



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **PROJETO MECATRÔNICO DE MANIPULADORES PARA TRANSFERÊNCIA DE CARGA EM OPERAÇÕES OFFSHORE**

**Camilla Mello, camillabmello@yahoo.com.br<sup>1</sup>**

**Ivanovich Lache, ilache@ufrj.br<sup>1</sup>**

**Max Suell Dutra, max@mecanica.coppe.ufrj.br<sup>1</sup>**

**Matthias Lemmerhirt, matthias.lemmerhirt@tuhh.de<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Laboratório de desenho de máquinas e robótica.

<sup>2</sup> Hamburg University of Technology (TUHH) – Department of Fluid Dynamics and Ship Theory.

**Resumo:** *Nas operações navais atuais existe uma constante necessidade para melhorar as condições de segurança em grande parte dos procedimentos realizados. Entre todas as operações realizadas dentro de um navio, existem algumas que envolvem a interação entre um ou mais navios, como por exemplo, o reboque de um navio e a transferência de carga. Nesse último exemplo, transferência de carga entre dois navios quando os mesmos se encontram fora do porto, é onde se encontra este trabalho, especificamente no projeto do manipulador que deve ser implementado para a realização desta tarefa.*

*As transferências de carga offshore entre dois navios envolvem basicamente três componentes, os controladores de posição das cargas, os componentes logísticos e os manipuladores mecânicos ou guindastes. Todos os componentes anteriormente mencionados dependem diretamente das condições marítimas e das interações hidrodinâmicas entre os navios envolvidos. Esta dependência dificulta a operação e a restringe às condições ambientais. Para melhorar estes tipos de operações é desenvolvido um projeto mecatrônico de uma nova concepção de guindaste com 6 graus de liberdade para as aplicações de transferência de carga offshore. Neste trabalho é apresentada a dinâmica do guindaste e uma comparação do novo projeto com os guindastes utilizados tradicionalmente. Nas comparações realizadas é possível observar as vantagens de utilizar manipuladores com 6 graus de liberdade assim como as grandezas das forças envolvidas numa transferência de carga. Para realizar este objetivo, modelos matemáticos dos sistemas foram desenvolvidos assim como simulações que permitiram o estudo e análise das diversas condições da operação. Finalmente um conjunto de trabalho futuros é apresentado assim como metodologias para o cálculo da interação hidrodinâmica entre os dois navios.*

**Palavras-chave:** *Manipuladores paralelos, Transferência de Carga.*

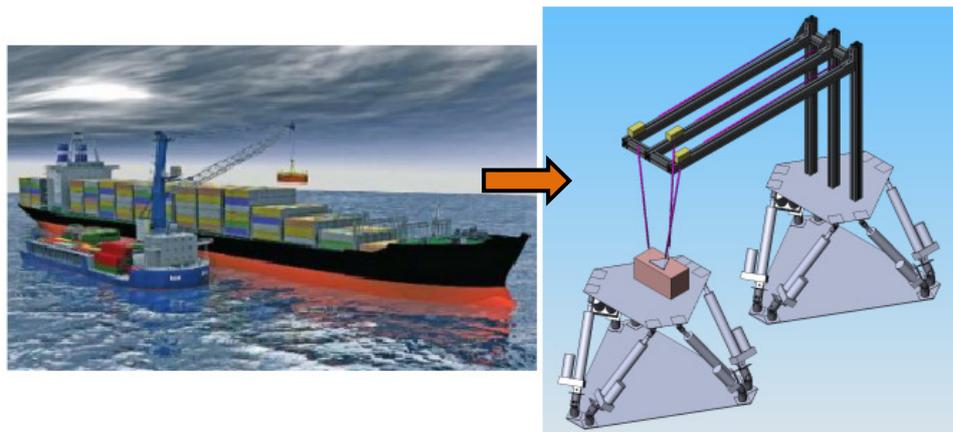
### **1. INTRODUÇÃO**

Diante da crescente demanda de transporte marítimo, navios cada vez maiores estão sendo construídos solicitando o crescimento de portos em mesma escala (Man Bw Diesel A/S., 2005). Atualmente, o maior navio transportador de container, o MSC Daniela, tem 366 metros de comprimento e capacidade nominal de 13.800 TEU, não aporta no Brasil devido às restrições de tamanho e calado. Esse cenário parece cada vez mais comum não só no país mas em todo o mundo, exigindo obras caras de expansão portuária ou custos altos com logística e transporte terrestre (Nottebom 2004). Uma solução para essa pendência é a transferência de cargas entre navios em águas profundas. A mesma idéia tem sido utilizada em terminais de carga flutuantes fora de porto para granel e líquidos, onde navios de grande porte descarregam em terminais em alto mar nos quais navios de menor porte são então carregados e seguem para diferentes destinos.

As transferências de carga offshore entre dois navios envolvem basicamente três componentes, os controladores de posição das cargas, os componentes logísticos e os manipuladores mecânicos ou guindastes. Neste último componente está centrado o desenvolvimento deste artigo, onde é apresentado uma nova configuração de guindastes. Esse guindaste, denominado de CABLEV possui 3 atuadores bi-lineais independentes o que permite atingir os 6 graus de liberdade (GDL). Esse equipamento poderá revolucionar o atual sistema de logística no Brasil e será adequado para atender a uma necessidade futura do setor, reduzindo significativamente o tempo e os custos gerados pelo desembarque tradicional. Esta nova medida, além de agilizar o processo e reduzir os gastos com o transporte, poderá ser a solução para a esperada saturação dos principais portos do país nos próximos 30 anos. Além das vantagens já citadas, em situações de risco como adernamento, incêndios e desastres ambientais o sistema seria de extrema relevância visto que a carga poderia ser salva mesmo durante o sinistro. Assim dito, esse sistema quando desenvolvido e aplicado a indústria naval pode possibilitar a transferência de cargas de sistemas de grande porte que transportem grande quantidade de

containers e apenas poucos deles seriam descarregados em alguma região. O mesmo possibilitaria uma diminuição grande nos custos de manutenção de portos em diversos lugares do país, facilitaria o salvamento de cargas e de pessoas quando em situação de risco, ajudaria no escoamento de cargas do país entre outras vantagens.

Para melhorar este tipo de operação este trabalho apresenta um simulador para transferência de carga em sistemas offshore para navios. Nesse contexto, o sistema possui dois manipuladores paralelos com 6 GDL capazes de reproduzir o espectro de movimento de navios em águas profundas e um manipulador do tipo guindaste responsável pela transferência de carga.. A idéia global pode ser observada na Figura 1).



**Figura 1 - Esquemático do sistema de navios para transferência de carga fora de porto (FRANÇA, et al., 2009)**

Da mesma forma será apresentada a dinâmica do guindaste tradicional assim como uma comparação do novo projeto com os guindastes utilizados atualmente. Nas comparações realizadas é possível observar as vantagens de utilizar manipuladores com 6 graus de liberdade assim como as grandezas das forças envolvidas numa transferência de carga.

## 2. MANIPULADORES TIPO GUINDASTE

Nesta seção são apresentados dois tipos de guindastes, os denominados tradicionais e a nova concepção denominada de CABLEV. Nesta área de manipuladores se encontram diversos trabalhos que abordam a modelagem dos guindastes (Jie L 2005; Verschoof J., 2002) e os controladores usados neles (Groom N, 2002 ;Yang K S, 2006). No presente trabalho o modelo do sistema é apresentado na seção 2.1 e a técnica de controle para o guindaste tipo Cablev na seção 2.2.

### 2.1. Abordagem Tradicional

Foi desenvolvido um modelo de um manipulador de carga tipo cartesiano, o qual é posicionado no navio, por tanto, os movimentos do dito manipulador são afetados pela dinâmica do navio. Geralmente, para identificar ou modelar os movimentos do navio são usados 6 graus de liberdade ( Fossen T, 1994; Sphaier SH 2005). A Tab. (1) indica os nomes para os diferentes graus de liberdade.

**Tabela 1. Os nomes para os graus de liberdade do navio**

Nome	Movimento
Avanço ( <i>Surge</i> )	translação no eixo X
Deriva ( <i>Sway</i> )	translação no eixo Y
Afundamento ( <i>Heave</i> )	translação no eixo Z
Jogo ( <i>Roll</i> )	rotação em torno do eixo X
Arfagem ( <i>Pitch</i> )	rotação em torno do eixo Y
Guinada ( <i>Yaw</i> )	rotação em torno do eixo Z

Definidos os movimentos do navio devem ser calculadas as respectivas transformações de base para cada grau de liberdade em uma determinada ordem, para este caso em particular, primeiro serão avaliadas as rotações sobre cada eixo e logo depois os deslocamentos, portanto, podemos observar a rotação sobre o eixo x denominada  $\theta_{X_N}$  (Jogo) na Eq. (1) na rotação sobre o eixo Y denominada  $\theta_{Y_N}$  (Arfagem) na Eq. (2) e, finalmente, para terminar as rotações sobre os respectivos eixos, temos a matriz de transformação para a rotação sobre o eixo Z denominada  $\theta_{Z_N}$  (Guinada) na Eq. (3).

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{X_N}) & -\sin(\theta_{X_N}) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_{X_N}) & \cos(\theta_{X_N}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{Y_N}) & 0 & \sin(\theta_{Y_N}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_{Y_N}) & 0 & \cos(\theta_{Y_N}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{Z_N}) & -\sin(\theta_{Z_N}) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_{Z_N}) & \cos(\theta_{Z_N}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

O mesmo procedimento é realizado para os deslocamentos nos respectivos eixos do navio, portanto temos os três deslocamentos sobre os eixos X (Avanço), Y (Deriva) e Z (Afundamento) representados pelas matrizes descritas na Eq. (4).

$$T_3^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_N \\ 0 & 1 & 0 & Y_N \\ 0 & 0 & 1 & Z_N \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Devido a isso, pode-se encontrar o deslocamento do navio simplesmente multiplicando as matrizes anteriores, assim como é apresentado na Eq. (5).

$$T_0^6 = T_0^1 * T_1^2 * T_2^3 * T_3^4 * T_4^5 * T_5^6 \quad (5)$$

O resultado da multiplicação é uma matriz de transformação do marco de referência inicial até o marco de referência do navio, esta matriz é denominada por  $T_0^6$  e esta descrita na Eq. (6).

$$T_0^6 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para obter a posição final do navio a respeito do marco de referência fixo, são utilizados os elementos  $a_{1,4}$ ,  $a_{2,4}$  e  $a_{3,4}$ , da Eq. (6), os quais estão descritos nas Eq. (7) (8) e (9).

$$\mathbf{a}_{14} = -\cos(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) Y_N + \cos(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) X_N + \sin(\theta_{Y_N}) Z_N \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_{24} = (-\sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) + \cos(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Z_N})) Y_N + (\sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) + \cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Z_N})) X_N - \sin(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Y_N}) Z_N \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_{34} = (\cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) + \sin(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Z_N})) Y_N + (-\cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) + \sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Z_N})) X_N + \cos(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Y_N}) Z_N \quad (9)$$

Estes elementos representam:

Posição no eixo X =  $a_{1,4}$

Posição no eixo Y =  $a_{2,4}$

Posição no eixo Z =  $a_{3,4}$

### 2.1.1. Manipulador cartesiano

No momento em que qualquer tipo de carga deixa a superfície do navio, pode-se considerar como uma carga pendurada, e se a carga é modelada como uma carga pontual representa-se o sistema como um pêndulo simples, para complementar o modelo. O elemento seguinte para se definir é o manipulador, neste exemplo se define como um

manipulador cartesiano que movimenta a carga pendurada (pêndulo simples), o sistema manipulador-carga simplificado, pode ser observado na Fig. (2).

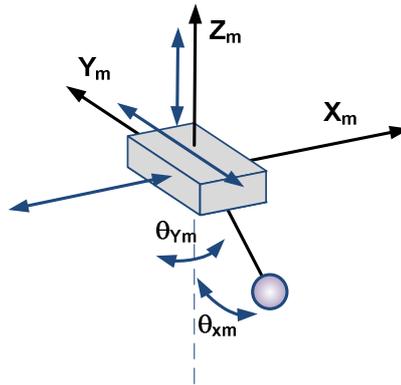


Figura 2. Ilustração do manipulador responsável pelo deslocamento da carga

A posição do pêndulo em qualquer instante do tempo em referência ao navio é dada por um conjunto de matrizes de transformação que vão desde o navio, passando pelo manipulador, até chegar à carga pontual, para encontrar a posição da carga em referência ao navio tem-se que implementar novamente as matrizes de transformação.

$$T_n^m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_m \\ 0 & 1 & 0 & Y_m \\ 0 & 0 & 1 & Z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T_m^c = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{Y_m}) & 0 & \sin(\theta_{Y_m}) & -\sin(\theta_{Y_m}) L_c \\ \sin(\theta_{X_m}) \sin(\theta_{Y_m}) & \cos(\theta_{X_m}) & -\sin(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) & \sin(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c \\ -\cos(\theta_{X_m}) \sin(\theta_{Y_m}) & \sin(\theta_{X_m}) & \cos(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) & -\cos(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Nesse caso a Eq. (10) representa a matriz de transformação que leva o marco de referência do navio até o marco de referência do manipulador levando em consideração que as variáveis  $X_m$ ,  $Y_m$  e  $Z_m$  que são os deslocamentos axiais do mecanismo de posicionamento da carga. A Equação (11) é a matriz que leva desde o manipulador até a carga onde  $L_c$  é o comprimento do cabo que une o manipulador à carga,  $\theta_{X_m}$  e  $\theta_{Y_m}$  representam os ângulos de giro sobre os eixos X e Y do manipulador os quais permitem definir a posição do pêndulo em qualquer momento.

Para definir a posição da carga a respeito do marco de referência fixo na terra, devemos fazer uma transformação, isso é possível multiplicando as matrizes de transformação  $T_0^6$ ,  $T_n^m$  e  $T_m^c$  da equação, gerando a Eq. (12) que representa a transformação de marco fixo na terra até a carga denominado  $T_0^c$ .

$$T_0^c = T_0^6 * T_n^m * T_m^c = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix} \quad (12)$$

O resultado de Eq. (12) é uma matriz de 4x4, novamente os elementos mais importantes desta matriz, por permitirem conhecer a posição da carga a respeito do marco de referência fixo, estão posicionados na Eq. (13) para X, Eq. (14) para Y e Eq. (15) para Z.

$$\begin{aligned} b_{14} = & \cos(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) (-\sin(\theta_{Y_m}) L_c + X_m) - \\ & \cos(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) (\sin(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c + Y_m) \\ & + \sin(\theta_{Y_N}) (-\cos(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c + Z_m) - \cos(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) Y_N + \\ & \cos(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) X_N + \sin(\theta_{Y_N}) Z_N \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{b}_{24} = & (\sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) + \cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Z_N})) (-\sin(\theta_{Y_m}) L_c + X_m) + \\
 & (-\sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) + \cos(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Z_N})) (\sin(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c + Y_m) - \\
 & \sin(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Y_N}) (-\cos(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c + Z_m) + \\
 & (-\sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) + \cos(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Z_N})) Y_N + \\
 & (\sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) \cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Z_N})) X_N - \sin(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Y_N}) Z_N
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{b}_{34} = & (-\cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) + \sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Z_N})) (-\sin(\theta_{Y_m}) L_c + X_m) + \\
 & (\cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) + \sin(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Z_N})) (\sin(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c + Y_m) + \\
 & \cos(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Y_N}) (-\cos(\theta_{X_m}) \cos(\theta_{Y_m}) L_c + Z_m) + \\
 & (\cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \sin(\theta_{Z_N}) + \sin(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Z_N})) Y_N + \\
 & (-\cos(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Y_N}) \cos(\theta_{Z_N}) + \sin(\theta_{X_N}) \sin(\theta_{Z_N})) X_N + \cos(\theta_{X_N}) \cos(\theta_{Y_N}) Z_N
 \end{aligned} \tag{15}$$

### 2.1.2. Equação de Lagrange

Um dos métodos mais clássicos para a obtenção de modelos físicos é aquele proposto por Lagrange, onde a partir do cálculo do Lagrangeano se pode encontrar a equação do movimento do sistema, portanto o primeiro passo é a consecução do Lagrangeano, este não é mais que a energia cinética  $E_c$  menos a energia potencial  $E_p$ , a equação é representada pela Eq. (16).

$$L = \left( \frac{m*v^2}{2} \right) - m * g * h \tag{16}$$

A Equação (17) mostra em detalhe as variáveis do Lagrangeano, onde  $m$  representa a massa da carga,  $v$  a sua velocidade,  $h$  a altura da carga com respeito ao eixo de referência da terra e finalmente  $g$  que representa a gravidade. Aproveitando o conhecimento da posição da carga a respeito do marco de referência da terra, é possível encontrar o valor da velocidade e altura da carga em todo momento, foi desenvolvido o Lagrangeano para o sistema da carga pendurada, o resultado é uma equação que depende de  $\theta_{X_N}, \theta_{Y_N}, \theta_{Z_N}, \dot{\theta}_{X_N}, \dot{\theta}_{Y_N}, \dot{\theta}_{Z_N}, X_m, Y_m, Z_m, \dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p, \theta_{X_m}, \theta_{Y_m}$  e  $lc$ .

$$L = f(\theta_{X_N}, \theta_{Y_N}, \theta_{Z_N}, \dot{\theta}_{X_N}, \dot{\theta}_{Y_N}, \dot{\theta}_{Z_N}, X_p, Y_p, Z_p, \dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p, \theta_{X_m}, \theta_{Y_m}, lc) \tag{17}$$

Depois de obter o Lagrangeano é possível encontrar a equação do movimento da carga, para isso, é importante relembrar a equação do movimento de Lagrange, representado na Eq. (18).

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_j} \right) = T \tag{18}$$

Neste caso  $q_j$  representa o grau de liberdade para o qual se procura a equação do movimento, neste caso, em particular, é necessário encontrar a equação do movimento da carga a qual é representada pelos dois graus de liberdade  $\theta_{X_m}$  e  $\theta_{Y_m}$ . Fazendo as respectivas derivações obtemos uma expressão para  $\ddot{\theta}_{X_m}$  e  $\ddot{\theta}_{Y_m}$  que dependem das mesmas variáveis do Lagrangeano mais as variáveis  $\ddot{\theta}_{X_N}, \ddot{\theta}_{Y_N}, \ddot{\theta}_{Z_N}, \dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p, \dot{\theta}_{X_m}$  e  $\dot{\theta}_{Y_m}$ .

### 2.1.3. Simulações do modelo

Para observar o comportamento da carga pendurada quando o guindaste era submetido a perturbações externas, simulando estar posicionado dentro de um navio, foram obtidos os movimentos de um navio utilizados nos simuladores do CIAGA (Centro de Instrução Almirante Graça Aranha), os dados do navio assim como as condições de mar implementadas para obter esses resultados se encontram na Tab. (2).

Tabela 2. Condições de simulação, Cortesia CIAGA.

Condição	Valor
Tipo do navio	PANAM AX
Calado do Navio	11m
Comprimento do Navio	220m
Boca do Navio	32m
Espectro de ondas utilizado	Short Crest 3D
Condições iniciais	Nulas
Lamina de água	100m
Condição marítima	Mar 5
Altura de onda	3.1m
Velocidade do vento	37km/h

Os resultados dos dois dos seis graus de liberdade (Deslocamento vertical e rotação sobre o eixo do avanço) estão descritos na Fig. (3).

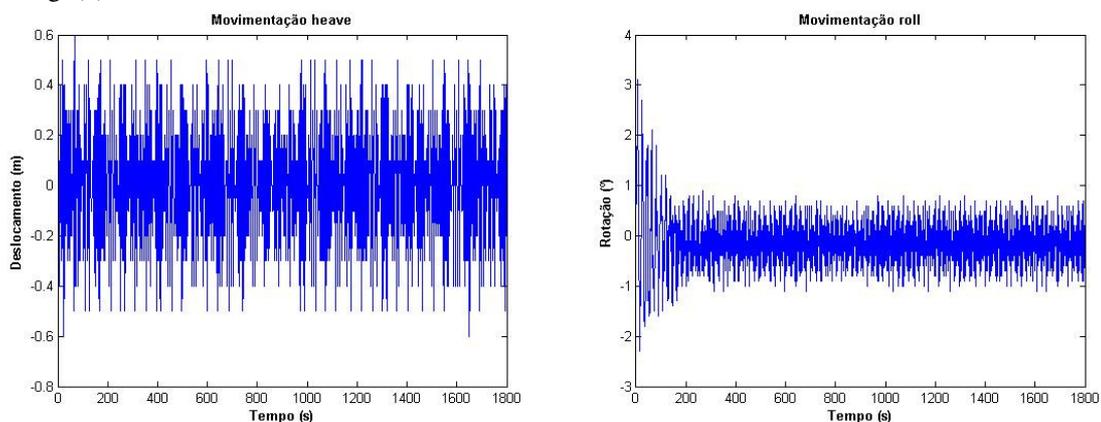


Figura 3. Dados de excitação do navio (Cortesia CIAGA)

Aplicando os dados obtidos na Fig. (3) sobre o modelo desenvolvido do guindaste foi achada a resposta da carga pendurada, a sua posição como era de esperar é modificada pelas perturbações, a resposta da carga pendurada é observada na Fig. (4).

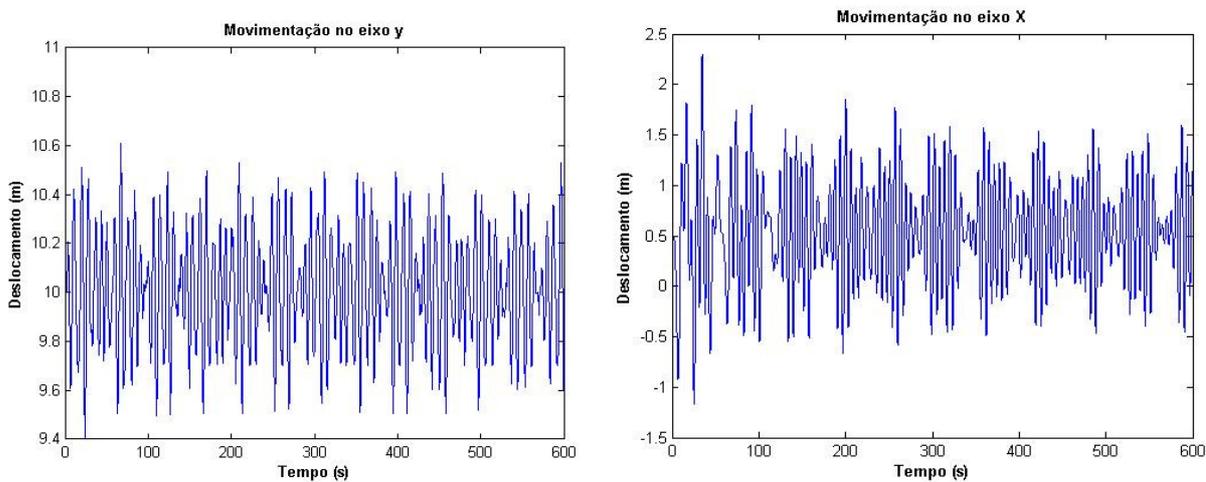


Figura 4. Resposta excitação guindaste (Cortesia CIAGA)

## 2.2. Cablev

O projeto do *Cablev* consiste em um sistema de transporte de carga através de uma placa suspensa por três cabos de comprimento variável ( $Pc_1$ ,  $Pc_2$ ,  $Pc_3$ ). Cada cabo é fixado em um carro elétrico (*trolley*) que se translada sobre um trilho ( $Pg_1$ ,  $Pg_2$ ,  $Pg_3$ ). Adicionalmente a base do guindaste pode rotacionar ( $pg_0$ ), resultando em um mecanismo redundante com 7 GDL. Para solucionar essa questão foi aplicada uma restrição na movimentação dos *trolleys*, a distância  $P$  entre os *Trolleys* mais externos deveria ser constante. Na Fig. (5) é possível contemplar essas informações.

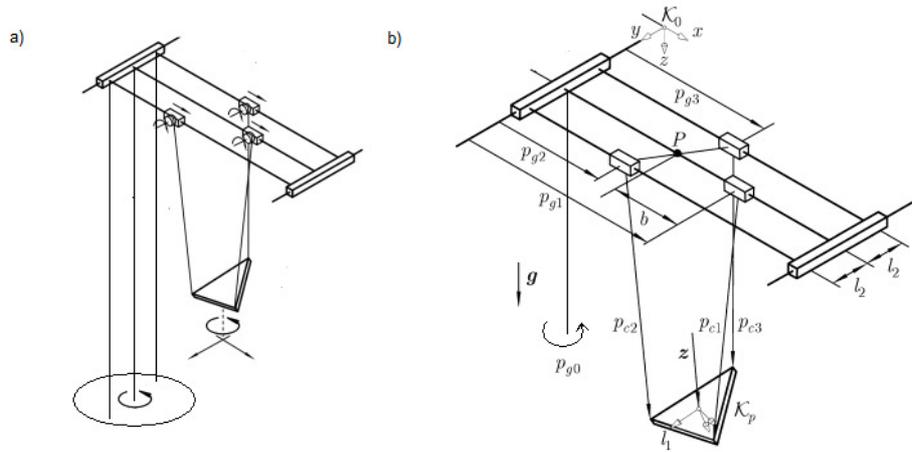


Figura 5 - a) Esquemático do Cablev; b) Graus de liberdade e sistema de referência do sistema

Considerando o efetuador com uma placa fina no formato de um triângulo equilátero de lado  $l_1$ , seus vértices no referencial local  $K_p$  é dado pela matriz  $d$ , onde cada coluna representa as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  de um vértice. Sejam as coordenadas do centróide representadas pelo vetor  $r = [r_x \ r_y \ r_z]$  e a matriz de rotação  $T = T_x(\theta_x) \cdot T_y(\theta_y) \cdot T_z(\theta_z)$  no referencial inercial  $K_0$ . Os vetores dos cabos são dados pela Eq. (19).

$$c = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}^T + [T][d] + [T][T_{pg_0}] \begin{bmatrix} -pg_1 & -pg_2 & -pg_3 \\ 0 & -l_2 & l_2 \\ h & h & h \end{bmatrix} \quad (19)$$

As forças  $F_c$  e os momentos  $L_c$  experimentados pelos cabos é definido pela Eq. (20) onde a matriz  $c$  apresenta a direção das forças e o vetor  $\lambda$  as intensidade da mesmas.

$$F_c = c \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix}; \quad L_c = D \times F_c = d_i \times (c_i \lambda_i) = [d_i \times c_i][\lambda_i] \quad (20)$$

Em termos dinâmicos a equação que rege o sistema é dada pela Eq. (21).

$$M \ddot{y}_p + k^c \dot{y}_p = k^e + F_c \quad (21)$$

Onde  $M \ddot{y}_p$  abrange as força inerciais,  $k^c \dot{y}_p$  engloba as forças centrípetas e de Coriollis e  $k^e$  compreende os esforços externos ao sistema. Isolando  $F_c$  na Eq. (21) obtêm-se

$$\underbrace{M \ddot{y}_p + k^c \dot{y}_p - k^e}_{[LHS]} = \underbrace{\begin{bmatrix} c \\ d \times c \end{bmatrix}}_G \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

A matriz  $G$  por sua vez pode ser decomposta em uma matriz constante relacionada apenas com a geometria do sistema e uma matriz que depende das coordenadas generalizadas  $p_{g0}, p_{g1}, p_{g2}, p_{g3}$  e a Eq. (22) pode ser reescrita segundo a Eq. (23)

$$[LHS] = \begin{bmatrix} G_F(y_p) + G_F(p_g) \\ G_L(y_p) + G_L(p_g) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad 23$$

Com essas grandezas em mãos é possível calcular para uma trajetória desejada do centróide do efetador a posição de cada *trolley*, a rotação da base e o comprimento dos cabos para cada instante do trajeto. Para tanto foi utilizado um método iterativo seguindo os seguintes passos:

- 1- Inicialização de  $p_g$  com uma solução estática de equilíbrio ou com a configuração anterior;
- 2 Cálculo da matriz  $G$  para os valores iniciais;
- 3 Redução do sistema para  $3 \times 3$  pelo método dos mínimos quadrados;
- 4 Solução do sistema linear para  $\lambda$ ;
- 5 Separação a parte conhecida  $[G(y_p) + G(p_{g0})]\lambda$  junto a LHS;
- 6 Substituição  $p_{g,i}$  na matriz  $G(p_g)$  por  $\lambda_i$  calculados;
- 7 Admissão da restrição para a sétima coordenada  $b = p_{g1} - \frac{1}{2} p_{g2} - \frac{1}{2} p_{g3} = const$  ;
- 8 Redução do sistema para  $3 \times 3$  pelo método dos mínimos quadrados ;
- 9 Solução do sistema linear para  $\lambda$  ;
- 10  $G(p_{g0})$  é calculado separadamente.

Matematicamente podemos simplificar os passos nas Eq. (24) e Eq. (23):

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} G_F(y_p, p_g) \\ G_L(y_p, p_g) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G_F(y_p, p_g) \\ G_L(y_p, p_g) \end{bmatrix} \right)^{-1} [LHS] \quad 24$$

$$\begin{bmatrix} p_{g1} \\ p_{g2} \\ p_{g3} \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} G_F(\lambda) \\ G_L(\lambda) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G_F(\lambda) \\ G_L(\lambda) \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} G_F(\lambda) \\ G_L(\lambda) \end{bmatrix}^T \left( [LHS] - \begin{bmatrix} G_F(y_p, p_{g0}) \\ G_L(y_p, p_{g0}) \end{bmatrix} [\lambda] \right) \quad 25$$

Esse esquema é repetido para cada posição desejada até o erro entre os dois lados da equação seja menor que um determinado valor. Como exemplo do procedimento e do acompanhamento de uma trajetória segue o resultado de uma simulação na Fig. (6).

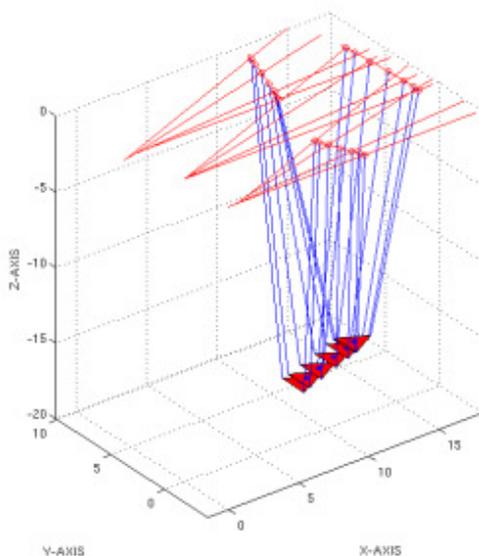


Figura 6 – Cablev em funcionamento

Esta abordagem permite a implementação do CABLEV em operações de acompanhamento de trajetórias, o que permite sua implementação nas operações de transferência de carga pois devido ao movimento relativo entre os dois navios é necessário utilizar sistemas que permitam içar ou posicionar uma carga a medida que os navios se encontram em movimento.

### 3. SIMULADOR

Baseado nos resultados alcançados foi desenvolvido em *LabView*<sup>®</sup> um programa capaz de imprimir o comportamento desejado em duas plataformas Stewart independentes para reprodução de movimentos de navios. Em uma das plataformas foi montado um guindaste do tipo Cablev cujo o atuador deve ser capaz de seguir a movimentação da outra plataforma.

O software oferece uma visão em três dimensões do sistema e permite que o usuário opte por trajetórias predefinidas ou configuradas manualmente. A Fig. (7) mostra a tela do programa e seus componentes serão enumerados. Os dados para geração das trajetórias predefinidas que alimentam o sistema são provenientes do simulador de navios do CIAGA.

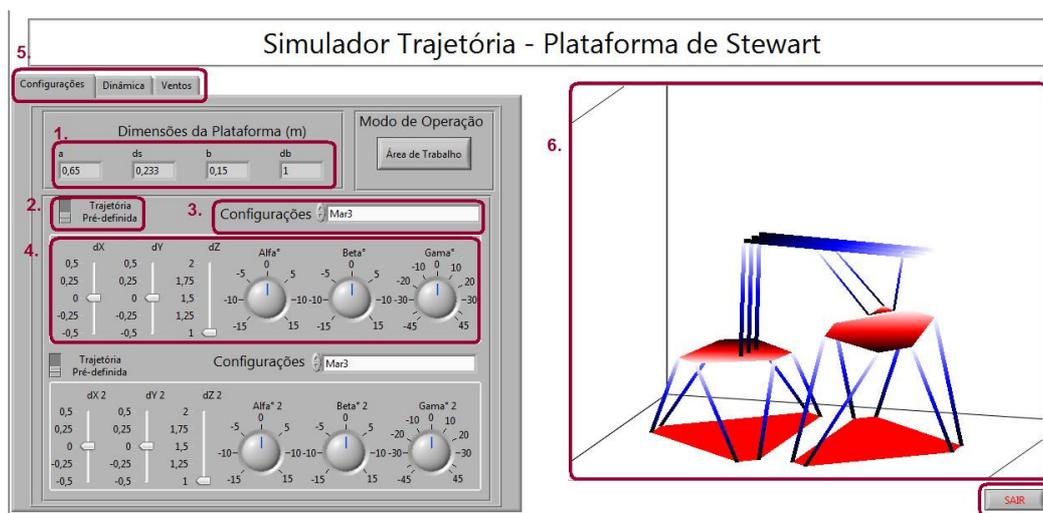


Figura 7 - Simulador Virtual para transferência de Carga

1. Dados físicos da das plataformas;
2. Opção de escolha para trajetórias predefinidas ou manualmente;
3. Configurações predefinidas para trajetórias;
4. Comandos manuais para movimentação dos 6 GDL da plataforma;

5. Abas para escolha de análise dinâmica e interferência do vento ;6. Visualização 3D do sistema;OBS: Os itens 2, 3 e 4 são independentes para cada plataforma.

Para condições de mar descritas e de navio descritas na Tab. (2), é possível obter os resultados do simulador apresentados na Fig. (8).

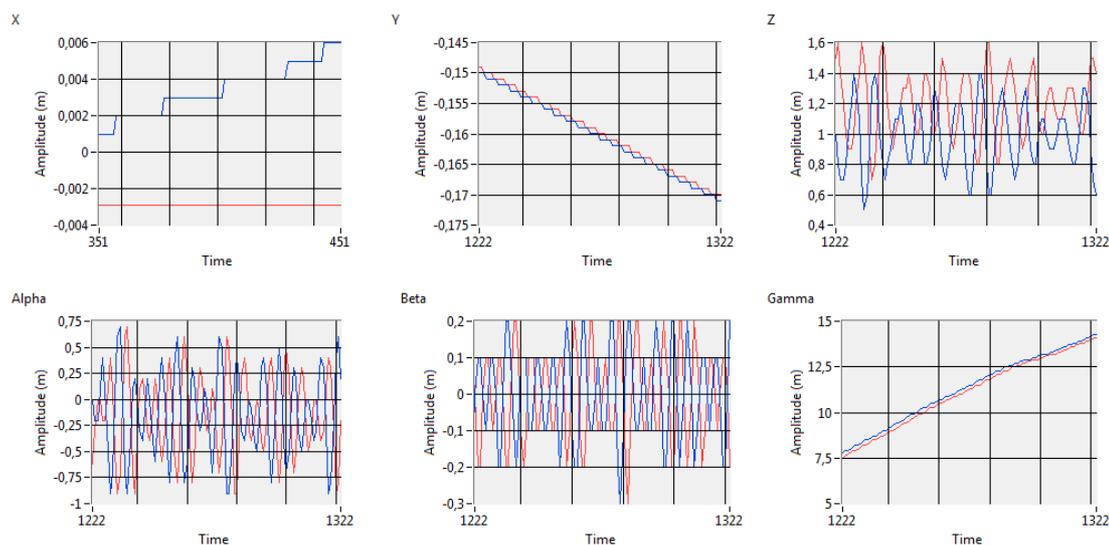


Figura 8 – Respostas do simulador

Na Fig. (8) é possível observar que os deslocamentos gerados pela movimentação do navio são acompanhados pela manipulação do CABLEV o que permitiria um acople seguro entre o guindaste e a carga a ser içada.

#### 4. CONCLUSÕES

O artigo mostra em detalhe o modelo matemático simplificado de um guindaste tradicional, neste modelo é possível introduzir perturbações (movimentação do navio, vento, etc) o que permite estudar a sua influência sobre uma carga pendurada. O modelo foi submetido a condições marítimas descritas no artigo para posteriormente avaliar a resposta do guindaste para estas perturbações. Grandes deslocamentos na carga pendurada foram achados, movimentações de até 3m da posição de repouso, o que permite afirmar que nas condições de mar citadas e com controladores desenvolvidos para rejeitar perturbações provenientes do vento, os guindastes tradicionais não poderiam realizar uma operação de transferência de carga com uma segurança desejada.

Continuando o trabalho com guindaste foi apresentado um novo conceito de guindaste para a transferência de carga entre dois navios, esse tipo de guindaste conhecido como o CABLEV que permite manipular uma carga em seis graus de liberdade. Baseados no modelo dinâmico do CABLEV o trabalho apresenta uma forma de controlar a posição do guindaste utilizando a informação de seu modelo. O modelo postulado mostrou-se apropriado nas diversas simulações apresentadas o que permite afirmar que sua implementação em operações de transferência de carga offshore é viável e necessária.

Finalmente foi desenvolvido um simulador da operação de transferência de carga onde foram avaliados os diversos cenários do projeto o que corresponde a uma ferramenta útil na implementação das diversas hipóteses de controle.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento à FINEP pelo apoio ao projeto CT- Aquaviário convenio 01.07.0673.00.

## **6. REFERÊNCIAS**

- Fossen T., 1994 "Guidance and Control of Ocean Vehicles. JohnWiley and Sons, New York."
- Groom N, Robinnet D., 2002, "Pendulation control system and method for rotary boom crane. Patent No US 6,442,439 B1".
- Jie L Guangfu S, Kleeberger M., 2005, "Complete dynamic calculation of lattice mobile crane during hoisting motion. Mechanism and machine theory".
- MAN BW DIESEL A/S., 2005, "Propulsion trends in container vessels. Man BW diesel a/s industrial manual reference".
- Nottebom T., 2004, "Container shipping and ports: An overview." Review of Network Economics.
- Sphaier SH., 2005, "Hidrodinâmica." Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Yang K S Yang J H., 2006 "Adaptive coupling control for overhead crane systems." Mechatronics.
- Verschoof J., 2002 "Cranes - Design, Practice and Maintenance. Professional Engineering Publishing Limited." London and Bury St Edmunds UK.

## **7. DIREITOS AUTORAIS**

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

## MECHATRONICS PROJECT FOR OFFSHORE CARGO TRANSFER MANIPULATORS

Camilla Mello, camillabmello@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Ivanovich Lache, ilache@ufrj.br<sup>1</sup>

Max Suell Dutra, max@mecanica.coppe.ufrj.br<sup>1</sup>

Matthias Lemmerhirt, matthias.lemmerhirt@tuhh.de<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – Laboratorio de desenho de máquinas e robotica.

<sup>2</sup> Hamburg University of Technology (TUHH) – Deparment of Fluid Dynamics and Ship Theory.

**Abstract:** *In the current naval operations there is a constant need to improve security conditions in most of the procedures performed. Among all transactions within a ship, there are some that involve interaction between one or more vessels, such as towing a ship and cargo transfer. In the latter, the container's transfer between two ships when they are outside the port is this paper focus, specifically in designing a manipulator that should be implemented to achieve this task.*

*Cargo's transfer between two ships offshore basically involve three components: the loads' position controller, logistics' components and mechanical manipulators (or cranes). All these components mentioned above depend directly on sea conditions and hydrodynamic interactions between the ships involved. This dependence complicates the operation and restrict it to environmental conditions. To improve these types of operations is developed a mechatronic design of a new design of crane with six degrees of freedom for cargo transfer offshore. This work presents a dynamics study of the crane and a comparison between this new project and cranes used traditionally. In comparisons it is possible to observe the benefits of using manipulators with six degrees of freedom as well as the magnitudes of forces involved in this process. To accomplish this goal, mathematical models were developed and simulations allowed the study and analysis of different conditions of operation. Finally a set of future work is proposed as well as methodologies for calculating the hydrodynamic interaction between the two ships.*

**Palavras-chave:** *Parallel manipulators, Offshore transfer operation.*