

## Bolinhas aos saltos - Um modelo para transições de fase e instabilidades

Por favor, antes de começar este problema, leia as instruções gerais que se encontram noutro envelope.

### Introdução

As *transições de fase* são processos bem conhecidos na vida diária; ex: a água pode-se encontrar em diferentes estados: líquido, sólido e gasoso. Para passar de um estado ao outro, ocorre uma transição de fase, onde o comportamento coletivo das moléculas do material muda drasticamente. Tipicamente, uma transição de fase está associada a uma temperatura de transição; ex: a temperatura de fusão e de ebulição da água, no exemplo acima.

As transições de fase podem também ocorrer nos mais variados sistemas, como em magnetes ou supercondutores, onde à temperatura de transição o sistema passa de paramagnético para ferromagnético ou de um condutor normal para supercondutor, respetivamente.

Para descrever uma transição de fase utiliza-se o conceito de *parâmetro de ordem*. Por exemplo, num magnete o parâmetro de ordem está associado com o alinhamento dos momentos magnéticos dos átomos que conduz a uma magnetização macroscópica do sistema.

Quando temos uma transição de fase contínua, o parâmetro de ordem é nulo acima da temperatura crítica, e cresce monotonamente abaixo da mesma, como é mostrado esquematicamente para um magnete na figura 1 abaixo. A temperatura de transição de uma transição de fase contínua chama-se temperatura crítica. Na figura representa-se a magnetização macroscópica (o parâmetro de ordem neste caso) em função da temperatura num magnete. A baixas temperaturas os momentos magnéticos estão alinhados e há uma magnetização macroscópica na amostra, enquanto que a temperaturas maiores que a temperatura crítica, os magnetes estão orientados aleatoriamente, e a magnetização macroscópica é nula.

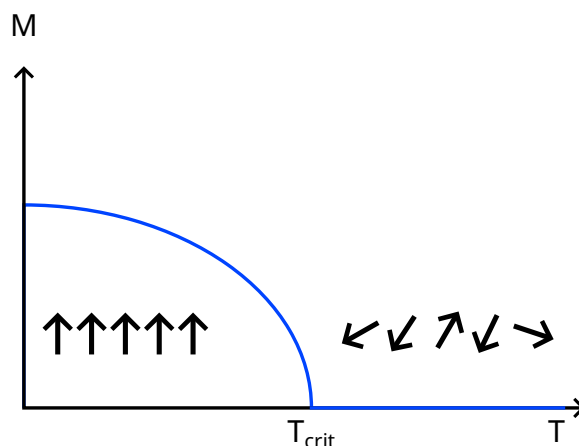


Figura 1: Representação esquemática da dependência do parâmetro de ordem  $M$  em função da temperatura para uma transição de fase. Abaixo da temperatura crítica,  $T_{crit}$ , o parâmetro de ordem aumenta, enquanto que é nulo a temperaturas acima de  $T_{crit}$ .

Em geral, numa transição de fase contínua verifica-se que o parâmetro de ordem perto da transição segue uma lei de potências; ex: no caso de um magnete a magnetização  $M$  abaixo da temperatura

crítica  $T_{\text{crit}}$  é dada por:

$$M \begin{cases} \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, & M < T_{\text{crit}} \\ = 0, & M > T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (1)$$

onde  $T$  é a temperatura. O que é mais surpreendente é que este comportamento diz-se universal: o expoente desta lei de potências é o mesmo para tipos diferentes de transições de fase.

## Tarefa

Iremos estudar um exemplo simples onde algumas características das transições de fase contínuas podem ser estudadas; ex: como as instabilidades no sistema podem determinar o comportamento coletivo das partículas e a transição de fase, ou como as alterações macroscópicas do sistema dependem da excitação das partículas.

Nas transições de fase, o nível de excitação das partículas é normalmente controlado pela temperatura. Contudo, no nosso exemplo, a excitação das partículas consiste na energia cinética das mesmas que é fornecida ao sistema por um altifalante. A alteração macroscópica correspondente à transição de fase que iremos estudar nesta experiência consiste na acumulação das bolinhas numa das metades do cilindro (que estão separadas por uma pequena parede).

As partículas deixam de acumular num dos lados quando se aumenta a amplitude do movimento vertical. Para altas amplitudes as partículas distribuem-se igualmente entre as duas metades do cilindro. Isto corresponde a aquecer o sistema a temperaturas acima da temperatura crítica.

O objetivo desta experiência é determinar o expoente crítico para este modelo de transições de fases.

## Lista de material

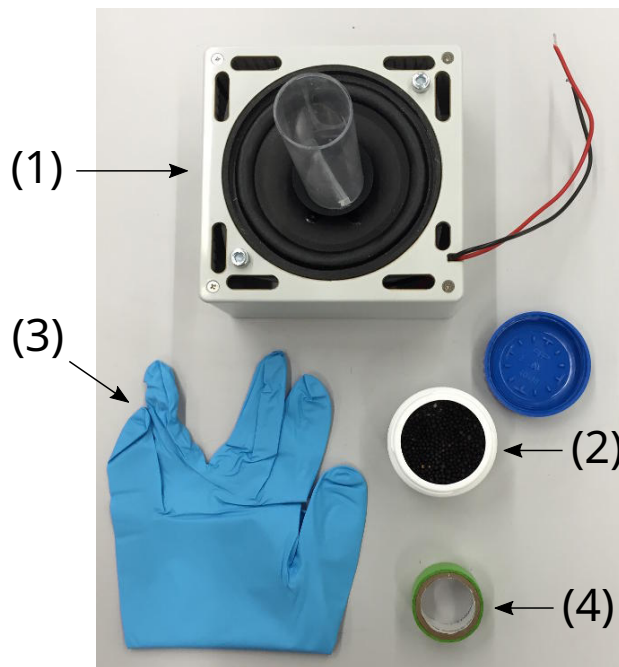


Figura 2: Equipamento adicional para esta experiência.

1. Montagem com o cilindro de plástico colocado em cima do altifalante
2. Aproximadamente 100 sementes de papoila (num recipiente de plástico)
3. Uma luva
4. Fita adesiva

## Cuidados Importantes

- Não exerça uma força lateral excessiva no cilindro quando este está montado no altifalante. Note que o material não será substituído no caso de se romper a membrana do altifalante ou de se partir o cilindro de plástico.
- Desligar o altifalante sempre que não esteja em uso de modo a poupar a bateria.
- A diferença de potencial fornecida pelo gerador de sinal aos terminais do altifalante é um sinal dente de serra com frequência 4 Hz.
- A amplitude deste sinal pode ser ajustada com o potenciômetro *speaker amplitude*, indicado com o número (4) na figura 2 das instruções gerais. A diferença de potencial contínua medida entre o terminal de saída *speaker amplitude* indicado com o número (6) e o terminal terra, indicado com o número (7), é proporcional à amplitude do sinal fornecido ao altifalante.
- O altifalante é delicado. Assegure-se que não aplica nenhuma pressão excessiva desnecessária lateralmente ou verticalmente.

## Parte A. Amplitude crítica de excitação (3,3 pontos)

Antes de iniciar a experiência, ligue o altifalante aos terminais do gerador de sinal (assegure-se que está a utilizar a polaridade correta). Coloque algumas (ex: 50) sementes de papoila no cilindro que está colocado em cima do altifalante. Utilize fita adesiva e uma secção da luva (corte um pedaço) para fechar o cilindro, de modo a que as sementes fiquem fechadas lá dentro. Ligue o interruptor do altifalante ((8), figura 2 das instruções gerais) e ajuste a amplitude no potenciómetro *speaker amplitude* (4) usando a chave de parafusos fornecida. Teste diferentes amplitudes e observe como as sementes se acumulam nas duas metades do cilindro.

A primeira tarefa consiste em determinar o valor da amplitude crítica de excitação para que a transição se observe. Com este objetivo, determine o número  $N_1$  e  $N_2$  de sementes nos dois compartimentos (em cada medida  $N_1$  é o número de sementes no compartimento com menos sementes, e  $N_2$  é o número de sementes no compartimento com mais sementes) em função da amplitude  $A_D$ , que é a diferença de potencial medida entre a saída *speaker amplitude* (6) e a terra (7). Esta diferença de potencial é proporcional à amplitude do sinal transmitido ao altifalante. Faça pelo menos 5 medidas por cada diferença de potencial aplicada.

Nota:

- Para que as sementes se movam, use valores de *speaker amplitude* maiores que 0,7 V. Observe o comportamento do sistema variando lentamente a voltagem aplicada. Pode ser que algumas sementes fiquem sempre coladas ao fundo do recipiente devido a estarem carregadas eletrostaticamente. Se for esse o caso, não inclua estas sementes nas suas contagens.

<b>A.1</b>	Registe na <b>Tabela A.1</b> as medidas dos números de partículas $N_1$ e $N_2$ nas duas metades do cilindro para várias amplitudes $A_D$ .	1.2pt
<b>A.2</b>	Calcule o desvio padrão das suas medidas $N_1$ e $N_2$ e apresente esses resultados na <b>Tabela A.1</b> . Represente no <b>Gráfico A.2</b> , $N_1$ e $N_2$ em função da amplitude $A_D$ . Inclua as incertezas nos pontos marcados no gráfico.	1.1pt
<b>A.3</b>	Com base no gráfico, determine a amplitude crítica $A_{D,crit}$ , acima da qual os valores de $N_1$ e $N_2$ (obtidos após esperar suficiente tempo para serem aproximadamente independentes do tempo) são aproximadamente iguais.	1pt

## Parte B. Calibração (3,2 pontos)

A amplitude  $A_D$  medida corresponde à diferença de potencial aplicada no altifalante. Contudo a quantidade física de interesse é  $A$ , a distância entre o mínimo e o máximo do movimento vertical da oscilação da membrana do altifalante, pois esta distância está relacionada com a excitação transmitida às sementes. Assim, será necessário estabelecer a relação entre  $A_D$  e  $A$ . Com este objetivo pode utilizar qualquer material que foi fornecido.

<b>B.1</b>	Faça um diagrama da montagem que utilizou para medir a amplitude da excitação, i.e a distância máxima $A$ , referida acima, medida em milímetros.	0.5pt
<b>B.2</b>	Determine o valor $A$ medido em milímetros para um número apropriado de pontos, i.e. registe na <b>Tabela B.2</b> a amplitude $A$ em função da amplitude $A_D$ . Indique o erro nas suas medidas.	0.8pt

<b>B.3</b>	Represente os seus dados no <b>Gráfico B.3</b> , incluindo as incertezas das medidas.	1.0pt
<b>B.4</b>	Determine os parâmetros da curva que aproxima de forma apropriada a função de calibração $A(A_D)$ .	0.8pt
<b>B.5</b>	Determine o valor da amplitude crítica da excitação $A_{crit}$ das sementes de poila.	0.1pt

### Parte C. Expoente crítico (3,5 pontos)

Neste sistema, a temperatura corresponde à energia cinética fornecida. Esta energia é proporcional ao quadrado da velocidade da membrana do altifalante, i.e.  $v^2 = A^2 f^2$ , onde  $f$  é a frequência da oscilação. Iremos agora obter o expoente  $b$  da lei de potências que governa o comportamento do parâmetro de ordem (ver Eq. 1).

<b>C.1</b>	Neste sistema, o quociente $\left  \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ é um bom candidato para parâmetro de ordem, pois é próximo de zero acima da temperatura crítica e é igual a 1 para valores baixos da excitação. Registe na <b>Tabela C.1</b> o valor do parâmetro de ordem em função da amplitude $A$ .	1.1pt
<b>C.2</b>	Represente o quociente $\left  \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ em função de $ A_{crit}^2 - A^2 $ no <b>Gráfico C.2a</b> onde os eixos estão na escala logarítmica (se quiser usar uma escala linear use o gráfico C2b). Pode usar a <b>Tabela C.1</b> para o seus cálculos. Os pontos no gráfico poderão aparentar não seguir uma linha reta, mas deverá, ainda assim, associar a melhor reta a estes dados de modo a conseguir estimar o expoente crítico pedido na alínea abaixo.	1pt
<b>C.3</b>	Determine o expoente $b$ e estime o erro.	1.4pt