



CONTROLE POR PILOTO AUTOMÁTICO DO MODELO NUMÉRICO DO LNEC PARA COMPORTAMENTO DE NAVIOS EM MANOBRA

João Alfredo Santos e Manuel Marcos Rita

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

SUMÁRIO

O simulador numérico do comportamento de navios em manobra desenvolvido pelo LNEC, SIMNAV, tem sido normalmente utilizado na verificação das dimensões propostas para canais de acesso a portos. Isto é, para um traçado em planta proposto e para um conjunto de situações de teste seleccionadas, são realizadas várias viagens por operadores experimentados procedendo-se, depois, ao tratamento estatístico dos desvios entre as trajectórias e o eixo do canal.

Contudo, este procedimento não é o mais adequado quando se pretende apenas comparar diferentes traçados para a travessia da mesma zona. Nesse caso, é mais interessante o controle do modelo numérico por um piloto automático pois, para os valores dos parâmetros de controle do navio mais adequados ao cenário em estudo, o traçado com menores desvios deve ser o melhor do ponto de vista da navegação.

Nesta comunicação descreve-se o piloto automático desenvolvido no LNEC para controle do modelo SIMNAV, bem como a sua aplicação à análise de seis traçados propostos para a travessia da barra do Douro.

1. INTRODUÇÃO

O simulador numérico do comportamento de navios em manobra desenvolvido pelo LNEC, SIMNAV, Santos (1991), tem sido normalmente utilizado na verificação das dimensões propostas para canais de acesso a portos. Isto é, para um traçado em planta proposto e para um conjunto de situações de teste seleccionadas, são realizadas várias viagens por operadores experimentados. Com a repetição das viagens nas mesmas condições de ensaio procura-se obter uma amostra significativa das viagens no canal, pois sabe-se que, para as mesmas condições ambientais, o mesmo piloto nunca faz duas viagens iguais. Do tratamento estatístico dos desvios entre as trajectórias e o eixo do canal podem estabelecer-se níveis de excedência para cada um dos troços em que o traçado pode ser dividido e daí a largura mais adequada para cada troço do canal.

Contudo, este procedimento não é o mais adequado quando se pretende apenas comparar diferentes traçados para a travessia da mesma zona. Nesse caso, é mais interessante o controle do modelo numérico por um piloto automático. Com efeito, uma vez estabelecidos os parâmetros do piloto automático, para as mesmas condições ambientais obter-se-á sempre o mesmo trajecto do navio para um dado traçado do canal. Embora o objectivo da utilização do piloto automático seja garantir que o navio segue a trajectória ideal, a presença do vento, das ondas ou das correntes de maré, impede que tal aconteça, existindo sempre um desvio entre aquela trajectória e a descrita pelo navio. Para os valores dos parâmetros de controle do navio mais adequados ao cenário em estudo, o traçado com menores desvios deve ser o melhor do ponto de vista da navegação.

Quando o Instituto de Navegabilidade do Douro (IND) solicitou ao LNEC a realização de um estudo comparativo, do ponto de vista da navegação, das soluções propostas pelos agrupamentos concorrentes ao Concurso Público Internacional de Concepção, Projecto e

Construção das Obras Necessárias à Melhoria das Acessibilidades e das Condições de Segurança na Barra do Douro, para o traçado do canal navegável no trecho da foz do Rio Douro, o número de traçados a analisar tornou evidente o interesse do desenvolvimento de um piloto automático para controlar o modelo numérico SIMNAV.

Nesta comunicação começa-se por descrever o piloto automático desenvolvido no LNEC para controle do modelo SIMNAV, passando-se, depois, ao estudo solicitado pelo IND, descrevendo-se os dados de base, a metodologia empregue e finalmente os resultados mais importantes do mesmo estudo.

2. O PILOTO AUTOMÁTICO

O problema do controle do navio consiste essencialmente em, dados os erros (diferença entre valores observados e pretendidos) de posição e velocidade, determinar como variar o ângulo do leme e a tracção produzida pelo hélice por forma a minimizar aqueles erros. Apresentam-se, em seguida, os passos básicos que levaram ao desenvolvimento de um piloto automático para o modelo numérico do comportamento de navios em manobra, o modelo SIMNAV.

2.1. Equações de movimento linearizadas

Desprezando os movimentos associados a variações de calado do navio, ou seja, arfagem ("heave"), balanço estibordo-bombordo ou rolo ("roll") e o balanço popa-proa ou galear ("pitch"), as equações de movimento do navio num referencial fixo em relação à Terra, figura 1, podem escrever-se:

$$\begin{aligned} X_0 &= m \ddot{x}_{0G} \\ Y_0 &= m \ddot{y}_{0G} \\ N &= I_z \ddot{\gamma} \end{aligned} \tag{1}$$

em que os dois pontos sobre x_{0G} , y_{0G} e γ representam as segundas derivadas desses valores em relação ao tempo t , X_0 é a força actuante na direcção x_b , Y_0 a força actuante na direcção y_b , m a massa do navio, N o momento em relação a um eixo vertical que passa pelo centro de gravidade do navio, I_z o momento de inércia do navio em relação ao mesmo eixo e γ o ângulo de guinada.

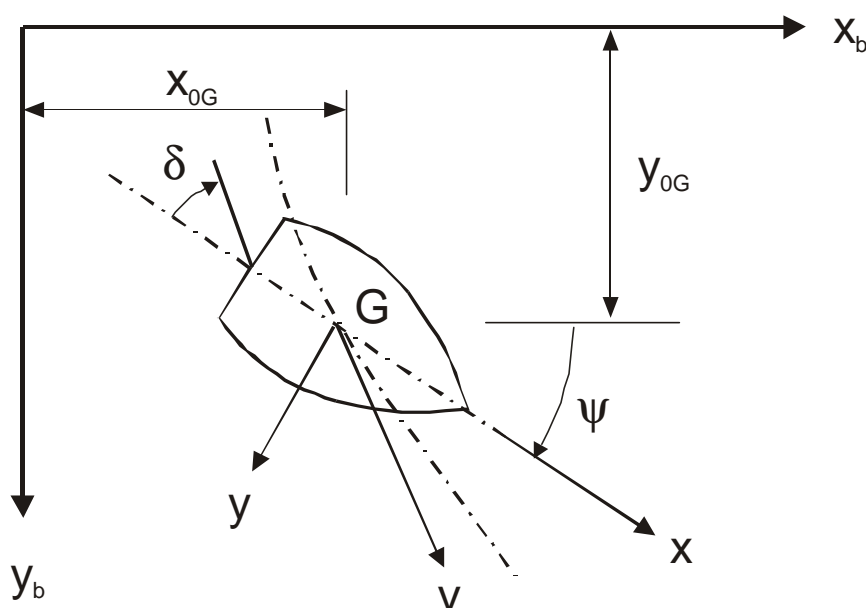


Figura 1 – Sistemas de coordenadas utilizados

A determinação das forças hidrodinâmicas actuantes no navio é bastante facilitada quando aquelas são medidas num referencial baricêntrico solidário com o navio, figura 1. As equações (1) vêm então:

$$\begin{aligned} X &= m (\dot{u} - v r) \\ Y &= m (\dot{v} + u r) \\ N &= I_Z \dot{r} \end{aligned} \quad (2)$$

em que X e Y são as componentes das segundo os eixos baricêntricos x e y , respectivamente, e

$$r = \dot{y} \quad (3)$$

Como a posição do centro de gravidade do navio varia com a condição de carga deste, é usual escrever as equações de movimento num referencial com origem a meio do navio e orientação igual à do referencial baricêntrico, atrás mencionado.

Sejam x_G , y_G e z_G as coordenadas do centro de gravidade do navio no novo referencial. Recordando a lei de distribuição de velocidades num corpo rígido e atendendo à simetria estibordo-bombordo, habitual em navios, o que implica $y_G = 0$, as equações de movimento vêm:

$$\begin{aligned} X &= m (\dot{u} - v r - x_G r^2) \\ Y &= m (\dot{v} + u r + x_G \dot{r}) \\ N &= I_Z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u r) \end{aligned} \quad (4)$$

Porque as equações (4) contêm termos não lineares, o que dificulta o seu posterior tratamento, e porque as trajectórias seguidas pelos navios têm, normalmente, raios de curvatura muito grandes, aquelas equações podem ser linearizadas para pequenos desvios em relação ao avanço em linha recta.

Considerando então o desenvolvimento em série de Taylor dos termos intervenientes nas equações (4) em torno daquela condição, $u = u_1$, $v = r = \dot{v} = \dot{r} = 0$, e desprezando infinitésimos de ordem superior à primeira, aquelas equações ficam na seguinte forma:

$$\begin{aligned} X &= m \dot{u} \\ Y &= m (\dot{v} + u_1 r + x_G \dot{r}) \\ N &= I_Z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + u_1 r) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2. Modelo linearizado das forças actuantes no navio

Das diversas parcelas que compõem as forças presentes nas equações (5) vão considerar-se apenas as resultantes do movimento do casco no seio do fluido, do ângulo do leme e a devida ao hélice. De facto, as restantes parcelas, devidas ao vento, às ondas e às correntes, são perturbações ao avanço normal do navio e a razão principal da necessidade de controle deste.

Escrevendo as funções que representam a relação entre as forças actuantes no navio e os parâmetros mencionados como séries de Taylor em torno do ponto correspondente ao avanço em linha recta, e considerando apenas termos de 1ª ordem, tem-se:

$$\begin{aligned} X &= X_u (u - u_1) + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_p \\ Y &= Y_v v + Y_r r + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_d d \\ N &= N_v v + N_r r + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_d d \end{aligned} \quad (6)$$

em que X_p é o eventual acréscimo de tracção a produzir pelo hélice e $Aa = A/a$ é o valor da derivada da força generalizada A (X , Y ou M) em ordem à grandeza a (u , v , r , \dot{u} , \dot{v} ou \dot{r}) na situação de equilíbrio $u = u_1$, $v = r = \dot{u} = \dot{v} = \dot{r} = \mathbf{d} = 0$. Na derivação destas expressões levou-se em consideração a simetria estibordo-bombordo do navio. Daí a ausência de termos dependentes de u na força segundo y e do momento segundo z , e de termos com u ou v na expressão da força segundo x . É também aquela simetria que leva à inexistência de força segundo y e momento segundo z quando o navio se desloca em linha recta.

2.3. Modelo do sistema

Viu-se no ponto anterior que as variáveis que regem a dinâmica do navio são as componentes da velocidade segundo cada uma das coordenadas, u , v e r . Porque a escrita da equação de movimento relativa à força segundo a coordenada x fica mais simples, u passa a representar o acréscimo na velocidade de avanço em relação à pretendida. As variáveis de controle do sistema são o ângulo do leme e a força de tracção produzida pelo hélice, enquanto as variáveis de saída, ou de avaliação do desempenho do sistema, são o afastamento do centro de gravidade do navio em relação à trajectória pretendida e o acréscimo de velocidade de avanço.

Para simplificar a escrita das equações, considera-se que a trajectória rectilínea a seguir pelo navio coincide com o eixo $0x_b$. Nesse caso o afastamento em relação à trajectória desejada é igual a y_b . Esta coordenada é também incluída nas variáveis do sistema sendo a respectiva equação de definição, linearizada, dada por

$$\dot{y}_b = u_1 y + v \quad (7)$$

Em resumo, para modelar o sistema definem-se os seguintes conjuntos de variáveis:

- internas (\mathbf{x})

$$[u, v, r, y, y_b]^T$$

- de controle (\mathbf{m})

$$[d, X_p]^T$$

- de saída (\mathbf{m})

$$[y_b, u]^T$$

Uma abordagem conveniente, para estudar a resposta transiente do sistema, é a utilização da transformada de Laplace. Assim, introduzindo as definições das forças linearizadas, equações (6), nas equações de movimento linearizadas, equações (5), e aplicando transformadas de Laplace às equações resultantes, bem como às equações de definição de r e de \dot{y}_b , equações (3) e (7), respectivamente, resulta o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}(s) & \mathbf{U}(s) \\ -\mathbf{V}(s) & \mathbf{W}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}} \\ -\bar{\mathbf{m}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\bar{\mathbf{m}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

em que $\mathbf{T}(s)$, $\mathbf{U}(s)$, $\mathbf{V}(s)$ e $\mathbf{W}(s)$ são matrizes de polinómios na variável complexa s da transformada de Laplace e $\bar{\mathbf{x}}$, $\bar{\mathbf{m}}$ e $\bar{\mathbf{m}}$ as transformadas de Laplace dos vectores atrás indicados. Assim

$$\begin{bmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 & X_d & 1 \\ 0 & B & C & 0 & 0 & Y_d & 0 \\ 0 & D & E & 0 & 0 & N_d & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -u_1 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{r} \\ \bar{y} \\ \bar{y}_b \\ \bar{d} \\ \bar{X}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\bar{y}_b \\ -\bar{u} \end{bmatrix} \quad (9)$$

em que

$$A = (m - X_u) s - X_v$$

$$B = (m - Y_v) s - Y_r$$

$$C = (m x_G - Y_r) s + m u_1 - Y_r$$

$$D = (m x_G - N_v) s - N_v$$

$$E = (I_z - N_r) s + m x_G u_1 - N_r$$

Partindo da descrição do sistema pela equação (8) é possível obter a matriz de transferência entre o vector controle $\bar{\mathbf{u}}$ e o vector das saídas $\bar{\mathbf{y}}$, isto é, a transformada de Laplace das variáveis y_b e u quando o controle do navio, $\bar{\mathbf{d}}$ ou X_p , é aplicado de forma impulsiva (ou pode ser descrito pela distribuição delta de Dirac, $\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{1}$):

$$\bar{\mathbf{y}} = \mathbf{G}(s) \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{G}(s) \mathbf{1} = \mathbf{G}(s) \quad (10)$$

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{V}(s) \mathbf{T}(s)^{-1} \mathbf{U}(s) \quad (11)$$

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{Y_d (Es + Du_1) - N_d (Cs + Bu_1)}{(EB - CD) s^2} & 0 \\ \frac{1}{A} X_d & \frac{1}{A} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Da observação da matriz de transferência verifica-se que o afastamento da trajectória não depende da tracção produzida pelo hélice, enquanto o acréscimo de velocidade depende daquela variável de controle e do ângulo do leme. Existe, portanto, acoplamento entre o afastamento e a velocidade. Contudo, não é difícil verificar que, se em vez das variáveis de controle consideradas, se utilizarem outras, definidas da seguinte forma

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{d}} \\ \bar{X}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -X_d & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{d}} \\ \bar{F} \end{bmatrix} \quad (13)$$

as equações que regem o sistema ficam desacopladas, resultando então a matriz de transferência

$$\begin{bmatrix} \bar{y}_b \\ \bar{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_d (Es + Du_1) - N_d (Cs + Bu_1)}{(EB - CD) s^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{d}} \\ \bar{F} \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.4. Análise de estabilidade do sistema

A equação (14) mostra que uma vez conhecidas a forma como as variáveis de controle variam no tempo, é possível determinar a forma como variam no tempo as variáveis de saída (após a aplicação da transformada de Laplace e da sua inversa às funções adequadas). Nada é dito

naquela equação acerca da forma mais adequada de controlar o sistema, isto é, que valores atribuir às variáveis de controle em função dos desvios observados nas variáveis de saída em relação aos valores desejáveis.

A análise da resposta do sistema original para aplicações impulsivas das variáveis de controle (a chamada análise de estabilidade em anel aberto) pode fornecer algumas indicações acerca do comportamento do sistema bem como informação preciosa para a escolha do tipo de controle a aplicar ao sistema (isto é, como atribuir valores às variáveis de controle).

Estabilidade em anel aberto

Com o desacoplamento do sistema, a análise da estabilidade fica muito simplificada pois pode considerar-se que o sistema em estudo é composto por dois sistemas independentes cujas funções de transferência são os elementos da diagonal da matriz de transferência na equação (14). Assim, basta averiguar a localização dos pólos de cada um dos elementos daquela matriz.

Quanto à função de transferência entre a variável F e o acréscimo de velocidade u , verifica-se que ela tem um zero no semi-plano complexo esquerdo. De facto,

$$\bar{u} = \frac{1}{A} F = \frac{1}{(m - X_{\dot{u}}) s - X_u} F \quad (15)$$

Ora tanto $X_{\dot{u}}$ como X_u são sempre negativos pelo que o pólo da função de transferência, em $s = X_u / (m - X_{\dot{u}})$ se situa sempre no semi-plano complexo esquerdo. Significa isto que um acréscimo de velocidade provocado por uma variação impulsiva da variável F desaparecerá com o tempo, voltando o navio a deslocar-se com a velocidade u_r .

No que se refere à variável y_b não faz muito sentido uma análise de estabilidade. De facto, uma vez afastado o navio da rota inicial por uma variação impulsiva do ângulo do leme, dada a inexistência de forças de restituição de posição no plano horizontal, não é muito razoável esperar que o navio volte à rota inicial. Tal pode verificar-se analisando a função de transferência respectiva. Admitindo a inexistência de zeros na origem, o pólo duplo aí localizado é responsável pelo crescimento contínuo da função resposta a impulso.

É em relação à velocidade segundo y_b , ou melhor, ao rumo da trajectória do navio, que é pertinente uma análise de estabilidade. Quando o navio possui a chamada “estabilidade em linha recta”, depois de desviado do seu rumo por um movimento impulsivo do leme, o navio volta deslocar-se em linha recta, embora com outro rumo. Isto traduz-se numa velocidade constante segundo y_b . De novo, a análise da função de transferência, agora entre a velocidade segundo y_b , $\bar{y}_b = s \bar{y}_b$, e o ângulo do leme, \bar{d} , corrobora esta afirmação:

$$s \bar{y}_b = \frac{Y_d (Es + Du_1) - N_d (Cs + Bu_1)}{(EB - CD) s} \bar{d} \quad (16)$$

O pólo simples na origem faz com que a resposta a impulso contenha uma função degrau. A aproximação assintótica a essa função depende da localização dos outros pólos da função de transferência.

Para que a velocidade segundo y_b convirja para um valor constante, e o navio possua “estabilidade em linha recta”, as raízes de $EB - CD = 0$ devem estar localizadas no semi-plano complexo esquerdo.

$$EB - CD = a_0 s^2 + a_1 s + a_2 = 0 \quad (17)$$

com

$$a_0 = (I_z - N_r) (m - Y_{\dot{v}}) - (Y_r - m x_G) (N_{\dot{v}} - m x_G)$$

$$a_1 = -(I_z - N_r) Y_v - (m - Y_{\dot{v}}) (N_r - m x_G u_1) +$$

$$-(Y_r - m u_1) (N_{\dot{v}} - m x_G) - (Y_{\dot{r}} - m x_G) N_v$$

$$a_2 = Y_v (N_r - m x_G u_1) - (Y_r - m u_1) N_v$$

As raízes da equação (17) estão no semi-plano complexo esquerdo quando

$$a_1 / a_0 > 0$$

$$a_2 / a_0 > 0 \quad (18)$$

Atendendo às definições de $Y_{\dot{v}}$ e de $N_{\dot{r}}$ e à geometria habitual dos navios, não é difícil concluir que coeficientes $Y_{\dot{v}}$ e $N_{\dot{r}}$ terão sempre valores negativos. De igual forma, pode afirmar-se

$$|Y_{\dot{v}}| \gg |Y_{\dot{r}}|$$

$$|Y_v| \gg |Y_r|$$

$$|N_{\dot{r}}| \gg |N_{\dot{v}}|$$

$$|N_r| \gg |N_v|$$

Estas propriedades, aliadas à curta distância entre o centro de gravidade e o meio do navio, permitem concluir que os coeficientes a_0 e a_1 são sempre positivos, resumindo-se então a condição de estabilidade em linha recta a

$$a_2 > 0$$

ou seja

$$Y_v (N_r - m x_G u_1) - (Y_r - m u_1) N_v > 0 \quad (19)$$

Importa chamar a atenção para o facto de que se o navio não tiver estabilidade de linha recta será muito difícil o seu controle de posição, pois qualquer ângulo do leme pode dar origem a desvios de amplitude crescente.

Se o navio tiver estabilidade de linha recta e as raízes da equação (17) forem complexas conjugadas, isto é, se

$$a_1^2 < 4 a_2 a_0$$

então, depois de uma variação impulsiva do ângulo do leme, a velocidade do navio segundo y_b apresentará um comportamento oscilatório em torno do valor final, decrescendo com o tempo a amplitude dessa oscilação. Se as raízes da equação (17) forem reais a velocidade do navio segundo y_b decai, exponencialmente, para o valor final, sem oscilar.

Análise de estabilidade de anel fechado

O processo de controle consiste na avaliação da diferença (ou erro) entre o valor de referência pretendido e o valor obtido na variável de saída. Dependendo do erro, assim se atribui um valor à variável de controle. O objectivo é a redução do erro. Contudo, o sistema formado pelo controlador e pelo sistema original pode ser instável. Daí a necessidade de analisar a estabilidade do sistema controlado, também designada por análise de anel fechado.

Na figura 2 representa-se o diagrama de blocos do sistema controlado e que é válido quer para o controle da velocidade, quer da posição do navio. A entrada do sistema controlado é o valor pretendido, n_0 , da velocidade, ou da posição, e a saída é o valor obtido, n .

Na análise de estabilidade do sistema controlado considerou-se que o elemento de medida, necessário para a avaliação do erro, tem função de transferência unitária. Assumiu-se, primeiramente, que o controle exercido no navio era apenas proporcional ao erro, verificando-se quais os valores da constante de proporcionalidade, também designada por ganho, que tornam o sistema controlado estável.

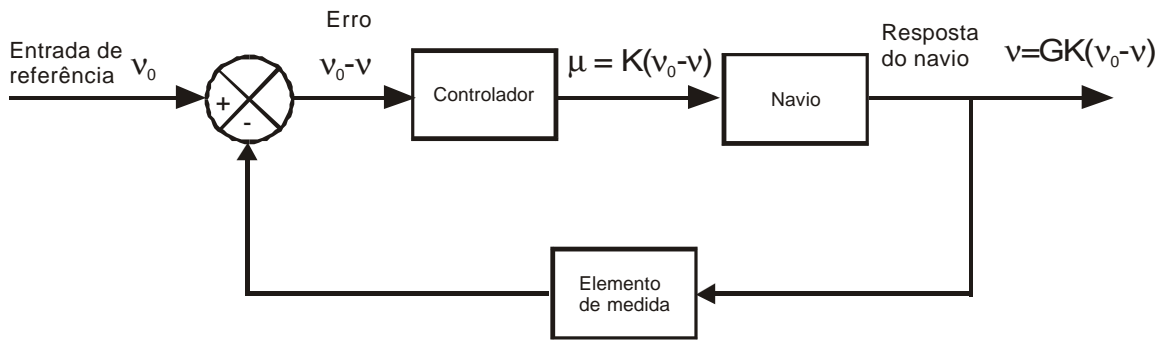


Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema controlado

Seja G a função de transferência entre o controle m e a saída n , para a velocidade ou posição, (isto é um dos elementos da diagonal principal da matriz de transferência \mathbf{G}) e K o ganho do controlador. A função de transferência do sistema controlado, Q , é dada por

$$Q = \frac{K G}{1 + K G} \quad (20)$$

O sistema é estável quando as raízes do denominador, pólos de Q , estão no semi-plano complexo esquerdo.

No caso do controle de velocidade a entrada de referência é o acréscimo de velocidade pretendido e a saída o acréscimo de velocidade obtido. É fácil verificar que, qualquer que seja o valor de $K > 0$, a raiz do denominador é sempre negativa.

$$1 + K G = 1 + K \frac{1}{(m - X_{\dot{u}}) s - X_u} = 0 \quad (21)$$

$$s = \frac{-K + X_u}{m - X_{\dot{u}}} \quad (22)$$

Como se viu atrás, $X_{\dot{u}}$ e X_u são sempre negativos, logo o sistema com controle de velocidade é sempre estável, qualquer que seja o valor positivo do ganho K .

Quanto ao controle de posição, em que a entrada é o desvio transversal pretendido para o navio e a saída o desvio obtido, importa conhecer a posição relativa dos zeros e dos pólos da função de transferência, G , do sistema não controlado, entre o ângulo do leme e o desvio obtido. Com essa informação será possível esboçar o gráfico do lugar das raízes da função de transferência do sistema controlado, Ogata (1985) e verificar, assim, se para algum valor do ganho o sistema controlado é estável.

O numerador da função de transferência G pode escrever-se

$$Y_d (Es + Du_1) - N_d (Cs + Bu_1) = b_0 s^2 + b_1 s + b_2 = 0 \quad (23)$$

com

$$b_0 = Y_d (I_z - N_{\dot{r}}) - N_d (m x_G - Y_{\dot{r}})$$

$$b_1 = Y_d (2 m x_G u_1 - N_r - N_{\dot{v}} u_1) - N_d (2 m u_1 - Y_r - Y_{\dot{v}} u_1)$$

$$b_2 = Y_d N_v u_1 + N_d Y_v u_1$$

De forma análoga ao ocorrido com os pólos da função de transferência entre o ângulo do leme e a velocidade segundo y_b , equação (16), e atendendo ao sinal de Y_d (sempre positivo) e a

$N_d = -Y_d L_{pp} / 2$, sendo L_{pp} o comprimento entre perpendiculares do navio, mostra-se facilmente que as raízes da equação (23) estão sempre no semi-plano complexo esquerdo.

Em resumo, o sistema não controlado, ou em anel aberto, tem dois pólos na origem, dois zeros no semi-plano esquerdo e pelo menos um pólo no mesmo semi-plano.

Embora em algumas combinações de zeros e pólos o gráfico do lugar das raízes do sistema controlado esteja todo no semi-plano esquerdo, o que implicaria a estabilidade do sistema com o controle de posição para qualquer valor do ganho K , nas restantes combinações aquele gráfico possui dois “ramos” no semi-plano direito, o que significa que para alguns valores do ganho K o sistema controlado seria instável. Nesses casos o controle proporcional não é o mais adequado.

Deverá, então, utilizar-se um controle do tipo “proporcional mais derivativo”. Tal corresponde a adicionar um zero à função de transferência do sistema controlado. Este zero deve localizar-se no semi-plano esquerdo, pois caso contrário ele iria contribuir apenas para a instabilidade do sistema controlado.

2.5. O controle implementado

Tendo em conta o objectivo de comparação das soluções propostas para o traçado do canal de acesso ao estuário do Douro, optou-se pelo controle do modelo numérico SIMNAV por um piloto automático. Controlou-se a posição do navio mas não a velocidade de avanço. Esta era a que resultava de manter constante, durante toda a viagem, o momento disponível no veio da máquina. Utilizou-se um controle do tipo “proporcional+derivativo”. Isto é, o ângulo do leme a utilizar em cada instante depende do desvio entre o centro de gravidade do navio e a trajectória ideal, observado nesse instante, bem como da taxa de variação desse desvio observada no mesmo instante. Uma vez seleccionadas as constantes de proporcionalidade para o erro e para a velocidade do erro, elas mantêm-se durante toda a viagem.

O eixo do traçado definido por cada um dos concorrentes constituía a trajectória ideal a seguir pelo navio, tendo-se discretizado esse eixo num número suficiente de segmentos de recta por forma que o erro associado a essa discretização não ultrapassasse 0.5 m.

Para evitar os problemas numéricos associados à avaliação da velocidade do desvio decidiu-se calcular o mesmo desvio entre o navio e o eixo do canal mas, em vez de ser no instante presente, N passos de cálculo a partir deste instante. Neste caso, o ângulo do leme a aplicar é proporcional àquele desvio, K é a constante de proporcionalidade. Uma vez seleccionados os valores de N e de K , eles mantêm-se durante toda a viagem.

3. A TRAVESSIA DA BARRA DO DOURO

O Instituto de Navegabilidade do Douro (IND) solicitou ao LNEC a realização de um estudo comparativo, do ponto de vista da navegação, das soluções propostas pelos agrupamentos concorrentes ao Concurso Público Internacional de Concepção, Projecto e Construção das Obras Necessárias à Melhoria das Acessibilidades e das Condições de Segurança na Barra do Douro para o traçado do canal navegável no trecho da foz do Rio Douro.

Para a comparação das soluções propostas, do ponto de vista da navegação, definiram-se dois cenários de teste correspondentes a duas situações de maré nas quais actuava também um estado de agitação marítima de características ao largo conhecidas. Nesses cenários, os mesmos para todas as configurações a testar, o mesmo navio, o navio - tipo, efectuava as travessias da barra no sentido da entrada e da saída do estuário.

Os dados necessários à definição dos cenários de teste, níveis e correntes de maré e ondas foram enviados pelos vários consórcios concorrentes. Dos sete concorrentes admitidos a concurso, apenas do concorrente 3 não foram recebidos os dados necessários. Daí a inexistência de qualquer referência a este concorrente no resto da comunicação.

3.1. O Navio-tipo

O navio - tipo utilizado foi o HERM J cujas dimensões principais são:

Comprimento: 84 m

Boca: 13 m

Calado: 5 m

e que são muito semelhantes às do navio de projecto definido no Caderno de Encargos do concurso:

Comprimento: 90 m

Boca: 12 m

Calado: 4 m

A escolha deste navio permitiu reduzir consideravelmente a duração do estudo pois evitou o problema da procura e definição dos dados do navio de projecto necessários ao funcionamento do modelo numérico SIMNAV (caracterização do casco, do leme e outros apêndices, do hélice e do motor) uma vez que todos esses dados já existiam no LNEC para o HERM J. Além disso, já foi verificada com o HERM J a capacidade do modelo numérico SIMNAV para simular o teste de rotação, quer para estibordo, quer para bombordo, do navio em águas profundas, na condição de lastro (calado 3.1 m), incluído nas provas de mar realizadas pelo Instituto Hidrográfico. Esta verificação estabeleceu a confiança na utilização do modelo numérico SIMNAV para simular o comportamento em manobra do HERM J com o calado de 4 m.

3.2. Geometria dos traçados propostos

Na figura 3 apresentam-se os traçados em planta dos canais propostos pelos vários concorrentes.

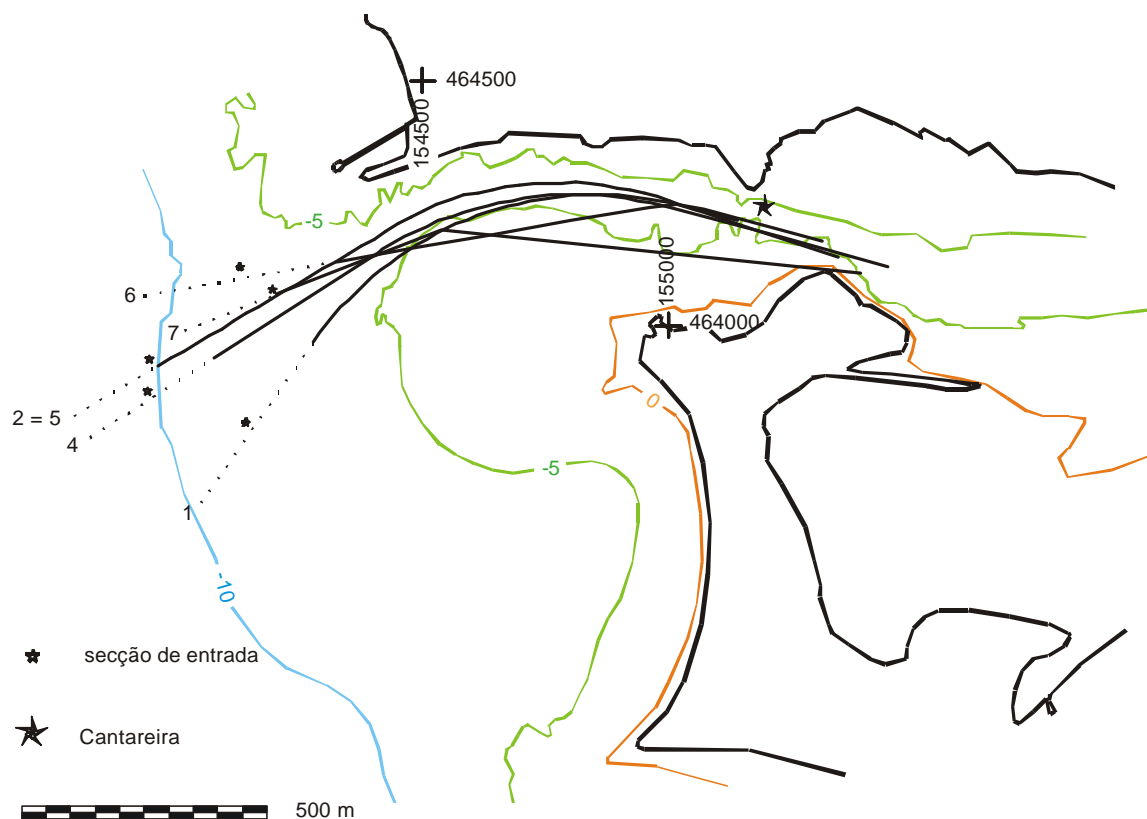


Figura 3 – Eixos dos traçados dos canais em análise

No trecho em análise, em quase todos os traçados propostos, o canal é formado por dois troços rectos unidos por uma concordância formada por um arco de circunferência. A única excepção é o traçado proposto pelo concorrente 7, que tem apenas troços rectos. A orientação do alinhamento mais exterior, para os diversos traçados propostos, varia entre N35E (concorrente 1) e E10N (concorrente 6) enquanto os valores do ângulo entre os dois alinhamentos variam entre 73° (concorrente 1) e 25° (concorrente 6). O alinhamento no interior do estuário está orientado, aproximadamente, para E15S. De novo, o traçado do concorrente 7 volta a ser excepção com um alinhamento interior orientado para E6S. Como pode observar-se na figura 3, o traçado proposto pelo concorrente 2 e o proposto pelo concorrente 5 são praticamente coincidentes.

Aparte os traçados dos concorrentes 4 e 7, a cota máxima do rasto na maioria dos traçados propostos é -5.00 m Z.H.. No traçado proposto pelo concorrente 4 aquele valor desce para -5.50 m Z.H., enquanto no do concorrente 7 desce até -6.00 m Z.H.. Os valores da largura do rasto dos vários traçados propostos variam entre 100 e 180 m, sendo constante ao longo dos traçados propostos pelos concorrentes 2, 6 e 7 e variável nos restantes.

Apesar das diferenças naturais entre os traçados propostos por cada um dos concorrentes, procurou-se que o trajecto em análise tivesse características semelhantes. Assim, todas as viagens decorreram entre uma secção afastada cerca de 200 m da extremidade do quebra-mar mais exterior e uma secção frente à Cantareira. Como os traçados definidos por alguns concorrentes não cobrem toda a zona, foi necessário prolongar para o largo o alinhamento de entrada (casos dos traçados dos concorrentes 1, 4 e 6) e até o segundo alinhamento recto, isto é, aquele que surge após a curva, (caso do traçado do concorrente 2). Estes prolongamentos foram realizados atendendo à orientação das secções extremas correspondentes. A extensão total dos trajectos entre secções inicial e final varia entre 1000 m (concorrente 7) e 1400 m (concorrentes 1 e 4).

Em todos os casos, uma vez que a trajectória ideal a seguir pelo navio coincide com o eixo do canal, para o correcto funcionamento do piloto automático foi necessário prolongar o alinhamento para além da secção de entrada. Essa a razão porque na Figura 1 se observa a continuação da linha a ponteadado, alinhamento acrescentado no âmbito deste estudo, para além da marca da secção de entrada do canal em estudo.

3.3. Ondas e correntes

Como já foi mencionado, nos cenários a testar, os mesmos para cada uma das soluções propostas pelos concorrentes, consideraram-se os efeitos da agitação marítima e das correntes de maré. As características da agitação marítima ao largo a considerar foram:

Rumo: W-10°-N,

Período de pico: 12 s,

Altura significativa: 4 m,

enquanto o nível de maré foi +2.00 m ZH, que corresponde aproximadamente ao nível médio do mar. Para caracterizar o campo de ondas actuante no navio foi solicitado aos concorrentes os valores, na zona onde o canal seria implantado, das alturas significativas e do rumo da agitação resultantes daquele estado de agitação marítima ao largo.

Quanto às correntes de maré, cujos efeitos foram sobrepostos aos das ondas, os instantes de maré considerados foram a meia vazante e a meia enchente. Por sugestão do Instituto de Navegabilidade do Douro, foi incluído também o efeito de um caudal fluvial de 420 m³/s. Aparentemente, só o concorrente 4 não terá considerado este valor para o caudal fluvial mas apenas 250 m³/s.

Os pontos de definição do campo de correntes provocado pela maré, bem como da elevação da superfície livre associada, são os mesmos da caracterização do campo de ondas.

Todos os dados necessários à caracterização dos campos de ondas e correntes na zona em estudo foram fornecidos pelos consórcios concorrentes e resultaram dos modelos matemáticos utilizados por esses concorrentes. Pese embora o objectivo original de obter situações de teste comparáveis, as diferenças entre os modelos numéricos empregues pelos diversos concorrentes, bem como as dimensões das malhas empregues na discretização do domínio em estudo e até os próprios dados desses modelos (aparentemente, nem todos os concorrentes utilizaram a mesma batimetria para a situação de referência) tornam a validade da comparação de traçados efectuada bastante discutível. Na ausência de melhor informação, assumiu-se que a caracterização das situações de teste fornecida pelos concorrentes foi a mais correcta possível, não tendo sido realizada qualquer análise à qualidade dos dados de correntes fornecidos pelos vários concorrentes.

No que se refere à cobertura da zona em estudo, isto é, ao número de pontos na zona em estudo nos quais foram fornecidos os valores pretendidos dos campos de ondas e correntes pode afirmar-se que:

- os pontos utilizados pelo concorrente 2 não cobrem a totalidade da zona em estudo, como pode observar-se na figura 4, com o campo de vectores cujo módulo representa a altura significativa do estado de agitação no ponto em causa e cujo sentido é o do vector número de onda da direcção média. Por essa razão os resultados obtidos com o modelo SIMNAV para o traçado proposto por este concorrente devem ser interpretados com algumas reservas.
- O concorrente 4 utiliza mais pontos que o concorrente 2, mas continua a ser uma descrição muito sucinta, pois limita-se a seis pontos próximo do eixo do canal por si definido. É o que pode observar-se na figura 5 com o mesmo campo de vectores da figura 4. De notar que este concorrente levou em conta o efeito das correntes de maré na propagação das ondas. A situação representada na figura 5 corresponde a meia enchente.
- Os restantes concorrentes têm uma cobertura bastante razoável, No caso dos concorrentes 1 e 6 a cobertura era tão densa que se utilizou no modelo SIMNAV apenas um subconjunto dessas malhas: fiadas de três pontos (um próximo do eixo do canal e os outros próximo das extremidades da secção do rasto do canal) espaçadas cerca de 150 m. Na figura 6 pode observar-se o campo de velocidades do escoamento provocado pela maré na situação de meia vazante correspondente à configuração proposta pelo concorrente 1.

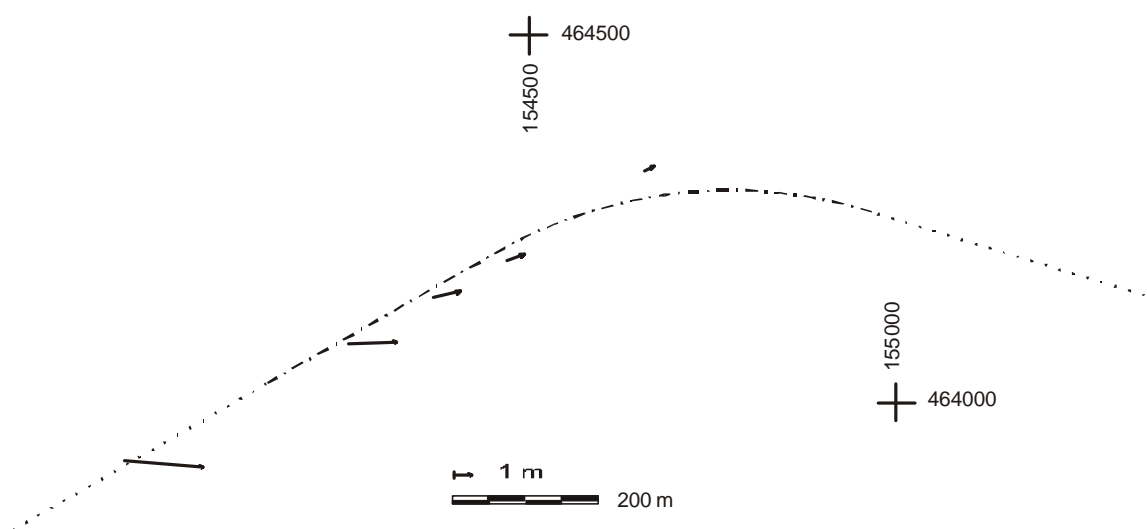


Figura 4 – Campo de ondas na zona em estudo correspondente à configuração proposta pelo concorrente 2. Características ao largo: Rumo W-10-N; Período de pico 12 s; Altura significativa 4.0 m. Nível médio +2.00 m ZH.

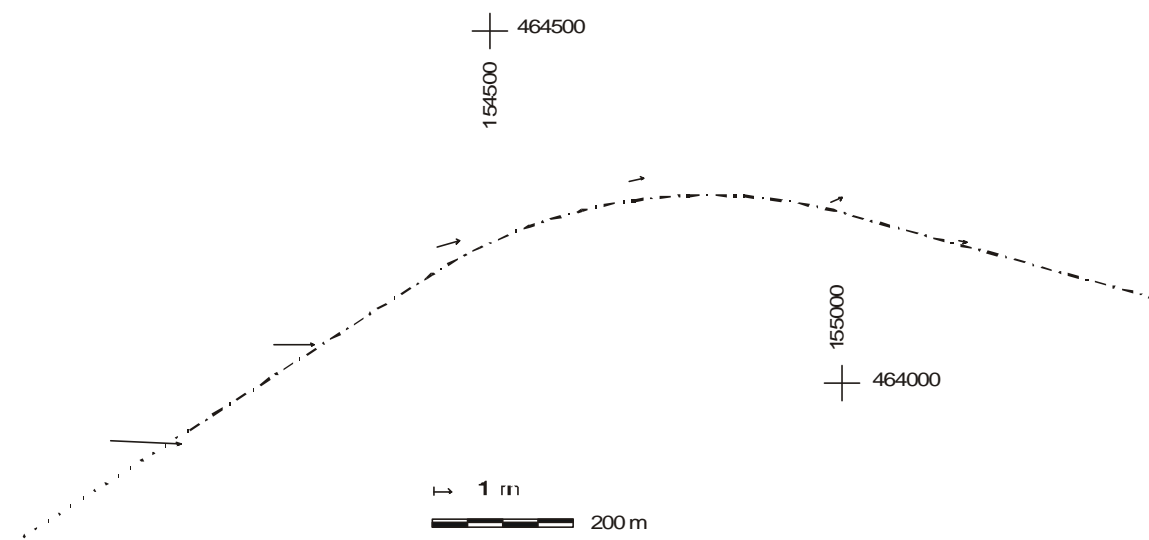


Figura 5 - Campo de ondas na zona em estudo correspondente à configuração proposta pelo concorrente 4. Características ao largo: Rumo W-10-N; Período de pico 12 s; Altura significativa 4.0 m. Nível de maré Meia enchente.

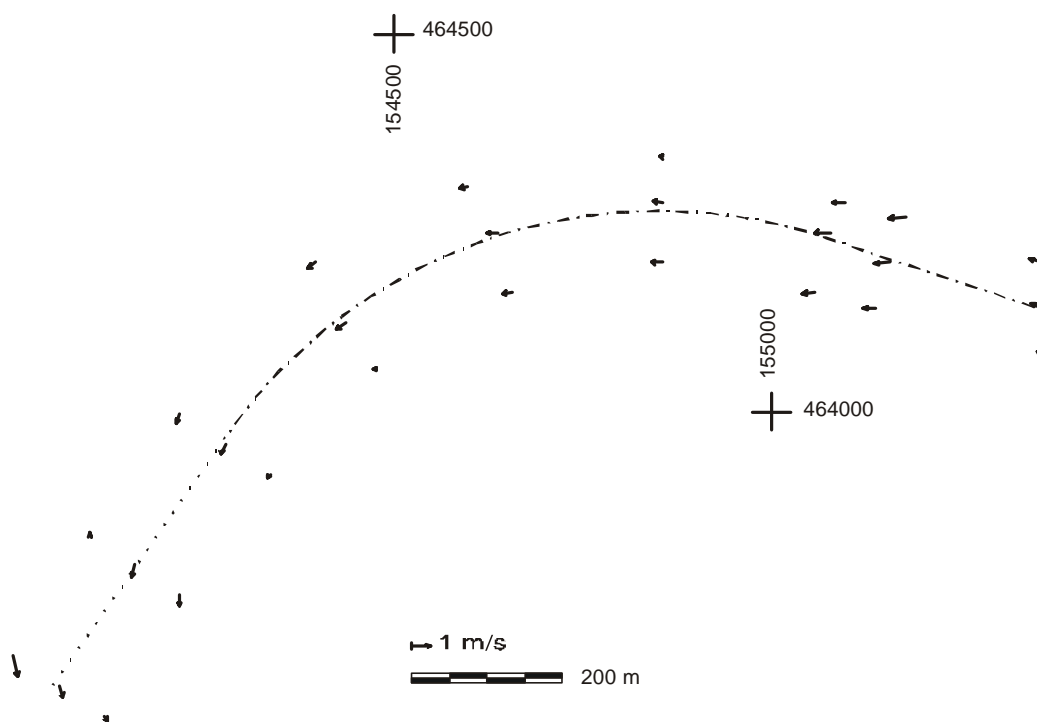


Figura 6 - Velocidade do escoamento provocado pela maré na zona em estudo na situação de meia vazante correspondente à configuração proposta pelo concorrente 1. Caudal fluvial de 420 m³/s.

Na fase de ensaio do piloto automático verificou-se que, devido à pouca profundidade da zona em que o navio se desloca, os valores da força horizontal e do momento de deriva provocados pela ação da agitação marítima incidente eram muito elevados, em alguns casos até, substancialmente superiores à resistência ao avanço do navio. De facto, nas viagens de entrada, por exemplo, a onda empurrava literalmente o navio e o tipo de controle considerado

no modelo SIMNAV deixava de ser válido. Como a força de deriva é proporcional ao quadrado da altura da onda incidente no navio e porque o objectivo do estudo é o de comparar traçados propostos, decidiu-se utilizar estados de agitação marítima com o mesmo período de pico e rumo ao largo mas com alturas significativas mais baixas. Em primeira aproximação, considerou-se válida a hipótese de linearidade da resposta da zona em estudo à acção das ondas e utilizaram-se os resultados fornecidos pelos concorrentes para estados de agitação com 4.0 m de altura significativa devidamente escalados para alturas significativas inferiores, 1.0 e 2.0 m.

3.4. Metodologia empregue

Em qualquer das situações de teste definidas (combinação de instante de maré + caudal fluvial + ondas) foram realizadas viagens de travessia da zona em estudo no sentido de entrada e no de saída.

As viagens de entrada começavam na “secção de entrada” do canal, que dista cerca de 200 m para o largo da cabeça do quebra-mar mais exterior, e terminavam em frente à rampa da Cantareira. Nas viagens de saída tinham as mesmas secções limite mas por ordem inversa. Em qualquer dos casos, as viagens iniciavam-se com o navio alinhado com o eixo do canal deslocando-se com uma velocidade de 10 nós em relação a terra.

O intervalo entre os instantes de cálculo da cinemática do navio com o modelo SIMNAV foi de 6 s. Em cada um desses instantes de cálculo eram guardados os valores da posição e rumo do navio, bem como os da velocidade deste, do ângulo do leme e da velocidade de rotação do hélice.

Embora o piloto automático possa ter um comportamento diferente de um piloto real, os valores de N e K utilizados como parâmetros do controlador em cada viagem podem ser um indicador da dificuldade da manobra nessa mesma viagem. Com efeito, um valor elevado de K significa que é necessário variar depressa o ângulo do leme para manter o navio na trajectória pretendida. De forma semelhante, um valor elevado de N significa que não basta ter uma ideia da trajectória descrita pelo navio num curto intervalo de tempo, o que indicará alguma dificuldade de manobra.

Isto não significa que o crescimento indefinido do intervalo de previsão leve a uma manobra mais adequada no instante presente. Não será difícil intuir que, para cada situação de teste, deve existir um par de constantes (N, K) do piloto automático com o qual se obtém o menor desvio máximo entre o navio e a trajectória ideal. Assim, uma abordagem possível seria o varrimento sistemático do espaço (N, K) por forma a encontrar o par de parâmetros de controle óptimo para cada situação de teste e configuração, isto é, para o qual fosse mínima a distância máxima, observada em cada viagem, entre o navio e a trajectória ideal.

Contudo, havia sempre o risco de não se encontrar o mínimo devido à escolha do passo para o varrimento do parâmetro K . Decidiu-se, por isso, analisar a resposta do modelo para uma aplicação do controlo apenas quando a distância prevista ao eixo do canal fosse superior a 10 m. Esperava-se com este tipo de aplicação do controlo obter um comportamento semelhante ao de um piloto real que só deve preocupar-se com a correcção da manobra do navio ao aperceber-se da possibilidade de um desvio razoável entre o navio e a trajectória desejável. Do varrimento sistemático do espaço (N, K), N variando entre 2 e 15 e K entre 0.5 e 10, com um passo de 0.5, verificou-se que, em cada situação de teste e para cada valor de N , ocorria sempre a saturação da distância máxima ao eixo do canal. Isso corresponde à limitação da variação do ângulo do leme pela velocidade máxima de rotação do mesmo.

Isto é, em vez de o navio ser controlado por um piloto muito sensível aos desvios esperados em relação à trajectória desejada e muito cuidadoso com a rotação do leme, o piloto automático só controla o navio quando o desvio esperado ultrapassa um determinado limite e, quando tal acontece, varia o ângulo do leme com a velocidade máxima possível. Assim, em vez de se procurar o par (N, K) que produz o controle óptimo do navio, basta procurar o valor de N para o qual a distância máxima de saturação é mínima.

Para avaliar a influência da geometria dos traçados propostos realizaram-se testes primeiro na situação de água parada, isto é sem ondas ou correntes, depois introduziram-se os efeitos provocados pela corrente de maré e pelo caudal fluvial, e finalmente acrescentaram-se os efeitos das ondas de 1.0 e 2.0 m.

3.5. Análise de resultados

No Quadro 1 apresentam-se os intervalos da distância máxima à trajectória ideal (em metros) observada em cada viagem considerados para a classificação dos traçados em estudo. No mesmo quadro apresenta-se também a pontuação associada a cada classificação.

Quadro 1 – Intervalos para classificação das viagens com o piloto automático.

Intervalo (m)	Classificação	Pontuação
[0 ; 2]	Muito bom	4
] 2 ; 5]	Bom	3
] 5 ; 10]	Suficiente	2
] 10 ; 15]	Medíocre	1
] 15 ; + [Mau	0

Utilizando os intervalos anteriores é possível classificar os traçados em análise de acordo com as distâncias obtidas em cada situação de teste. No Quadro 2 apresentam-se as classificações das viagens de entrada, enquanto o Quadro 3 diz respeito às viagens de saída.

Quadro 2 – Classificação das viagens de entrada.

concorrente	1	2	4	5	6	7
água parada	Bom	Bom	Bom	Suficiente	Bom	Suficiente
meia enchente	Suficiente	Bom	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente
meia enchente + ondas 1 m	Suficiente	Bom	Bom	Bom	Bom	Suficiente
meia enchente + ondas 2 m	Medíocre	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Bom	Medíocre
meia vazante	Suficiente	Bom	Suficiente	Bom	Bom	Suficiente
meia vazante + ondas 1 m	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Bom	Suficiente	Medíocre
meia vazante + ondas 2 m	Medíocre	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente

Dos quadros pode concluir-se que:

- a) Com os parâmetros de “saturação” do piloto automático podem obter-se distâncias ao eixo do canal muito pequenas. O navio nunca se aproximaria dos limites do rasto do canal. Isso significa que o piloto automático utilizado deve ser substancialmente melhor que a maioria dos pilotos humanos que são expectáveis naquele canal. Isto é, os resultados agora apresentados podem ser úteis para classificar os traçados propostos mas não devem ser utilizados para garantir a segurança da navegação nos mesmos traçados.

Quadro 3 – Classificação das viagens de saída.

concorrente	1	2	4	5	6	7
água parada	Bom	Bom	Suficiente	Bom	Bom	Suficiente
meia enchente	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente
meia enchente + ondas 1 m	Bom	Suficiente	Suficiente	Bom	Suficiente	Suficiente
meia enchente + ondas 2 m	Bom	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Medíocre
meia vazante	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Bom	Suficiente	Suficiente
meia vazante + ondas 1 m	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Bom	Suficiente	Suficiente
meia vazante + ondas 2 m	Suficiente	Suficiente	Suficiente	Bom	Suficiente	Suficiente

- b) As viagens de entrada são em geral piores do que as de saída. Tal pode dever-se ao facto de ambas serem iniciadas com a mesma velocidade em relação a terra. Ora como na viagem de saída a profundidade inicial é inferior à da viagem de entrada a resistência ao avanço no início daquela viagem é superior à do início das viagens de entrada. Isso implica maior momento no veio da máquina, logo maior velocidade e melhor manobrabilidade no fim da viagem onde as profundidades devem ser maiores. Nas viagens de entrada passa-se exactamente o contrário.

Importa recordar que a caracterização dos campos de ondas e correntes efectuada pelo concorrente 2 não cobre a totalidade da zona em estudo pelo que os resultados obtidos devem ser tomados com algumas reservas.

Somando as pontuações das viagens de entrada e de saída em cada uma das situações de teste obtém-se o Quadro 4.

Quadro 4 – Pontuação das viagens de entrada e de saída.

concorrente	1	2	4	5	6	7
água parada	6.0	6.0	5.0	5.0	6.0	4.0
Apenas correntes de maré	8.0	10.0	8.0	10.0	9.0	8.0
meia maré + ondas 2 m	7.0	8.0	8.0	9.0	9.0	6.0
meia maré + ondas	16.0	17.0	17.0	21.0	18.0	13.0

As diferenças na ordem de grandeza das pontuações das quatro categorias de situações consideradas devem-se ao número de testes contidos em cada categoria. Assim, para a “água parada” tem-se apenas dois testes (a viagem de entrada e a de saída), nas “apenas correntes de maré” adicionaram-se as pontuações obtidas nas viagens de entrada e de saída nas situações de meia vazante e meia enchente (quatro testes), na “meia maré + ondas 2 m” adicionaram-se as pontuações das viagens com correntes de maré e ondas de 2 m apenas (quatro testes) e na “meia maré + ondas” adicionaram-se as pontuações das viagens com correntes e ondas de 1 m e das com correntes e ondas de 2 m (oito testes).

Importa referir que os maus resultados do concorrente 7 (mesmo na situação de água parada tem uma grande distância à trajectória ideal) podem dever-se ao facto de o canal deste concorrente ter sido definido por troços rectos apenas. É fácil verificar na Figura 7 que a distância à trajectória ideal, coincidente com o traçado do eixo do canal, tem o máximo na zona do vértice onde os dois alinhamentos rectos se encontram.

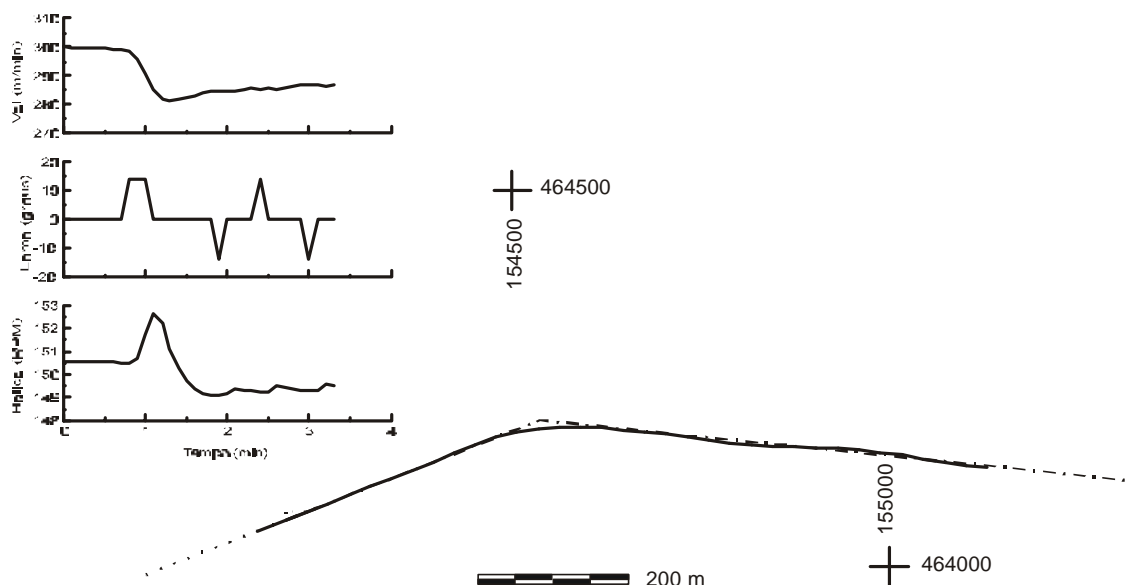


Figura 7 - Viagem de entrada no traçado proposto pelo concorrente 7. Água parada. Nível médio do mar +2.0 m Z.H..

4. CONCLUSÕES

Apresentou-se nesta comunicação o piloto automático implementado no modelo numérico de comportamento de navios em manobra, desenvolvido no LNEC. Utilizou-se um controle do tipo “proporcional+derivativo”. Isto é, o ângulo do leme a utilizar em cada instante depende do desvio entre o centro de gravidade do navio e a trajectória ideal, observado nesse instante, bem como da taxa de variação desse desvio observada no mesmo instante.

Apresentaram-se, também, os resultados da utilização daquele modelo numérico com um controle daquele tipo na análise de seis traçados propostos para a travessia da barra do Douro. Varreu-se o espaço das variáveis de controle de forma sistemática por forma a determinarem-se os pares daquelas variáveis onde se iniciava a saturação do “desvio entre o navio e a trajectória ideal” ao longo de toda a viagem com menor valor.

Dos resultados obtidos pode concluir-se que os “melhores” parâmetros do piloto automático podem levar a distâncias ao eixo do canal muito pequenas. Observou-se que o navio-tipo nunca se aproximaria dos limites do rasto do canal em qualquer dos traçados propostos. Isso significa que o piloto automático utilizado deve ser substancialmente melhor que a maioria dos pilotos humanos que são expectáveis naquele canal. Isto, é os resultados agora apresentados podem ser úteis para classificar os traçados propostos mas não devem ser utilizados para garantir a segurança da navegação nos mesmos traçados.

AGRADECIMENTO

Os autores expressam a sua gratidão ao Instituto de Navegabilidade do Douro pela autorização concedida para a divulgação dos resultados do estudo para ele realizado.

REFERÊNCIAS

Ogata, K. (1985) *Teoria de controle moderno*. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro.

Santos, J.A. (1991) *O acesso marítimo aos portos. Simulação numérica das manobras do navio*. Trabalho de síntese apresentado a concurso para acesso à categoria de Assistente de Investigação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. LNEC, Lisboa.