



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”**  
Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição

**LAN 2662 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS NO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS II**

# **Transferência de Massa**

## **Secagem**

Profa. Gabriela Feltre



## Roteiro da Aula:

- ✓ Conceitos básicos;
- ✓ Transferência de massa;
- ✓ Lei de Fick – difusividade;
- ✓ Secagem;
- ✓ Cinética de Secagem.



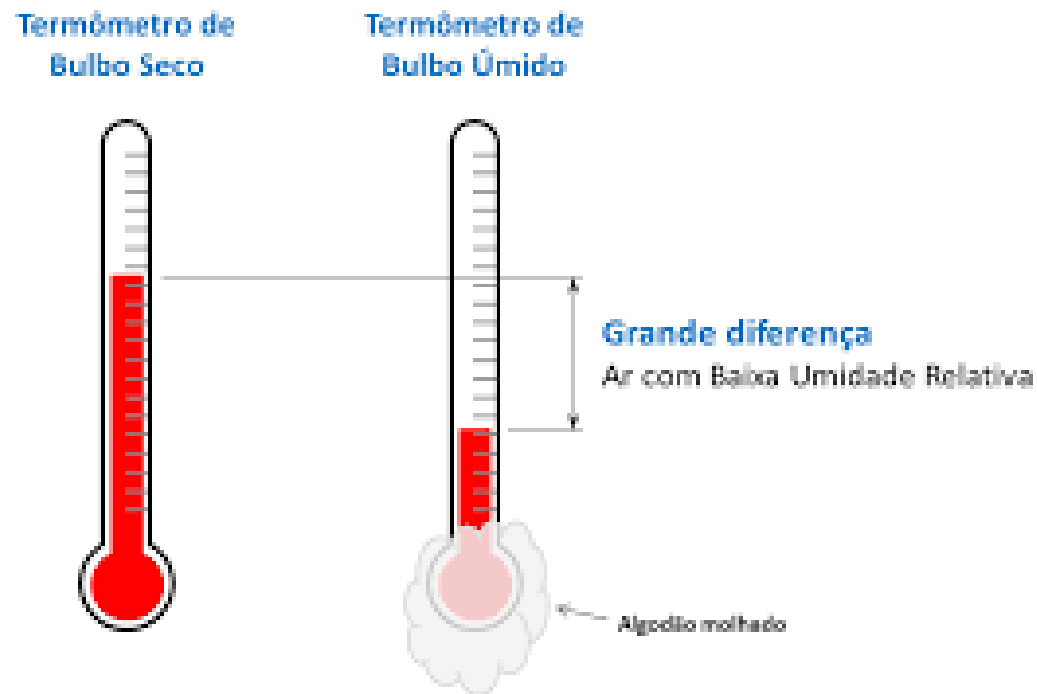
# *Conceitos básicos*



## Umidade relativa do ar (UR)

$$UR_{ar}(\%) = \left( \frac{m_{\text{água}}^{ar}}{m_{\text{água}}^{ar-saturado}} \right)_T \cdot 100$$

## Temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ) e Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ )





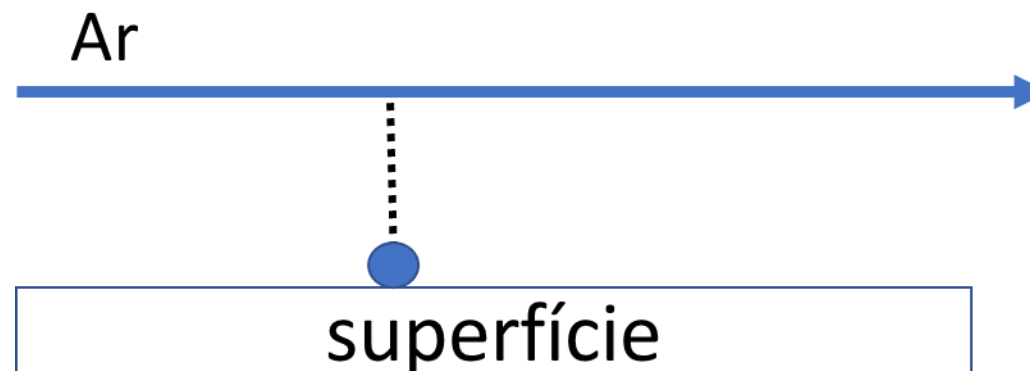
# *Transferência de massa*

## Transferência de massa

- ✓ É o processo de transporte em que há migração de uma (ou mais) espécie química por um meio;
- ✓ Esse meio pode ser sólido, líquido e gasoso;
- ✓ Dois mecanismos de transferência de massa:
  - Difusão;
  - Convecção.

## Convecção

- ✓ O transporte acontece pela diferença de densidade dos fluidos;
- ✓ Na secagem, por exemplo, o vapor de água na superfície do alimento é transportado para o ar.







# Conveção

## Transferência de Massa

✓ Natural:

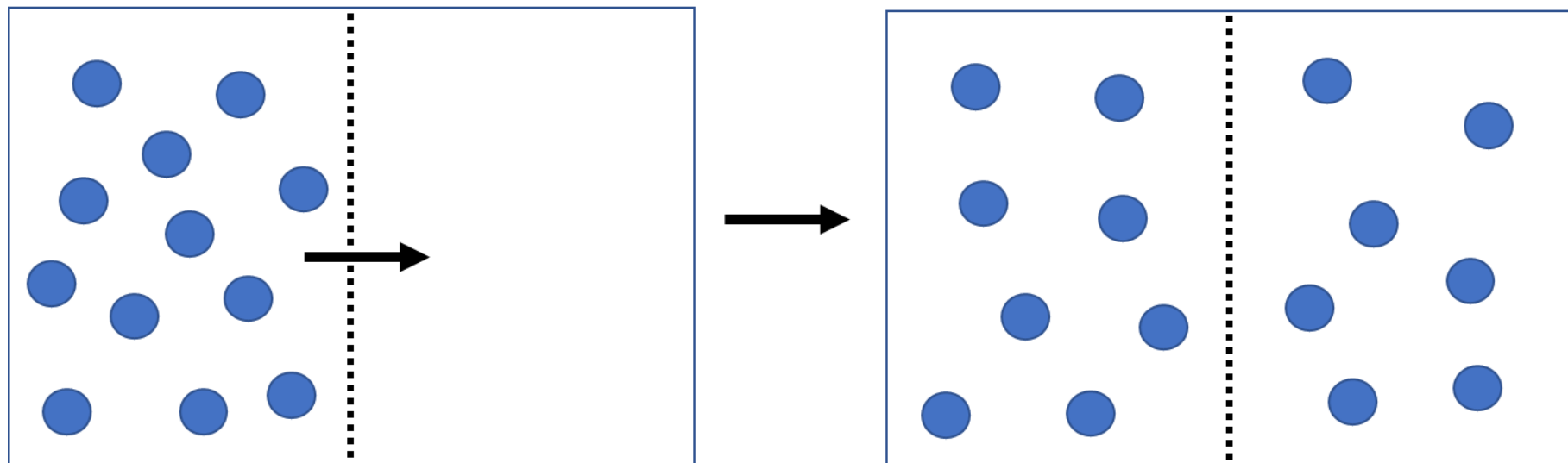
Movimentação do fluido ocorre sem fontes externas.

✓ Forçada:

Movimentação do fluido é facilitada por uma fonte externa.

## Difusão

- ✓ O transporte acontece pelo movimento das moléculas;
- ✓ O soluto passa de zona de maior concentração para menor concentração → **GRADIENTE DE CONCENTRAÇÃO**



## Cinética de transferência de massa

$$\text{Cinética} = \frac{d\text{reação}}{dt}$$

Cinética  $\longrightarrow$  quanto uma reação varia com o tempo

# Cinética de transferência de massa

- ✓ Difusão: Lei de Fick

$$\frac{\partial \left(\frac{m}{A}\right)}{\partial t} = -D \nabla c \quad \frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c$$



Adolf Eugen Fick

(03/09/1829 — 21/08/1901)

D = coeficiente de difusividade: facilidade com que um soluto se move em um determinado solvente.



# *Secagem*

# Redução da atividade de água

## Secagem

Conservação e segurança

Logística e conveniência

### Métodos

#### Concentração

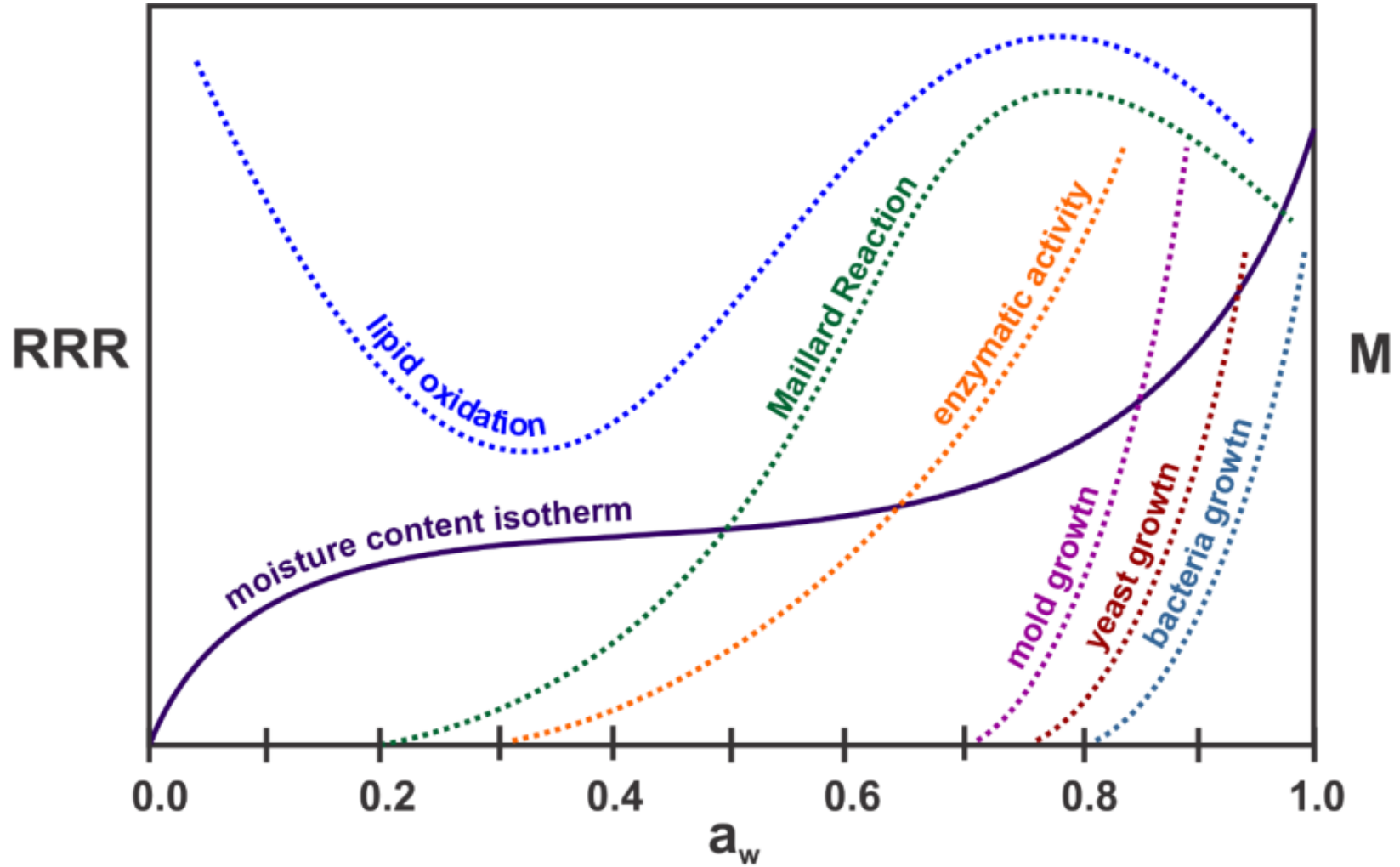
- Evaporação
- Membranas
- Crioconcentração
- Desidratação osmótica

#### Adição de solutos

#### Secagem

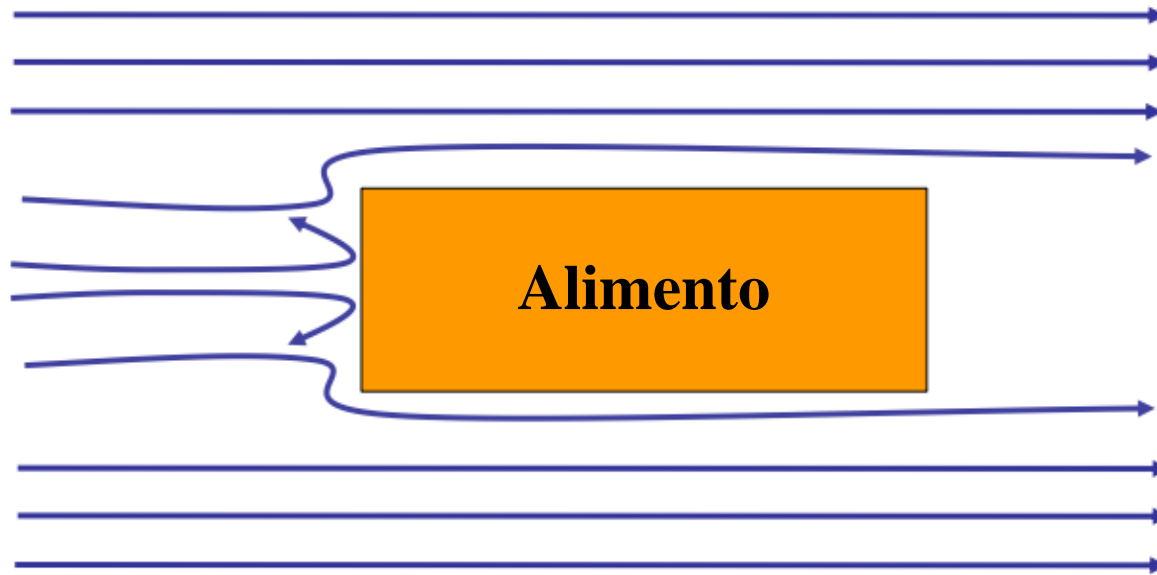
- Ar
- Contato
- Extrusão
- Liofilização

# Secagem



## Olhando para o alimento

ar seco



**Alimento seco**



## Olhando para o ar



Olhando para o ar

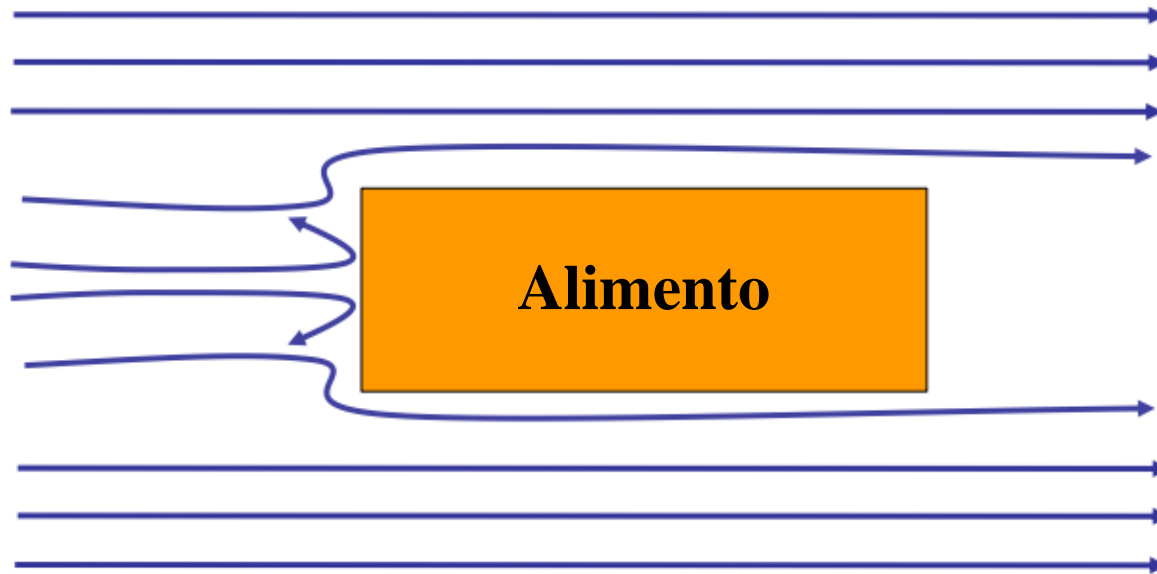
**PSICROMETRIA:  
PRÓXIMA AULA!**

ar que  
é seco

de um  
e úmido

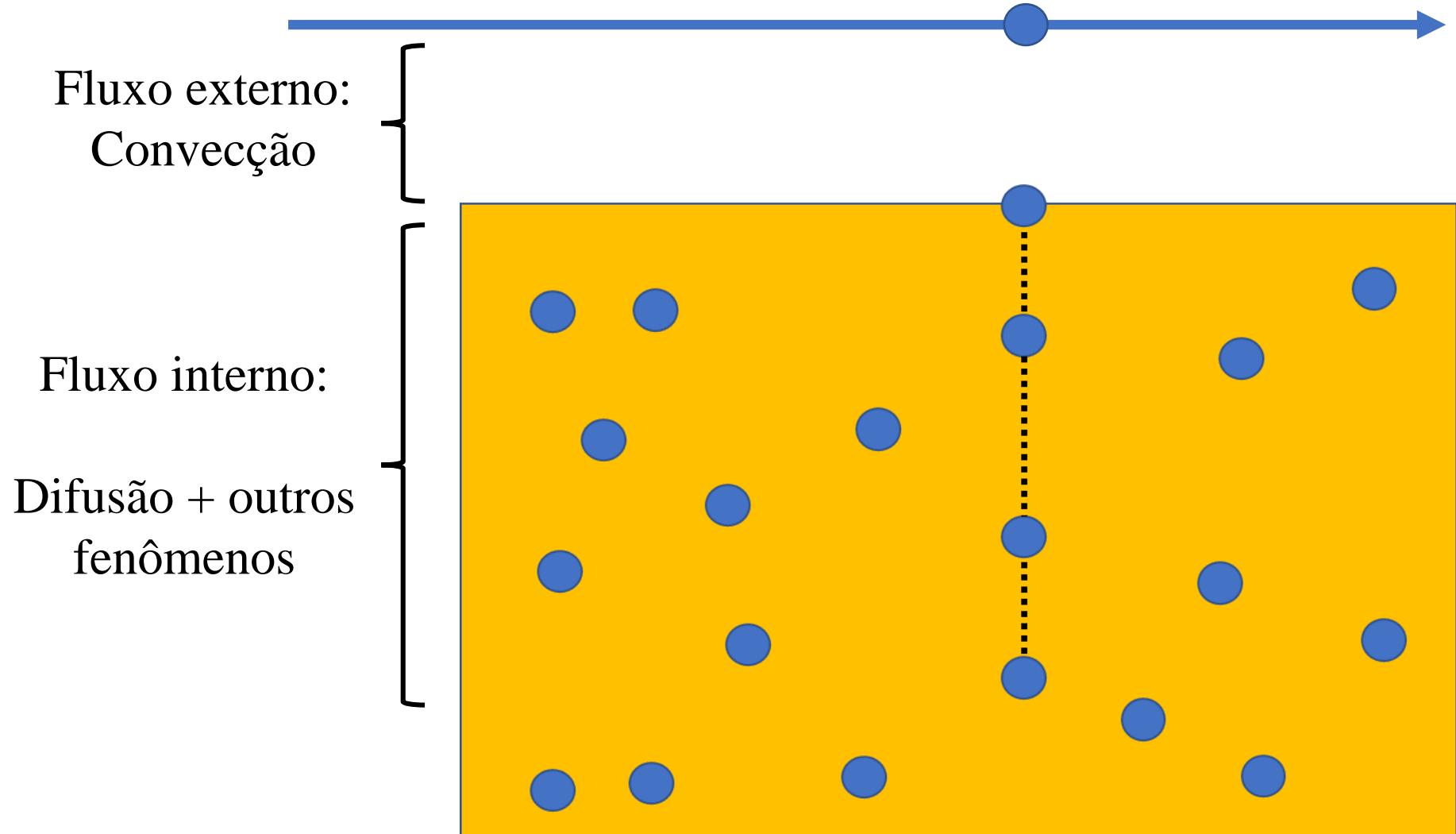
## Olhando para o alimento

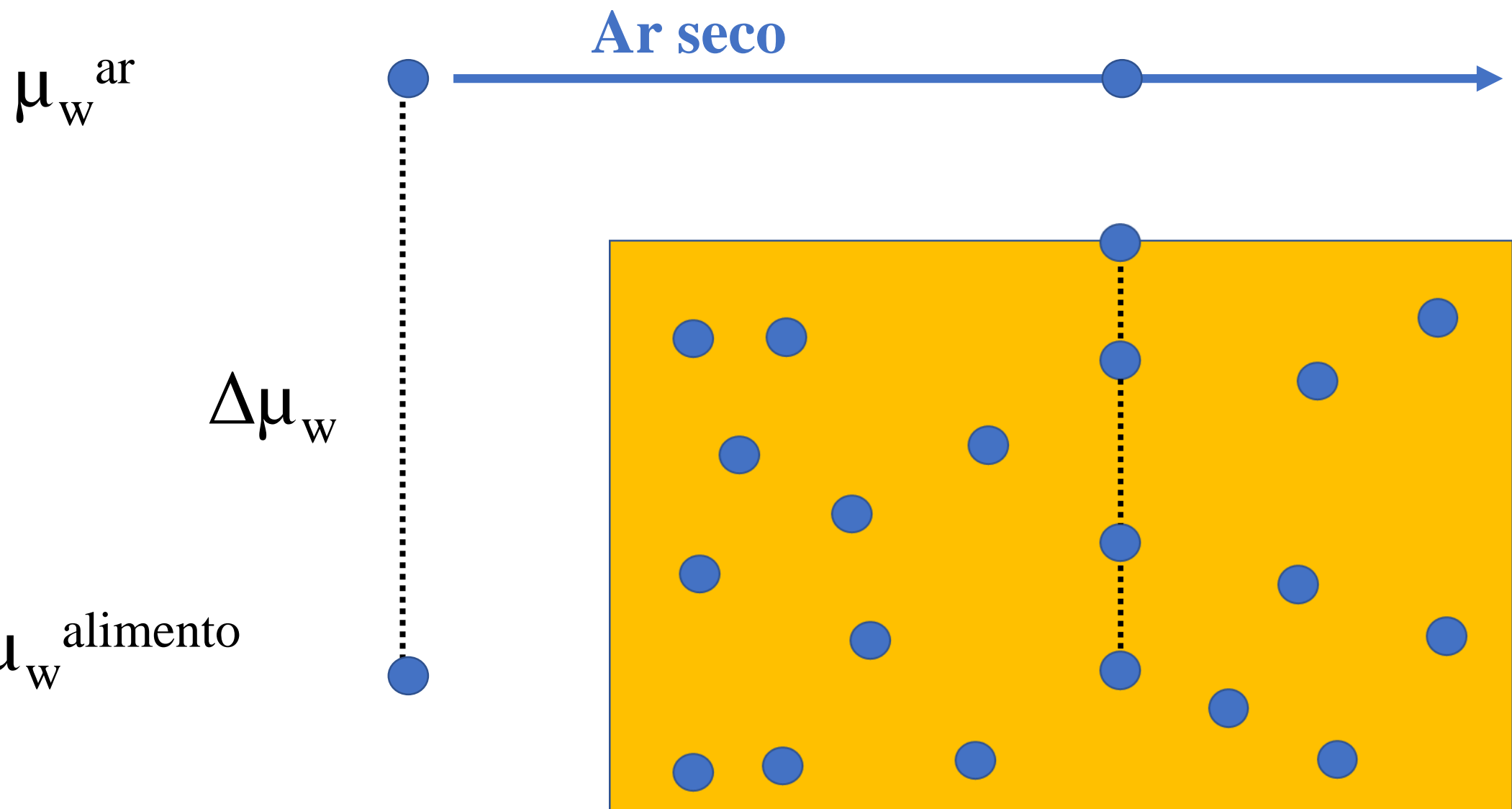
ar seco



**Alimento seco**

Ar seco







**Secagem**

UR

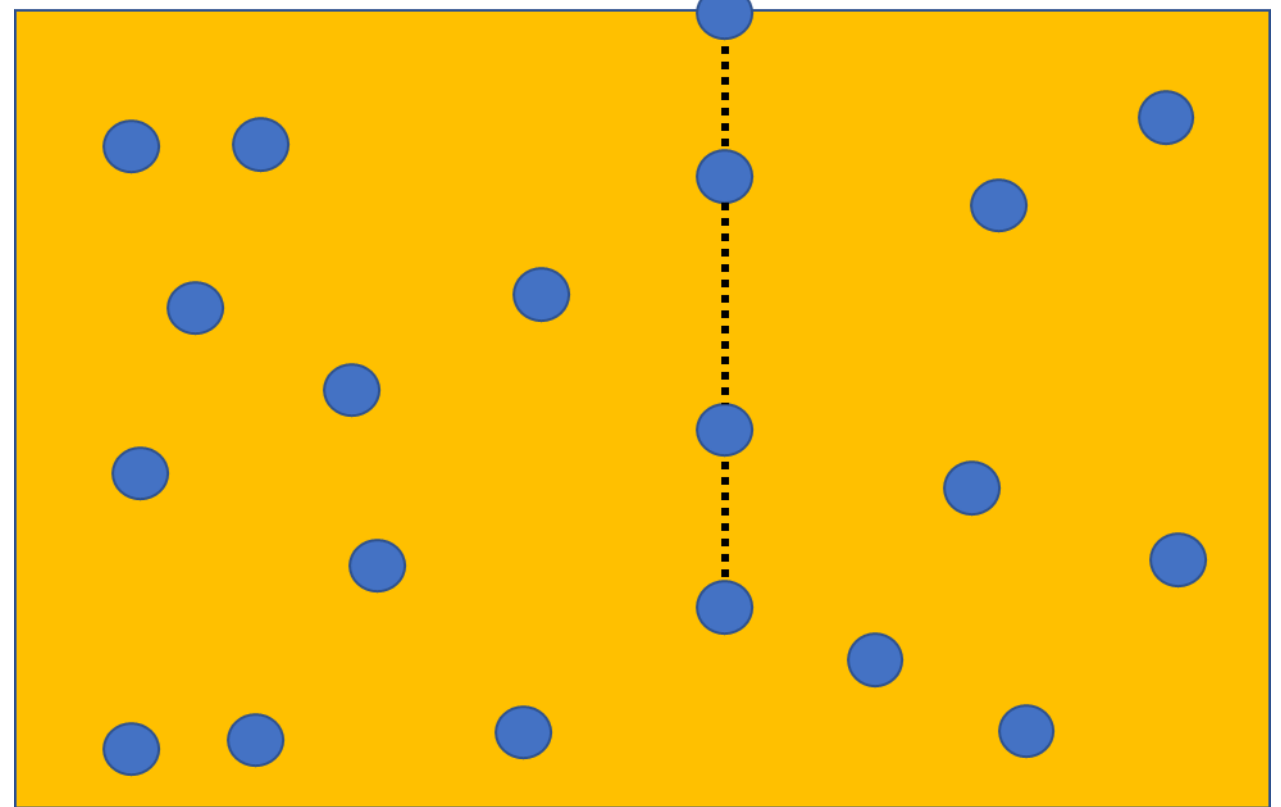
$\mu_w^{\text{ar}}$

Ar seco

$\Delta\mu_w$

$\mu_w^{\text{alimento}}$

Aw



*Secagem*

# AR

- ✓ Para a secagem acontecer, o Ar deve estar com UR baixa, para que o fluxo de água seja do alimento para o ar;
- ✓ O Potencial da água no ar é dado pela UR.

$$UR_{ar}(\%) = \left( \frac{m_{\text{água}}^{ar}}{m_{\text{água}}^{ar-saturado}} \right)_T \cdot 100$$

# AR

Para tornar a UR do ar baixa temos duas alternativas:

- Tirar a água do ar (Alto custo na indústria);
- Aumentar o quanto de água o ar pode solubilizar.

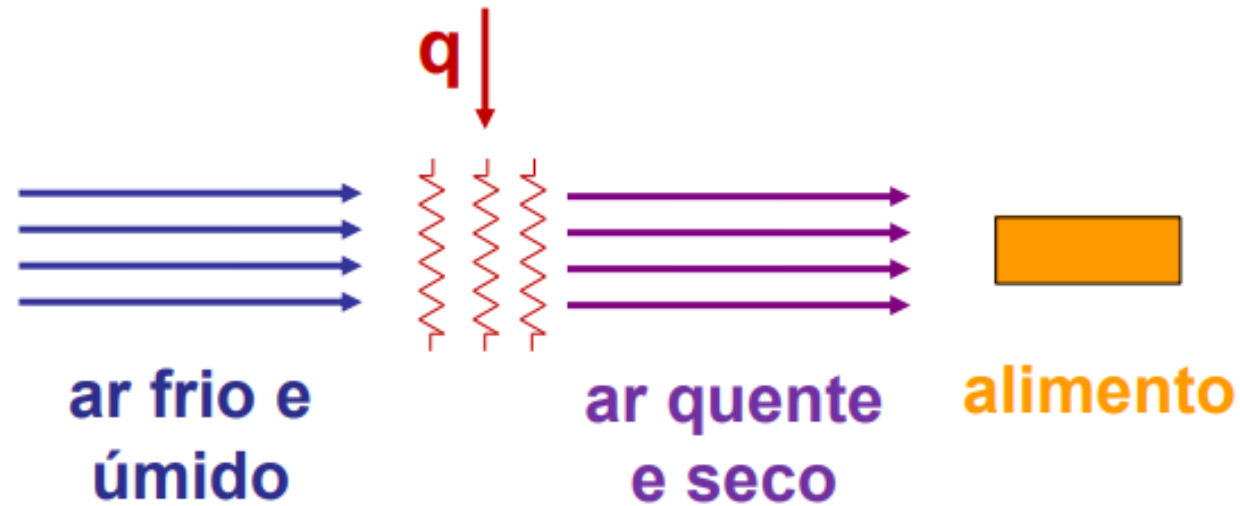
$$UR_{ar}(\%) = \left( \frac{m_{\text{água}}^{ar}}{m_{\text{água}}^{ar-saturado}} \right)_T \cdot 100$$



## AR

O ar é aquecido.

Alta temperatura – Aumenta a solubilidade da água no ar.

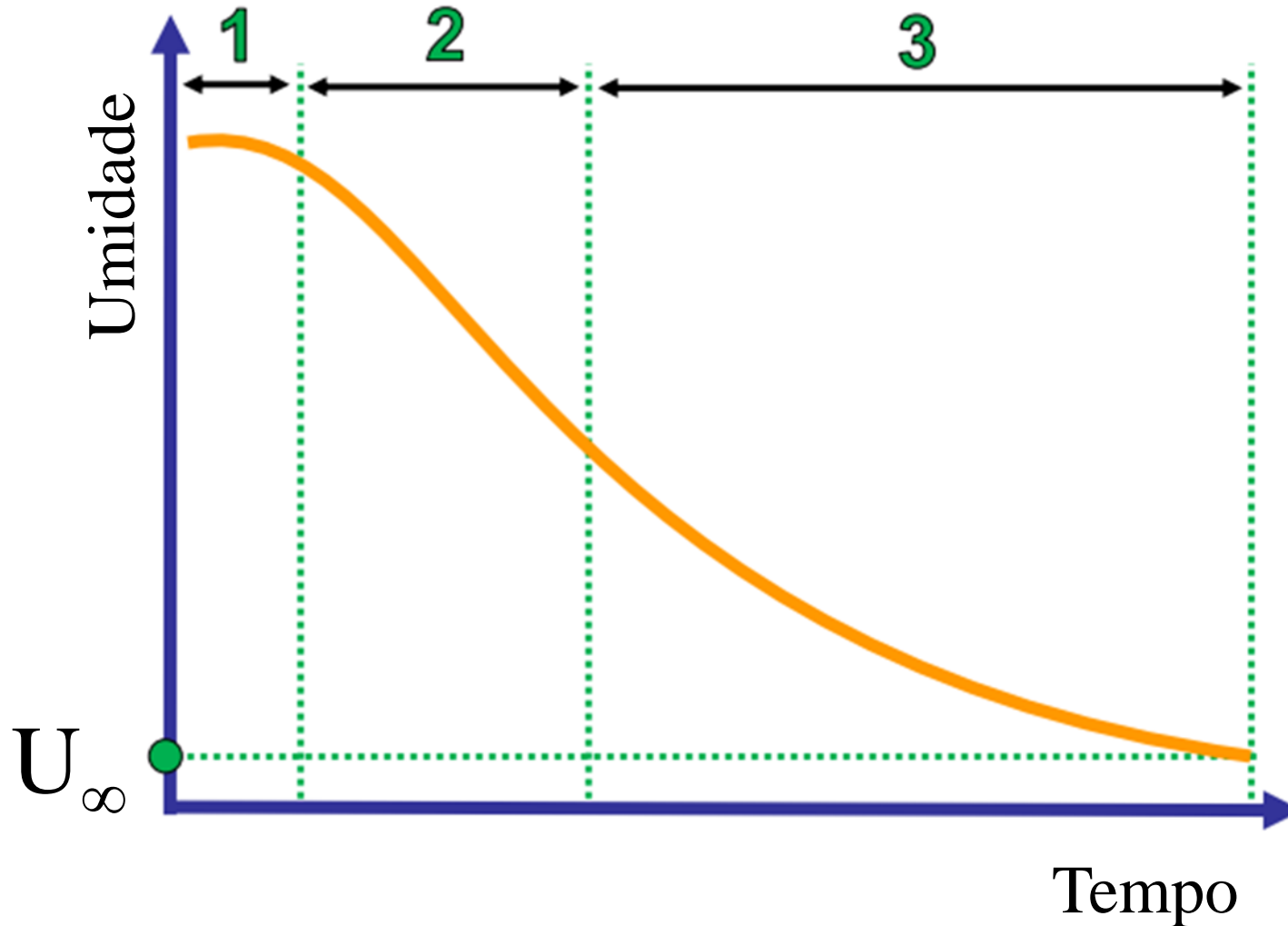


AR

$$\downarrow UR_{ar}(\%) = \left( \frac{m_{\text{água}}^{ar}}{m_{\text{água}}^{ar-saturado}} \right)_T \cdot 100 \uparrow$$

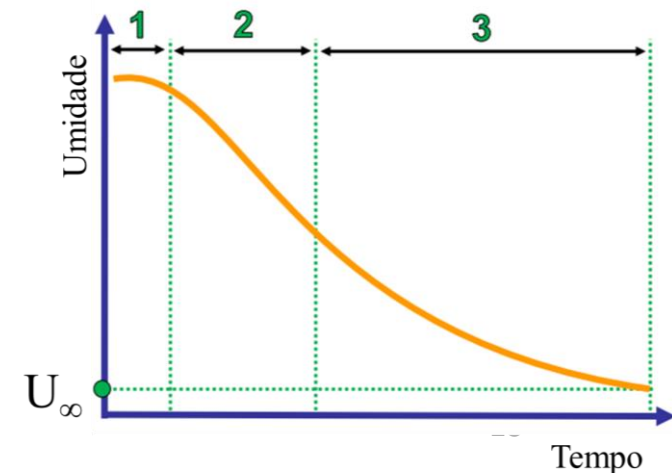
## Curva de Secagem

Como a umidade do alimento varia com o tempo



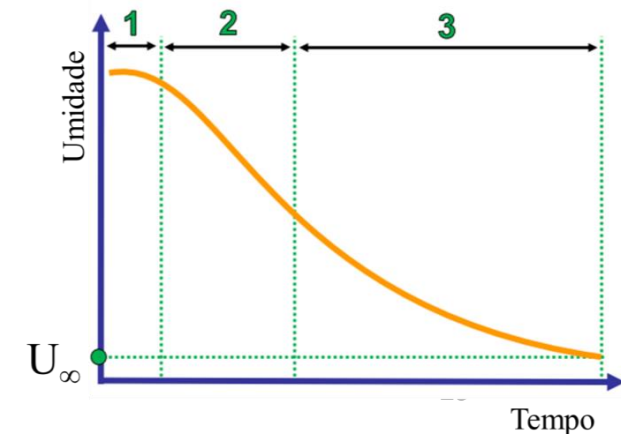
## Período 1 – Curva de secagem

- ✓ Estabilização, acomodação;
- ✓ Baixa taxa de transferência de massa;
- ✓ Temperatura do alimento até Temperatura de bulbo úmido



## Período 2 – Curva de secagem

- ✓ Taxa constante;
- ✓ Taxa difusão da água = Taxa de vaporização da água;
- ✓ Resistência interna a transferência de água é muito menor que a resistência externa;
- ✓ Temperatura da superfície ~ Temperatura de bulbo úmido;
- ✓ Ocorre até umidade crítica ( $U_c$ )

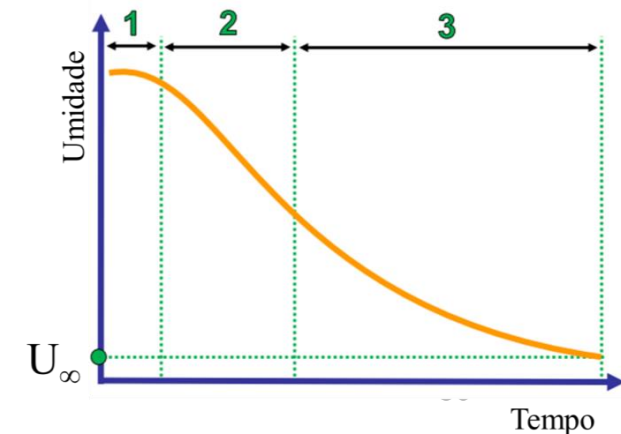


## Período 3 – Curva de secagem

- ✓ Parte mais demorada do processo;
- ✓ Período de taxa decrescente;
- ✓ Após  $U_c$ , a taxa decresce até ~ taxa zero ( $U_\infty$ );
- ✓ Temperatura da superfície se aquece até Temperatura de bulbo seco;
- ✓ Taxa de difusão < Taxa de vaporização



**CUIDADO! POSSÍVEL  
FORMAÇÃO DE CROSTA**

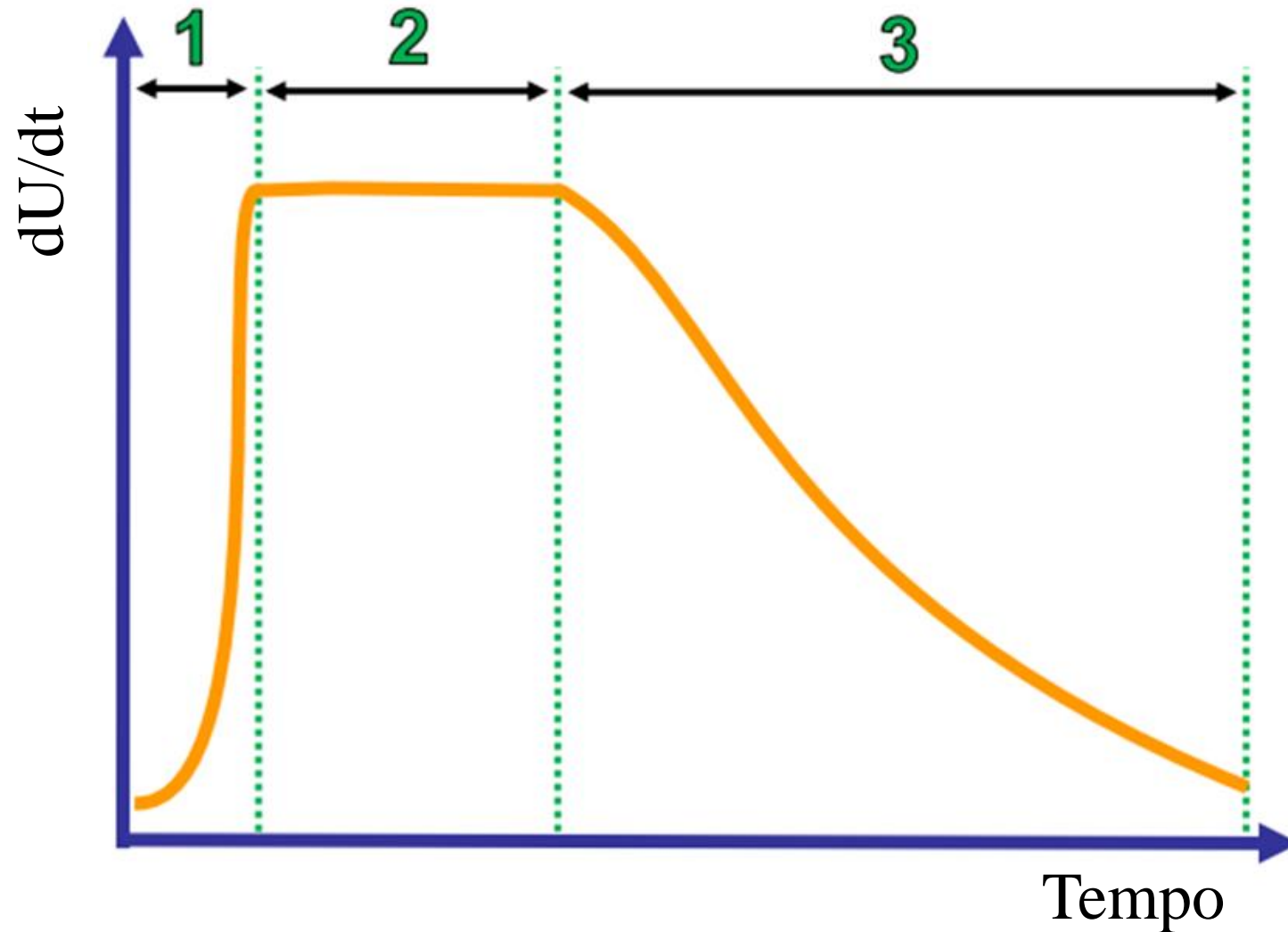


## Mas será que a crosta não é interessante?

DEPENDE DO QUE SE QUER!

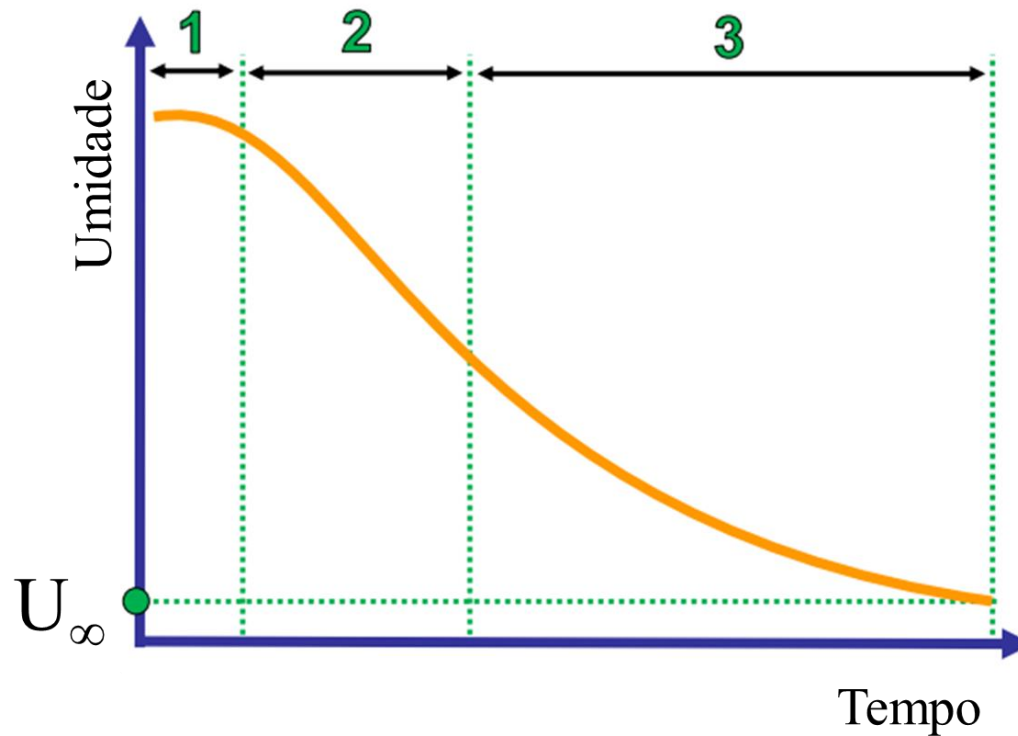
- ✓ No pão, a crosta é interessante;
- ✓ Produtos cozidos na Air Fryer se deseja um meio úmido e superfície crocante;
- ✓ No macarrão, não queremos crosta.

# Curva da taxa de secagem



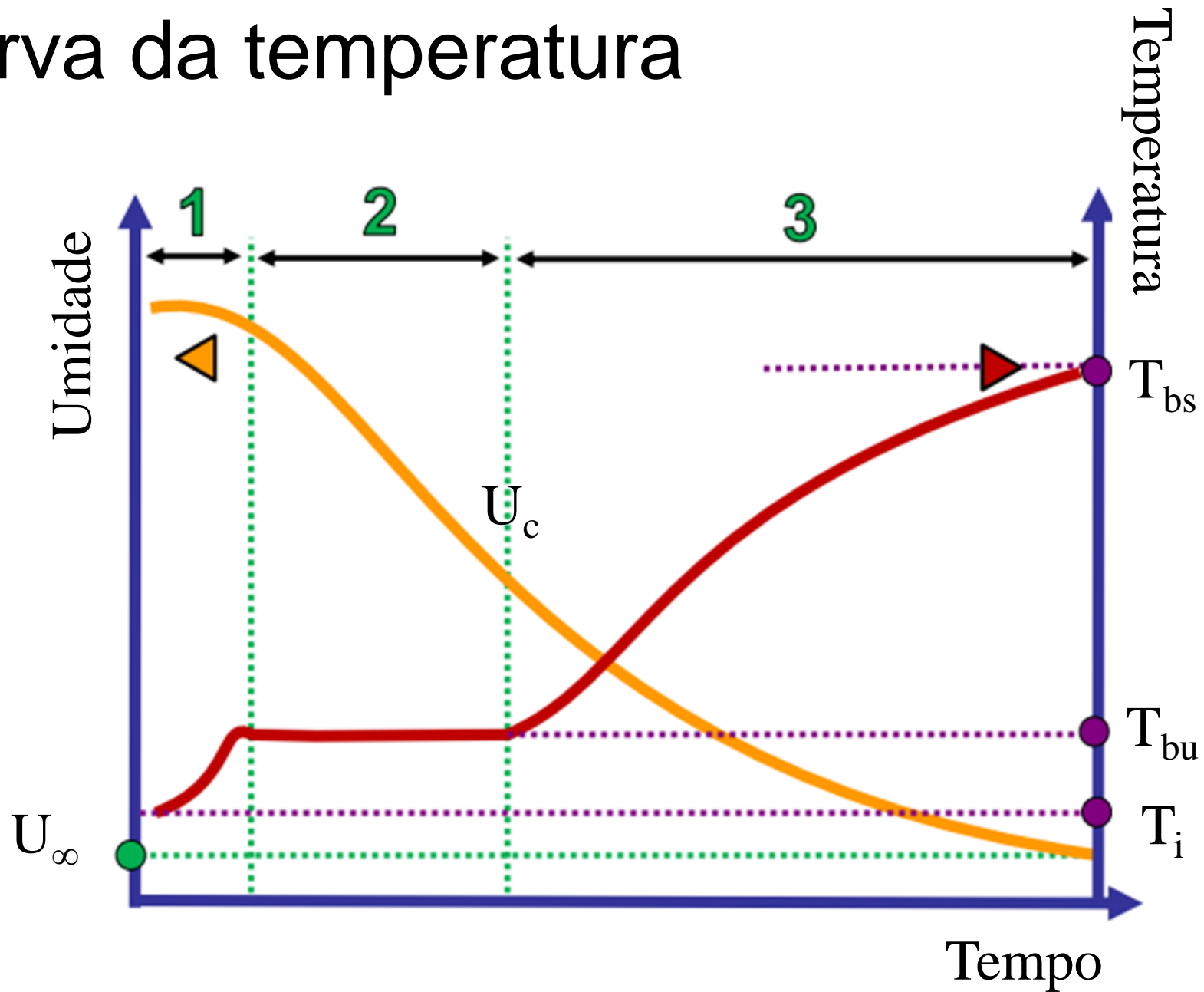


## Como varia a temperatura no alimento?

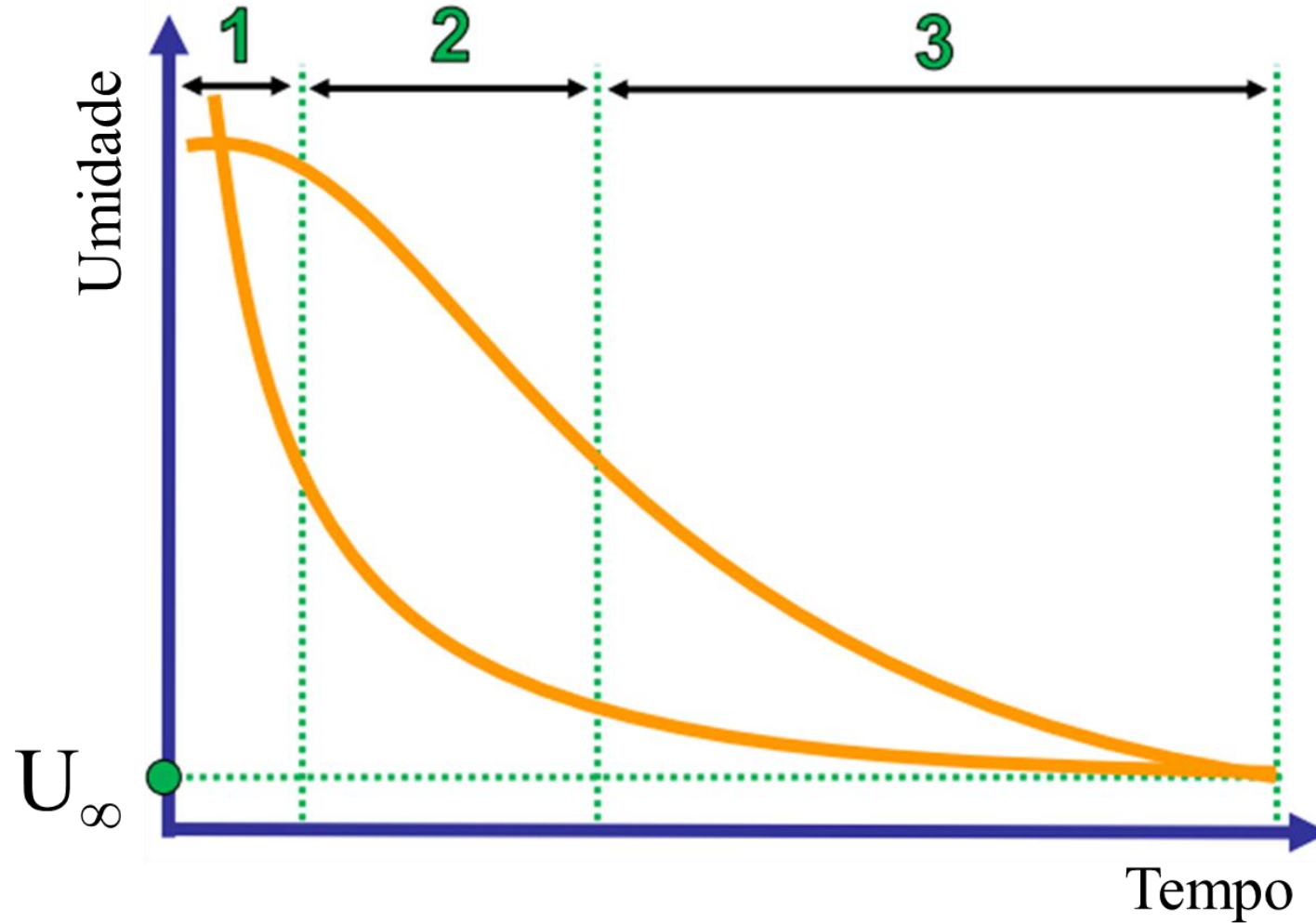


Curva de secagem do alimento (como a umidade varia com o tempo)

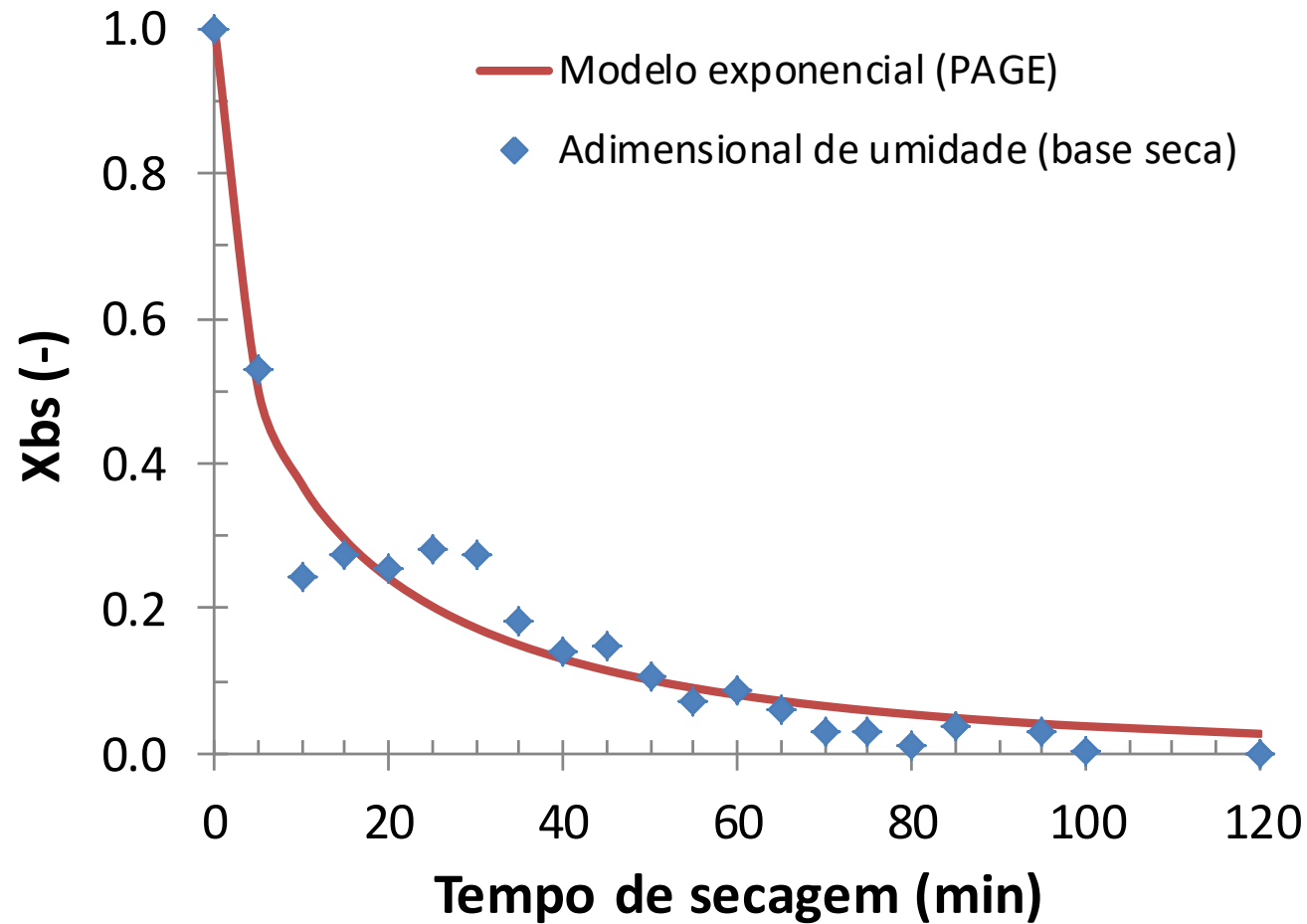
# Curva da temperatura



# Curva de Secagem

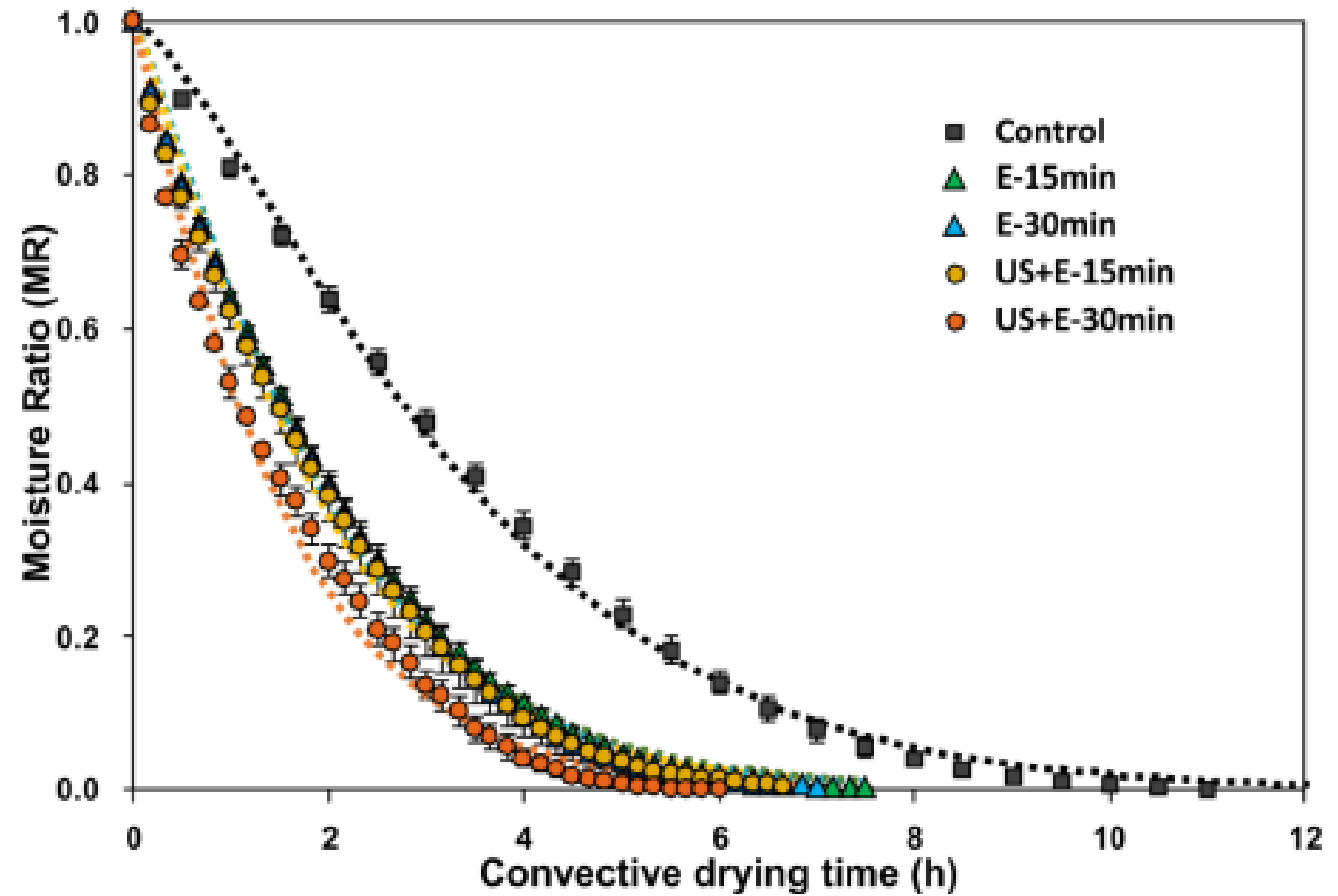


## Exemplos - Curva de Secagem



Fonte: Feltre, 2015.

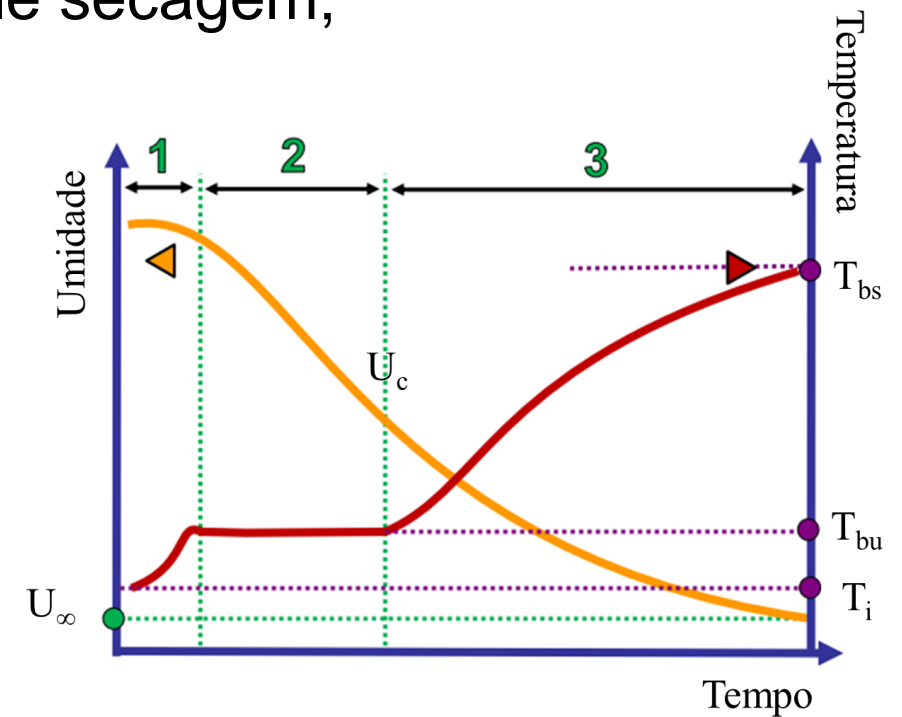
## Exemplos - Curva de Secagem



Fonte: Rojas et al, 2020.

## Exemplo - Macarrão

- ✓ Importância do conhecimento da curva de secagem;
- ✓ Secagem de massas alimentícias.





# *Cinética de Secagem*

## Cinética de secagem

$$\text{Cinética} = \frac{dU}{dt}$$

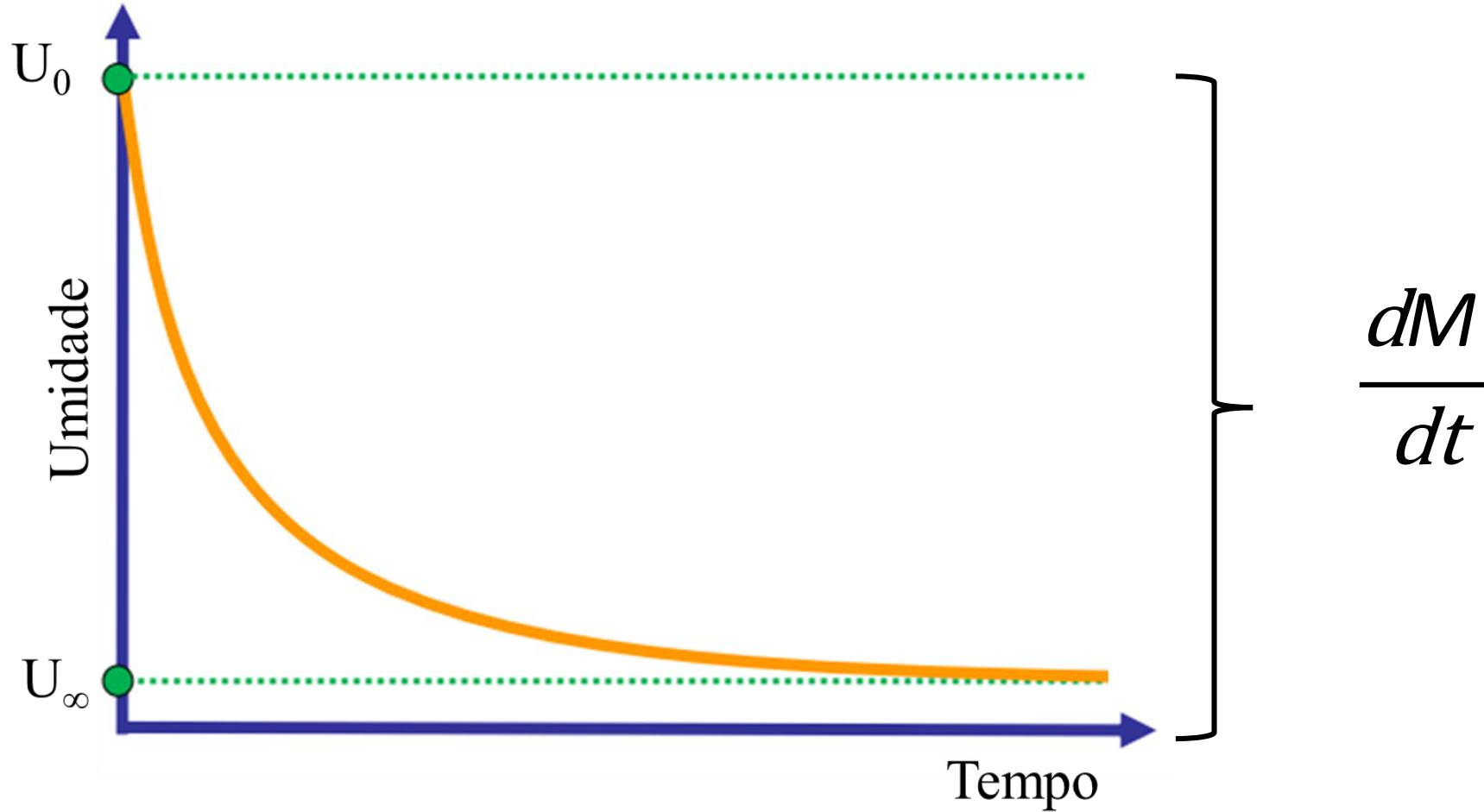
Cinética de secagem



quanto a umidade do alimento  
varia com o tempo.



# Cinética de secagem



## Cinética de secagem

$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = e^{-kt}$$

$$\frac{dM}{dt} = -kM$$

MR - Umidade adimensional;  
M<sub>t</sub> - Umidade no tempo t;  
M<sub>∞</sub> - Umidade de equilíbrio.  
M<sub>0</sub> - Umidade inicial;  
k - constante cinética.



# Umidade

## Secagem

- ✓ UMIDADE é calculada em base seca ( $M_{bs}$ )!
- ✓ Podemos calcular a  $M_{bs}$  tendo a  $M_{bu}$ .

# Umidade

✓ Umidade em base úmida ( $M_{bu}$ )

$$M_{bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{produto}}}$$

$$M_{bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{produto}}} * 100$$

✓ Umidade em base seca ( $M_{bs}$ )

$$M_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos}}}$$

$$M_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos}}} * 100$$

## Por que?

$$M_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{produto}}}$$

Os dois termos variam durante a secagem

$$M_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos}}}$$

Apenas a massa de água varia durante a secagem



# Conversão

## Secagem

$$M_{bs} = \frac{M_{bu}}{100 - M_{bu}} * 100$$

$$M_{bu} = \frac{M_{bs}}{100 + M_{bs}} * 100$$

## Cinética de secagem

Cinética de 1ª ordem

Linearizando:

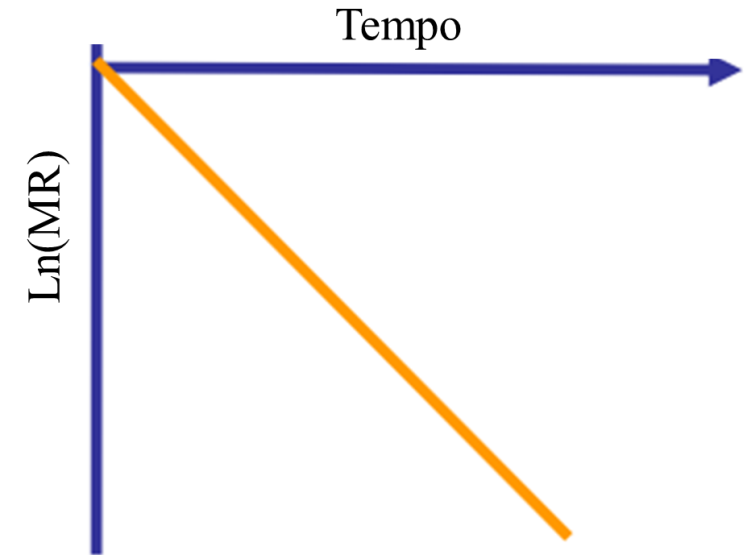
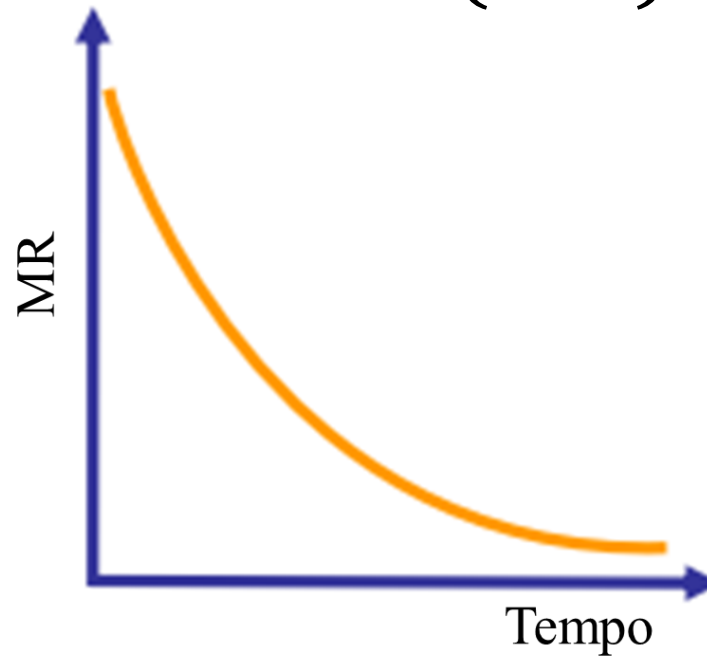
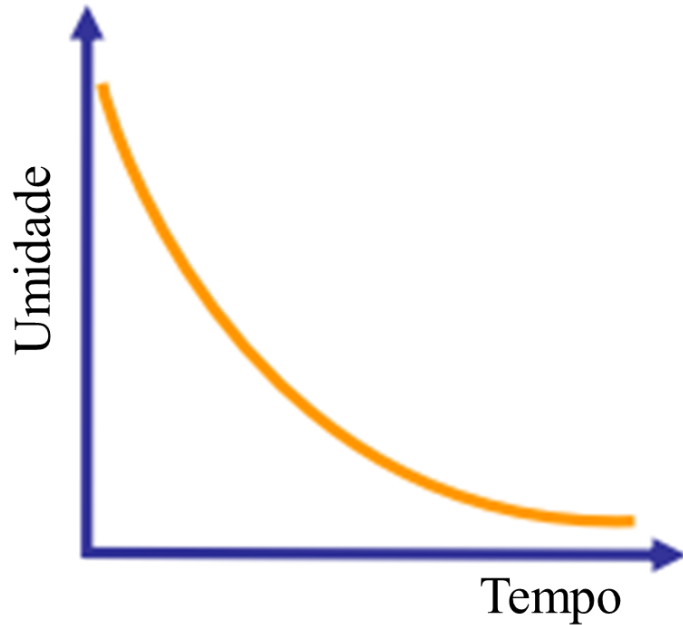
$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = e^{-kt}$$

$$\ln(MR) = -kt$$

## Cinética de secagem

Cinética de 1ª ordem

$$\ln(MR) = -kt$$

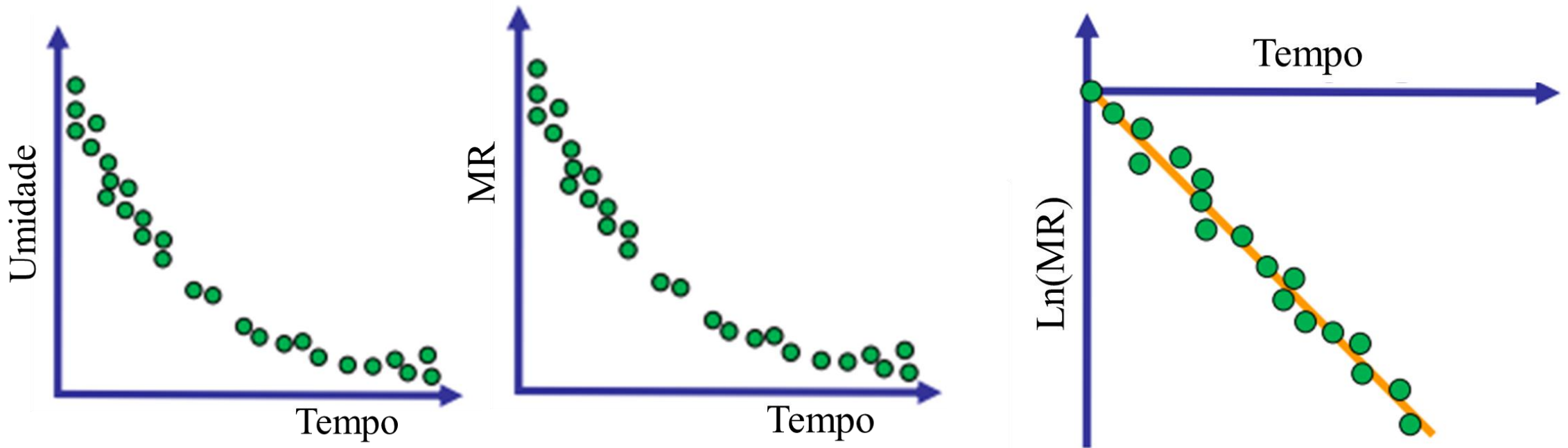




## Cinética de secagem

Cinética de 1ª ordem

$$\ln(MR) = -kt$$



## Cinética de secagem

- ✓ Parâmetro  $k$  depende da temperatura

$$MR = e^{-kt}$$

$$k = k_0 e^{\frac{Ea}{RT}}$$