as ondas preestabelecidas. Na Figura 2 tem-se uma representação do posicionamento do M4B no tanque didático, onde é possível observar que a barra 4 – balancim é a placa geradora responsável pela geração da onda a partir do movimento de rotação da barra 2 – manivela.

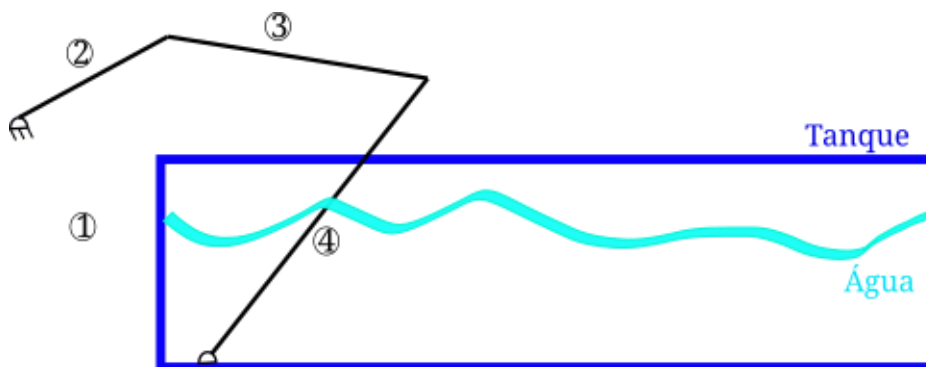


FIGURA 2. Representação do posicionamento do M4B (autoria própria).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, o material utilizado foi um computador de mesa com processador Intel Core i3-3250 de 3,5 GHz, 8 GB memória RAM em Windows 7 64 bit. Dentro da filosofia do uso de software livre, optou-se pelo uso do software Octave versão 6.2.0 [4] para a implementação das equações matemáticas, cálculo e simulações computacionais.

Os métodos utilizados neste trabalho foram dois. O primeiro consistiu no uso dos valores dos comprimentos Do arco S obtidos da aplicação da teoria de onda linear, onde a partir da altura de onda desejada H foi possível determinar o arco S a ser varrido pela barra 4 (balancim), conforme ilustrado na Figura 3, e de posse do valor do comprimento deste arco e da altura da lâmina de água foi determinado o respectivo ângulo de varredura θ , que é o ângulo entre as posições limites do curso do balancim. Na Figura 3 tem-se a representação das duas posições limites do balancim B' e B'' utilizadas na síntese do M4B. Neste trabalho não

será abordada a síntese gráfica, nem a teoria de onda linear e nem a obtenção das medidas das barras do M4B, podendo o leitor obter mais informações em [1,2,3,5,6,7,8,9].

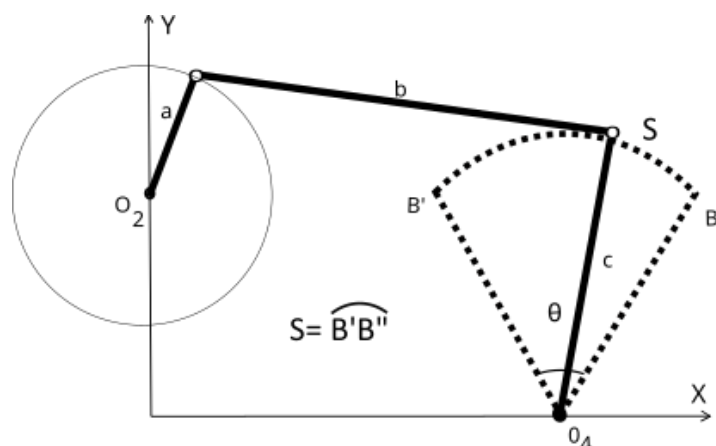


FIGURA 3. Ilustração do uso do M4B a ser sintetizado e analisado (autoria própria).

O segundo método consistiu na análise do ângulo de transmissão, na determinação do tipo do M4B e na simulação do M4B. A determinação do ângulo de varredura θ entre as duas posições limites do balancim foi estimada considerando a restrição imposta pelas alturas das paredes do tanque, de tal modo a evitar a colisão entre a barra 3 (biela) e o topo da lateral do tanque. Deve ser observado que a barra 1 (barra fixa) consiste de uma estrutura formada pela junção geométrica de parte do fundo do tanque e a base do M4B (não mostradas aqui), ou seja, não existe fisicamente a barra 1 e não se encontra na horizontal. Em todos os cálculos e simulações a barra 1 é representada pela reta O_2O_4 .

2.1. O ângulo de transmissão μ

Após a realização da síntese do M4B, diversos comprimentos para cada uma das barras foram obtidos, sendo necessária uma análise qualitativa do M4B sintetizado, para uma determinada combinação destes comprimentos quatro a quatro [2]. Mas, na análise é necessário verificar as condições limitantes que possam impedir que o M4B sintetizado alcance as posições pré estabelecidas [1,2]. Em outras palavras, a síntese fornece como solução diversos comprimentos para o M4B, que ao se movimentar, passa pelas posições pré-definidas no projeto B' e B'' , mas não assegura que o M4B passará pelas posições intermediárias entre estas posições pré-definidas. Uma destas condições limitantes é o valor do ângulo de transmissão de movimento. O ângulo de transmissão é ângulo formado entre as barras 3 e 4, ou seja, entre a biela e o balancim. Representado por μ e com vértice no ponto B, ele é uma medida da qualidade de transmissão do movimento porque indica a direção da força que a biela transmite ao balancim ($F_{34}\cos\mu$). Na Figura 4 tem-se uma representação do ângulo de transmissão e da força aplicada na articulação entre as barras 3 e 4. Note que se o ângulo de transmissão for 0° ou 180° , o M4B poderá travar e ficará a depender da aplicação de uma força externa para o seu destravamento. A recomendação é que $40^\circ < \mu < 140^\circ$ [10] e neste trabalho, a condição de validação do ângulo de transmissão será manter esses valores.

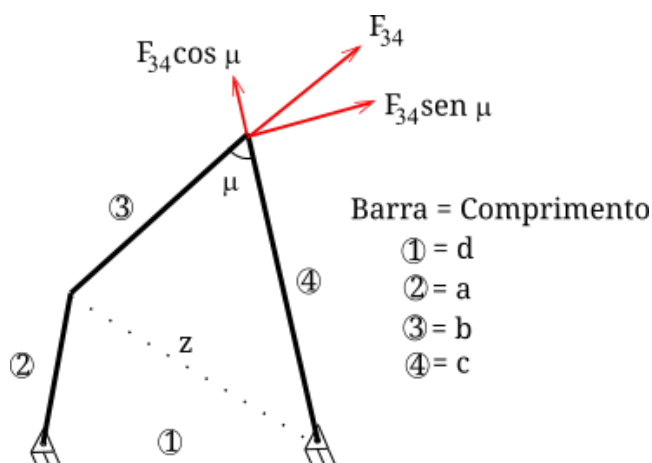


FIGURA 4. Representação do ângulo de transmissão μ e da força na articulação (autoria própria).

O valor do ângulo de transmissão pode ser determinado geometricamente a partir da semelhança entre os triângulos da Figura 4, onde o lado de comprimento z é comum aos triângulos formados pelas barras 1 e 2 e pelas barras 3 e 4. Utilizando a lei dos cossenos, obtêm-se a Equação 1, a qual representa o valor do ângulo de transmissão em função do ângulo de entrada θ_2 e dos comprimentos não nulos (a , b , c e d) das barras (1, 2, 3 e 4) do M4B. Neste trabalho o ângulo θ_2 é conhecido e gerado a partir da rotação do eixo do motor do mecanismo gerador de ondas.

$$\mu = \arccos \left[\frac{b^2 + c^2 - (d^2 + a^2) + 2ad \cos \theta_2}{2bc} \right] \quad (1)$$

2.2. A condição de Grashof.

A condição de rotação das barras móveis foi analisada por Grashof em 1883 [11], que propôs que se o M4B atende a sua condição, pelos menos uma das barras será capaz de fazer uma revolução completa. Neste trabalho, por questões operacionais, a barra 2 deve ser a única capaz de realizar uma revolução completa. A aplicação da condição de Grashof é útil para a determinação do tipo do M4B. Considere que m_e seja a menor barra do M4B, m_a a maior, p e q as outras duas barras que restaram. Por meio da comparação entre a soma dos comprimentos das barras pode-se determinar como o M4B irá se mover. Na Tabela 1 tem-se a classificação do tipo de M4B em função dos comprimentos de cada barra do mecanismo.

TABELA 1. Determinação do tipo do M4B em função da condição de Grashof (fonte própria).

	Menor barra	Tipo do M4B	Classe do M4B
$m_e + m_a < p + q$	1	Dupla manivela	I
$m_e + m_a < p + q$	2	Manivela balancim	I
$m_e + m_a < p + q$	3	Duplo balancim	I
$m_e + m_a < p + q$	4	Manivela balancim	I
$m_e + m_a = p + q$	1	Dupla manivela	III
$m_e + m_a = p + q$	2	Manivela balancim	III
$m_e + m_a = p + q$	3	Duplo balancim	III
$m_e + m_a > p + q$	-	Triplô balancim	II

Os M4B da Classe III são caracterizados por alinhamento das barras móveis e podem apresentar travamento. Por este motivo os mesmos não são desejados para acionar o gerador de ondas.

2.3. A relação entre os comprimentos das barras e os parâmetros das ondas.

No estudo de ondas em tanques de escala reduzida é possível relacionar o arco S , descrito por B' e B'' que representa a trajetória do ponto de articulação entre as barras 3 e 4 (ponto B = vértice do ângulo de transmissão) e o arco M , descrito por B'_m e B''_m , que representa a trajetória de um ponto no balancim em contato com a superfície da água. Na Figura 5 tem-se a representação do balancim, dos arcos S e M e da altura de onda desejada H . A determinação do arco M é realizada utilizando-se a teoria da onda linear através do uso da equação da função de transferência F_t entre o deslocamento do balancim M e a altura de onda H desejada, considerando que o balancim está posicionado no fundo do tanque [6,7,8].

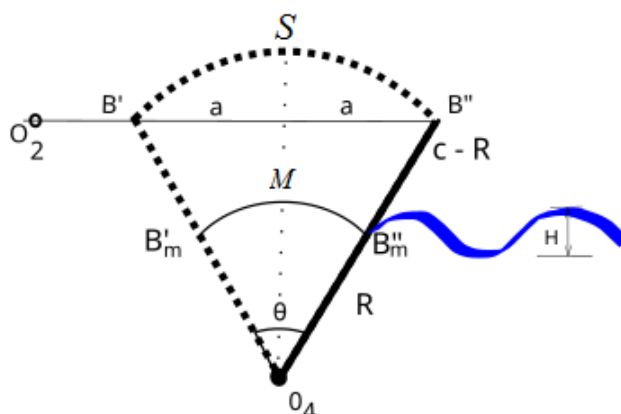


FIGURA 5. Representação dos parâmetros do balancim gerador de ondas (autoria própria).

Galvin [12] propôs uma abordagem simples para a determinação da altura de onda em função do deslocamento da placa do gerador de ondas de um tanque de ondas. Ele propôs que o volume de água deslocado pelo gerador de ondas é igual ao volume da crista da onda formada. Uma abordagem mais completa leva em consideração os efeitos das condições de contorno, a qual o seu desenvolvimento não é apresentado aqui porque não é o objetivo deste trabalho apresentar a determinação da função de transferência. Porém, para uma placa oscilante, a relação matemática entre o curso da placa geradora de ondas M e a altura de onda desejada H pode ser obtida por meio da equação da função de transferência de Biésel [13]:

$$\frac{H}{M} = \frac{4\sinh(kh)}{\sinh(2kh)+2kh} \left[\sinh(kh) + \frac{1-\cosh(kh)}{kh} \right] \quad (2)$$

onde H é a altura da onda desejada, k é o número de onda, h é a profundidade da coluna de água e M é o arco descrito pelo balancim no nível da água. A Equação 2 foi implementada em código Octave [4] e os resultados obtidos foram o vetor M e os respectivos comprimentos das barras do M4B (a, b, c e d) e os valores de θ_2 .

3. RESULTADOS

Devido as dimensões do tanque e para evitar que o balancim – responsável pela geração das ondas – atingisse a lateral do tanque, todos os cálculos realizados se referem a uma altura de onda de até $H = 6$ cm, com a profundidade da água de $h = 30$ cm e comprimento do balancim de $c = 50$ cm e a distância entre a O_4 e B''_m de $R = 30$ cm. Também deve ser ressaltado que se buscou a construção de um M4B do tipo manivela balancim, devido à facilidade de controle de rotação de um motor de corrente contínua, controlado via computador, para obter o torque necessário para deslocar o balancim dentro da água.

Ao executar o código em Octave [4], é lido o vetor com valores lineares de comprimentos de ondas que podem ser gerados no tanque. Estes comprimentos de ondas são utilizados como entrada para a equação da Função de Transferência Ft (Equação 2) para a obtenção dos valores de M – deslocamento do balancim na superfície da água, conforme Figura 5. A partir destes valores de M , são determinados os respectivos valores de S – deslocamento do balancim na união com a biela. Nas Figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11 tem-se os resultados obtidos para os parâmetros da Figura 5.

Na Figura 6 tem-se os valores do ângulo de transmissão para 18 comprimentos da manivela (a). A palavra Grashof grafa em cima de cada gráfico indica se o M4B sintetizado atendeu ou não a condição de Grashof.

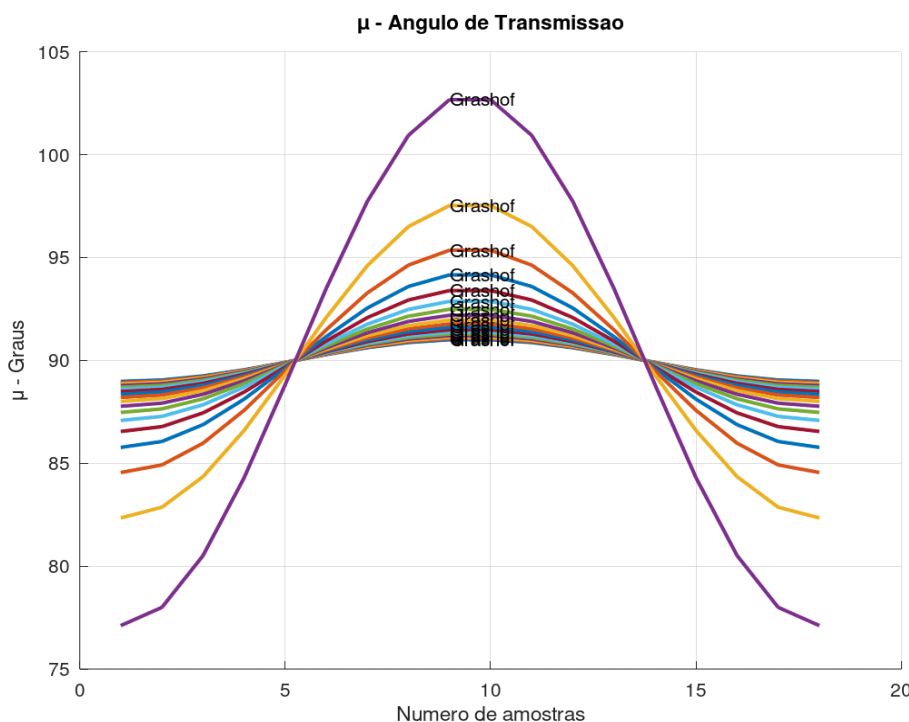


FIGURA 6. Angulo de transmissão em graus em função do número de amostras (autoria própria).

Na Figura 7 tem-se todos os valores do ângulo de transmissão para cada um dos 18 comprimentos da manivela (a) somados um após o outro. Pode-se observar o crescimento deste ângulo a medida que o comprimento da manivela aumenta.

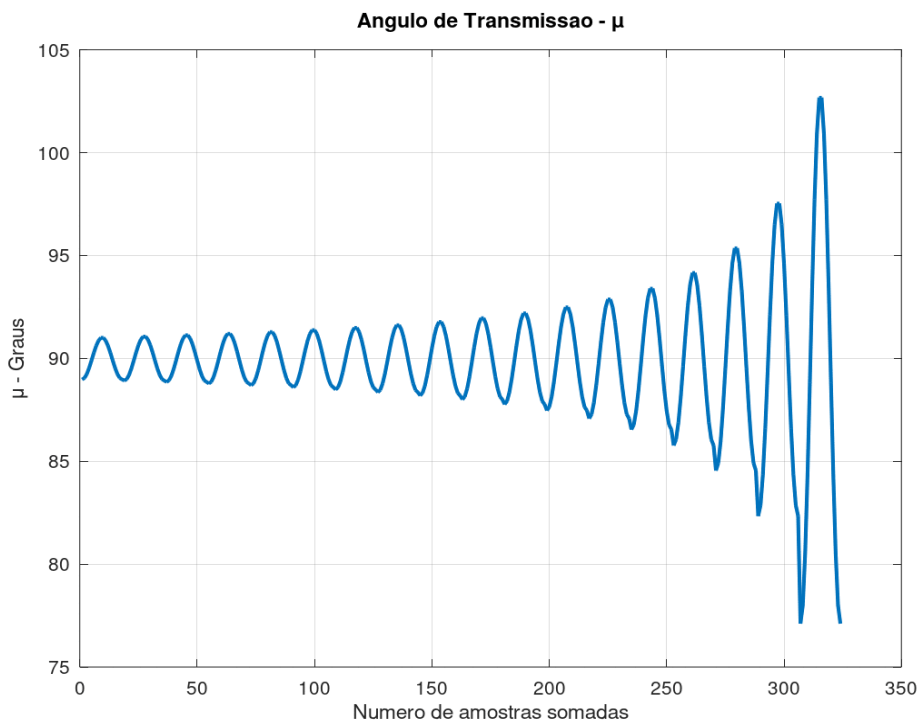


FIGURA 7. Angulo de transmissão em graus em função do número de amostras somadas (autoria própria).

Na Figura 8 tem-se os valores do ângulo de transmissão em função do ângulo de rotação da manivela durante uma volta completa.

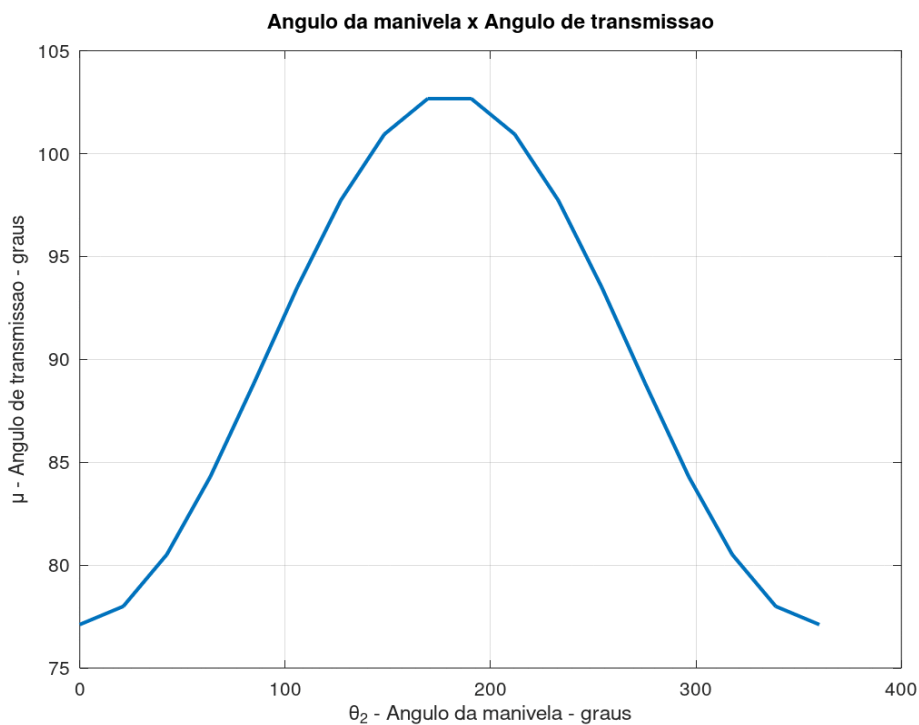


FIGURA 8. Angulo de transmissão em graus em função do ângulo da manivela (autoria própria).

Na Figura 9 tem-se os valores mínimos do ângulo de transmissão para cada comprimento da manivela, indicando que não há possibilidade de travamento do M4B devido aos valores mínimos.

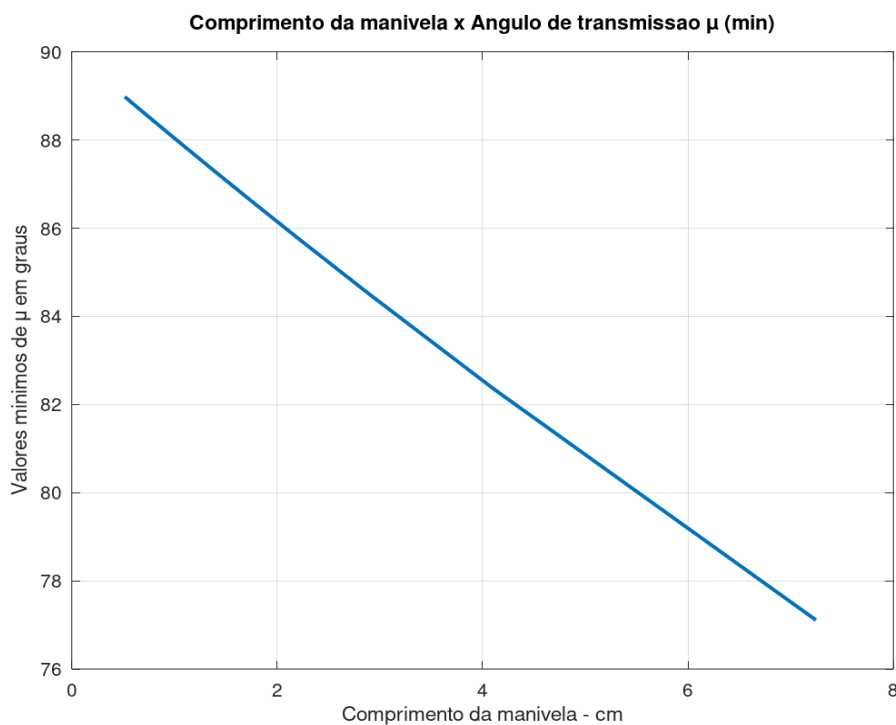


FIGURA 9. Menor valor do ângulo de transmissão em função do comprimento da manivela (autoria própria).

Na Figura 10 tem-se os valores máximos do ângulo de transmissão para cada comprimento da manivela, indicando que não há possibilidade de travamento do M4B devido aos valores máximos.

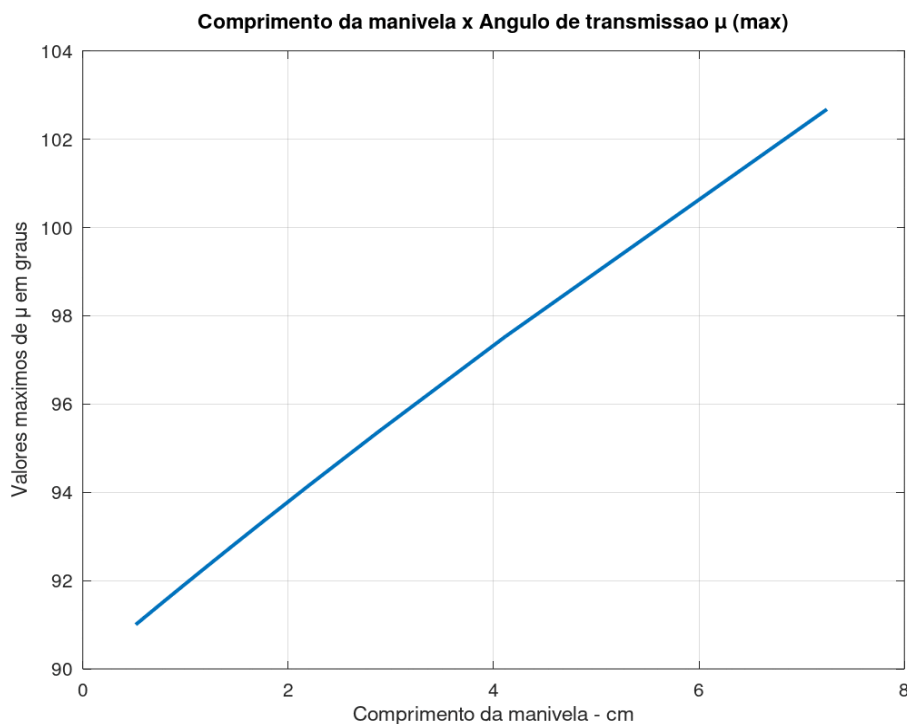
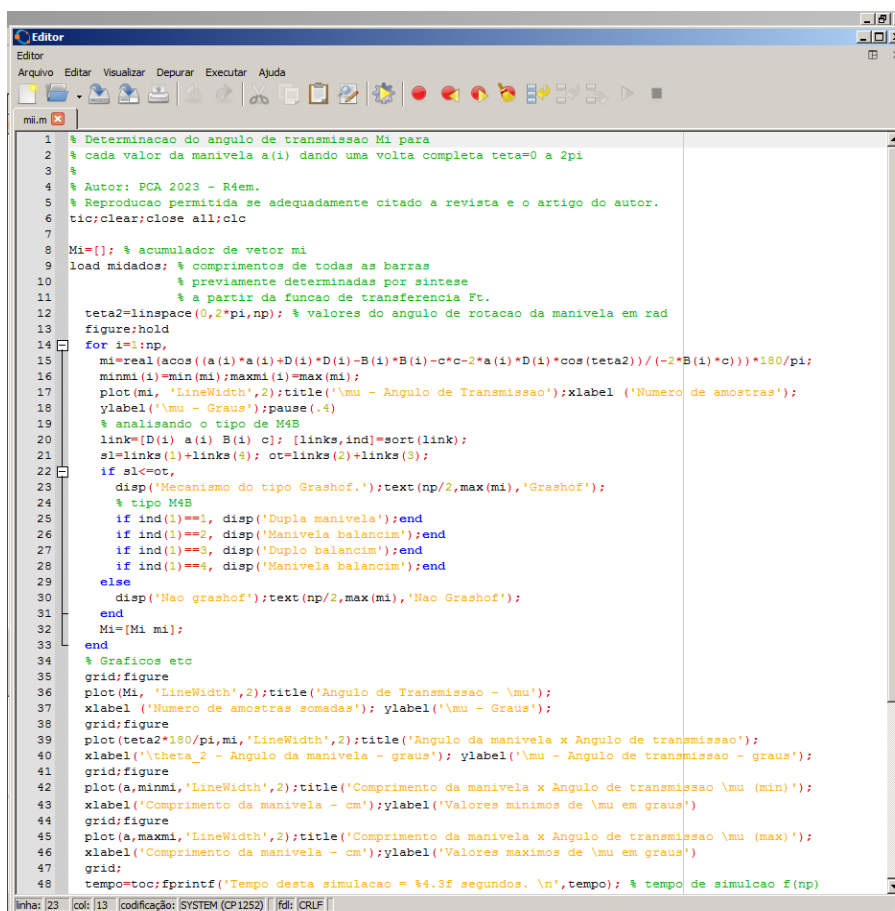


FIGURA 10. Maior valor do ângulo de transmissão em função do comprimento da manivela (autoria própria).

- [3] Saincher, S.; Banerjee, J. Design of a Numerical Wave Tank and Wave Flume for Low Steepness Waves in Deep and Intermediate Water. *Procedia Engineering*. 2015. 116. 221-228.
- [4] Eaton, J. W.; Bateman, D.; Hauberg, R. W. 2020. *GNU Octave version 6.1.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations*. URL <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v6.1.0/> (acesso em 13/02/2023).
- [5] Dean, R.G. Dalrymple, R.A. *Water wave mechanics for engineers and scientists, Advanced Series on Ocean Engineering*. Volume 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991, pp. 41-178.
- [6] Cho Y-H, Nakamura T, Mizutani N, Lee K-H. An Experimental Study of a Bottom-Hinged Wave Energy Converter with a Reflection Wall in Regular Waves—Focusing on Behavioral Characteristics. *Applied Sciences*. 2020; 10(19):6734. <https://doi.org/10.3390/app10196734>.
- [7] Yeulwoo Kim, Sangyoung Son, Taehwa Jung, Timu Gallien, An analytical and numerical study of a vertically discretized multi-paddle wavemaker for generating free surface and internal waves, *Coastal Engineering*, 2021. Volume 165.
- [8] Liu, Yi & Zheng, Yuxi & Song, Ruiyin & Chen, Junhua & Jin, Heng. Wave generation characteristic analysis of piston and flap type wave maker with rotary-valve-control vibrator. *Journal of Vibration and Control*. 2020. 26.
- [9] Drzewiecki, M.; Guziński, J. Fuzzy Control of Waves Generation in a Towing Tank. *Energies* 2020, 13, 2049. <https://doi.org/10.3390/en13082049>.
- [10] Von H. Alt, *Der ubertragungswinkel und seine bedeutung fur dar konstruieren periodischer getriebe, Werksstattstechnik* 26 (Heft4) (1932) 61±64.
- [11] Grashof, F. *Theoretische maschinenlehre*. Vol.3. Voss. Hamburg. Deutschland. 1883.
- [12] Galvin, C.J., *Wave-Height Prediction for Wave Generators in Shallow Water*. Technical Memorandum, Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA. 1964.
- [13] F. Biéssel and F. Suquet, “Les appareils générateurs de houle en laboratoire”, *La Houille Blanche*, no. 2, pp. 161-163, 1951.

APÊNDICE A1



```

1 % Determinacao do angulo de transmissao Mi para
2 % cada valor da manivela a (i) dando uma volta completa teta=0 a 2pi
3 %
4 % Autor: PCA 2023 - R4em.
5 % Reproducao permitida se adequadamente citado a revista e o artigo do autor.
6 tic;clear;close all;clc
7
8 Mi=[]; % acumulador de vetor mi
9 load midados; % comprimentos de todas as barras
10 % previamente determinadas por sintese
11 % a partir da funcao de transferencia Ft.
12 teta2=linspace(0,2*pi,np); % valores do angulo de rotacao da manivela em rad
13 figure;hold
14 for i=1:np,
15     mi=real(acos((a(i)*a(i)+D(i)*D(i)-B(i)*B(i)-c*c-2*a(i)*D(i)*cos(teta2))/(-2*B(i)*c))*180/pi);
16     minmi(i)=min(mi);maxmi(i)=max(mi);
17     plot(mi, 'LineWidth',2);title('\mu - Angulo de Transmissao');xlabel('Numero de amostras');
18     ylabel('\mu - Graus');pause(.4)
19     % analisando o tipo de M4B
20     link=[D(i) a(i) B(i) c]; [links,ind]=sort(link);
21     sl=links(1)+links(4); ot=links(2)+links(3);
22     if sl<=ot,
23         disp('Mecanismo do tipo Grashof. ');text(np/2,max(mi),'Grashof');
24         % tipo M4B
25         if ind(1)==1, disp('Dupla manivela');end
26         if ind(1)==2, disp('Manivela balancim');end
27         if ind(1)==3, disp('Duplo balancim');end
28         if ind(1)==4, disp('Manivela balancim');end
29     else
30         disp('Nao grashof. ');text(np/2,max(mi),'Nao Grashof');
31     end
32     Mi=[Mi mi];
33 end
34 % Graficos etc
35 grid;figure
36 plot(Mi, 'LineWidth',2);title('Angulo de Transmissao - \mu');
37 xlabel('Numero de amostras'); ylabel('\mu - Graus');
38 grid;figure
39 plot(teta2*180/pi,mi,'LineWidth',2);title('Angulo da manivela x Angulo de transmissao');
40 xlabel('\theta_2 - Angulo da manivela - graus'); ylabel('\mu - Angulo de transmissao - graus');
41 grid;figure
42 plot(a,minmi,'LineWidth',2);title('Comprimento da manivela x Angulo de transmissao \mu (min)');
43 xlabel('Comprimento da manivela - cm');ylabel('Valores minimos de \mu em graus');
44 grid;figure
45 plot(a,maxmi,'LineWidth',2);title('Comprimento da manivela x Angulo de transmissao \mu (max)');
46 xlabel('Comprimento da manivela - cm');ylabel('Valores maximos de \mu em graus');
47 grid;
48 tempo=toc;fprintf('Tempo desta simulacao = %4.3f segundos. \n',tempo); % tempo de simulacao f(np)

```

FIGURA A1. Cópia da Janela do Editor do Octave com o código fonte (autoria própria).