

Sistemática para dimensionamento do sistema de energia de um AUV

Systematic for AUV power system sizing

Flávio José Aguiar Soares
acadaf@gmail.com
Instituto Federal de Educação
Tecnológica do Amazonas

Walter de Britto Vidal Filho
wbritto1@gmail.com
Universidade Federal de
Pernambuco

Resumo

O presente artigo aborda o problema da definição da fonte de energia em um robô submersível autônomo – AUV (*autonomous underwater vehicle*). Tal sistemática pode ser estendida a outros sistemas autônomos. É apresentada uma revisão bibliográfica envolvendo as tecnologias utilizadas e a influência do escoamento hidrodinâmico sobre a autonomia. Uma sistemática para o projeto do sistema de energia é proposta, correlacionando os fatores que influenciam na determinação do sistema.

Palavras-chave: Projeto energético. AUV. Robôs subaquáticos.

Abstract

This article shows the problem of defining the source of energy in an autonomous underwater vehicle - AUV. This can be systematically extended to other autonomous systems. It presented a literature review of the technologies used and the hydrodynamic flow influence on autonomy. A process design of the power system is proposed to correlate the factors that influence the determination of the system.

Keywords: Energetic design. AUV. Subaquatic robot.

1 Introdução

Os AUV (*autonomous underwater vehicle*) são veículos robóticos autônomos submersíveis empregados na exploração marinha e em sistemas de defesa.

O presente trabalho aborda a questão do projeto do sistema de energia de um AUV. Esses veículos não possuem uma ligação física com a base, como os ROV (*remotely operated vehicle*), pela qual comandos e energias podem ser trocados (Figura 1).

Estabelecer qual a fonte de energia e qual o método de conversão em trabalho útil para um sistema autônomo móvel constitui um problema central de projeto. Os requisitos básicos de um projeto são: maior autonomia da fonte de energia e maior eficiência do conversor.

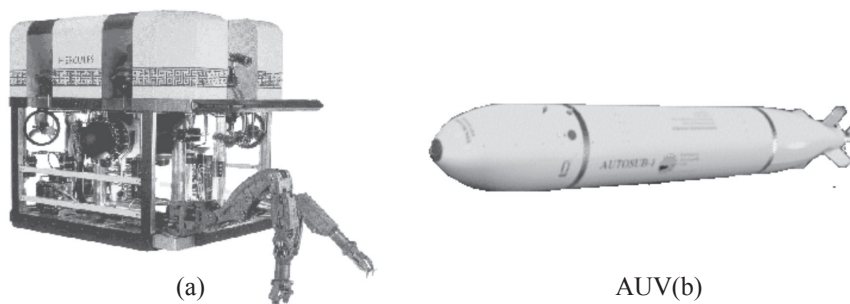


Figura 1: ROV.
Fonte: SUT, 2010

2 Sistema de energia

Os AUV são compostos de diversos subsistemas e seu projeto implica na análise integrada deles. O sistema de energia é basicamente composto pela fonte e os sistemas de controle desta. Contudo, a análise energética implica em englobar no sistema energético toda a cadeia de energia.

Existem duas classes de fontes de energia disponíveis: as eletroquímicas e as térmicas. Fontes eletroquímicas associam motores elétricos com acumuladores (baterias), células combustíveis ou semicélulas. Fontes térmicas apresentam tanques de combustíveis e conversores que obedecem a um determinado ciclo termodinâmico.

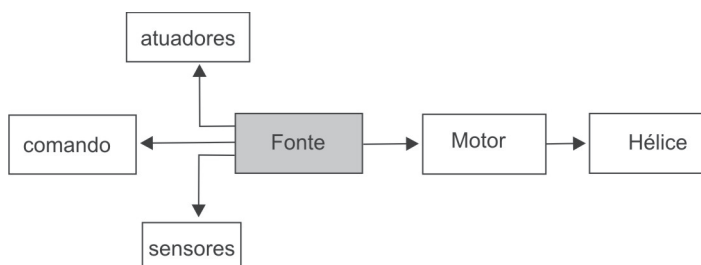


Figura 2: Interação do sistema de energia e demais sistemas.

As fontes eletroquímicas mais comuns são as baterias que geram corrente eletroquímica baseadas na diferença de eletronegatividade entre dois eletrodos metálicos imersos em uma solução ácida que promoverá o transporte de cargas elétricas. As principais características a serem observadas nesse tipo de fonte são: densidade mássica (gravimétrica) de energia Wh/Kg; densidade volumétrica de energia Wh/dm³; capacidade de descarga Ah; eficiência da fonte (energia de carga/descarga); vida útil; curva de descarga; e efeito memória.

As fontes térmicas são aquelas que convertem energia térmica em energia requerida pela propulsão.

3 Tecnologias

As principais tecnologias empregadas nas baterias são:

- Baterias alcalinas: bateria primária, indicada para altas descargas a baixas temperaturas. Bradley (2001) cita densidades de energia para pilhas tamanho D de 140 Wh/Kg a 2° C. São comercialmente difundidas e de custo relativamente baixo, entretanto, emitem hidrogênio quando mantidas em descargas prolongadas. Griffiths (1999) *apud* Bradley (2001) utilizou baterias alcalinas de 80 Wh/kg no AUV AUTOSUB.
- Baterias de zinco-prata: utilizadas em aplicações aeroespaciais, mísseis e torpedos. Devido à sua grande capacidade de descarga, podem alcançar alta densidade de energia de 100 Wh/kg a 200 Wh/Kg, mas, usualmente, apresentam 55 Wh/Kg, segundo Rigaud (2001). Possuem, entretanto, vida útil muito curta e custo elevado. Segundo Descroix (1994), o custo do kWh pode variar de US\$ 500 a US\$ 1.000,00. Possuem densidade de energia teórica de 440 Wh/kg.
- Baterias de níquel-cádmio: baterias de Ni-Cd são recarregáveis, sendo boas para altas correntes de carga, entretanto, apresentam baixa capacidade, inferior às alcalinas, porém, superior às de chumbo-ácido. Apresentam efeito memória. Usualmente, possuem em torno de 500 ciclos de vida. São sensíveis a temperaturas acima de 45° C. Apesar de sua grande popularidade, têm seu uso gradualmente restrito, pois enfrentam problemas ambientais pela deposição do cádmio. Segundo Descroix (1994), a companhia francesa Saft STN tem utilizado uma bateria com 55 Wh/kg para veículos elétricos.
- Baterias de níquel metal hidreto: baterias de NiMH têm curvas de comportamento muito parecidas com as de Ni-Cd, mas com desempenho superior. Descroix (1994) cita densidades de 80 Wh/kg. Comparadas com as baterias de Ni-Cd, possuem melhor capacidade de descarga, quase o dobro da densidade de energia, melhor curva de carga e similar de descarga. Também são recarregáveis por cerca de 500 ciclos. Entretanto, são um pouco mais sensíveis à temperatura, com melhor desempenho variando entre 0° C e 40° C. Não toleram cargas reversas, pois as danificam rapidamente, incorrendo na rápida geração de gases e risco de ruptura do invólucro.
- Baterias de lítio-primária: não recomendadas para cargas oscilantes, possuem alta densidade de energia de 375 Wh/Kg, associada ao alto custo. Rigaud (2001) cita que o modelo Li-SOCL2 pode chegar a 500 Wh/Kg.

- Baterias de lítio-íon: as baterias de Li-Ion merecem destaque entre as baterias de lítio, pois possuem densidades de energia superior às de Ni-MH, que, por sua vez, são superiores às de Ni-Cd. Em consequência, são leves e capazes de produzir grandes voltagens. Sua curva de descarga tem pouca inclinação. Não têm o efeito memória apresentado pelas baterias de Ni-Cd. Proporcionalmente, uma pilha produz o equivalente a três pilhas de Ni-Cd associadas em série. Possibilitam reduções dimensionais em projetos. São recarregáveis, mas requerem alguns cuidados especiais. Possuem custo elevado e necessitam de eletrônica sofisticada para regulação da carga e descarga.
- Baterias de lítio metal: permitem a obtenção de células de 200 Wh/kg com capacidade de 150 Ah. Descroix (1994) afirma que a companhia francesa Saft desenvolveu uma célula especificamente para AUV.
- Baterias de lítio Thionyl cloreto: trata-se de baterias primárias, com densidade de energia de 280 Wh/kg. A densidade de energia teórica é de 1.480 Wh/kg.
- Baterias de chumbo-ácido: tecnologia de grande aplicação por terem grande capacidade de carga aliada ao seu baixo custo, serem recarregáveis e recicláveis. São produzidas por um grande número de fornecedores. As mais populares operam em 6V e em 12V. Têm melhor desempenho na faixa de temperatura que vai de -10 °C até +50 °C. Geralmente, são mencionadas como VRLA (*valve regulated lead acid*) ou SLA (*sealed lead acid*), em referência às baterias seladas, que não sofrem manutenção e normalmente usam um gel como eletrólito ácido. Essa modificação provoca um pequeno aumento em sua densidade de energia e elimina a manutenção. O ciclo de vida está relacionado com a intensidade da curva de descarga, tendo vida menor para descargas mais intensas. Para aplicações em grandes profundidades, podem trabalhar imersas em óleo, o que permite a redução da espessura e, conseqüentemente, do peso dos vasos de pressão. Liberam hidrogênio e possuem densidade de energia teórica de 171 Wh/kg.

Na Tabela 1, observa-se um comparativo de densidade e ciclo de vida de cada uma das baterias.

Tabela 1: Densidades de energia.

Tecnologia	Densidade de Energia [Wh/Kg]	Ciclos de Vida
Alcalina	140	1
Lítio – primária	375	1
Chumbo- ácido	31,5	100*
NiCd	33	100*
NiZn	58,5	500
Li Ion	144	500
Lítio polímero	193	500
Ag Zn	100	30

Fonte: Bradley (2001).

(*aproximado)

As principais tecnologias das células combustíveis podem ser classificadas segundo o eletrólito. A geração da corrente é obtida por reações eletroquímicas, similares às baterias secundárias, mas nestas, os eletrodos não são consumidos na geração da corrente. O ânodo é alimentado com o combustível, e o cátodo, com o oxidante – ambos imersos num eletrólito.

O modelo mais conhecido, por razões econômicas, é o hidrogênio-oxigênio, que tem como produtos da reação água e calor. Entretanto, a armazenagem do hidrogênio apresenta dificuldades, dada sua baixa densidade. Hawley e Reader (1992) apresentam alguns outros modelos:

- Alcalinos aquosos (AFC)
- Carbonatos fundidos (MCFC)
- Eletrólito de óxidos sólidos (SOEFC)

Entre as tecnologias disponíveis, duas são de interesse para AUV: as que utilizam eletrólitos conhecidos como *advanced proton exchange membrane* (APEM) e as células combustíveis de ácido fosfórico (PAFC). Scamans *et al.* (1994) relatam o desenvolvimento de duas células combustíveis à base de alumínio feita pela companhia canadense Alupower especificamente para aplicações em AUV. O primeiro modelo foi desenvolvido para maior autonomia e precipita hidróxido de alumínio como resultado da reação, por isso é designado “gerenciador de sólidos”. Esse sistema tem capacidade de 50 kWh para uma carga de 1,25 kWh utilizando oxigênio comprimido, o que gera uma densidade de energia de 260 Wh/l, podendo alcançar 320 Wh/l utilizando oxigênio líquido.

Na tecnologia empregada na semicélula combustível, o oxidante alimenta um eletrodo, mas o combustível é o ânodo na forma de um metal sólido, geralmente lítio ou alumínio. Trata-se de uma combinação entre uma célula de combustível e uma bateria secundária tradicional. O eletrólito pode ser a água do mar. Uma vez que a reação eletroquímica é estabelecida, ela se mantém enquanto for alimentada com o oxidante. À medida que o ânodo é consumido, a reação libera calor e hidrogênio, que devem ser expelidos.

As principais tecnologias térmicas empregadas dizem respeito às fontes e aos armazenadores. Armazenadores de energia térmica (TES) são constituídos de materiais aquecidos no início da missão e, ao longo dela, vão dissipando calor, o qual é convertido em energia necessária à propulsão e aos sistemas. Um material usado é o sal fundido. A principal vantagem é não gerar gases que precisem ser expulsos.

As principais fontes térmicas são as químicas e as nucleares. A primeira se baseia em combustão de hidrocarbonetos ou em reação com combustível metálico; a última gera calor pela desintegração espontânea de um isótopo radioativo. Estas podem ser construídas por pequenos reatores na faixa de 100 kW para pequenos submarinos tripulados, ou na faixa de 20 kW para aplicações espaciais. Possuem boa densidade de energia, mas a eficiência é baixa para aplicações em AUV. Walter *et al.* apud Hawley e Reader (1992) apresentam um conversor que utiliza thulium-170 e pode prover 50 kW com 30% de eficiência. A principal limitação está nos conversores que são máquinas térmicas.

A combustão de hidrocarboneto requer a armazenagem de oxigênio na razão de quatro para um de combustível, e implica na expulsão dos gases saturados residuais, o que pode se tornar impraticável para profundidades superiores a 200 m. Entretanto, sua capacidade pode ser, algumas vezes, maior do que se for baseada em baterias de chumbo-ácido ou prata-zinco. A reação baseada em combustível metálico gera mais energia do que é possível obter através da queima de hidrocarbonetos. Os volumes dos reagentes são iguais e não existem gases que devam ser expelidos, tornando a operação do sistema independente de profundidade.

Os conversores térmicos aplicados a AUV são o motor Stirling, o *synthetic atmosphere diesel* (SAD) e as turbinas a gás operando no ciclo Brayton. Turbinas a vapor e motores de combustão interna Wankel foram aplicados na propulsão de torpedos e não são indicados para as baixas velocidades dos AUV.

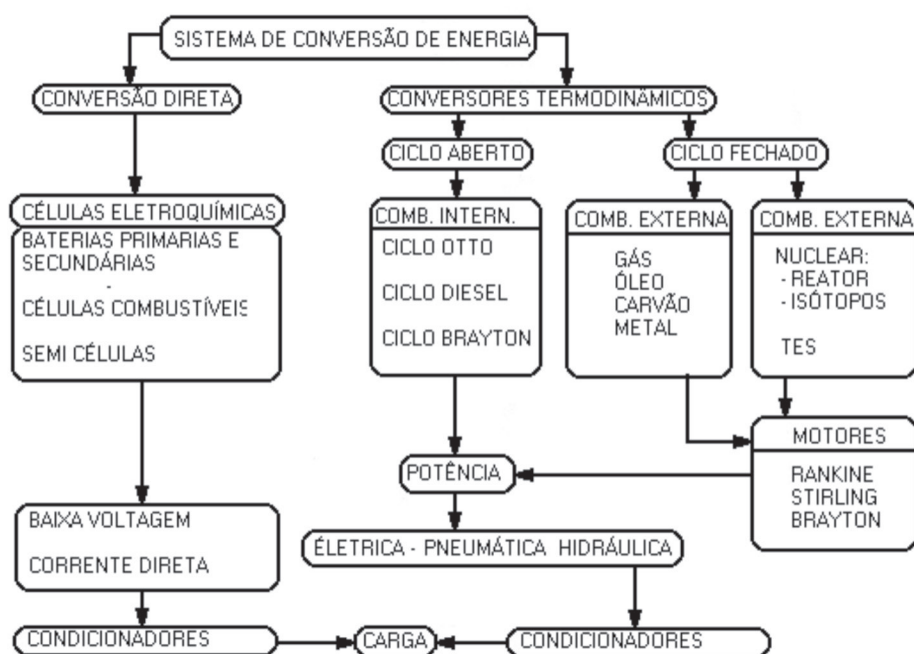


Figura 3: Resumo dos sistemas de conversão de energia.

Fonte: Soares (2001)

4 Metodologia de projeto

Segundo Paul e Beitz (1989), qualquer projeto pode ter suas tarefas ou etapas agrupadas nas seguintes fases: concepção, detalhamento e validação. Dessa forma, um projeto de um AUV pode ser dividido em: projeto conceitual, projeto detalhado, prototipagem, validação e documentação. O projeto do sistema de energia possui uma fase no projeto conceitual e uma no projeto detalhado. O primeiro necessita de uma estimativa da fonte para a concepção do espaço no casco. Algumas vezes, só no projeto detalhado se descobre que o espaço da fonte de energia é insuficiente, necessitando de um redimensionamento do espaço.

Uma revisão de literatura evidencia a necessidade de cálculos preliminares no projeto. Segundo Bradley (2001), pode-se estimar, inicialmente, a autonomia em função da massa de baterias e do arrasto do casco, e, segundo Rigaud (2001), relacionar a massa das fontes de energia com a densidade do casco.

Potter *et al.* (1999) descrevem um procedimento mais detalhado em *software* que propõe uma solução à determinação do valor requerido para a propulsão baseada nos arrastos hidrodinâmicos sobre o casco.

A energia necessária a um AUV é o somatório das energias requeridas em todos os subsistemas eletrônicos, atuadores e propulsão. Dessa forma, a eficiência do sistema que converte energia armazenada em energia mecânica de propulsão é determinada pela relação da energia mínima gasta no arrasto do deslocamento do veículo a uma dada velocidade e a energia consumida nos conjunto motor e hélice. Contudo, a autonomia está relacionada com a capacidade da fonte de energia. O aumento da capacidade da fonte implica num aumento de massa e volume a ser deslocado, o que aumenta a demanda de energia.

A sistemática começa fazendo uma estimativa de arrasto, baseando-se em seções com geometria clássica. Segundo Almendinger (1990), a força de arrasto é a soma da resistência do casco com a resistência dos apêndices:

$$F_a = F_c + F_i \quad (1)$$

$$F_a = C_t \frac{\rho \cdot A \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

Em que C é o coeficiente de arrasto, v é a velocidade, A é a área da seção transversal, e ρ é a densidade. O coeficiente é baseado em geometrias clássicas ou pode ser obtido por ensaio de arrasto em um tanque de provas:

$$C_t = C_f + \Delta C_f + C_r + C_w \quad (3)$$

Em que C_f é o coeficiente de fricção, ΔC_f é o coeficiente de correlação, C_r é o coeficiente de resistência residual, e C_w é o coeficiente de geração de ondas.

Segundo a International Towing Tank Conference, adota-se a seguinte equação para a estimação do valor de C_f :

$$C_f = \frac{0,0075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (4)$$

Hoerner (1965) *apud* Almendinger (1990), após ensaiar uma série de formas geométricas, apresenta esta formulação para estimar o valor de C_t :

$$C_t = C_f \left[3 \left(\frac{comp.}{diâm.} \right) + 4,5 \left(\frac{comp.}{diâm.} \right)^{1/2} + 21 \left(\frac{comp.}{diâm.} \right)^2 \right] \quad (5)$$

Considerando o arrasto da área frontal do submersível, caso se considere a superfície molhada, deve-se empregar:

$$C_t = C_f \left[1 + 1,5 \left(\frac{diâm.}{comp.} \right)^{3/2} + 7 \left(\frac{diâm.}{comp.} \right)^3 \right] \quad (6)$$

De posse da estimativa da força de arrasto, determina-se a potência de propulsão:

$$P_p = F_a \cdot v \quad (7)$$

Pode-se somar a potência para acelerar o AUV quando houver missões com uma curva de velocidade contendo muitas acelerações:

$$\int F(v) dv \quad (8)$$

A potência necessária no motor de propulsão é a potência de arraste pelos rendimentos do hélice, da transmissão e do motor:

$$P_m = \frac{P_a}{n_1 n_2 n_3} \quad (9)$$

Determinada a potência de propulsão, determina-se a energia necessária a missão somando a potência dos dispositivos embarcado e a propulsão, pelo tempo da missão.

$$E = (P_m + P_e) T \quad (10)$$

Bradley (2001) estima que a autonomia em função da potência propulsiva empregada para vencer o arrasto hidrodinâmico é dada por:

$$R = \left(\frac{E}{C_d} \right) v^2 \quad (11)$$

Em que R é a autonomia [m], E é a energia disponível [J], C_d é o coeficiente de arrasto [$W s^3/m^3$], e v é a velocidade [m/s].

Essa equação pode ser rearranjada para incluir a carga referente ao transporte de sensores de navegação e controle, resultando em:

$$R = \left(\frac{E}{C_d + \frac{P_h}{v^3}} \right) v^2 \quad (12)$$

Brighenti (1990) realiza uma análise comparativa nas relações entre os parâmetros da massa, eficiência e autonomia entre fontes de energia que podem ser usadas nessa fase do projeto.

A densidade de energia pode ser mássica – energia específica E_e [Wh/Kg] – ou volumétrica – densidade de energia E_v [Wh/l]. Para um sistema de energia que utiliza somente baterias, a energia específica do sistema pode ser estimada da seguinte forma:

$$E_e = \frac{E}{k_{pt} P_u + k_{en} E} \quad (13)$$

Em que E é a taxa de descarga líquida entregue pelo conjunto de baterias [KWh], P_u é a potência disponível pelo sistema de energia [KW], k_{pt} é a densidade mássica de potência correspondente ao tipo de bateria empregado [Kg/KW], e k_{en} é a densidade mássica de energia que depende do tipo de bateria empregada [Kg/KWh].

Utilizando uma dessas estimativas de energia, especifica-se a fonte, de posse das opções tecnológicas e dos critérios de projeto.

Hawley e Reader (1992) recomendam que a fonte de energia tenha relação ideal entre as densidades volumétricas e mássicas de energia igual a um, o que deve variar a cada projeto, em função da parcela de densidade do veículo destinada à fonte de energia. Entretanto, a escolha não deve se basear em apenas um parâmetro.

A definição de qual fonte utilizar para determinada aplicação deve ser parametrizada considerando:

- a) Custo (considerando a vida útil da fonte)
- b) Capacidade de descarga compatível
- c) Autonomia desejada (em horas e em alcance)
- c) Volume disponível
- d) Densidade de energia necessária

- e) Eficiência
- f) Comportamento da descarga da fonte para se adequar a uma curva de demanda da carga
- g) Limitações impostas ao projeto pelas características da fonte
- h) Maturidade tecnológica
- i) Segurança
- k) Disponibilidade de fornecedores

Os artigos pesquisados apresentaram várias comparações entre relações mássicas e volumétricas de energia para possíveis fontes de energia para AUV (Bradley, 2001; Potter *et al.*, 1999; Hawley e Reader, 1992; Macgregor *et al.*, 1990).

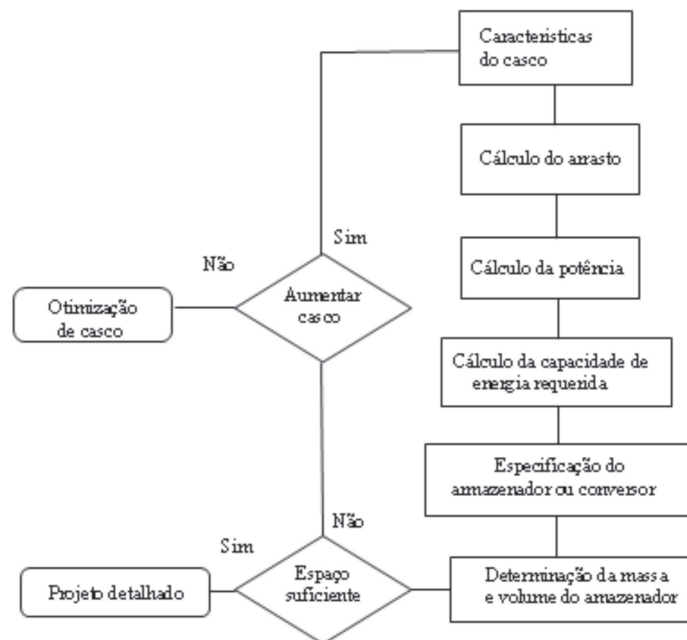


Figura 4: Fluxograma da sistemática

Caso a fonte escolhida ou o conjunto fonte conversor ocupe mais espaço do que o inicialmente pensado, aumenta-se o casco e calcula-se a sequência até convergir a uma solução satisfatória. A solução para o projeto é conseguida por uma sistemática interativa, algumas vezes, recursiva. A solução mais eficaz caminha em busca do aumento da capacidade de carga associada ao aumento da densidade de energia, seja mássica ou volumétrica.

Esses parâmetros do projeto conceitual são passados ao projeto detalhado, no qual cálculos serão otimizados e componentes, detalhados. No projeto detalhado, um modelo do casco deve ser ensaiado para obter o C_d real para a geometria escolhida. A partir disso, calcula-se o arrasto real. Contudo, seguindo a sistemática anterior, não haverá a necessidade de aumentar o casco e construir novos modelos até a solução convergir. O cálculo da integração hélice-motor-redutor deve ser feita obtendo valores mais precisos dos rendimentos.

Programas de simulação computacional CFD (*computacional fluid dynamics*), como o CFX ou Featflow (código aberto e licença pública) podem ser utilizados para gerar simulações de escoamento em cascos virtuais e obter valores estimados do coeficiente de arrasto. Esse procedimento deve ser utilizado para otimizar o escoamento em torno do casco, mas não elimina a necessidade de testes de arrasto.

Gilmer e Jhonson (1982) estimam que, em um submarino, 57% da resistência ao deslocamento se devem ao atrito do casco com a água e 7,3%, à forma do casco. Esses valores se alteram significativamente quando passamos a avaliar o arrasto sobre cascos de AUV que possuem área molhada significativamente menor. Nesse caso, a forma do casco se torna o elemento preponderante na geração da força de arrasto.

Na otimização de casco, busca-se reduzir o arrasto. O trabalho de Osse (1989) descreve métodos de redução do

arrasto e apresenta exemplos de otimização do escoamento em torno do casco aplicando o método de Parsons (1974). O autor apresenta modelos de casco em que o escoamento no corpo de saída permanece laminar. Segundo ele, os métodos de redução podem ser passivos ou ativos. O escoamento laminar está associado ao alto rendimento hidrodinâmico, mas requer baixas velocidades de deslocamento; dessa forma, otimiza-se o consumo de energia, mas se prolonga o tempo de duração das missões.

Os principais métodos passivos são:

- Revestimento deformável: Thomas *apud* Osse (1978) cita redução de 10% no arrasto de um modelo cilíndrico com corpo frontal parabólico e corpo de saída cônico quando revestido com poliuretano.
- Remodelagem do casco: utiliza o método de Parsons (1974), que consiste, basicamente, em obter o menor gradiente de pressão ao longo do casco e fazer com que o ponto de máximo esteja concentrado sobre uma pequena área. Isso garante que o escoamento laminar alcance uma área maior e gere uma faixa de transição reduzida. O resultado é um casco composto apenas por um corpo frontal e um corpo de saída, sem o corpo central, devendo o modelo operar a uma velocidade constante. Na Figura 4, observa-se o exemplo de remodelagem otimizando o gradiente de pressão ao longo do casco. O segundo perfil gerado apresentou arrasto 25% menor.

Os principais métodos ativos são:

- Sucção da camada limite: produção de acoplamento forçado da camada limite a fim de evitar a separação e formação de escoamento turbulento.
- Aquecimento das paredes do casco: o calor atrasa a formação da transição turbulenta.

5 Conclusão

Este trabalho visa auxiliar o desenvolvedor de sistemas autônomos no projeto do sistema de energia para o caso específico de veículos submersíveis.

Procedimentos de integração do projeto do sistema de propulsão com o projeto do casco irão indicar ao projetista a importância da eficiência hidrodinâmica do escoamento em torno do casco, de modo que a autonomia possa ser muito afetada pelo arrasto. Em outras palavras, não é possível desassociar o dimensionamento do sistema de energia do sistema propulsivo, e este, do projeto hidrodinâmico do casco. Essa integração permitirá o uso mais eficiente da fonte de energia.

A capacidade da fonte de energia é definida em função dos parâmetros apresentados anteriormente, mas a autonomia é dada em função da eficiência do método propulsivo.

Sistemas convencionais de hélices possuem eficiência usualmente na ordem de 40%. Griffiths *et al.* (2000) descrevem um AUV, AUTOSUB-1a, na forma de um torpedo, cujo sistema propulsor possui eficiência total de 38%, com eficiência do motoredutor elétrico de 65% e eficiência da hélice de 57%. Sistemas alternativos, baseados na mimetização de movimentos de peixe, apresentam eficiências superiores.

De acordo com Paster (1986), “considerações sobre uma boa hidrodinâmica na execução do projeto do corpo do modelo de veículos submersíveis autopropelidos resultarão num alcance de duas a dez vezes[o quê?], funcionando à mesma velocidade e profundidade pela redução do arrasto proporcional”.

A eficiência hidrodinâmica em AUV corresponde a reduzir o efeito do arrasto sobre o casco, minimizando perdas, de modo a facilitar o escoamento da água em torno do casco. A literatura cita métodos de otimização da eficiência hidrodinâmica (Osse, 1989) que podem ser passivos ou ativos.

Dessa forma, a autonomia é obtida pelo cruzamento das variáveis “fonte de energia” e “método propulsivo”. Esta, por sua vez, depende da eficiência hidrodinâmica do casco.

Referências

ALLMENDINGER, E. Eugene. *Submersible vehicle systems design*. Jersey City, NY: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990.

BRADLEY, A. et al. Power systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. v. 26, n. 4, p. 526-538, Oct. 2001.

BRIGHENTI, A. Parametric analysis of the configuration of autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 15, n. 3, p 179-188, July 1990.

DESCROIX, G. Chagnom. Comparison of advanced rechargeable batteries for autonomous underwater vehicles. In: SYMPOSIUM ON AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE TECHNOLOGY, 1994, Cambridge, MA. *Proceedings...* Cambridge, MA: IEEE, 1994. p. 194-197.

GILMER, C. T.; JHONSON, B. *Introduction to naval architecture*. Maryland: Naval Institute Press. 1982.

GRIFFITHS, G. *Technology needs for autonomous underwater vehicles*. In: EUROMAR workshop: technologies for ocean and coastal survey. Brussels, Nov. 1999.

GRIFFITHS, G. et al. The autonomous vehicle validation experiment. *Sea Tehcnology*, v. 26, n. 2, p. 65-71, 2003.

HAWLEY, G. J.; READER, T. G. Advanced power systems for autonomus unmanned underwater vehicles: underwater vehicles. *Journal of the Society for Underwater Technology*. v. 18, n. 1, p. 24 to 33, 1992.

MACGREGOR, R. James et al. A concept exploration model for initial design of autonomus underwater vehicles. *Journal of the Society for Underwater Technology*, v. 16, n. 4, p. 3-11, 1990.

PARSONS, J. S.; GOODSON, R. E; Goldshmiel, F. R. Shaping of axisymmetric bodies for minimum drag in incompressible flow. *Journal Hydronautics*, v. 8, n. 3, p. 100-107, July 1974.

PASTER, L. Donald. *Importance of hydrodynamic considerations for underwater vehicle design*. Raytheon Company – Submarine Signal Division. In: OCEANS '86, 1986, Portsmouth, RI. *Proceedings...* Portsmouth, RI: IEEE, 1986. p. 1413-1422.

PAUL, G.; BEITZ, W. *Engineering design: a sistematic approach*. London: Springer, 2007.

POTTER, I. J. et al. Optimization of Diesel powered underwater vehicles. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 9., Brest, 1999. *Proceedings...* Brest, 1999. p. 407-414.

OSSE, James. *Low drag technology applied to human powered vehicles*. Appleid Physics Laboratory. In: OCEANS '89 AN INTERNATIONAL CONFERENCE ADDRESSING METHODS FOR UNDERSTANDING THE GLOBAL OCEAN, 2002, Seattle, 1989. *Proceedings...* Seattle: *Applied Physics Laboratory*, 1989. p. 710-714.

RIGAUD, V. *Apostila do Mini curso "Underwater Robotics"*. Rio de Janeiro: Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer – IFREMER - COOPE – UFRJ, 2001.

SCAMANS M. Geoffrey et al. Aluminum fuel cell power sources for long range: unmaned underwater vehicles. In: SYMPOSIUM ON AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE TECHNOLOGY, 1994, Cambridge, MA. *Proceedings...* Cambridge, MA, 1994. p. 179-186.

SOCIETY FOR UNDERWATER TECHNOLOGY. *Underwater Robotics Group*. Disponível em: <<http://sig.sut.org.uk/>>. Acesso em: 30 jan. 2010.