



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.



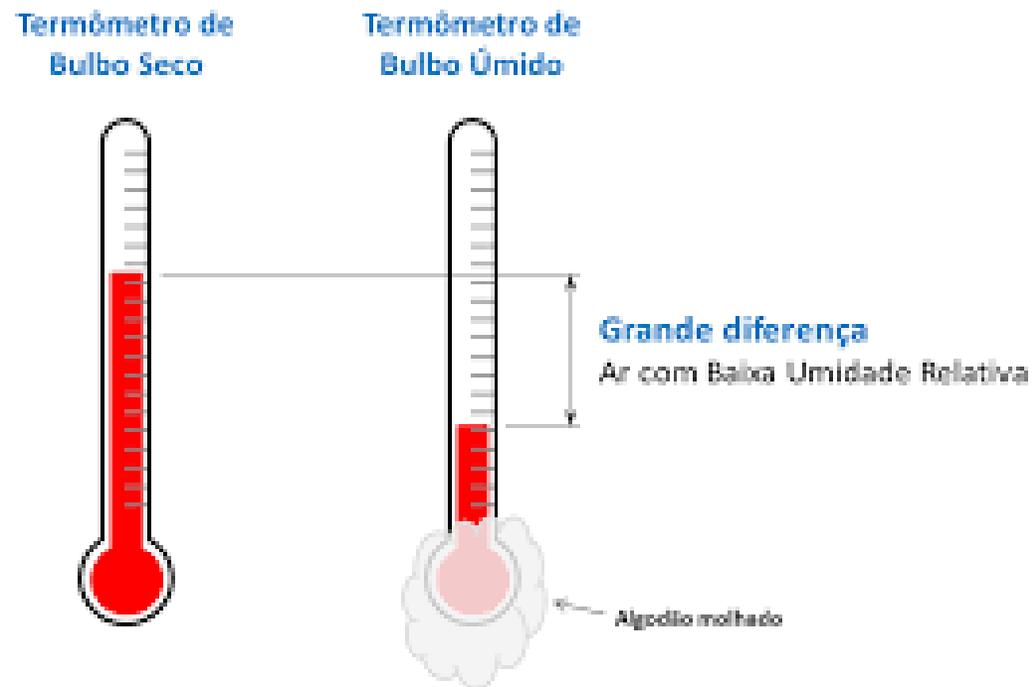
Conceitos básicos



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})





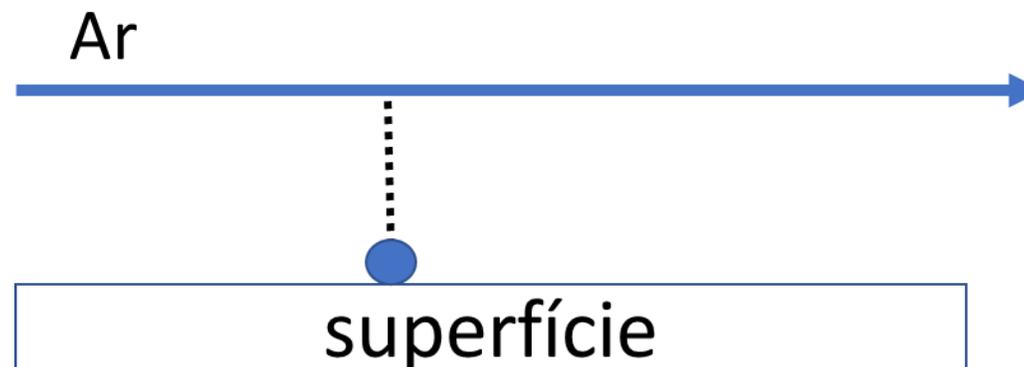
Transferência de massa

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:

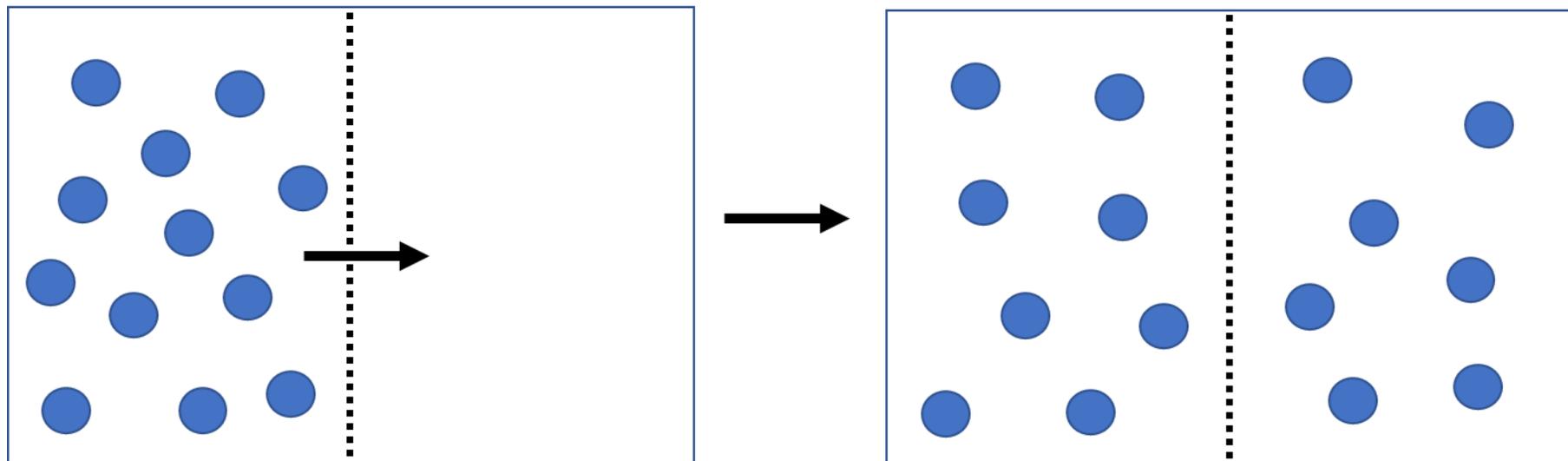
Movimentação do fluido ocorre sem fontes externas.

✓ 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

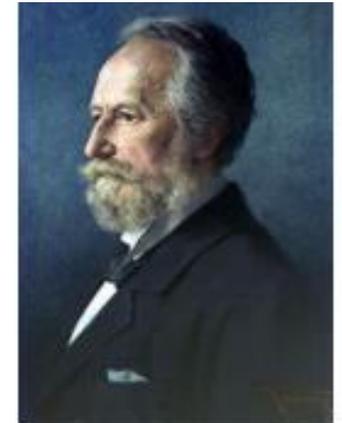
$$\text{Cinética} = \frac{d\text{reação}}{dt}$$

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

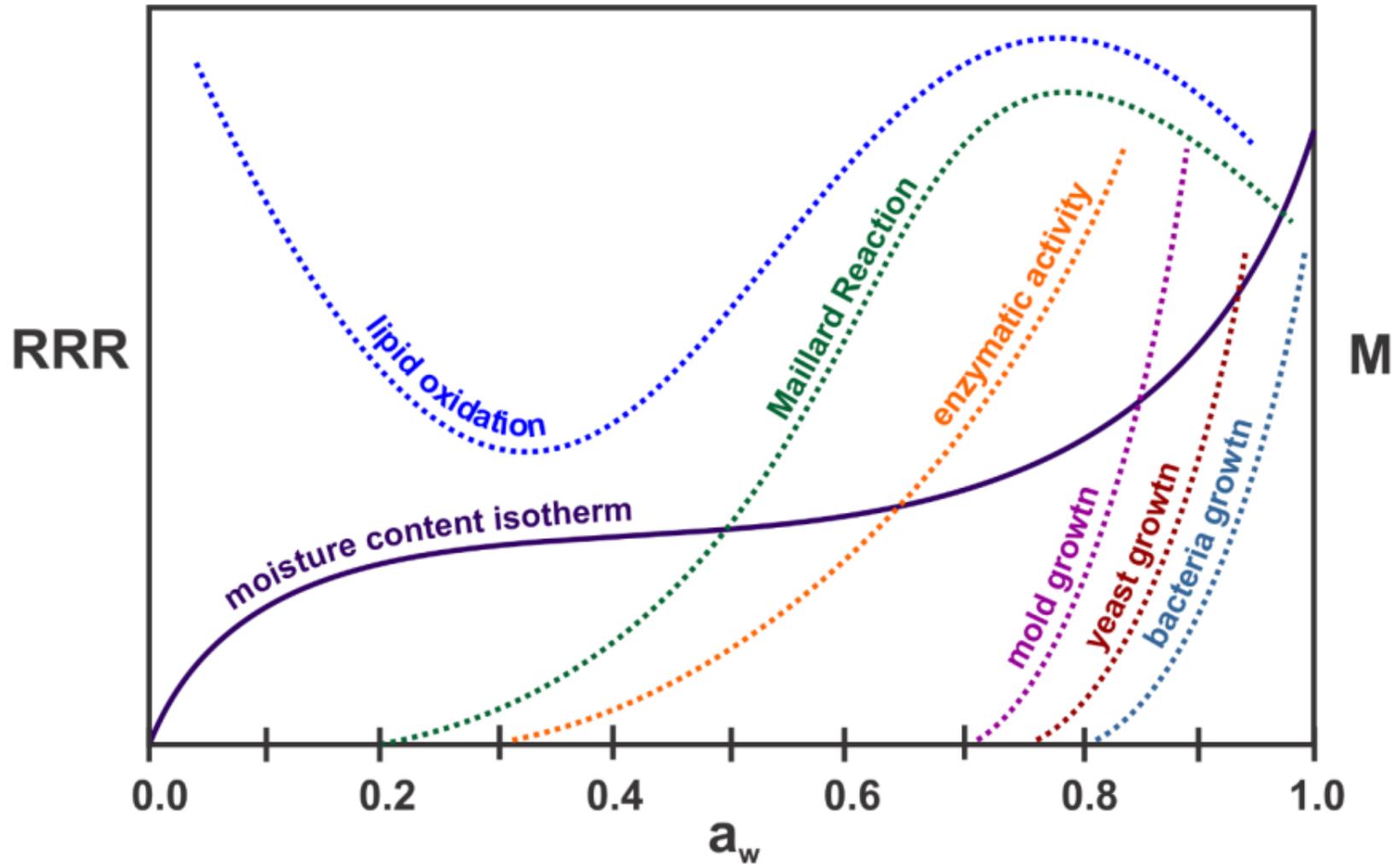
Concentração

- Evaporação
- Membranas
- Crioconcentração
- Desidratação osmótica

Adição de solutos

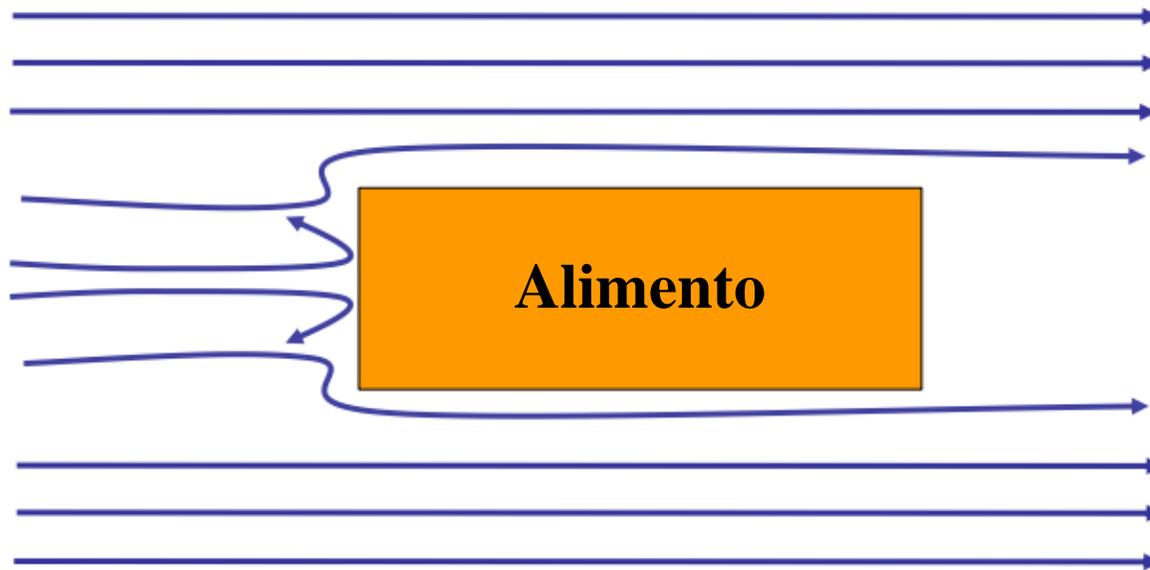
Secagem

- Ar
- Contato
- Extrusão
- Liofilização



Olhando para o alimento

ar seco



Alimento seco

Olhando para o ar



Olhando para o ar

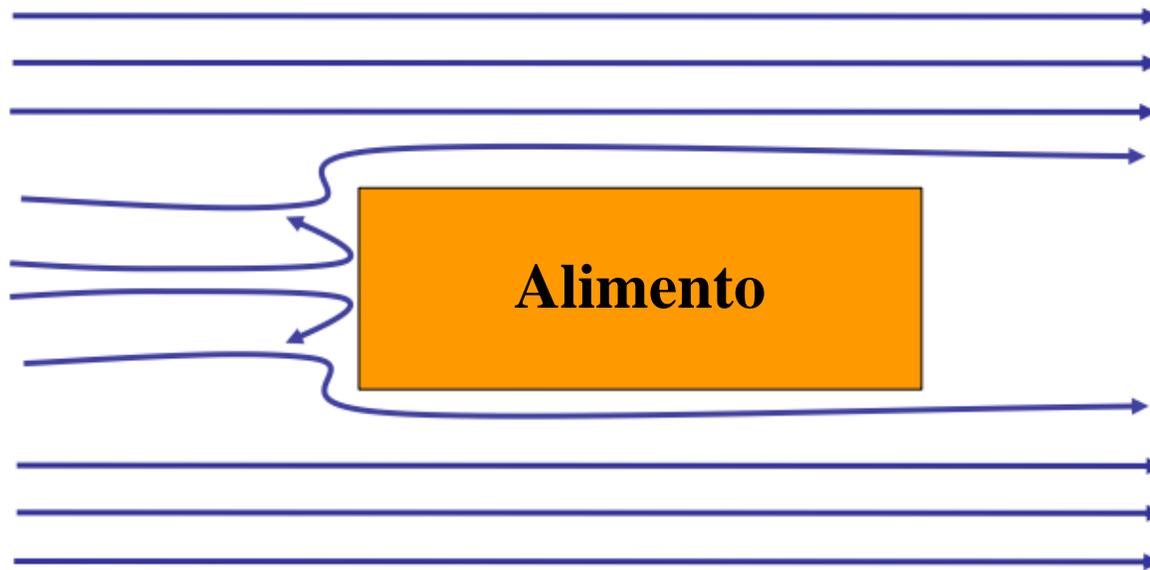
**PSICROMETRIA:
PRÓXIMA AULA!**

ar que
é seco

de um
e úmido

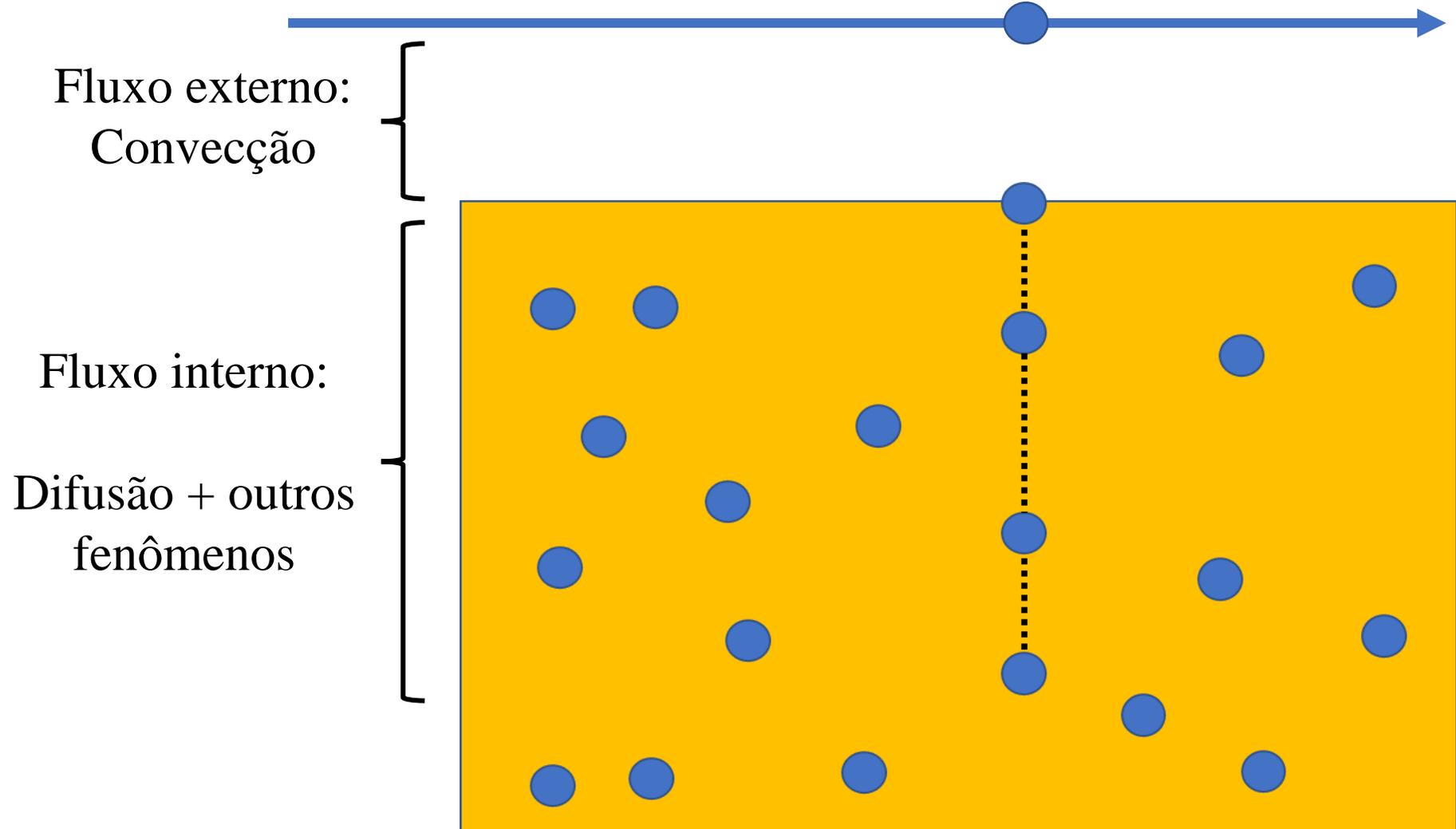
Olhando para o alimento

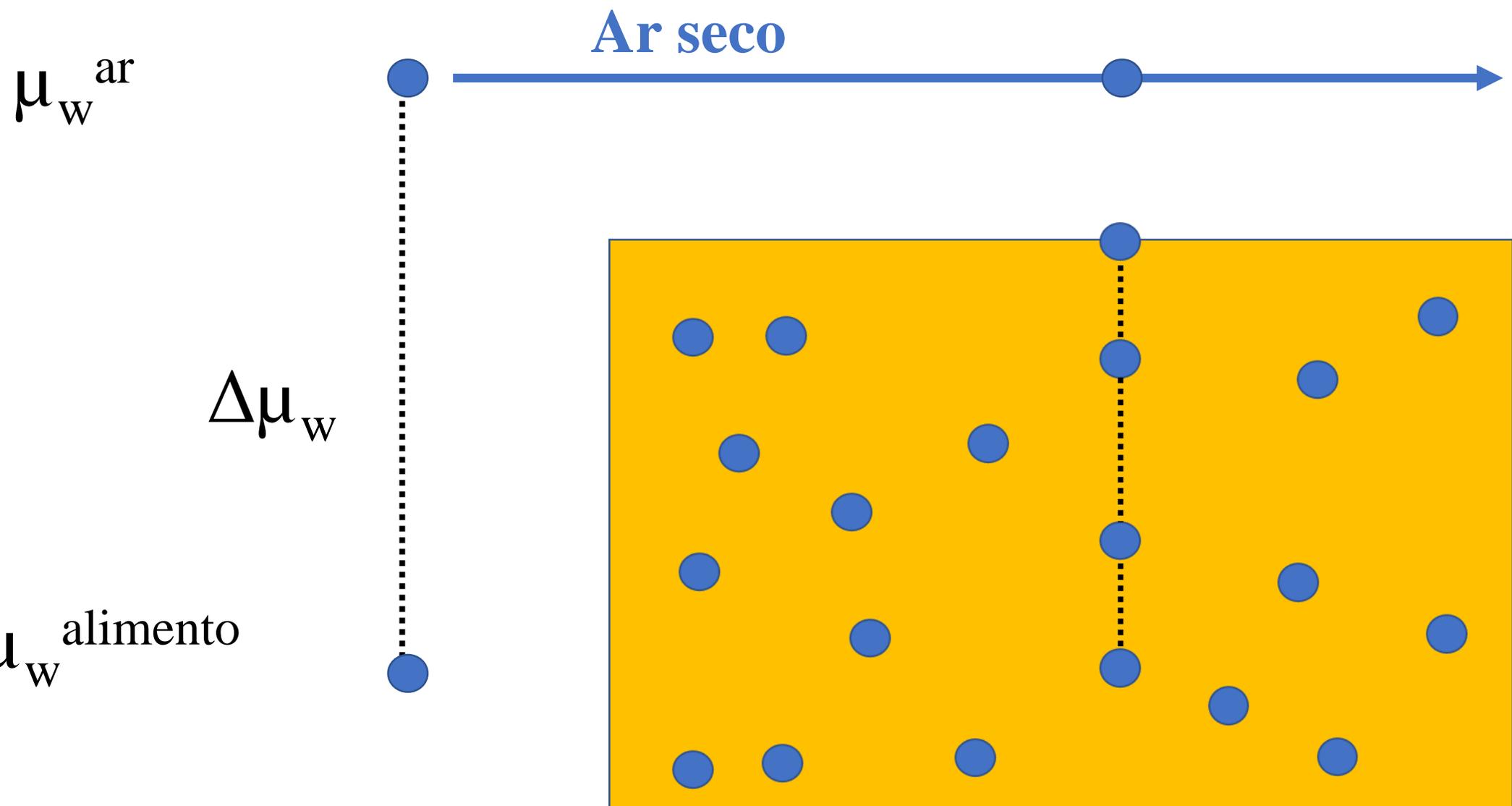
ar seco



Alimento seco

Ar seco







Secagem

UR

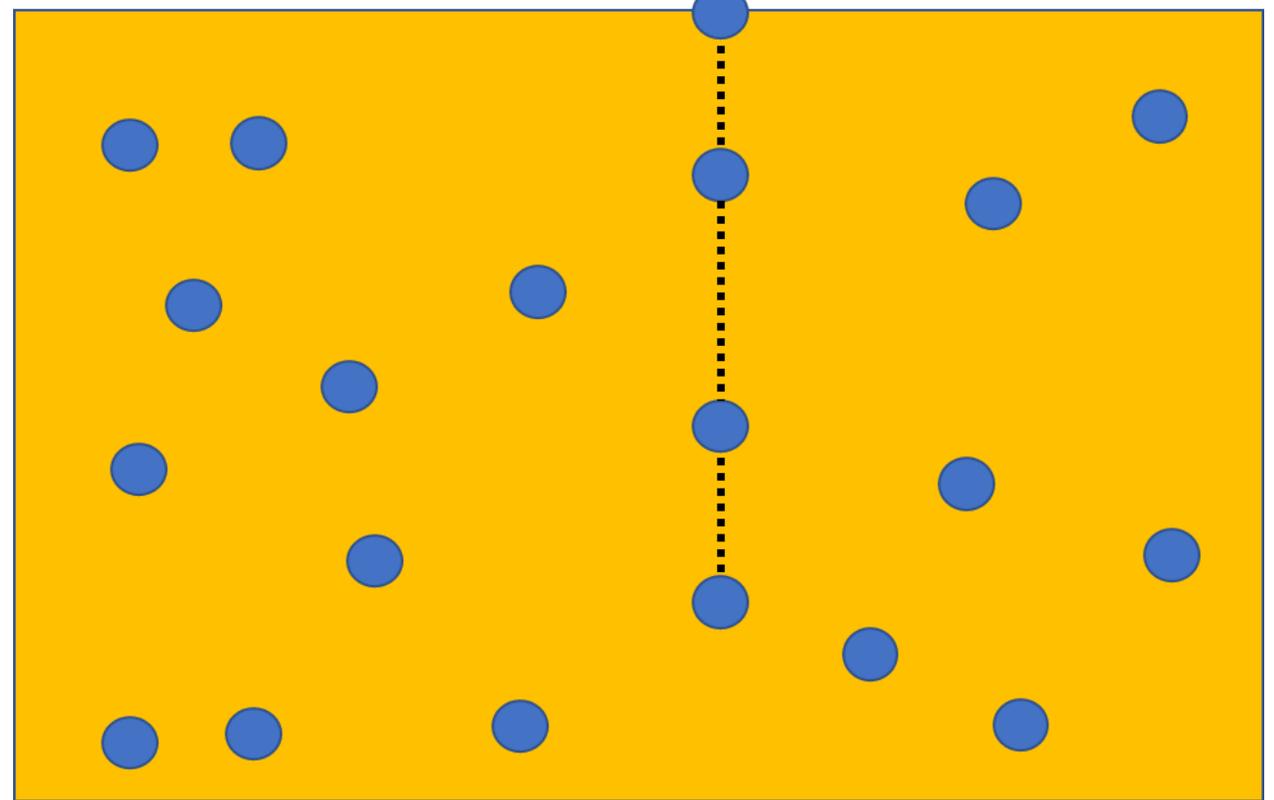
μ_w^{ar}

Ar seco

$\Delta\mu_w$

μ_w^{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

Secagem

Para tornar a UR do ar baixa temos duas alternativas:

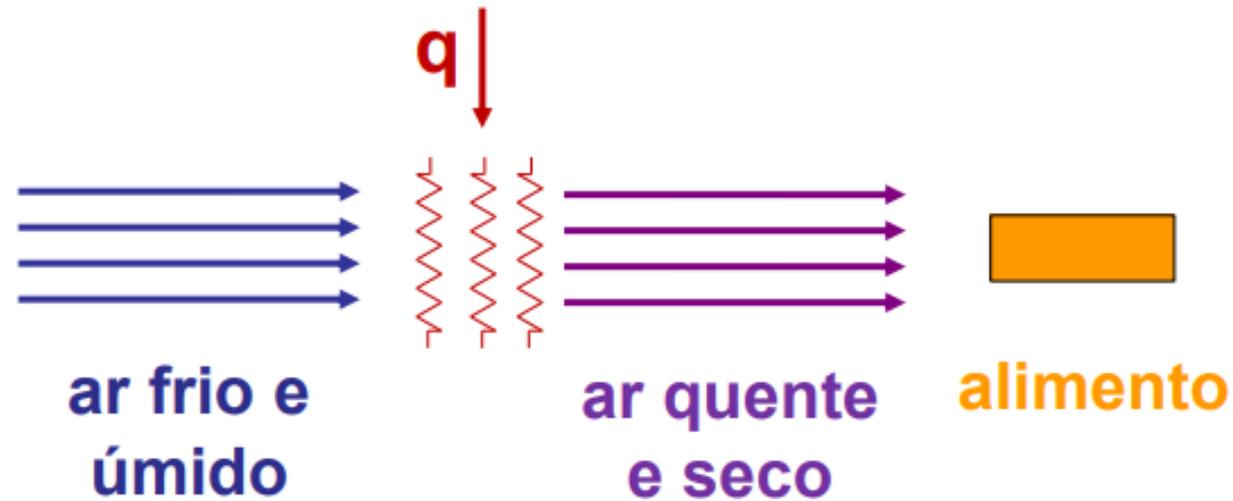
- Tirar a água do ar (Alto custo na indústria);
- Aumentar o quanto de água o ar pode solubilizar.

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

AR

O ar é aquecido.

Alta temperatura – Aumenta a solubilidade da água no ar.

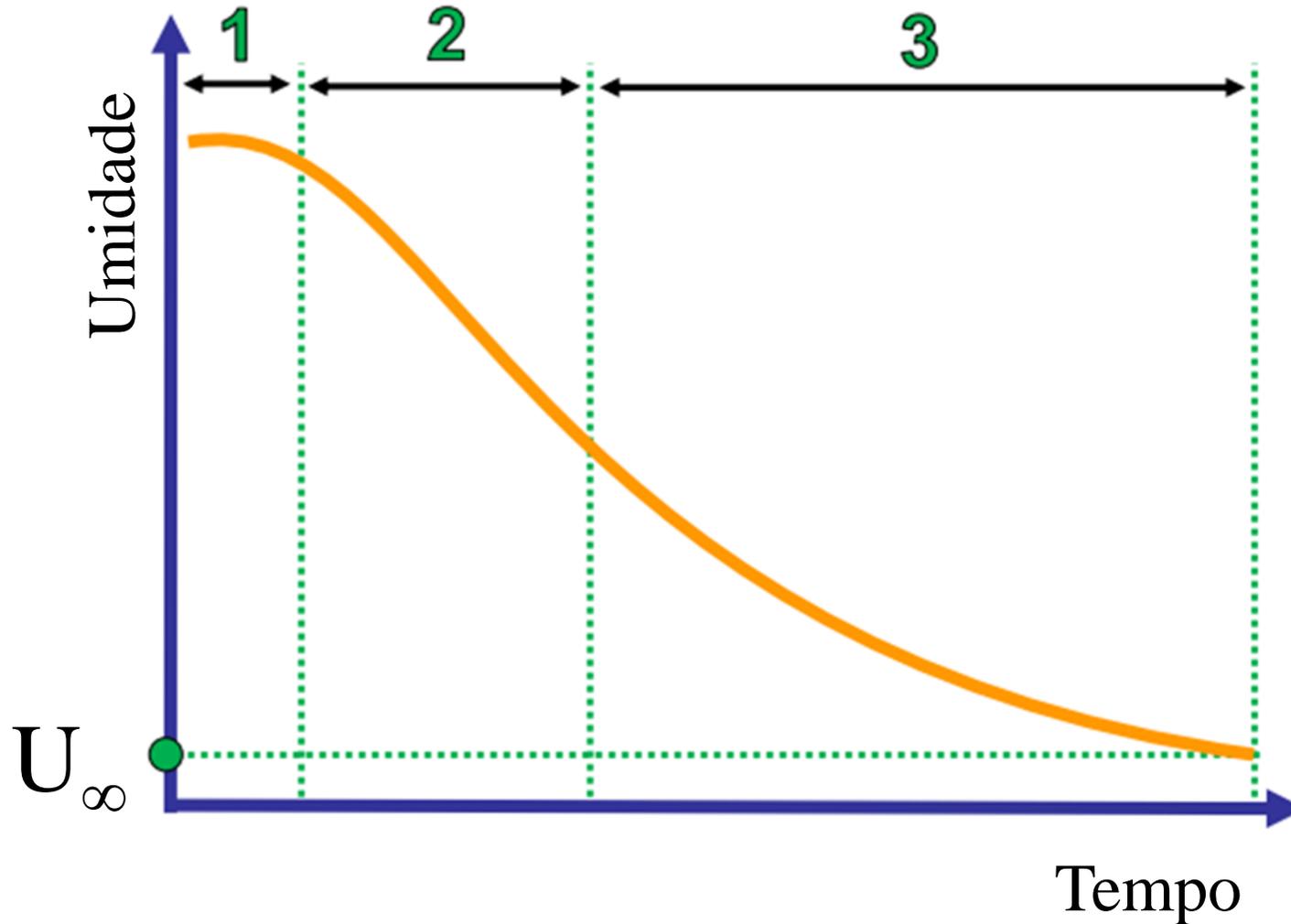


AR

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

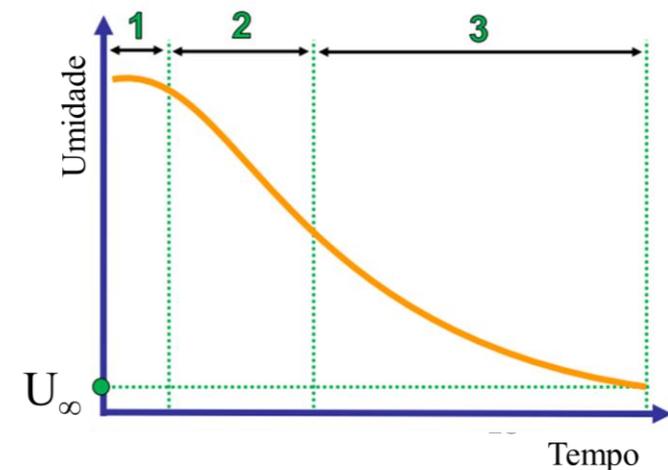
Curva de Secagem

Como a umidade do alimento varia com o tempo



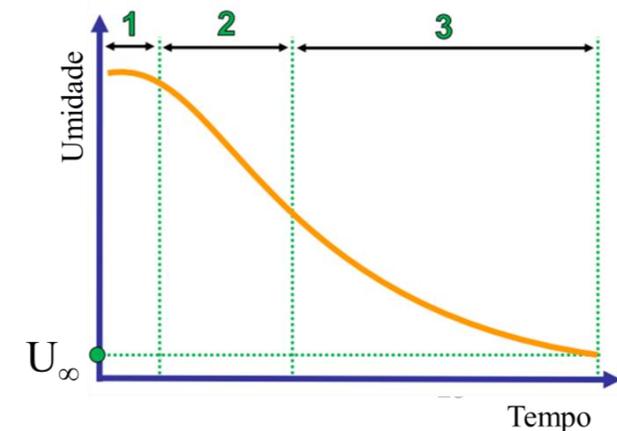
Período 1 – Curva de secagem

- ✓ 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)

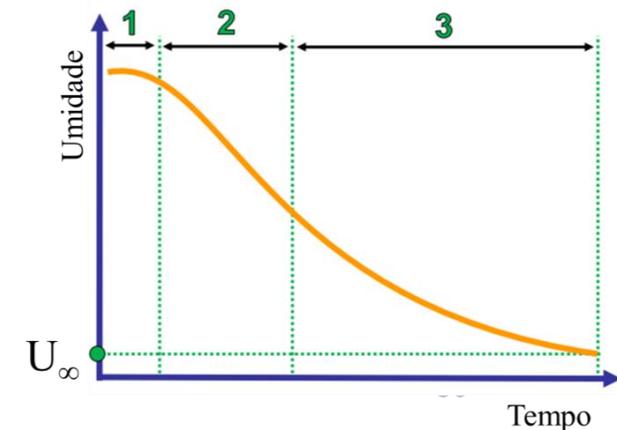


Período 3 – Curva de secagem

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



**CUIDADO! POSSÍVEL
FORMAÇÃO DE CROSTA**

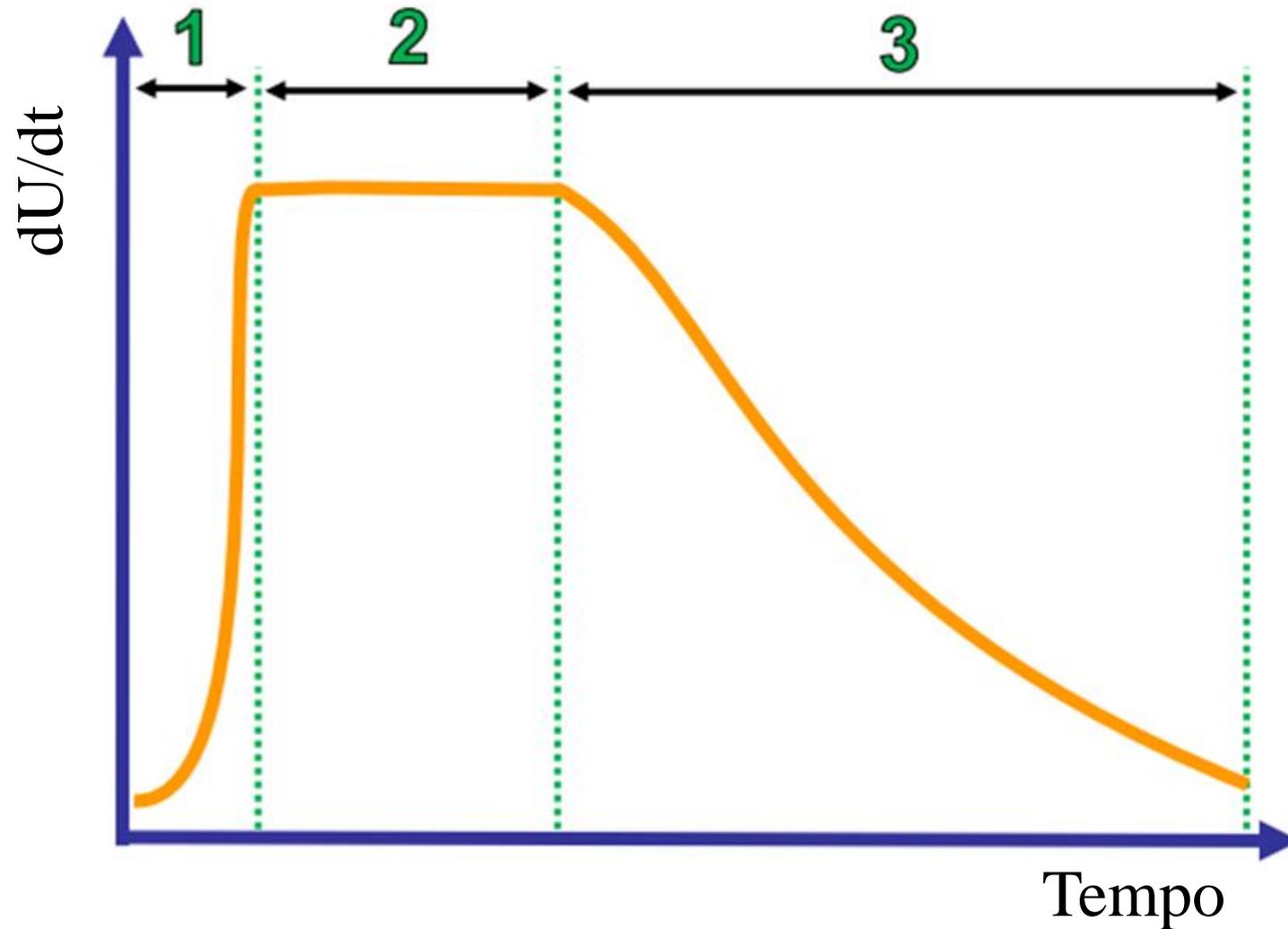


Mas será que a crosta não é interessante?

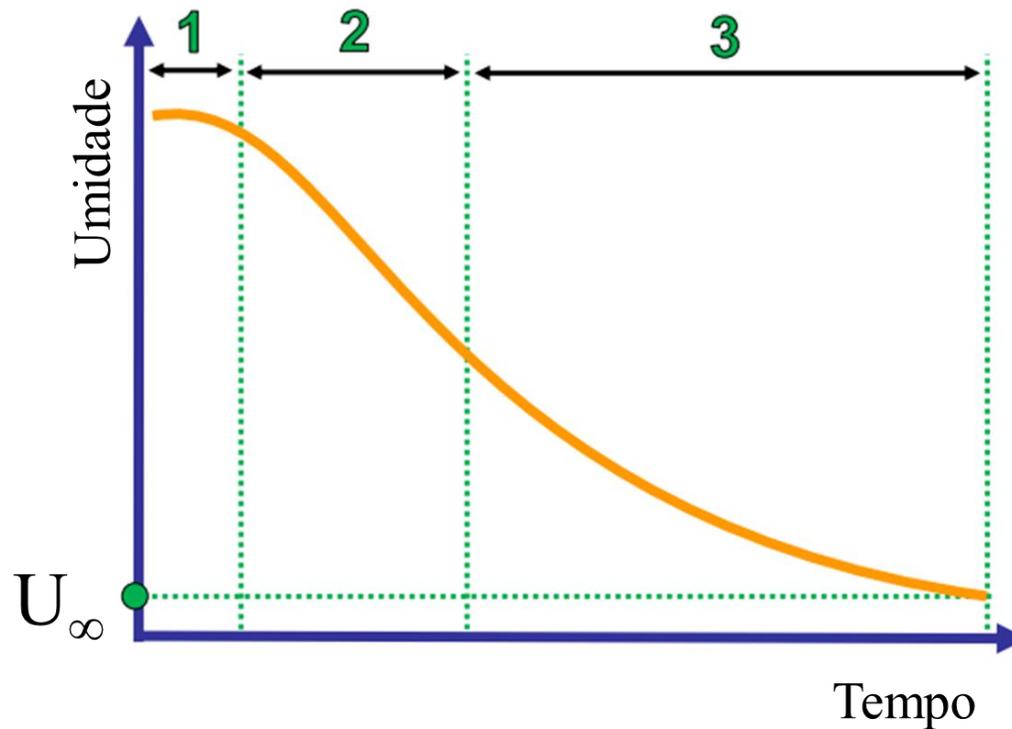
DEPENDE DO QUE SE QUER!

- ✓ 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

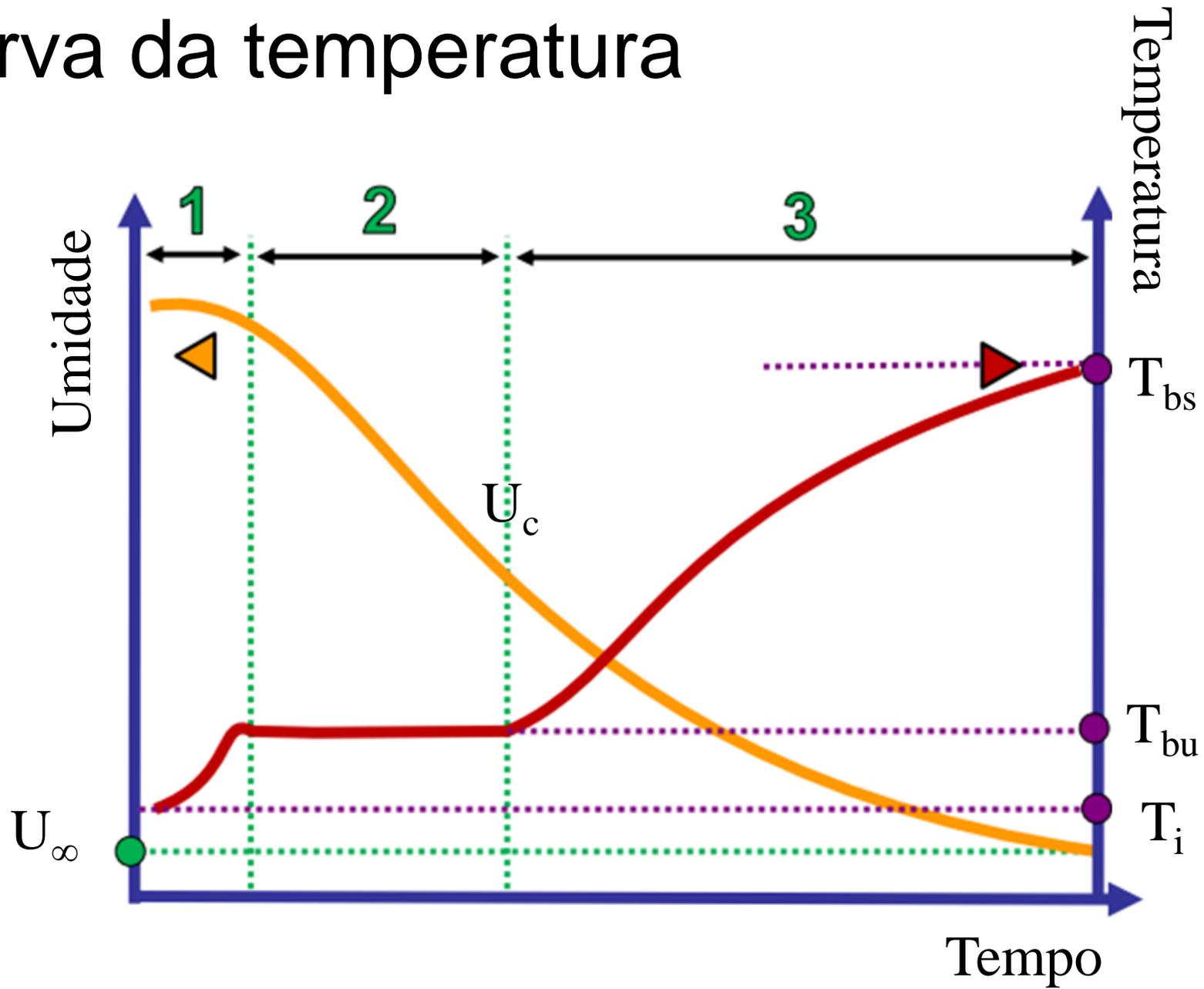


Como varia a temperatura no alimento?

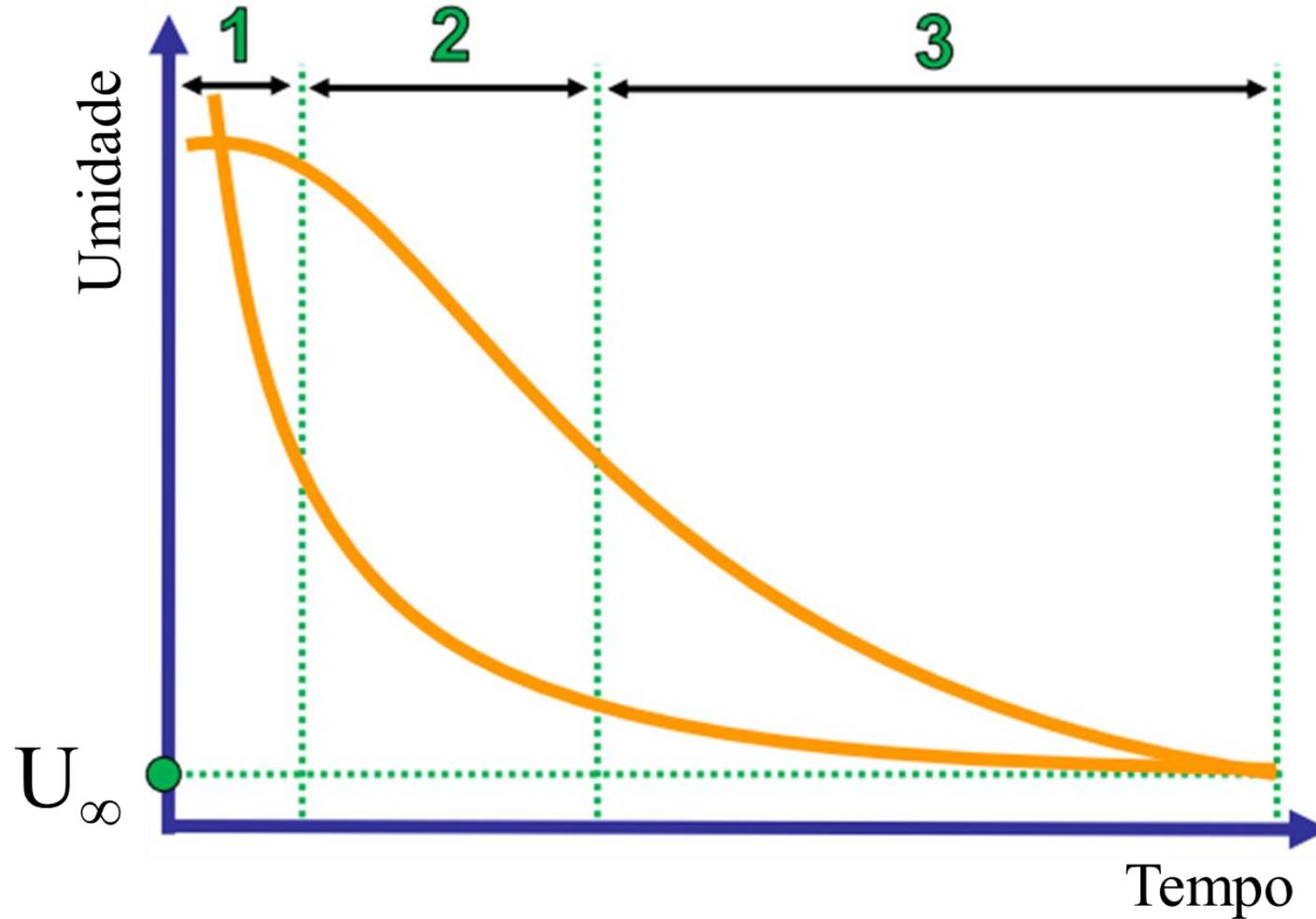


Curva de secagem do alimento (como a umidade varia com o tempo)

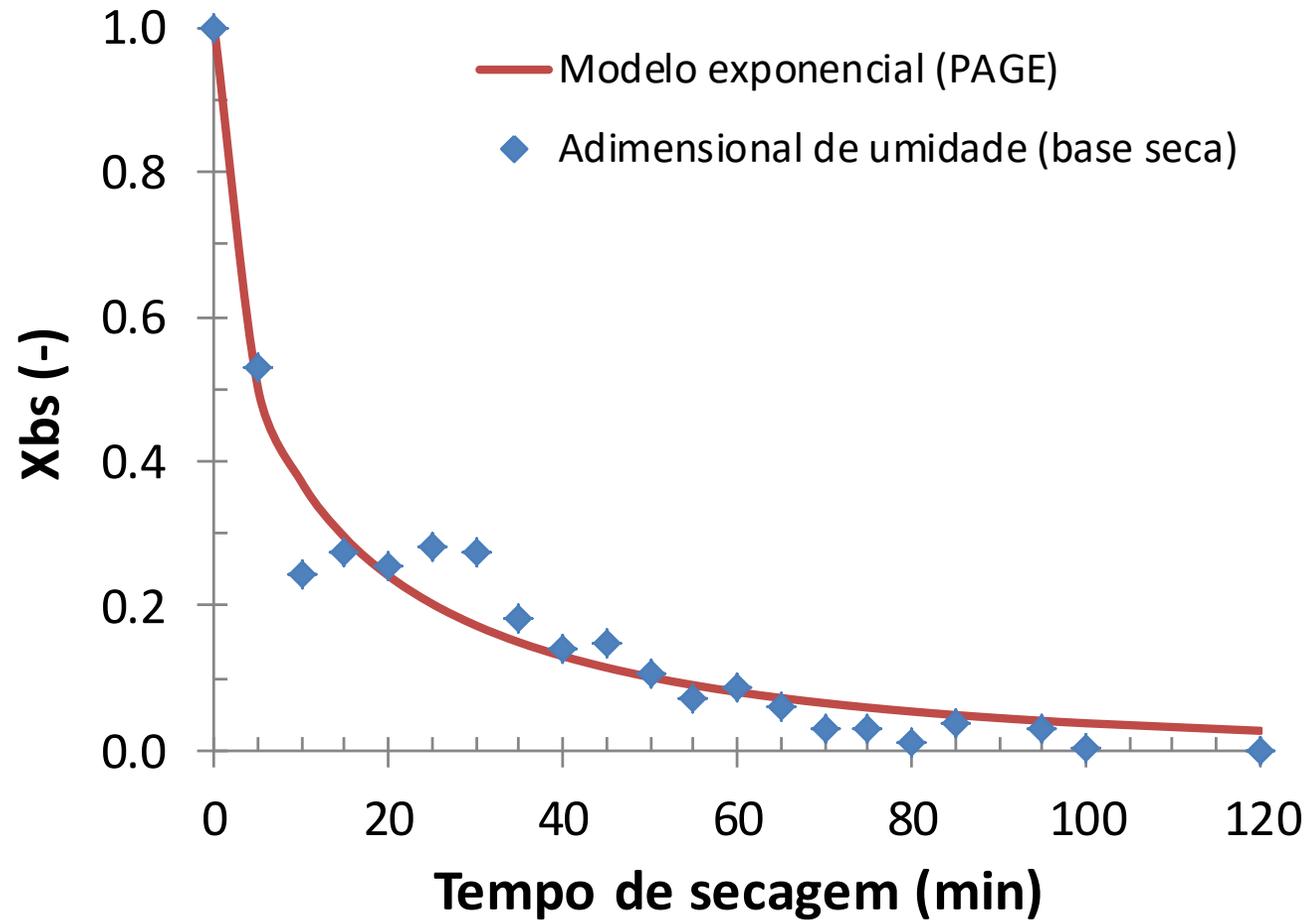
Curva da temperatura



Curva de Secagem

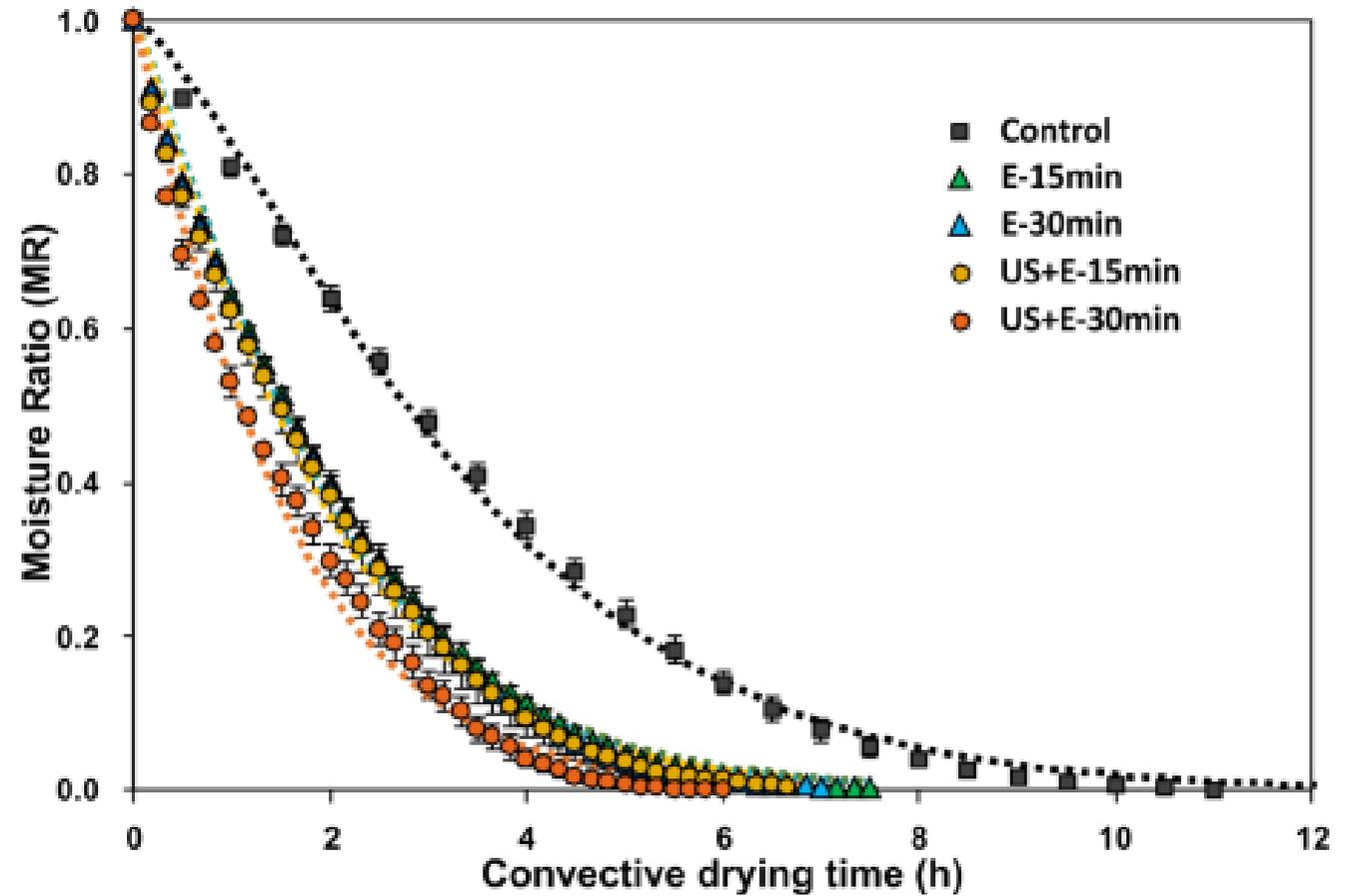


Exemplos - Curva de Secagem



Fonte: Feltre, 2015.

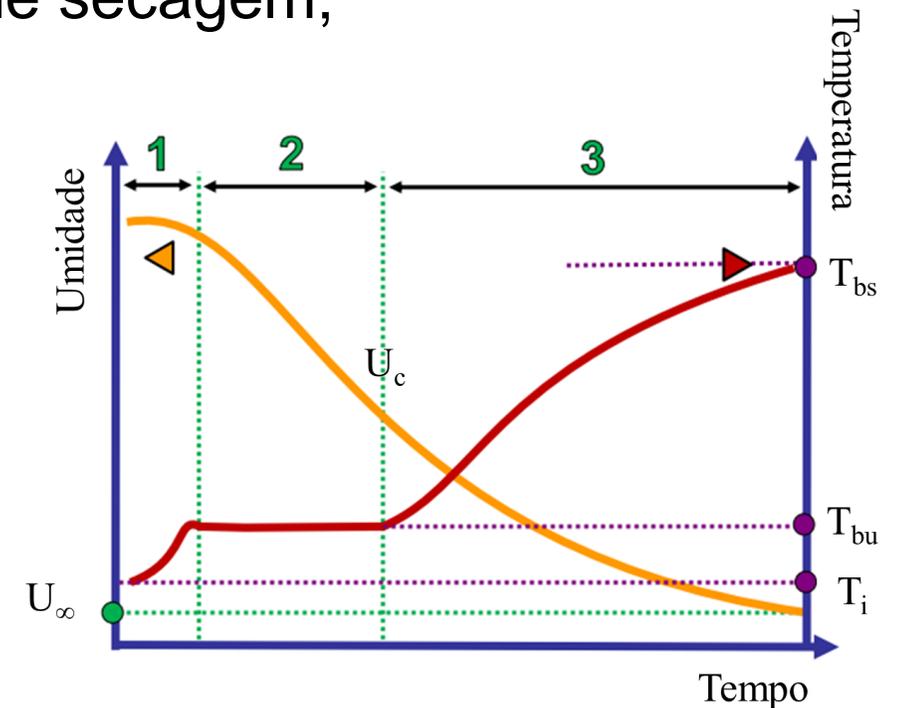
Exemplos - Curva de Secagem



Fonte: Rojas et al, 2020.

Exemplo - Macarrão

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





Cinética de Secagem

Cinética de secagem

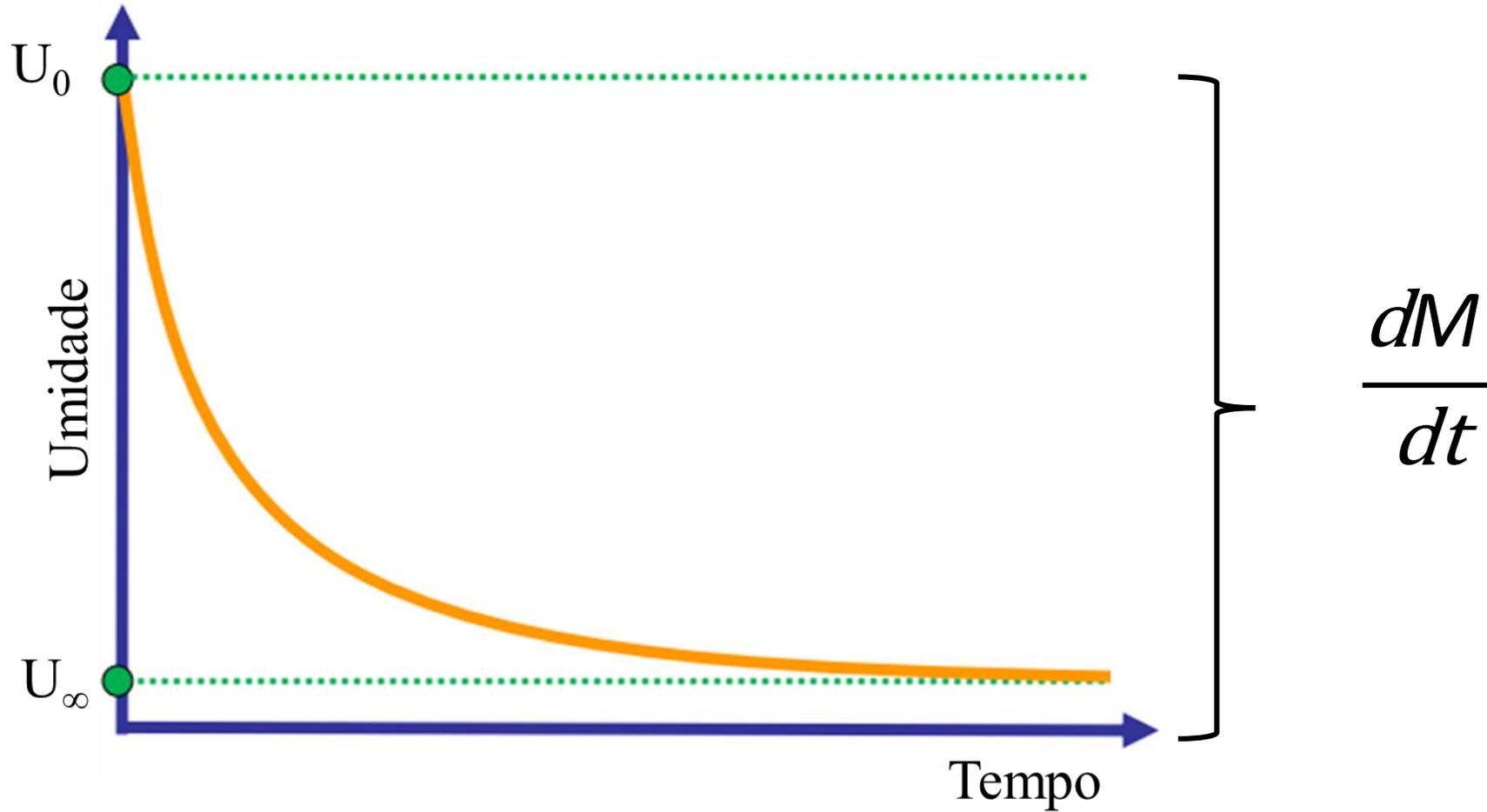
$$\text{Cinética} = \frac{dU}{dt}$$

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_t - Umidade no tempo t;
M_∞ - Umidade de equilíbrio.
M₀ - 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:

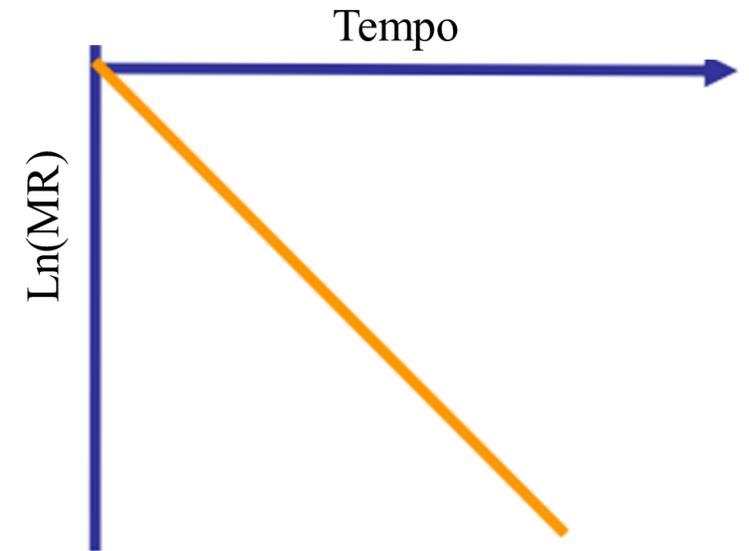
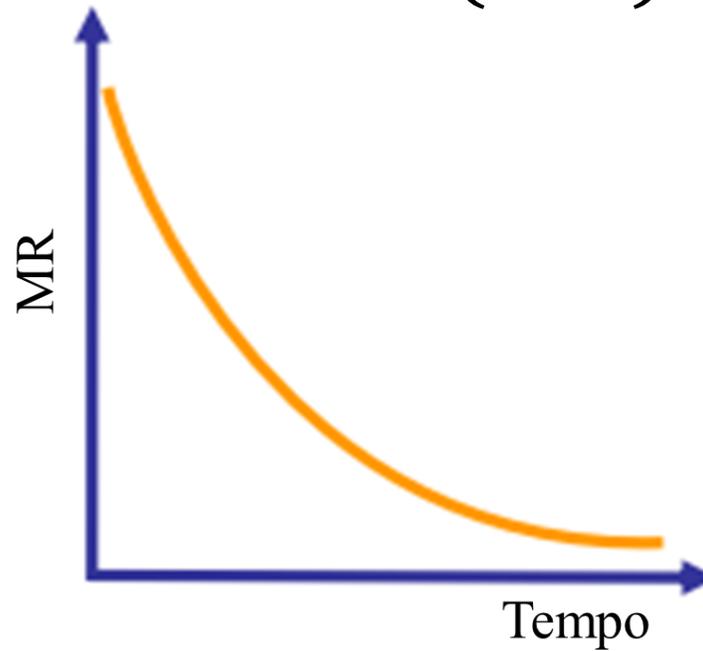
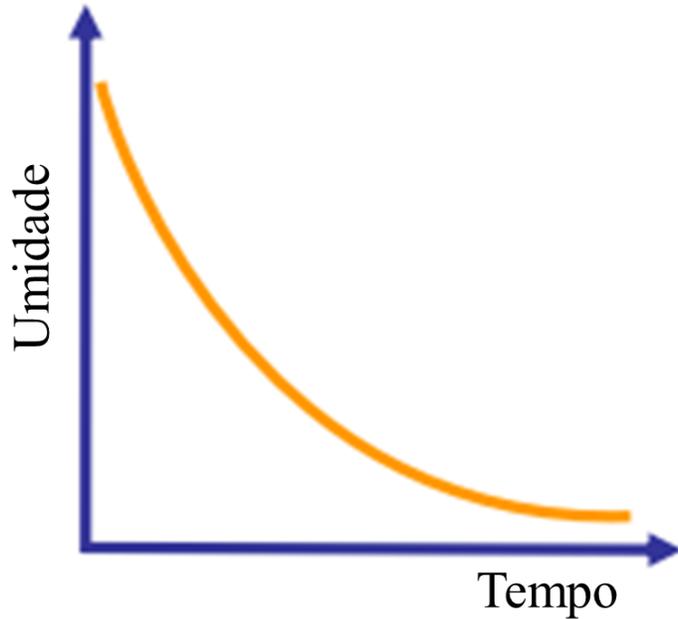
$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = e^{-kt}$$

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

Cinética de secagem

Cinética de 1ª ordem

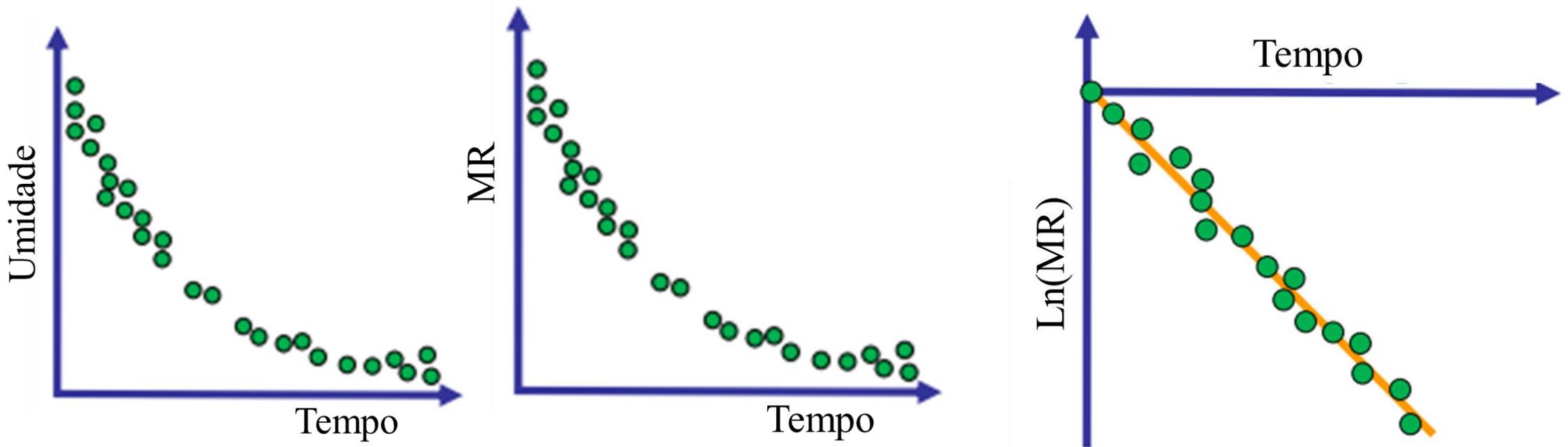
$$\ln(MR) = -kt$$



Cinética de secagem

Cinética de 1ª ordem

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



Cinética de secagem

- ✓ Parâmetro k depende da temperatura

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

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