Esse documento mostra uma possível abordagem física e experimental para investigar o fenômeno, ***mas não se limite a ela****! Há inúmeras formas diferentes de analisar qualquer problema da IYPT.*

Vórtice de Ar

Coloque um pequeno ímã em forma de haste no fundo de um recipiente cheio de líquido e faça-o girar usando um agitador magnético. Acima de uma certa velocidade de rotação, forma-se um fino canal de ar que se estende da superfície do líquido até o próprio ímã em rotação. Investigue e explique esse fenômeno.



1 Enunciado

O enunciado pede uma investigação e explicação para o surgimento de um canal de ar quando um ímã gira no fundo de um recipiente com líquido. Desse modo, apesar de não estar explícito no enunciado, espera-se que o participante conduza experimentos e teste a influência de determinados parâmetros como parte da investigação. Assim, tais procedimentos são esperados: (a) uma análise qualitativa do fenômeno, (b) a formulação de um modelo teórico e (c) a condução de uma experimental que busque medir a eficácia do modelo teórico.

1.1 Questionamentos Iniciais

Quais são os parâmetros do fluido, do ímã, do recipiente e das condições iniciais que influenciam na geração do vórtice de ar? Há alguma condição limite que impeça a formação do vórtice? Quais características do vórtice podem ser medidas?

1.2 Parâmetros

Para avaliar extensivamente o fenômeno, considere os seguintes parâmetros relevantes:

- **Caracterização do ímã**
  - Comprimento do ímã;
  - Diâmetro do ímã;
- **Caracterização do líquido:**
  - Viscosidade do líquido.
  - Densidade do líquido;
- **Caracterização do recipiente com líquido:**
  - Diâmetro do recipiente;
  - Altura do líquido;
  - Relação entre altura e diâmetro;

- **Caracterização do agitador magnético:**
  - Velocidade de rotação do ímã.

2 Análise Qualitativa

2.1 Conceitos Físicos Importantes

- **Rotação e momento angular**
  1. **Definição:** Momento angular é a quantidade de movimento associada à rotação de um corpo em torno de um eixo.
  2. **Como afeta:** Em uma partícula de fluido, o momento angular em torno do eixo é:

$$l = mrv,$$

Em que m é a massa da partícula, r é sua distância do centro, e v é a velocidade tangencial. Em um escoamento invíscido, axissimétrico e sem torque externo em torno do eixo, essa quantidade pode ser conservada durante o movimento da partícula:

$$l = mrv = constante,$$

Isso nos mostra que, conforme nos afastamos do centro (aumenta r), a velocidade do fluido diminui. No entanto, o problema não envolve um vórtice ideal, já que há a influência externa do ímã e do recipiente. Assim, é necessário buscar outras explicações mais completas para a teoria.

- **Vórtice**
  1. **Definição:** Região onde o fluido gira predominantemente em torno de um eixo. A menor pressão no centro gera uma diferença de pressão, que ajuda a manter o vórtice.
  2. **Como ocorre:** O ímã começa a girar. Por causa da viscosidade do fluido, há uma transferência de momento angular do ímã para o líquido perto dele. Aos poucos, o movimento da porção mais abaixo do fluido é transmitido para as camadas vizinhas. Isso estabelece o movimento circular.
  3. **Como se mantém:** No movimento circular de um fluido, a inércia tende a fazer com que o fluido se afaste do centro. Ao mesmo tempo, no centro, há uma região de baixa pressão comparada à pressão do restante do fluido. Com isso, o gradiente de pressão em direção ao centro provoca a aceleração centrípeta necessária para o movimento circular.
- **Altura da camada de ar:**
  1. **Definição:** A superfície do líquido é mais alta na periferia e mais baixa no centro (formato de funil). Podemos visualizar isso a partir da equação de Bernoulli:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{constante} \tag{1}$$

No geral, P é constante. Assim, como v é maior no centro, a altura h do líquido deve ser menor para manter o valor constante. A equação de Bernoulli ajuda a entender o porquê da superfície do fluido se deprimir no centro, mas a análise do gradiente radial de pressão é mais adequada para explicar o fenômeno de forma mais completa.

  2. **Como afeta:** Dependendo da velocidade de rotação, a formação do canal de ar pode ocorrer ou não.

No geral, quanto maior a velocidade de rotação, maior o tamanho da depressão no centro.

- **Forças Viscosas**
  1. **Definição:** A viscosidade é uma propriedade do fluido associada à resistência relativa entre camadas de fluido que se movimentam em velocidades diferentes. Essa diferença faz com que as camadas exerçam forças entre si (arrasto).
  2. **Como afeta:** O ímã em movimento arrasta o líquido das regiões vizinhas por meio das forças viscosas. Essas regiões, por sua vez, arrastam outras camadas de fluido e provocam o movimento de todo o líquido. Assim, a geometria do ímã, a sua velocidade e a viscosidade do líquido influenciam a transmissão do movimento e a consequente formação do vórtice de ar.
- **Número de Reynolds**
  1. **Definição:** Compara os efeitos inerciais com os efeitos viscosos.
  2. **Como afeta:** Um maior número de Reynolds indica que efeitos inerciais são mais intensos em relação aos viscosos. É uma boa medida (embora não suficiente) para prever a formação do canal de ar.

3 Sugestão de Experimental

3.1 Equipamentos e Forma de Extração de Dados

- **Recipiente transparente** alto e largo o suficiente para permitir a formação do vórtice e registro de seu movimento;
- **Fita métrica ou régua** para relacionar a distância real com a distância no vídeo;
- **Câmera ou smartphone** para capturar o movimento do vórtice e do ímã;
- **Ímã/"peixinho"** com diferentes tamanhos (comprimento e diâmetro). Sobre variar o formato, sugere-se que você comece variando a densidade e as dimensões do ímã, uma vez que modelar o movimento de diferentes formatos de ímãs é mais complexo;
- **Agitador magnético** que permite ampla variação de velocidade de rotação do ímã. Pode ser comprado ou construído (há diversos tutoriais no Youtube);
- **Líquidos** de diferentes viscosidades prioritariamente. A densidade também pode ser variada;
- **Software de rastreamento (Tracker ou similar)** para identificar o vórtice no vídeo.

3.2 Metodologia

- **Preparo do sistema**: Encha de água o recipiente até a altura desejada. Ponha a régua na frente do recipiente para depois ajustar as medidas no software de rastreamento. Marque, no fundo do recipiente, o seu centro. Posicione o ímã nessa marcação.
- **Registro digital**: Posicione a câmera de frente para o recipiente, permitindo capturar a superfície e o fundo do líquido.
- **Análise da evolução do vórtice**: Importe o vídeo no software de rastreamento. Marque quadro a quadro a altura mais baixa da depressão de ar. Também, a cada experimento, registre aspectos como a estabilidade da depressão de ar (oscila/não oscila), tempo médio para atingir um regime estacionário e se a barra perde seu acoplamento magnético.
- **Análise do movimento do ímã**: Marque, com uma cor vibrante, uma das extremidades do ímã, de

forma que consiga visualizá-la no vídeo e registrar os quadros em que completa uma volta. Isso seria uma estimativa da velocidade angular do ímã. Muitos agitadores magnéticos comprados vêm com uma leitura da velocidade angular, que pode ser do ímã (necessidade de consulta).

- **Organização dos dados**: Mantenha em uma planilha todos esses resultados.

3.3 Cuidados Experimentais, Incertezas e Possíveis Erros

- **Minimização de paralaxe**: Ponha a câmera centralizada em um plano paralelo ao vórtice e a uma distância considerável do recipiente.
- **Ambiente estável**: Mantenha a câmera estável ao longo do experimento, sem realizar vibrações. Também tenha o cuidado de esperar o líquido se estabilizar entre experimentos.
- **Configurações do software**: Ajuste o sistema de coordenadas e o momento inicial de análise (frame 0) de forma consistente (ex.: 5 segundos após começar a rotação).
- **Posição do vórtice**: É importante que o recipiente seja largo o suficiente para que nem o ímã, nem o vórtice sofram interferência da parede do recipiente. Por isso, posicionar o ímã no fundo e no centro e assegurar que há o mínimo contato com a parede são ações cruciais.

3.4 Limites Experimentais

- **Distorção de refração**: A luz, ao passar pelo líquido/recipiente, sofre uma mudança de velocidade caracterizada pelo índice de refração do meio. Assim, a altura da depressão de ar capturada pela câmera pode não corresponder à medida real.
- **Distorções de paralaxe**: Recipientes muito altos podem sofrer distorções causadas pela paralaxe.
- **Sem medidas diretas**: Essa experimental permite uma investigação sobretudo do movimento do vórtice de ar, mas não tem equipamentos específicos para realizar medidas diretas de outras grandezas físicas.
- **Identificação da velocidade de rotação do ímã**: Em determinadas condições experimentais, o ímã pode atingir altas velocidades angulares. Somado à baixa visibilidade devido ao fluido e ao material do recipiente, calcular a velocidade de rotação do ímã pode não ser possível. Mesmo assim, gravar com alta taxa de quadros pode ser útil.

3.5 Investigações Adicionais

Para analisar as diferentes grandezas relacionadas ao fenômeno e/ou contornar os diferentes limites experimentais, você pode tentar:

- Investigar a influência de diferentes formatos de ímãs, uma vez que sua geometria impacta as forças viscosas e a transferência de momento angular.
- Calcular o número de Reynolds para cada configuração experimental. Há também o número de Froude, o qual compara a escala de aceleração relacionada à aceleração com a aceleração da gravidade.
- Investigar abordagens diferentes para capturar a velocidade angular do ímã.

4 Referências para Estudo

- **Kit de Referência da IYPT** (inglês), material excelente para encontrar artigos sobre o fenômeno;
- **Vídeo de Exposição do Fenômeno** (inglês), excelente para entender o problema qualitativamente.