

ESTUDO E PROJETO DE CADEIRA MOTORIZADA PARA DEFICIENTES FÍSICOS COM LOCOMOÇÃO POR PERNAS

José Maria Bezerra, zemaria@ufpe.br¹
Walter de Britto Vidal Filho, wbritto1@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Rua Acadêmico Hélio Ramos S/N, Cidade Universitária, Recife-PE.

Resumo. *O presente trabalho descreve o estudo e desenvolvimento do projeto conceitual de uma cadeira com locomoção por pernas utilizando cadeias cinemáticas com um grau de liberdade que permite movimentos em duas dimensões em um plano cinemático vertical. A cadeira de rodas para deficientes físicos apresenta algumas limitações devido à maioria das vias e edificações existentes não estarem adaptadas. Apesar da roda ser o meio de locomoção mais simples e eficiente, não permite transpor as guias das calçadas, as escadas e os batentes. O presente estudo mostra a viabilidade do emprego de mecanismos de barras como meio de locomoção de cadeirantes.*

Palavras-chave: *tecnologia assistiva, mecanismos, cadeias cinemáticas, mecanismo de Klann*

1. INTRODUÇÃO

A cadeira de rodas para deficientes físicos apresenta algumas limitações devido à maioria das vias e edificações existentes não estarem adaptadas, apesar da existência de normas técnicas como a NBR 9050. Desta forma, um simples desnível se torna uma barreira quase intransponível para o cadeirante. Apesar de a roda ser o meio de locomoção mais simples e eficiente, não permite transpor as guias das calçadas, as escadas e os desníveis acentuados.

Várias soluções foram desenvolvidas ao longo do tempo, para cada um destes obstáculos, empregando desde locomoção por esteiras até por pernas. Em Lawn and Ishimatsu (2003) uma cadeira de rodas com um mecanismo de barras foi desenvolvido para permitir a mobilidade de deficientes físicos em escadas e desníveis acentuados. No Japão em 2003 foi apresentado a cadeira robótica WL-16 com duas pernas Fig. (1), cada uma com um mecanismo de cadeia cinemática paralela, composta de 6 atuadores lineares cada uma, permitindo 6 graus de liberdade para cada perna (Sugahara *et al.* (2007)). Na Coreia foi desenvolvido a cadeira robótica Hubo fx-1 Fig. (2) com duas pernas, composta cada uma de cadeia cinemática aberta, onde cada perna possui 6 graus de liberdade, dois graus no tornozelo, um grau no joelho e três graus na junta da perna no quadril, movendo-se a uma velocidade de 1,25 km/h (Kim and Jun (2007)).



Figura 1. Robô WL-16 subindo degraus, (Gizmodo (2010))



Figura 2. Robô Hubo chairbot fx-1, (HuboLab (2010))

A ideia de uma cadeira de pernas para locomoção de cadeirantes não é nova, contudo as soluções encontradas, tornam os sistemas complexos e conseqüentemente de elevado custo. As soluções utilizando pernas de sistemas robotizados

apresentam o desafio do controle de um sistema dinâmico instável, portanto necessitam de recurso computacional pesado, servomotores e sensores inerciais (Sugahara *et al.* (2007)), (Kim and Jun (2007)). A perspectiva vista neste trabalho objetiva desenvolver uma solução com estabilidade estática, ou seja, o centro de gravidade está sempre dentro da área formada pelos pontos de contato das pernas com o solo.

O sistema aqui estudado se baseia nas cadeias cinemáticas, empregando mecanismos de barras em suas pernas, que podem simular facilmente o caminhar de animais quadrúpedes com total estabilidade produzindo trajetórias paralelas ao solo, suplantando assim a principal vantagem das rodas. Diferentemente dos sistemas robóticos utilizados na simulação do andar humano ou de animais, que demandam vários graus de liberdade na sua concepção, este sistema cinemático apresenta um único grau de liberdade implicando em apenas um atuador por conjunto cinemático. Isto simplifica o controle do movimento, diminuído bastante o número de atuadores e sensores, bem como, a complexidade da programação do controle.

2. OBTENÇÃO DE UM MECANISMO

Considerando que a adaptação de um mecanismo para as pernas da cadeira, se fará através de cadeias planas (Hartenberg and Denavit (1980); Norton (1992) e Dought (2001)), a ideia consiste em se obter curvas planas traçadas pelos pés, ou patas, deste mecanismo, que permitam um movimento suave da cadeira tanto no plano como em aclives ou declives tais como escadas e rampas, tendo como preocupação principal a segurança e conforto do cadeirante em todas as situações, como também uma preocupação com os custos finais do produto. Este último item sugere uma pesquisa nos mecanismos de Jansen Fig. (3) e Klann, Fig. (4), que têm como base uma cadeia cinemática com um grau de liberdade diferentemente da conceituação utilizada em robótica em cujo caminhar de um simples robô com duas únicas pernas demanda pelo menos seis graus de liberdade. Para que haja estabilidade transversal da cadeira ou objeto a ser movimentado por estas cadeias,

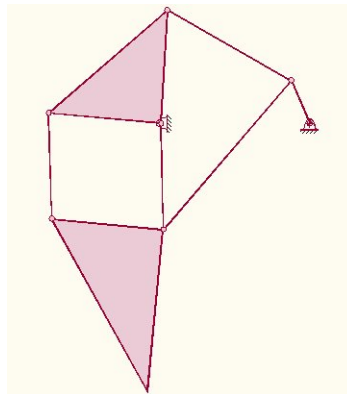


Figura 3. Cadeia cinemática de Jansen.

estes mecanismos terão que ser montados em pares simétricos com a entrada do movimento feita por uma única manivela para os dois Fig. (5) aos quais doravante chamaremos de "planos cinemáticos". Dentre estes dois mecanismos, a escolha

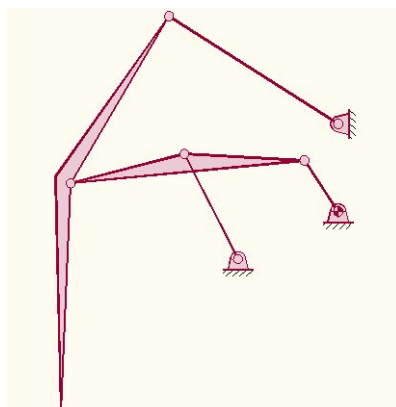


Figura 4. Cadeia cinemática de Klann.

recai na cadeia de Klann devido ao fato de esta conter menos barras em sua concepção (apenas seis) e permitir movimento suave - linear do centro de massa - com apenas dois planos cinemáticos de mecanismos Fig. (6) em contraposição ao modelo de Jansen que necessita de 3 planos. Desta forma as duas cadeias cinemáticas em cada plano se ligam à mesma manivela defasadas de 180 graus, fazendo com que sempre se tenham duas pernas em contato com o solo durante todo o

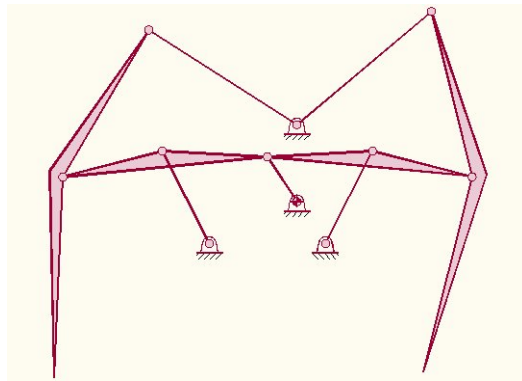


Figura 5. Montagem de duas Cadeias em uma única, chamada "plano Cinemático".

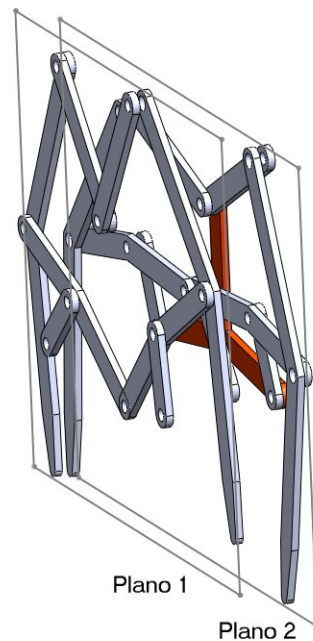


Figura 6. Dois "planos cinemáticos" lado a lado.

tempo Fig. (7). Notar ainda que do ponto de vista frontal da cadeira, serão necessários dois planos cinemáticos em cada

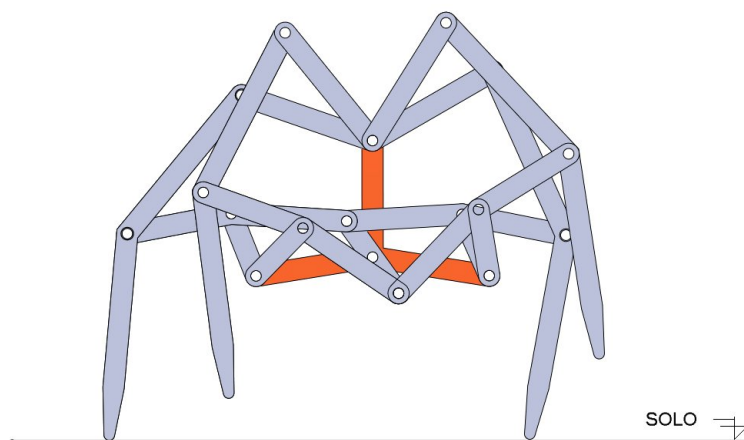


Figura 7. No mecanismo de Klann, dois planos cinemáticos garantem sempre duas pernas em contato com o solo.

lado para a sua total estabilidade Fig. (8). Ainda aqui teremos um mecanismo com um único grau de liberdade, como pode ser visto a partir da Equação (1) que explicita o critério de Grübler (Norton (1992)) para cadeias cinemáticas planas

aplicado a este mecanismo. Isto, levando-se em conta que agora o mesmo tem 10 barras ($n = 10$) e 13 pares cinemáticos

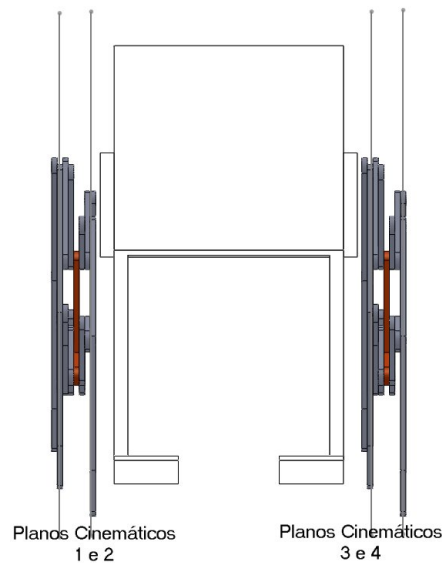


Figura 8. Planos cinemáticos em cada lado para a estabilidade da cadeira.

do tipo rotativo ($j = 13$), como pode ser visto na Figura (5), levando-se em conta que os quatro pivôs fixos formam uma barra de ordem quatro.

$$f = 3(n - 1) - 2j \quad (1)$$

É importante frisar aqui que este fato - apenas um grau de liberdade - vai simplificar o sistema de potência para o mecanismo final, demandando apenas em um único motor com sistema diferencial para curvas a partir de uma redução no movimento de cada plano cinemático na lateral da cadeira ou dois motores eletronicamente comandados para este fim.

3. ASSENTAMENTO E PASSO DAS PERNAS

A partir da escolha do tipo de mecanismo e enfatizando, como anteriormente questões de segurança e economia, as variáveis envolvidas são as dimensões do assento e geometria da escada, a distância e altura de cada passada e a localização do centro de massa do conjunto. Utilizando-se de uma escada normalizada onde cada degrau tem para dimensões 15 cm

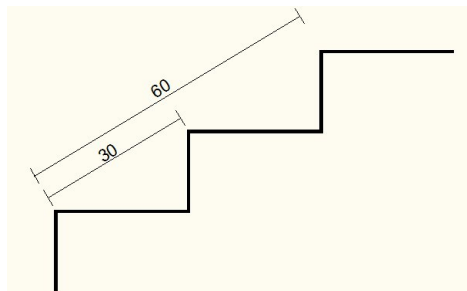


Figura 9. Distância máxima e mínima da passada para que a perna alcance o próximo degrau.

de altura por 25 cm de comprimento (Provenza (1996)) a distância de cada passada deve ficar entre 30 cm e 60 cm para que uma perna suba um degrau por vez Fig. (9). Tomando uma distância de 35 cm e escolhendo o mecanismo de Klann para o traçado da curva somos levados, num primeiro momento, à curva clássica deste mecanismo Fig. (10). Porém uma verificação mais detalhada das diversas maneiras em que a perna pode começar o movimento de entrada no degrau, a partir do plano, vai nos mostrar a possibilidade de acidente Fig. (11), quando a perna se apoia na beirada do degrau, ficando em falso e caindo no meio da passada. Verifica-se também a possibilidade de interferência para o próximo passo como na Fig. (12).

A solução está numa curva, ainda traçada pelo mecanismo de Klann, porém com saída e chegada mais suave Fig. (13) a partir de uma certa simetria e elevação moderada. Esta última curva descarta qualquer possibilidade de acidente ou resvalo no início da subida ao primeiro degrau devido ao fato de a sua entrada ser inferior a altura do degrau, ocasionando um deslizamento vertical e reposicionamento da perna para um início de subida seguro. Note-se ainda que o estudo destas

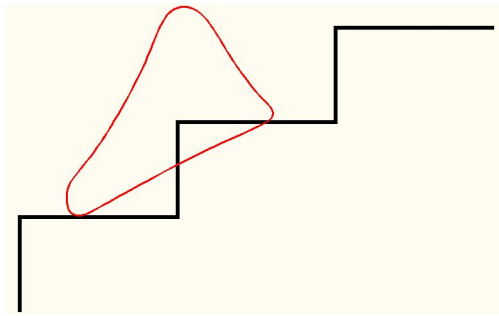


Figura 10. Curva clássica de Klann com base em 35 cm adaptada aos degraus.

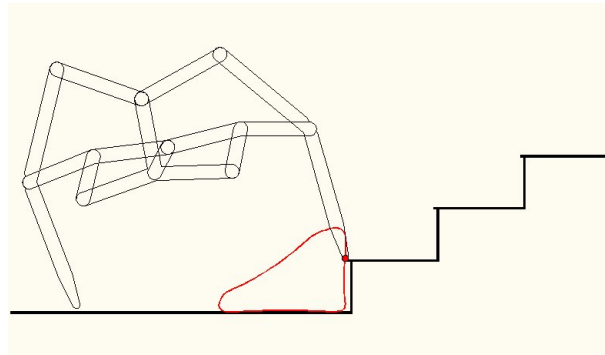


Figura 11. Possibilidade de resvalo da perna na entrada do degrau.

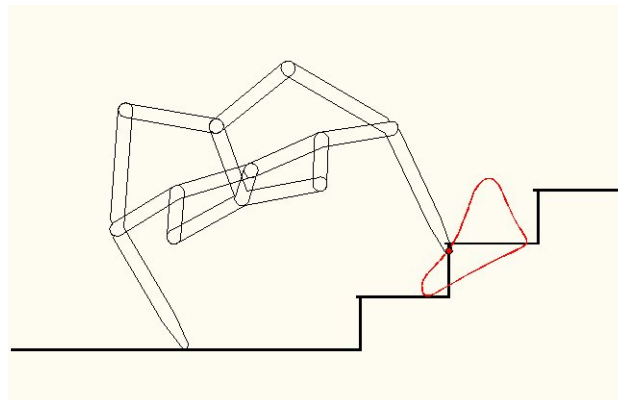


Figura 12. Interferência com o degrau.

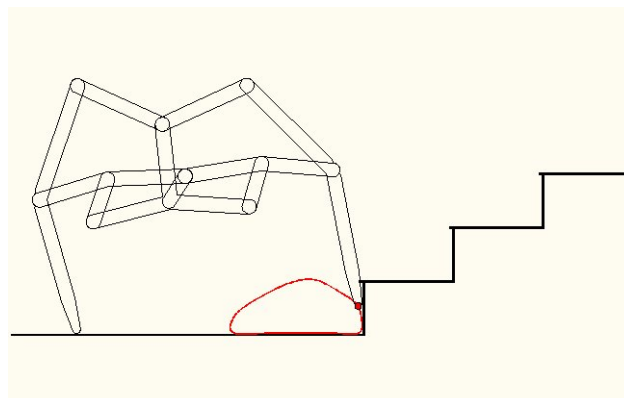


Figura 13. Acomodação da perna, caso a passada não se dê em cima do degrau.

curvas deve levar em consideração que as pernas estarão se movendo e portanto elas não são estáticas como simplificado acima. Algumas análises, como por exemplo a interferência do início de subida da perna com o degrau Figs. (11) e (13), têm que ser observadas numa simulação computacional. Neste trabalho isto foi feito com o módulo "SolidWorks Motion"

do SolidWorks™, onde pudemos reavaliar e efetuar pequenas modificações na curva inicialmente obtida.

4. DIMENSIONAMENTO GEOMÉTRICO

Nos procedimentos de síntese, a definição da curva do acoplador (Hartenberg and Denavit (1980)) normalmente determina as dimensões de todas as barras envolvidas no mecanismo a partir de um número finito de soluções. Estas soluções são obtidas a partir de processos geométricos, síntese dimensional ou síntese numérica, demandando esta última de programas de computador extremamente sofisticados rodando em clusters ou supercomputadores. Felizmente para problemas de ordem simples, como é o caso, hoje dispomos de aplicativos computacionais de custo razoável para uma síntese geométrica simplificada e iterativa, tais como o "SAM60", "Algodoo", "Cinderella" e tantos outros. Com a utilização de qualquer programa destes e levando-se em consideração as dimensões e altura do assento é possível se chegar a uma solução viável em termos de geometria para as diversas barras que compõe as pernas com a curva determinada anteriormente. Esta análise nos leva a várias soluções, sendo a mais viável apresentada na Fig. (14).

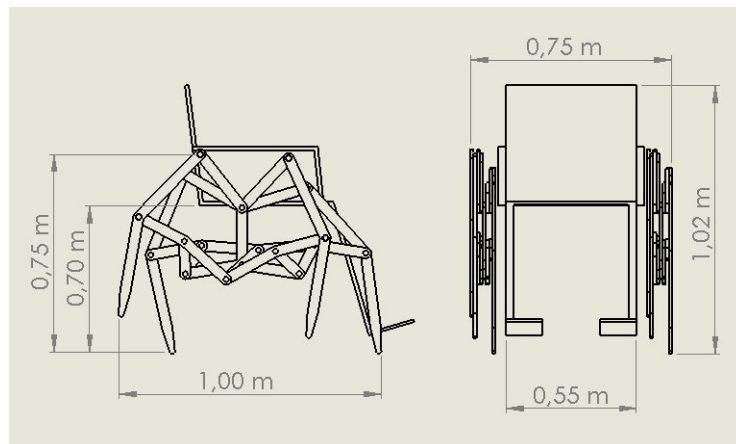


Figura 14. Dimensões apropriadas para a cadeira.

5. CINEMÁTICA DO MOVIMENTO

Objetivando a análise de velocidade para o motor ou conjunto motor redutor, se faz necessário a obtenção da velocidade da perna, especificamente de sua extremidade inferior no momento em que esta toca o solo, aqui estipulada em 2,5 m/seg como sendo razoável para a velocidade de uma cadeira de rodas. A partir deste valor e em função das expressões obtidas, é possível se determinar a velocidade do motor.

5.1 Deslocamentos e Velocidades das Barras

Com base nas dimensões das diversas barras envolvidas no mecanismo, agora simplificado novamente para efeito de análise cinemática Fig. (15), podemos calcular os deslocamentos, Equação 2 e velocidades, Equação 3 de todas as barras envolvidas (Dought (2001)) e, conseqüentemente da perna (barra "ABP") em função de uma velocidade angular da manivela (barra "FC") e por conseguinte a partir desta, calcular a velocidade do ponto "P", também em função da velocidade angular da manivela, que define a nossa curva e também a velocidade linear da cadeira. Na Fig. (15), as variáveis de interesse para deslocamento angular são θ como variável principal de entrada, podendo ser diretamente a velocidade de um motor ou de um redutor acoplado a este, sendo portanto conhecida em qualquer instante, e as variáveis secundárias (assim chamadas porque dependem da variável principal θ) α , β , γ e φ . O objetivo consiste em se calcular para estas variáveis secundárias os seus deslocamentos. Isto pode ser feito resolvendo-se o sistema, não linear da Equação 2 - quatro equações a quatro incógnitas - nestas variáveis. Isto é feito de forma fácil através de métodos numéricos.

$$\begin{cases} a \cos \theta + b \cos \alpha - c \cos \beta - d & = 0 \\ a \sin \theta + b \sin \alpha - c \sin \beta & = 0 \\ e \cos \gamma + f \sin \varphi - g \cos(\varepsilon - \alpha) - b \cos \alpha & = 0 \\ e \sin \gamma + f \cos \varphi - g \sin(\varepsilon - \alpha) + b \sin \alpha - q & = 0 \end{cases} \quad (2)$$

A variável ε é uma constante dependente exclusivamente da geometria da barra "BCD". Agora, de posse dos diversos deslocamentos angulares obtidos através da resolução da Equação 2 é possível se obter as diversas velocidades para estas variáveis dependentes ($\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$, $\dot{\gamma}$ e $\dot{\varphi}$), como função da velocidade angular $\dot{\theta}$ da manivela (barra "ED") a partir da solução

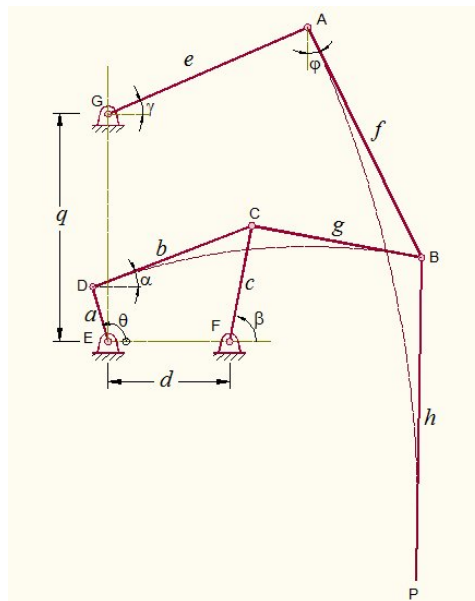


Figura 15. Esquema do mecanismo para análise.

da Equação 3.

$$\begin{bmatrix} -b \operatorname{sen} \alpha & c \operatorname{sen} \beta & 0 & 0 \\ b \operatorname{cos} \alpha & -c \operatorname{cos} \beta & 0 & 0 \\ (b-g) \operatorname{sen} \alpha & 0 & -e \operatorname{sen} \gamma & f \operatorname{cos} \varphi \\ (b+g) \operatorname{cos} \alpha & 0 & e \operatorname{cos} \gamma & -f \operatorname{sen} \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix} = \dot{\theta} \cdot \begin{Bmatrix} -a \operatorname{sen} \theta \\ a \operatorname{cos} \theta \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Que depende somente da inversão de uma matriz 4x4 composta de valores já conhecidos. Inversão esta perfeitamente viável por métodos analíticos ou através de programas simbólicos tais como o Mathcad ou Maple.

5.2 Deslocamento e Velocidade do Ponto P

Para deslocamentos do ponto "P" - extremidade final da perna - este é tratado como um ponto do acoplador e, de posse dos diversos deslocamentos angulares obtidos através da Equação 2, juntamente com as dimensões de todas as barras, é possível se montar um sistema local $u \times v$ sobre o ponto "A" Fig. (16), onde neste sistema o ponto "P" teria coordenadas (u,v) constantes e determinando-se então o seu deslocamento pela solução da Equação 4. Perceba-se que u

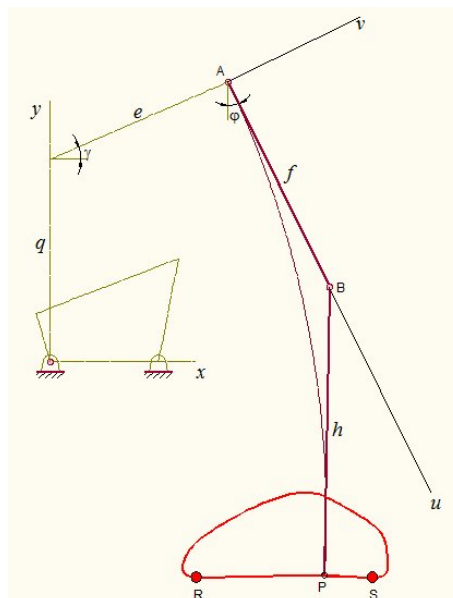


Figura 16. Sistema local para cálculo dos deslocamentos e velocidades do ponto P.

será uma constante igual ao comprimento da barra "AB" mais o comprimento da barra "BP" multiplicado pelo cosseno

do ângulo formado entre estas duas barras e v será também uma constante igual ao comprimento da barra "BP" pelo seno deste referido ângulo.

$$\begin{Bmatrix} x_p \\ y_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e \cos \gamma \\ q + e \sin \gamma \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (4)$$

A diferencial desta última expressão, Equação 5, no tempo, vai fornecer as velocidades que podem ser compostas vetorialmente para fornecer a velocidade tangencial do ponto "P" ao longo da curva descrita pela extremidade da perna.

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{Bmatrix} = \dot{\gamma} \cdot \begin{Bmatrix} -e \sin \gamma \\ e \cos \gamma \end{Bmatrix} + \dot{\varphi} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \varphi & -\cos \varphi \\ \cos \varphi & -\sin \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (5)$$

O gráfico da Fig. (17) mostra com exatidão a curva de velocidade do ponto "P" para um ciclo completo da manivela, bem como a curva de deslocamentos para que possamos focar esta análise no trecho R-S onde o ponto "P" estaria em contato com o solo. No gráfico é possível se ver que para uma velocidade constante da manivela de 100 rpm, o ponto

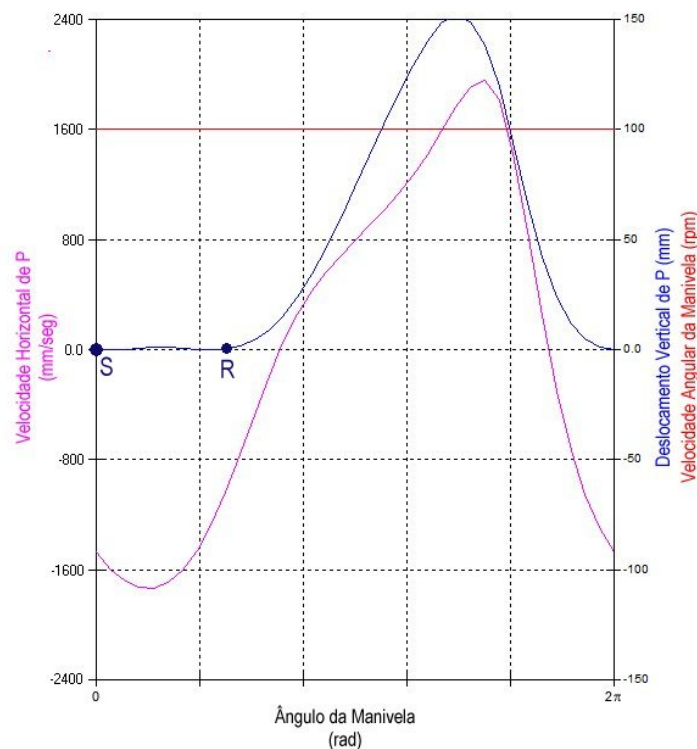


Figura 17. Velocidade e Deslocamento do ponto P.

"P" da perna atinge uma velocidade máxima horizontal de 1,7 m/seg. com a perna no solo e chega a 2,4 m/seg. quando do retorno desta, deixando claro que se tem um retorno rápido à próxima pisada, fazendo com isto que sempre tenhamos uma perna em contato com o solo quando colocamos duas pernas defasadas de 180 graus em um mesmo lado.

6. SIMULAÇÃO DO MECANISMO COMPLETO

O mecanismo, com base no aqui exposto, foi modelado no SolidWorks™ Fig. (18) para fins de análise e verificação da teoria, onde foi possível se detectar movimentos e interferência de curvas com os degraus da escada e também a estabilidade pela simulação de materiais aos diversos componentes e localização de seus centros de massa. Nesta primeira simulação, foram observadas interferências de algumas barras (problema já sanado) como também o choque dos estribos da cadeira com o primeiro degrau no instante da subida, problema este com algumas possibilidades de solução em análise, tais como rotação dos estribos para cima apenas no início da subida, translação do núcleo da cadeira para trás em relação ao mecanismo das pernas e elevação do conjunto cadeira/estribo após o assento.

A despeito destes pequenos problemas o comportamento cinemático e dinâmico, como um todo, ficou dentro do esperado verificando-se apenas alguns pequenos deslizamentos no contato com o chão, o que deverá ser evitado aumentando-se o coeficiente de atrito entre as pernas e o chão no protótipo real que será feito em breve.

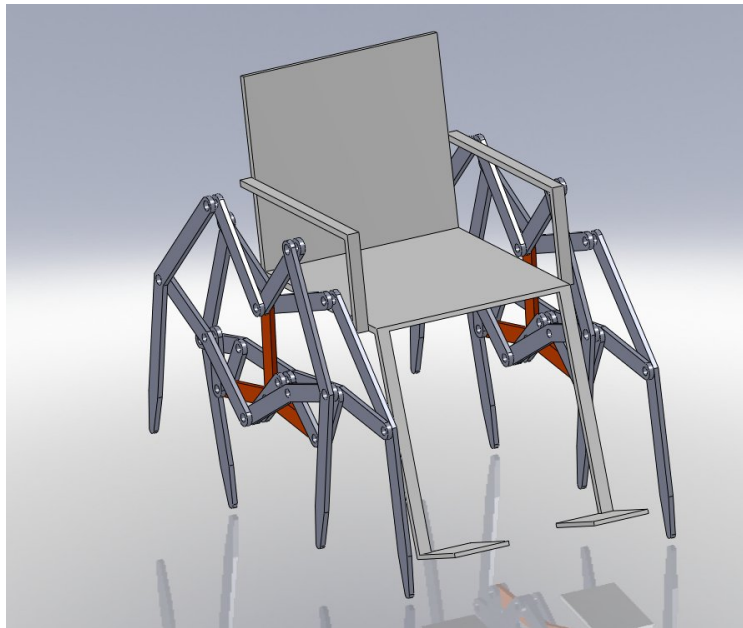


Figura 18. Sistema completo modelado no SolidWorks.

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostra ser possível desenvolver uma cadeira com locomoção por pernas que possua um deslocamento suave do centro de gravidade paralelo ao solo, permitindo conforto e segurança ao cadeirante. O sistema necessitaria de no máximo dois atuadores, uma para cada dois planos cinemáticos o que permitiria o controle no plano horizontal. A sistemática para projeto cinemático do mecanismo é apresentada, bem como, a seleção do tipo de mecanismo mais indicado.

8. REFERÊNCIAS

- Dought, S., 2001. *Mechanics of Machine*. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Gizmodo, 2010. "gizmodo.com". 1 Jan. 2010 <http://www.gizmodo.com/gadgets/images/rcliming_rh.jpg>.
- Hartenberg, R.S. and Denavit, J., 1980. *Kinematic Synthesis of Linkages*. McGraw-Hill, New York.
- HuboLab, 2010. "Humanoid robot". 1 Jan. 2010 <<http://hubolab.kaist.ac.kr/index.php>>.
- Kim, J.L.J.Y. and Jun, H.O., 2007. "Experimental realization of dynamic walking for the human-riding biped robot, hubo fx-1". *Advanced Robotics*, Vol. 21, No. 3-4, pp. 461–484.
- Lawn, M.J. and Ishimatsu, T., 2003. "Modeling of a stair-climbing wheelchair mechanism with high single step capability". *IEEE Transactions on neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 11, No. 3.
- Norton, R.L., 1992. *Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines*. McGraw-Hill, New York.
- Provenza, F., 1996. *Pro-tec Manual do Projetista de Máquinas*. Editora F. Provenza, São Paulo, Brasil.
- Sugahara, Y., Carbone, G., Hashimoto, K., Ceccarelli, M., Lim, H.O. and Takanishi, A., 2007. "Experimental stiffness measurement of wl-16rrii biped walking vehicle during walking operation". *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 3.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THE STUDY AND DESIGN OF MOTORIZED CHAIR WITH LEGS LOCOMOTION FOR THE DISABLED PERSON

José Maria Bezerra, zemaria@ufpe.br¹

Walter de Britto Vidal Filho, wbritto1@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Rua Acadêmico Hélio Ramos S/N, Cidade Universitária, Recife-PE.

Abstract. *This paper describes the study and development of the a chair conceptual design with legs locomotion by using kinematic chain with one degree of freedom allowing movement in two dimensions in a vertical plane kinematic. The wheelchair for disabled people has some limitations due to the majority of the roads and buildings are not adapted. Although the wheel is the more efficient transport means and simpler, not to overpass the sidewalks, stairs and gaps. This study shows the feasibility of employing mechanisms bars as a means of locomotion for wheelchair users.*

keywords: *tecnologia assistiva, mecanismos, cadeias cinemáticas, mecanismo de Klann*