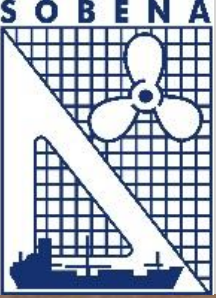


Contribuições para a otimização dos sistemas de propulsão e de manobras de embarcações fluviais

Carlos Daher Padovezi

*Palestra apresentada no SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE
TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO HIDROVIÁRIO INTERIOR, 13.,
2023, Belém. 15 slides*

A série "Comunicação Técnica" compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. REPRODUÇÃO PORIBIDA



13º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior

Belém/PA, 30 de outubro a 1º de novembro de 2023



Contribuições para a otimização dos sistemas de propulsão e de manobras de embarcações fluviais

Carlos Daher Padovezi, Engenheiro Naval, Doutor, IPT, padovezi@ipt.br



EMBARCAÇÕES FLUVIAIS - ESPECIFICIDADES

Diferentemente de grande parte das embarcações convencionais oceânicas, que trafegam a maior parte do tempo em trajetórias retilíneas e em velocidades médias relativamente altas, as embarcações fluviais convivem o tempo todo com a necessidade de realizar **manobras importantes em velocidades mais baixas.**

Também ocorrem o tempo todo **alterações de acelerações dos motores**, para redução ou aumento de velocidades, conforme as características do trecho do rio

Primeira conclusão: os requisitos existentes de manobrabilidade de embarcações para embarcações marítimas (da IMO – International Maritime Organization) não devem ser aplicados diretamente em embarcações fluviais.



EMBARCAÇÕES FLUVIAIS - ESPECIFICIDADES

Os requisitos de manobrabilidade das embarcações fluviais devem ser mais rígidos. Por exemplo, a distância máxima de parada brusca (de emergência) de embarcações fluviais deve ser muito menor do que a de uma embarcação oceânica.

A capacidade de manobras das embarcações depende diretamente dos sistemas de propulsão e de manobras: tanto da potência instalada, como do número e dimensões dos propulsores e dos lemes. No caso de sistemas de propulsão azimutal, onde os lemes não são necessários, a manobrabilidade depende da potência e do número e dimensões dos propulsores azimutais.

Com relação ao número de propulsores, verifica-se que a capacidade de manobras de embarcações mono-hélices convencionais (com lemes) é seriamente prejudicada em operações em velocidades reduzidas. A desaceleração do propulsor tende a reduzir a velocidade de água na região do leme, reduzindo, conseqüentemente, as forças aplicadas pelo leme no controle da trajetória da embarcação.



MONO-HÉLICES X BI-HÉLICES

Quadro comparativo entre embarcações fluviais mono-hélices e bi-hélices, considerando operação em baixas velocidades.

	Mono-hélice ←	Bi-hélices ←←
Capacidade de Manobras	PIOR	MELHOR
Redundância de Sistemas	NÃO	SIM
Segurança Operacional	PIOR	MELHOR

POTÊNCIA MÍNIMA INSTALADA

A potência mínima instalada em uma embarcação está relacionada com a velocidade de cruzeiro máxima desejada, mas também com a capacidade de enfrentamento de situações operacionais críticas como paradas bruscas de emergência e navegação em condições ambientais extremas (correnteza, ventos, ondas).

A potência final da embarcação geralmente é aquela obtida no projeto do sistema propulsivo, para determinada condição operacional, com acréscimo de uma margem que varia entre 10% e 20%, dependendo do tipo de embarcação. Tal margem de potência possibilita o melhor enfrentamento de situações de emergência, como uma parada brusca

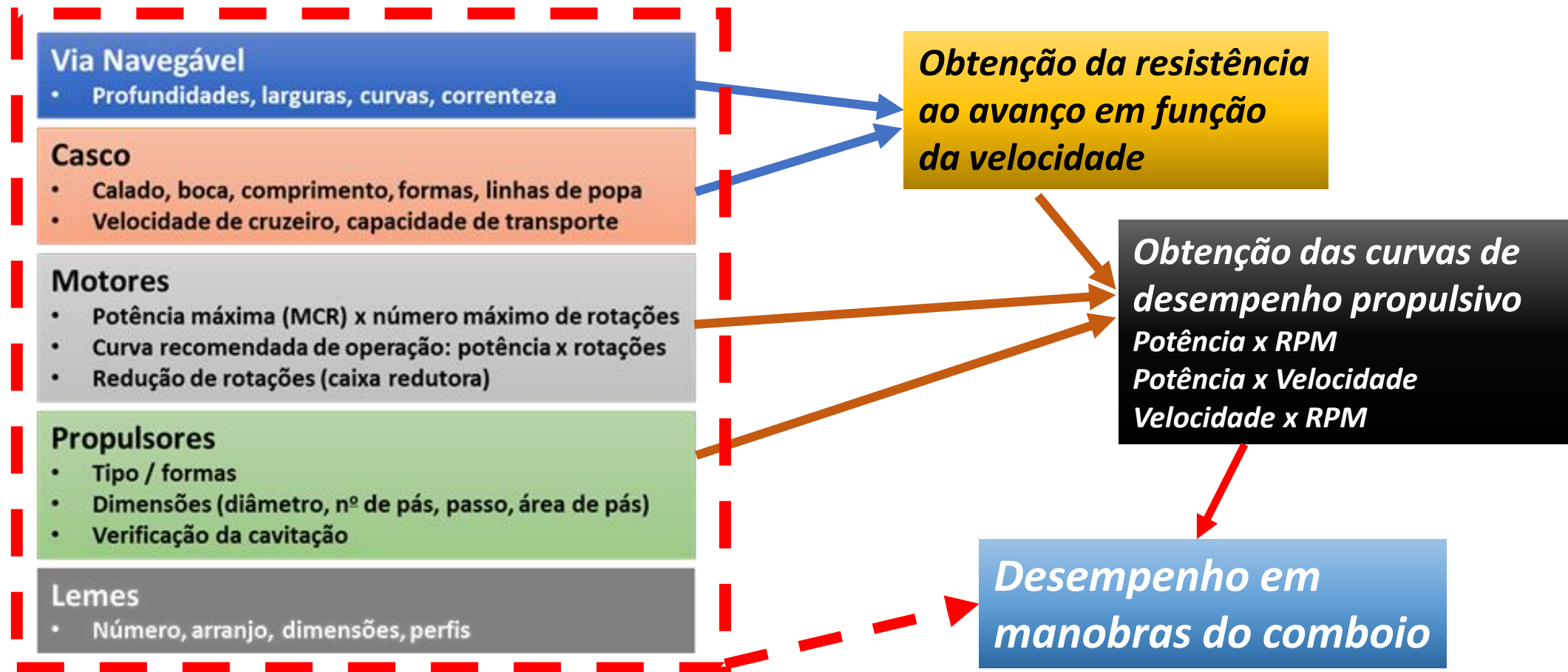


PROJETO DO SISTEMA DE PROPULSÃO E MANOBRAS - PASSOS

- a) Estudo adequado das características da hidrovia, dos seus pontos críticos dignos de atenção e das variações de níveis d'água ao longo do ano;
- b) Com a definição do casco, é possível estimar a curva de resistência em função da velocidade em várias condições de operação. Para comboios fluviais, pode ser utilizada a formulação de Howe adaptada pelo IPT e apresentada em PADOVEZI (2022); para outras embarcações, a estimativa de resistência do casco pode ser estimada satisfatoriamente utilizando HOLTROP (1984);
- c) O passo seguinte é escolher os motores e projetar os propulsores, o que deve ser feito em conjunto. Os motores e caixas de redução de rotações são escolhidos em catálogos de fabricantes após a determinação da potência mínima instalada na embarcação. Tal potência é definida a partir da relação entre potência entregue pelo motor P_D e a potência efetiva do casco P_E , da seguinte forma:
$$P_D = P_E / C_p$$
onde C_p é definido como coeficiente propulsivo. LEWIS (1988) e PADOVEZI (1997) definem os passos para se chegar às potências necessárias para navegação em função das velocidades.
- d) Em seguida, são projetados os lemes, para garantir a capacidade de manobras requerida para a embarcação.



PROJETO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA EMBARCAÇÃO FLUVIAL



PROJETO DOS PROPULSORES

As séries sistemáticas que cobrem as necessidades de projetos de embarcações fluviais são: para hélices livres (sem dutos): B-Troost e Gawn; para hélices em dutos: série Kaplan.

Espessuras dos propulsores de embarcações fluviais tendem a ser maiores que as espessuras das séries. Como forma de situar os efeitos de aumentos de espessuras nas pás dos hélices, O'BRIEN (1962) apresenta alguns dados de correções de passos e de eficiências medidos em hélices com aumentos de espessuras de 100% com relação às espessuras previstas pela série B-Troost.

Embarcações fluviais de carga, que operam com grandes deslocamentos e velocidades baixas, se operarem em águas com menor quantidade de detritos, têm vantagem em utilizar hélices em dutos, porque possibilitam aumento de empuxo do sistema de propulsão em velocidades baixas de operação: com 30% a 15% a mais das forças de empuxo dos propulsores.

Embora a utilização de hélices em dutos seja recomendada em embarcações fluviais de cargas que navegam em águas sem muitos detritos, o sistema é bastante sensível a erros de instalação. Se as pontas das pás estiverem a uma distância das paredes internas do duto maior que 0,7% do diâmetro do hélice, há uma grande perda de eficiência e a utilização de dutos passa a não fazer sentido.



CAVITAÇÃO – UM PROBLEMA A SER EVITADO

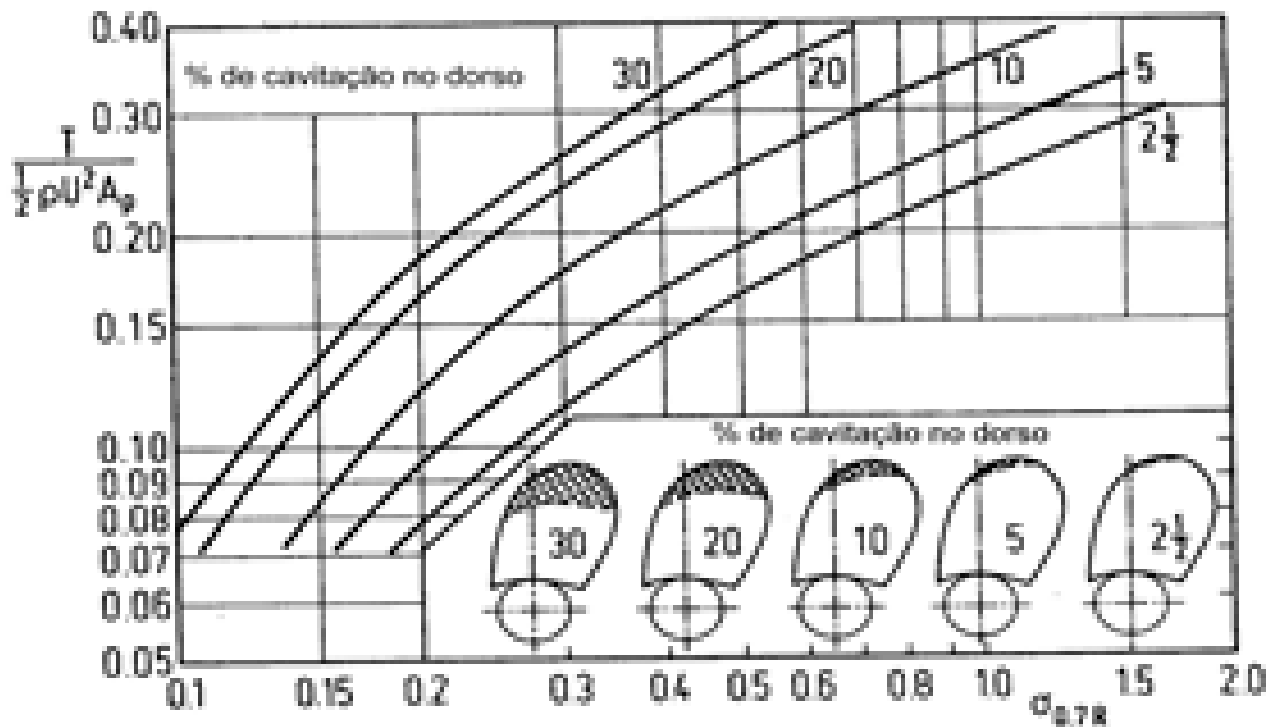


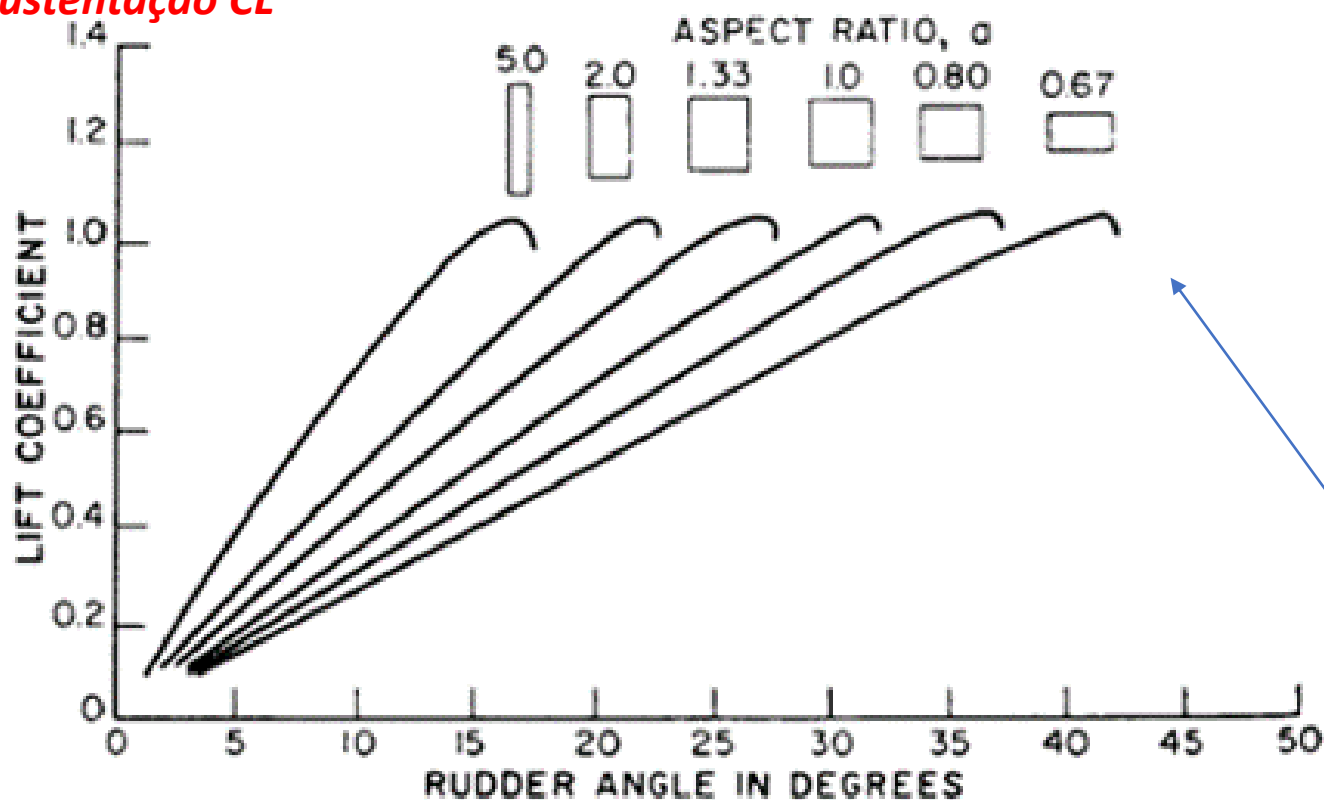
Diagrama de Burril, com indicação de porcentagem provável de cavitação nas pás (BURRIL & EMERSON, 1962).



FORÇA DE SUSTENTAÇÃO DE LEMES x RAZÃO DE ASPECTO

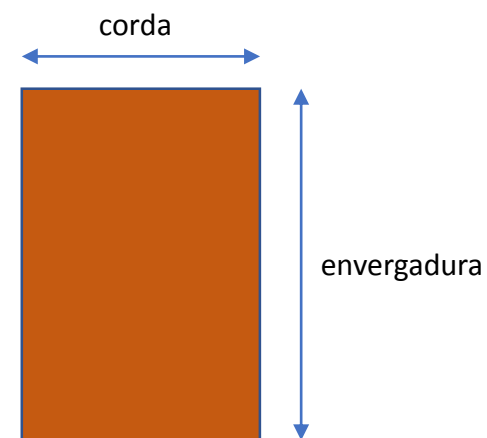
Coeficiente de sustentação C_L

Razão de aspecto



Ângulo de leme δ (graus)

Razão de aspecto = envergadura / corda



Em empurrares fluviais, os lemes têm razões de aspecto menores e, portanto, curvas C_L x δ com ponto de *stall* em ângulos maiores.

Fonte: publicação de Van Lammeren, Troost e Koning, de 1948, citada em LEWIS (1989).



PROJETO DE LEMES

Para gerar as forças de manobra e os momentos necessários, os lemes (um ou mais) devem ter uma área total suficiente. Embarcações fluviais que têm geralmente restrições de calados, tendem a ter necessidade de mais que um leme.

Quando não existe espaço suficiente na popa de uma embarcação para colocar um leme apenas atrás de cada hélice, podem ser adotados lemes múltiplos, de modo a se garantir uma área necessária para gerar força e momento necessário para uma boa capacidade de manobras.

A área total necessária dos lemes de uma embarcação é normalmente expressa como uma razão da área submersa lateral da embarcação $L \times T$, onde L é o comprimento entre perpendiculares e T é o calado da embarcação carregada. No caso de comboios, deve ser considerado o maior comprimento possível do empurrador mais o conjunto de barças. Em comboios navegando em altas velocidades de correntes, a razão entre área de lemes a $(L \times T)$ se situa entre 0,045 e 0,050. Para embarcações de carga que navegam em águas com velocidades baixas de correntes, a relação $A_L/(LT)$ exigida está na faixa entre 0,020 e 0,030. Para embarcações de menor porte, a faixa da relação $A_L/(LT)$ se situa entre 0,017 e 0,023.



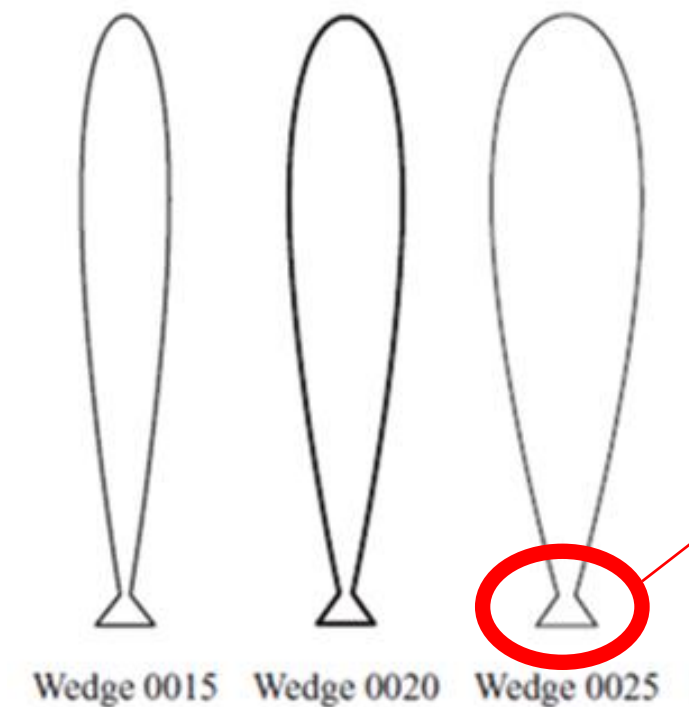
FORÇAS NOS LEMES

Conhecendo-se o coeficiente de sustentação C_L em função do ângulo de leme e a área do leme pode ser obtida a força normal ao leme:

$$F_N = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A_L \cdot U_R^2 \cdot \sin \alpha_R$$

onde U_R e α_R são, respectivamente, a velocidade no leme e o ângulo de entrada do escoamento no leme. ρ é a densidade específica da água.

LEMES DE ALTA SUSTENTAÇÃO - “FISH TAIL”

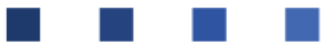


O aumento de coeficiente de sustentação C_L devido à adoção de *fish tail*, pode ser da ordem de 40% para ângulo de leme entre 15 e 20 graus.

Os aumentos correspondentes de forças de arrasto nos lemes serão compensados pelos ganhos em poder de manobras das embarcações fluviais de grande porte.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

- **Embarcações fluviais**, para se adaptar adequadamente às necessidades de manobras em baixas velocidades, às vezes com ação externa importante de ventos e/ou de correntes, **devem ter mais que um hélice**.
- A definição da **potência instalada** nas embarcações sempre deve levar em consideração uma **margem** que possa ser utilizada em situações emergenciais. Por exemplo, com motores em ré, em uma parada brusca.
- Os projetos adequados de propulsores e de lemes podem ser desenvolvidos de forma simplificada, utilizando ferramentas consagradas na engenharia naval e banco de dados disponíveis em referências bibliográficas, como curvas de Água Aberta de séries de hélices e curvas de coeficientes de sustentação e de arrasto de perfis de lemes.



Obrigado!

- Carlos Daher Padovezi
- padovezi@ipt.br

 [linkedin.com/school/iptsp/](https://www.linkedin.com/school/iptsp/)

 [instagram.com/ipt_oficial/](https://www.instagram.com/ipt_oficial/)

 [youtube.com/@IPTbr/](https://www.youtube.com/@IPTbr/)

www.ipt.br

 **ipt**
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

 **SÃO
PAULO**
GOVERNO
DO ESTADO