

MEDIÇÕES DE FORÇAS E CAMPOS DE VELOCIDADES EM SISTEMAS DE PROPULSÃO DE NAVIOS Forces and Velocity Measurements in Ship Propulsion Systems

JOÃO PEDRO PÊGO ⁽¹⁾ & RODRIGO MAIA ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dr.-Ing., FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, jppego@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

Resumo

Pod drives são modernos sistemas de propulsão de navios, do tipo fora-de-borda, cujo motor se encontra isolado da água numa cápsula (*pod*) hermética. O(s) hélice(s) estão directamente ligadas ao eixo do motor, rodando solidariamente com este. Toda a unidade está suspensa sob a ré do navio e pode girar em torno de um eixo vertical, providenciando, desta forma, o controlo da direcção do navio sem necessidade de um leme. Nas últimas décadas a propulsão do tipo *pod drive* tem-se afirmado como uma alternativa séria e fiável aos sistemas de propulsão convencionais diesel ou diesel-eléctrico, sobretudo para a categoria dos navios cruzeiros (Friesch, 2001). Os *pod drives* produzem um baixo nível de ruído e vibrações e melhoram a manobrabilidade do navio. Do ponto de vista de eficiência hidrodinâmica este tipo de propulsão apresenta desvantagens relativamente aos sistemas convencionais. Dado que a eficiência económica do navio depende largamente da eficiência do propulsor torna-se necessário melhorar este tipo de sistemas de propulsão recorrendo a soluções não convencionais.

O trabalho apresentado nesta comunicação teve como objectivo a caracterização hidrodinâmica do comportamento de *pod drives* com hélices em série. Foram estudados modelos de *pod drives* a funcionar com hélices em co- e contra-rotação. A investigação permitiu determinar a influência da geometria do *pod* para a eficiência do sistema, resultando na optimização do sistema. O escoamento na esteira dos modelos mais eficientes foi investigado recorrendo à anemometria laser Doppler.

O momento transmitido às hélices e o impulso gerado foram medidos para diferentes pontos de funcionamento das hélices, permitindo obter as curvas características de 24 modelos de *pod drives*. Os parâmetros em estudo revelaram a influência da distância entre planos de hélice, razão entre frequências de rotação e tipo de hélices (co- ou contra-rotação) para a eficiência global.

Com base nos resultados experimentais obtidos por Pêgo (2007), foi feita uma análise de balanços energéticos, visando justificar qualitativa e quantitativamente os fenómenos físicos observados e o diferente comportamento dos dois sistemas ensaiados.

Palavras-chave: Propulsão de Navios, Anemometria Laser Doppler.

Abstract

Pod drives are modern outboard ship propulsion systems with a motor encapsulated in a watertight pod. The motor's shaft is connected directly to one or two propellers. The whole unit hangs from the stern of the ship and rotates azimuthally, thus providing thrust and steering. In the past decade *pod drive* propulsion has evolved and proven to be a reliable and serious alternative to conventional ship propulsion, especially for cruiser liners (Friesch, 2001). The overall efficiency of the system is determinant for the economical success of the vessel and for this reason it is necessary to improve the efficiency of the propulsor recurring to non-conventional solutions.

Force and phase-resolved LDA measurements were performed for inline co-rotating and contra-rotating propeller *pod drive* models. The measurements permitted to characterize these ship propulsion systems in terms of their hydrodynamic performance and lead to their efficiency optimization. The most efficient co- and contra-rotating propellers were subjected to detailed study of the swirling wake flow by means of laser Doppler anemometry.

Based on the experimental work by Pêgo (2007) an analysis of energetic balance was conducted, aiming to justify qualitatively as quantitatively the physical phenomena observed and the different behavior of the studied ship propulsion systems.

Keywords: Ship Propulsion Systems, Laser Doppler Anemometry.

1. Introdução

Os avanços na optimização da eficiência de sistemas de propulsão de navios atingiram um estado de desenvolvimento que requerem a aplicação combinada e simultânea de técnicas analíticas, numéricas e experimentais. Por estas razões foi construída no túnel de água do LSTM-Erlangen (Instituto de Mecânica dos Fluidos da Universidade Erlangen-Nürnberg, Alemanha) uma instalação apropriada ao estudo do escoamento na esteira de hélices.

Esta instalação faz uso de técnicas modernas aplicadas à mecânica dos fluidos, nomeadamente uma balança de três componentes e um sistema de anemometria laser Doppler, para quantificar as forças actuantes num sistema de propulsão de navios, bem como para medir o campo de velocidades médio e turbulento nas suas imediações e esteira.

Baseado numa concepção proposta pela empresa Siemens AG, um conjunto de 24 modelos de propulsor *pod drive* foi estudado (Pêgo (2007)) usando a instalação para estudos avançados de sistemas de propulsão de navios existente no LSTM-Erlangen (Pêgo (2005)).

O programa de investigação teve por objectivo a optimização da eficiência deste tipo de propulsores, para a qual foram medidas, através da balança do túnel de água, o impulso produzido e o momento distribuídos aos hélices. Modelos de propulsores *pod drive* com hélices em série a funcionar em co- e em contra-rotação foram usados durante o programa experimental.

Os resultados experimentais evidenciam a influência da geometria do *pod* sobre a eficiência global do propulsor, provando também que hélices em contra-rotação se tornam mais eficientes que hélices em co-rotação. Este aumento de eficiência pode ser usado para aumentar a velocidade de cruzeiro do navio sem aumento do consumo de combustível ou para reduzir o consumo, para a mesma velocidade de cruzeiro do navio.

A presente comunicação discute os resultados das medições de forças e campos de velocidade médios feitas em dois dos modelos de propulsor *pod drive*, sendo estes os dois modelos mais eficientes, um com hélices em co-rotação (CoRP) e o outro em contra-rotação (ContraRP).

2. Instalações Experimentais e Técnicas de Medição

2.1. Túnel de Água

O trabalho experimental foi realizado no túnel de água existente no LSTM-Erlangen, que se encontra representado na Figura 1.

A secção de teste é rectangular com uma largura de 800 mm e uma altura de 1000 mm, com uma extensão longitudinal de 8800 mm. Janelas em vidro, de grandes dimensões, constituem as paredes, fundo e tecto da secção de teste, permitindo desta forma o acesso óptico ao seu interior. O controlo contínuo do caudal de escoamento foi realizado através da variação do passo das pás da bomba axial (não representada na Figura 1).

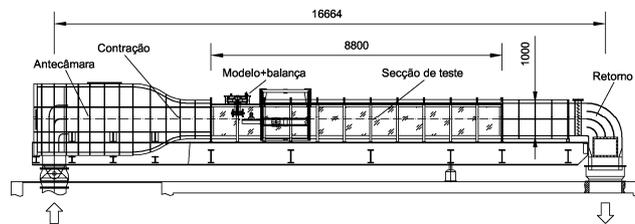


Figura 1. Propulsor modelo e balança no túnel de água.

2.2. Sistemas de Propulsão Modelo

Os sistemas de propulsão testados foram dois modelos de propulsor *pod drive* com dois hélices em co- e contra-rotação. A Figura 2 apresenta os componentes principais do modelo, estando este acoplado à balança usada para medir as forças actuantes nos modelos de propulsão e delas derivar a eficiência destes. Uma barreira de luz montada no eixo dos motores forneceu um sinal TTL, marcando o início de cada novo ciclo. Este sinal foi usado para determinar a frequência de rotação dos hélices e também para permitir a identificação espacial do hélice no ciclo de rotação, necessária para as medições do campo de velocidades. Os hélices tinham um diâmetro de 250 mm e foram optimizados para maximar a eficiência, na condição de inexistência de fenómenos de cavitação. À excepção do sentido de rotação do hélice traseiro, os dois sistemas de propulsão foram projectados de acordo com os mesmos critérios. Para o diâmetro dos hélices escolhido, o bloqueio da área transversal do canal foi de apenas 6%, o que permitiu a dispensa de correcção dos resultados relativamente à aceleração do campo de velocidades em torno do modelo.

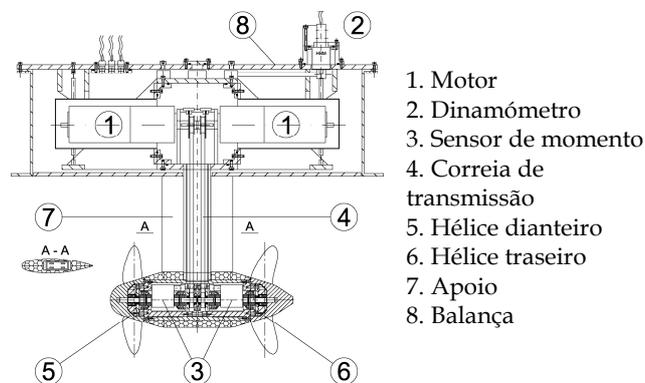


Figura 2. Propulsor modelo e balança do túnel de água.

2.3. Anemometria Laser Doppler

A medição dos campos de velocidades foi feita recorrendo a um sistema de análise de partículas da firma Aerometrics (Phase Doppler Particle Analyser - PDPA) adaptado para funcionar como um sistema de anemometria laser Doppler, a funcionar em modo de retrodispersão (backscatter LDA). A sonda gera um volume de controlo com um diâmetro aproximado de 100 μm , à distância de 665 mm da lente frontal, em água. Este equipamento permitiu a medição simultânea de duas componentes do campo de velocidades. Os sinais Doppler foram processados por duas unidades Dantec 57N20 BSA Enhanced, a operar em modo síncrono. A instalação experimental usada durante as medições do campo de velocidades está representada na Figura 3.

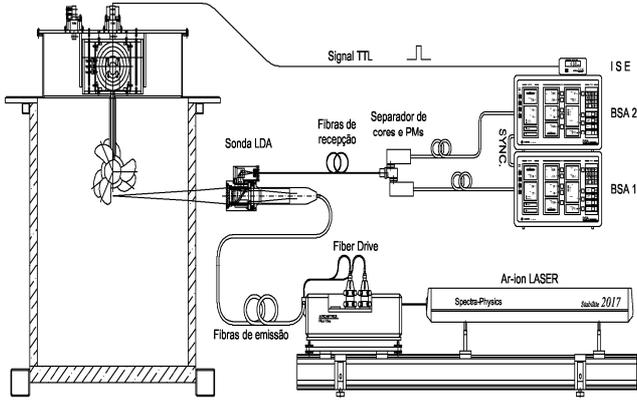


Figura 3. Instalação do sistema de anemometria laser Doppler.

3. Discussão

3.1. Eficiência do Propulsor

A Figura 4 mostra as curvas características dos dois modelos de propulsor *pod drive* escolhidos, aos quais correspondeu uma razão entre a distância entre planos de hélice, L_{prop} , e o diâmetro do hélice frontal, D_1 , de $L_{prop}/D_1 = 1.248$.

Os gráficos mostram os valores dos coeficientes de impulso,

$$K_T = \frac{T}{\rho D_1^4 n_1^2} \quad [1]$$

e momento,

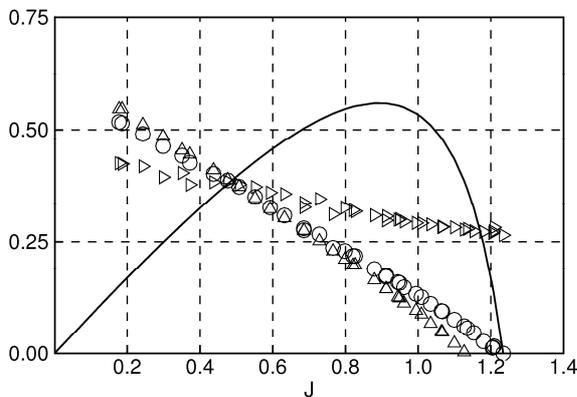
$$K_Q = \frac{Q}{\rho D_1^5 n_1^2}, \quad [2]$$

bem como da eficiência,

$$\eta_o = \frac{K_T}{K_{Q1} + \frac{n_2}{n_1} K_{Q2}} \cdot \frac{J}{2\pi}, \quad [3]$$

em função do passo de avanço,

$$J = \frac{V_A}{n_1 D_1}. \quad [4]$$

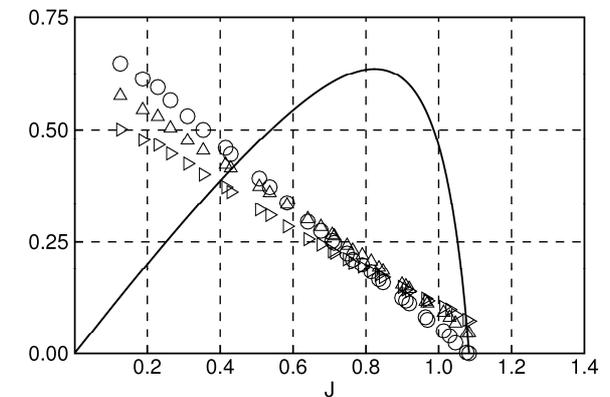

 (a) CoRP, $n_2/n_1 = 1.0$

Os índices 1 e 2 referem-se ao hélice frontal e traseiro, respectivamente. T é o impulso gerado, Q_i o momento no eixo do hélice, n_i e D_i são a frequência de revolução e o diâmetro do hélice, V_A a velocidade de avanço e ρ a massa volúmica do fluido. O número de Reynolds, $Re_{0.7R1}$ baseado no comprimento da secção da pá para a posição radial $r = 0.7R_1$ e na velocidade de avanço da secção, V_S , foi aproximadamente 380 000. $R_1 = D_1/2$ é o raio do hélice frontal e a correspondente velocidade de avanço da secção para a posição $r = 0.7R_1$ é dada por:

$$V_S = \sqrt{V_A^2 + (\omega R_1 \cdot 0.7 D_1)^2}. \quad [5]$$

As amostras foram recolhidas a uma frequência de rotação do hélice frontal de 7.5 Hz. Os resultados apresentados correspondem aos valores médios de 10 000 amostras, o que correspondeu aos seguintes erros estatísticos: 0.5% para o impulso, T , 0.3% para o momento, Q , e 0.3% para a velocidade de avanço, V_A . Atendendo à propagação de erros nas medições, o valor máximo do erro estatístico nas quantidades apresentadas é o seguinte: K_T , 0.5%; K_Q , 0.3% e η_o , 0.37%.

A Figura 4 demonstra que os dois propulsores modelo escolhidos apresentam um comportamento muito diferente. Enquanto o modelo com hélices em co-rotação funciona com uma distribuição da potência entre hélices que varia fortemente com o passo de avanço, J (ver o andamento das curvas correspondentes a K_{Q1} e K_{Q2} na Figura 4 (a)), no modelo ContraRP os hélices têm uma distribuição mais equilibrada. É também possível observar que este último modelo está menos carregado, o que é evidenciado pelos valores mais baixos de K_T , K_{Q1} e K_{Q2} . Para além destas diferenças, nota-se um andamento muito distinto da curva de eficiência. Em toda a gama de passos de avanço o modelo ContraRP apresenta maior eficiência que o modelo em CoRP. No seu valor máximo, o primeiro modelo é cerca de 8% mais eficiente que o segundo, o que, para além de provar o melhor comportamento de hélices em contra-rotação, o torna economicamente mais favorável.


 (b) ContraRP, $n_2/n_1 = 0.9$

○ - K_T , △ - $10K_{Q1}$, ▽ - $10K_{Q2}$, — η_o

 Figura 4. Curvas características para o propulsor $L_{prop}/D_1 = 1.248$.

3.2. Campo de Velocidades Médio

A Figura 6 e a Figura 9 mostram a distribuição radial das componentes axial e tangencial do campo de velocidades médio na esteira dos propulsores modelo. Usando a técnica de anemometria laser Doppler com resolução de fase, foram medidos os campos de velocidade à distância de 1 e de 5 diâmetros do plano de referência do hélice traseiro. Nos gráficos apresentados, cada linha representa um perfil radial para uma posição angular diferente. Por forma a reduzir a densidade de informação, somente 6 dos 60 perfis medidos são apresentados, estando a sua localização no sistema de coordenadas cilíndricas associado ao hélice traseiro indicada na Figura 5. Todos os valores de velocidade medidos foram adimensionalizados pela velocidade de avanço, V_a .

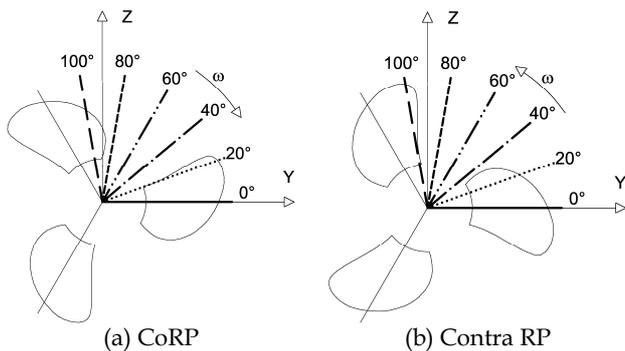


Figura 5. Distribuição radial dos perfis de velocidade no sistema de coordenadas cilíndrico.

A motivação de utilizar a contra-rotação dos hélices para aumentar a eficiência dos sistemas de propulsão reside na possibilidade de utilizar a rotação do hélice traseiro para recuperar alguma da energia perdida pelo hélice frontal, maioritariamente sob a forma de energia cinética da componente tangencial da velocidade. A contra-rotação deve, por isso, permitir gerar um maior impulso, ao mesmo tempo que reduz a perda de energia para a componente tangencial da velocidade, daí resultando uma maior eficiência global.

Comparando os resultados obtidos para a componente axial do campo de velocidades médio no plano mais próximo do hélice (Figura 6) é bastante evidente o efeito da contra-rotação no impulso gerado.

No modelo CoRP a distribuição radial mostra-se pouco uniforme, atingindo valores inferiores à unidade junto do eixo do hélice, evidenciando que nesta zona se produz um impulso negativo. Com um comportamento bastante diferente, o modelo ContraRP é caracterizado por um impulso gerado por uma distribuição bastante mais homogénea. Embora continue a existir uma diminuição do impulso gerado perto do eixo, todo o disco do hélice contribui positivamente para o impulso, além de que a distribuição angular é mais homogénea, o que se pode concluir da marcada sobreposição dos perfis radiais.

As distâncias maiores dos hélices, a influência destes sobre o escoamento atenua-se, havendo nenhuma ou pouca dependência da posição do hélice no campo de velocidades.

Na Figura 7 é possível observar que, quer no caso do modelo CoRP, quer do modelo ContraRP as linhas correspondentes aos diferentes perfis radiais confundem-se, convergindo numa única linha.

Em ambos os modelos dos propulsores, o aumento da distância resulta numa homogeneização do perfil de velocidades, diminuindo a variação angular (colapso das linhas numa única) e a variação radial, resultando na atenuação da depressão junto ao eixo do hélice e na diminuição dos valores extremos de velocidade.

Comparando globalmente os dois modelos, pode-se concluir que os hélices em contra-rotação geram (de forma homogénea) um impulso maior. Assim, a análise do campo de velocidades médio axial permite provar que a geração do impulso é diferente, dependendo do sentido de rotação dos hélices. No entanto, a distribuição radial do campo de velocidades médio tangencial (Figura 8 e Figura 9) tem ainda maior revelância na comparação entre os dois modelos.

Tal como esperado, o modelo em co-rotação apresenta um campo de velocidades caracterizado por uma forte componente tangencial. A sua distribuição caracteriza-se por um núcleo onde ocorre um escoamento do tipo vórtice de Rankine, que se estende desde o eixo até à posição $r/R_1 = 0.22$. Para posições radiais mais exteriores a velocidade tangencial decai assintoticamente até atingir a velocidade do escoamento não perturbado.

A variação angular do campo de velocidades é bastante reduzida, quer próximo, quer longe dos hélices e a intensidade do vórtice decai rapidamente com a distância, havendo uma diminuição para metade do valor máximo da velocidade de $x/D_1 = 1$ para $x/D_1 = 5$.

Observando agora o campo de velocidades do modelo ContraRP verifica-se um comportamento bem distinto do anterior. Neste caso a intensidade do vórtice é muito menor, e restringe-se somente a uma parte muito localizada junto do eixo.

No geral, a componente tangencial do escoamento foi eliminada, correspondendo a uma recuperação da correspondente energia cinética. À distância de cinco diâmetros dos hélices, a componente tangencial do campo de velocidades é apenas residual, sendo de concluir que o objectivo de eliminar o vórtice foi conseguido com sucesso.

3.3. Energia Cinética

A análise do campo de velocidades médio mostra que a componente tangencial da velocidade é determinante para explicar o comportamento mais ou menos eficiente dos dois modelos de propulsor estudados.

Observando a Figura 8 e a Figura 9 é notória a diferença de intensidades do vórtice na esteira dos hélices, sendo aquele muito intenso no caso do modelo CoRP e quase inexistente no caso do modelo ContraRP. A maior ou menor intensidade deste vórtice traduzir-se-á numa distribuição diferente da energia cinética pelas suas componentes ortogonais, dependendo do propulsor modelo.

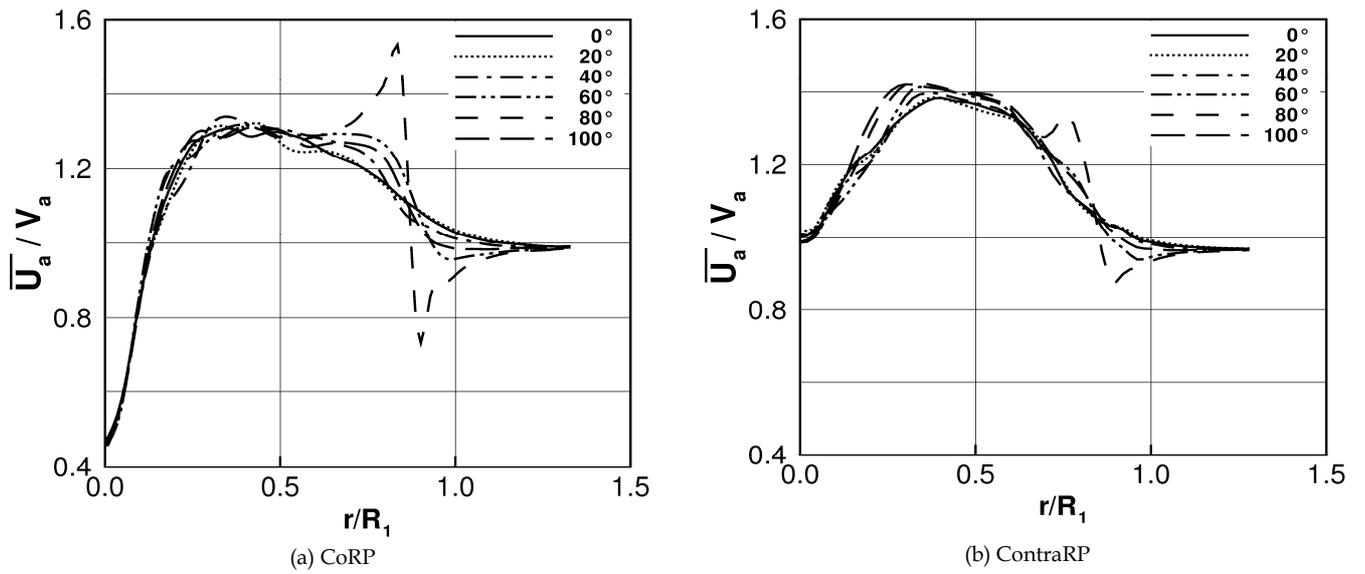


Figura 6. Distribuição radial da velocidade média axial ($x/D_1 = 1$).

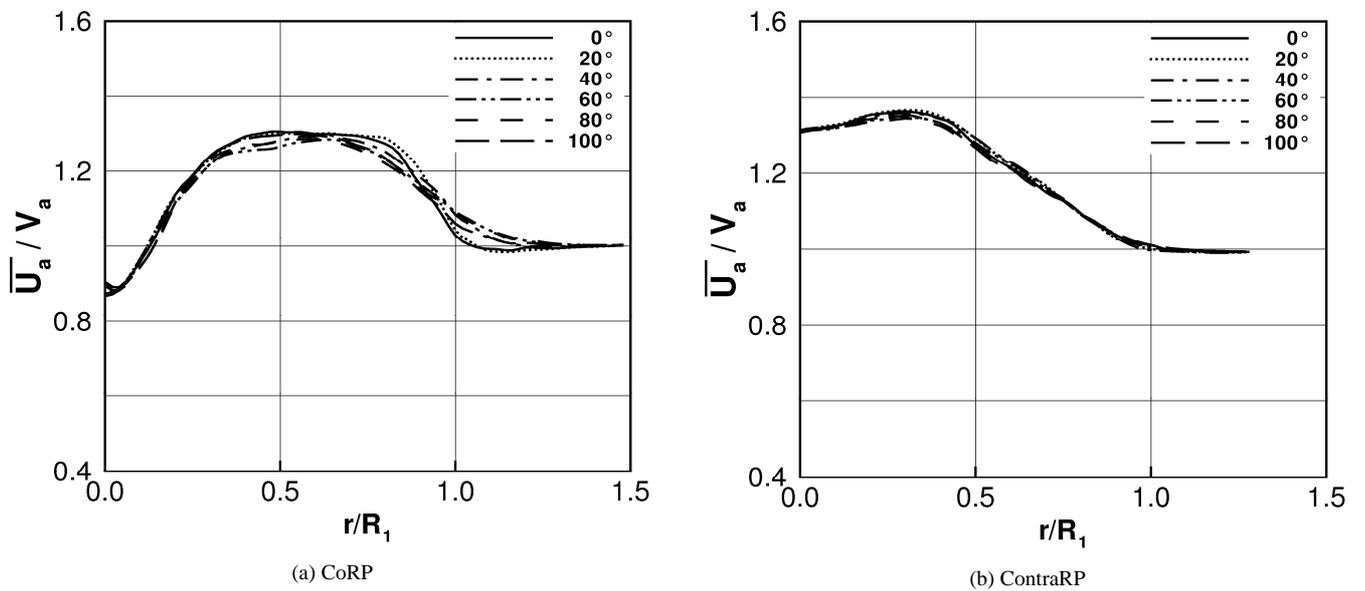


Figura 7. Distribuição radial da velocidade média axial ($x/D_1 = 5$).

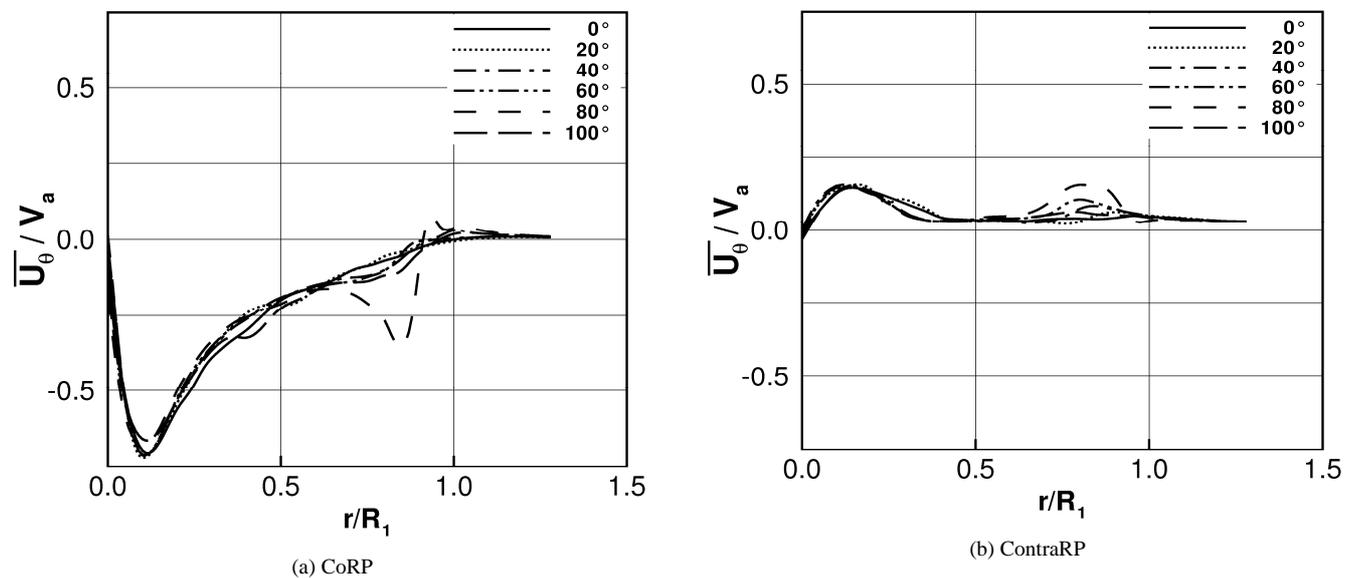


Figura 8. Distribuição radial da velocidade média tangencial ($x/D_1 = 1$).

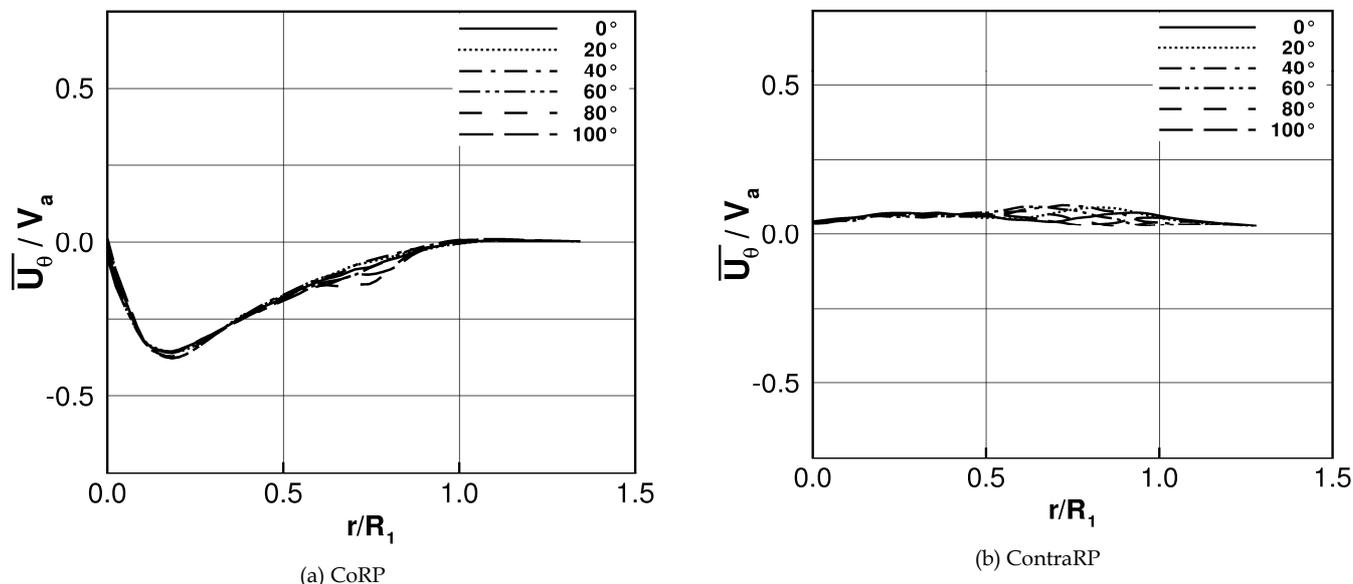


Figura 9. Distribuição radial da velocidade média tangencial ($x/D_1 = 5$).

Neste trabalho, a distribuição de energia cinética foi quantificada através do coeficiente de energia cinética, k_i , dado pela seguinte expressão,

$$k_i = \frac{\int \frac{1}{2} \rho U_i^2 dS}{\frac{1}{2} \rho V_a^2 \int dS}, \quad [6]$$

que tem o significado de uma razão entre o integral da energia cinética, no plano do hélice, e o correspondente num plano a montante do modelo. U_i corresponde à velocidade média local e o índice i representa a componente da velocidade em questão. Por forma a tornar mais evidente a contribuição de cada componente da velocidade para a energia cinética, foram definidos os seguintes coeficientes (a que designaremos coeficientes de distribuição de energia cinética),

$$c_a = \frac{k_a - 1}{k_a + k_r + k_\theta - 1}, \quad [7]$$

$$c_r = \frac{k_r}{k_a + k_r + k_\theta - 1}, \quad [8]$$

e

$$c_\theta = \frac{k_\theta}{k_a + k_r + k_\theta - 1}, \quad [9]$$

cuja soma iguala a unidade. Nestas expressões, foi considerada apenas a energia cinética produzida pelos hélices, o que justifica o factor -1 presente. Aplicando estas definições aos resultados da secção anterior obtêm-se os valores apresentados na Tabela 1. Através desta quantificação torna-se notória a diferente distribuição da energia cinética entre as diversas componentes. À distância de um diâmetro, cerca de 10.7% da energia cinética produzida pelo modelo CoRP encontra-se distribuída pela componente tangencial, o que, como foi visto anteriormente, se traduz numa perda para o escoamento envolvente, logo numa perda de eficiência. Já no modelo ContraRP a componente tangencial corresponde somente a cerca de 1% do total, um valor muito mais baixo e semelhante ao da componente radial.

A diferença entre estes dois valores corresponde sensivelmente ao acréscimo de eficiência (ver secção 3.1), pelo que será legítimo afirmar que a perda de eficiência se deve essencialmente à energia cinética perdida na componente tangencial da velocidade.

Tabela 1. Distribuição de energia cinética pelas componentes da velocidade média.

	$x/D_1 = 1$		$x/D_1 = 5$	
	CoRP	ContraRP	CoRP	ContraRP
k_a	1.26	1.34	1.27	1.41
k_r	0.00495	0.00355	0.00199	0.00141
k_θ	0.0313	0.00353	0.0164	0.00332
c_a	87.58%	97.96%	93.64%	98.85%
c_r	1.70%	1.02%	0.69%	0.34%
c_θ	10.72%	1.02%	5.67%	0.81%

Comparando o comportamento de ambos os modelos nos dois planos de medição, é também possível observar que a energia cinética correspondente à componente tangencial diminui com a distância, transferindo-se para a componente axial. Como seria de esperar a contribuição da componente radial para a energia cinética é, em todos os casos, residual.

Conclusões

Nesta comunicação foram apresentadas novas instalações dedicadas ao estudo avançado de sistemas de propulsão naval. Estas instalações foram projectadas e construídas no LSTM-Erlangen, Alemanha, sendo compostas por um túnel de água de grandes dimensões, equipado com uma balança de três componentes e um sistema de anemometria laser Doppler de duas componentes.

Foram apresentados os resultados experimentais de forças integrais e medições de campos de velocidade em dois modelos de propulsor de navios do tipo *pod drive*, de um conjunto de vinte e quatro, todos equipados com duplo hélice. Alguns dos modelos funcionaram com os hélices em contra-rotação e os restantes em co-rotação.

Foi demonstrado que devido ao uso da contra-rotação a eficiência do propulsor pode ser aumentada significativamente. As características propulsivas também se mostraram mais favoráveis em toda a gama de passos de avanço.

Através dos resultados das medições com anemometria laser Doppler foi possível analisar os campos de velocidade médios nas esteiras dos dois propulsors modelo. Em concordância com os resultados de forças integrais, o modelo ContraRP apresentou um escoamento axial mais homogêneo e intenso, o que se traduz num maior impulso gerado.

Em termos de componente tangencial, este modelo é caracterizado por uma quase inexistência desta, em oposição ao modelo CoRP, que apresenta um vórtice de grande intensidade. Usando ainda os resultados desta experiência, foi possível demonstrar uma correlação entre o aumento de eficiência através da contra-rotação e a distribuição de energia cinética.

Agradecimentos

J. Pêgo agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento da sua estadia no LSTM-Erlangen para a prossecução do seu doutoramento e à empresa Siemens AG o financiamento concedido para a execução dos estudos aqui apresentados.

Referências

- Breslin, J., Andersen, P. (1996) *Hydrodynamics of ship propellers*, Cambridge, Cambridge University Press, 583 páginas. ISBN 0521574706.
- Friesch, J. (2001), *Investigations of podded drives in a large cavitation tunnel*, 8. Int. Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS 2001) Shanghai, China
- Pêgo, J. (2007) *Advanced Fluid Mechanics Studies of Ship Propulsion Systems*, PhD Thesis, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.
- Pêgo, J., Lienhart, H., Durst, F. and O. Badran (2005) *Construction of a test facility for the research of ship propulsion systems*. Emirates Journal for Engineering Research, 2005, vol. 10, n.º 2, pág.1--8. ISSN: 1022-9892.