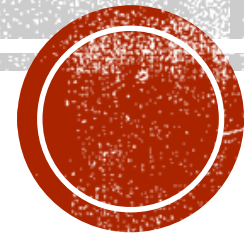


SEMICONDUTORES / DIODOS

João Paulo Neto Torres

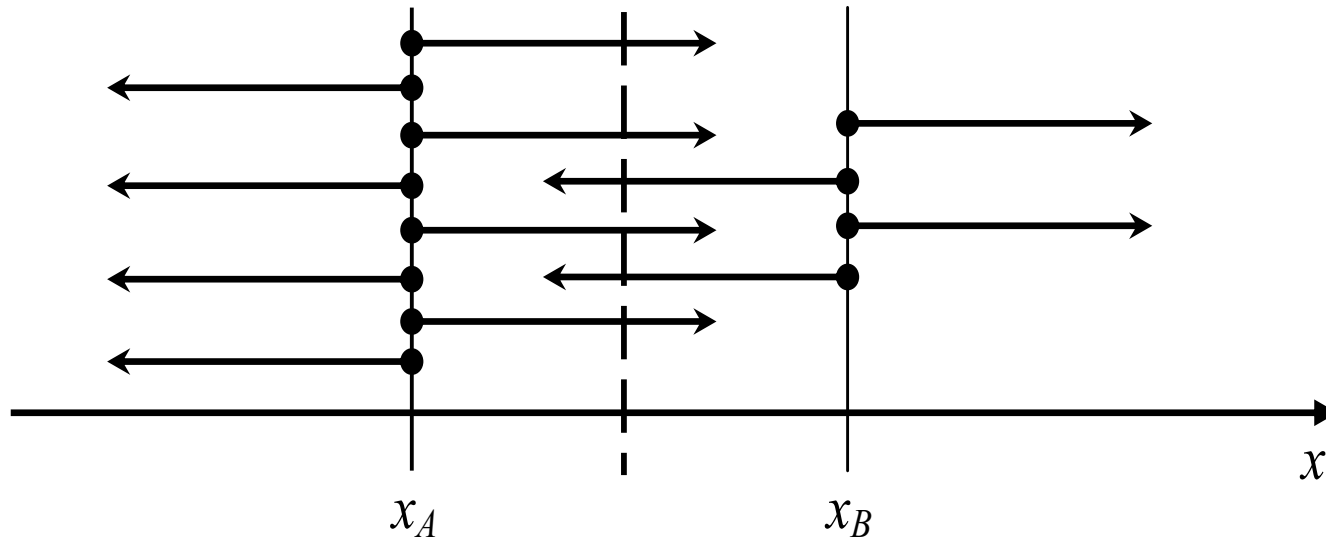




- Processo de transporte de partículas que resulta do movimento aleatório nas três direções do espaço (a $T=const$).
- Os elétrons e buracos regem-se pela estatística de Maxwell-Boltzmann, podem ser considerados como um gás rarefeito de partículas carregadas.
- Situações onde pode existir processos de difusão:
 1. Caso exista um gradiente de densidades num semiconductor não homogéneo.
 2. Ocorrência de iluminação não uniforme num semiconductor homogéneo.
 3. Semiconductor com diferentes temperaturas em diferentes regiões.



▪ **Modelo de Difusão unidimensional simplificado.**



No espaço 3D, a difusão está associada a um movimento equiprovável da partícula em qualquer direção e sentido que, associado ao gradiente de densidades, garante um fluxo de partículas da região de maior densidade para a de menor densidade.

Hipoteses:

1. em x_A existem 8 partículas: 4 devem dirigir-se para a direita e 4 para a esquerda.
2. em x_B chegam 4 partículas, todas elas com movimento perfeitamente aleatório, 2 devem deslocar-se para a direita e 2 para a esquerda.

Numa coordenada intermédia, existe, um movimento efetivo de duas partículas para a direita.



- A **densidade de corrente de partículas por difusão** \mathbf{C}_{dif} [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] é \propto ao gradiente de densidade. A constante de proporcionalidade é o **coeficiente de difusão** D [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$].

$$\vec{C}_{n_{dif}} = -D_n \text{grad } n$$

$$\vec{C}_{p_{dif}} = -D_p \text{grad } p$$

- As respectivas densidades de corrente são:

$$J_{n_{dif}} = -q \vec{C}_{n_{dif}} = qD_n \text{grad } n$$

$$J_{p_{dif}} = q \vec{C}_{p_{dif}} = -qD_p \text{grad } p$$

- Para os semicondutores não-degenerados, os **coeficientes de difusão** e as mobilidades estão ligados através das relações de Einstein:

$$D = u_T \mu$$

$$u_T = \frac{kT}{q}$$



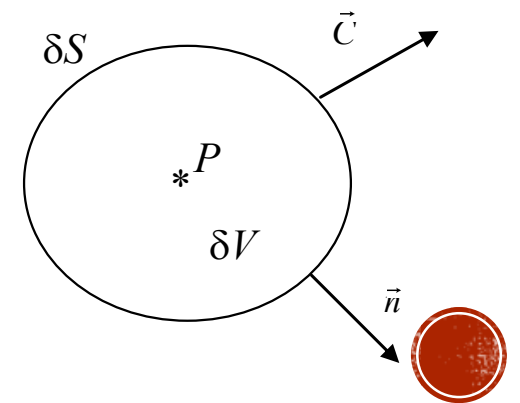
- Num semicondutor, a densidade de corrente total é, então, expressa como:

$$J_n = J_{n_{cond}} + J_{n_{dif}}$$

$$J_p = J_{p_{cond}} + J_{p_{dif}}$$

Equação da continuidade

- É uma equação diferencial que estabelece a lei de variação no espaço e no tempo da densidade de elétrons e dos buracos.
- Num elemento de volume dV de semicondutor, que envolve o ponto P , a **densidade de portadores pode variar no tempo devido a dois fatores:**
 1. um desequilíbrio entre o ritmo de G e o de R ($[G-R]dV$)
 2. um processo de transporte, condução e/ou difusão, responsável pelo movimento de portadores de ou para o elemento de volume dV .



$$\left(\frac{\partial n}{\partial t} \right) \delta V = (G - R)_n \delta V - \text{div } \vec{C}_n \delta V$$

- para cada ponto do semiconductor

$$\frac{\partial n}{\partial t} = [G - R]_n - \text{div } \vec{C}_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = [G - R]_p - \text{div } \vec{C}_p$$

- a equação da continuidade para os elétrons e buracos poderá ser escrita como:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = [G - R]_n + D_n \text{lap } n + \mu_n \text{div}(n \vec{E})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = [G - R]_p + D_p \text{lap } p - \mu_p \text{div}(p \vec{E})$$



$$\vec{C}_{ndif} = -D_n \text{grad } n \quad ; \quad \vec{C}_{ncond} = -n \mu_n \vec{E}$$

$$\vec{C}_{pdif} = -D_p \text{grad } p \quad ; \quad \vec{C}_{pcond} = p \mu_p \vec{E}$$



- **Semicondutor homogéneo do tipo-p, iluminado uniformemente**

- **Evolução da densidade de minorias após o corte de iluminação**

- Se o semicondutor é homogéneo e está iluminado uniformemente:

$$\text{div } \vec{C} = 0$$



$$\frac{dn}{dt} = G - R$$

- Neste caso,

$$G = G_{ter} = r n_0 p_0$$

- procuram-se as soluções para $t \geq 0$, quando não há iluminação. Como:

$$R = r n p$$



$$\frac{dn}{dt} = r(n_0 p_0 - np)$$

e

$$\begin{aligned} n &= n_0 + n' \\ p &= p_0 + p' \end{aligned}$$



$$np = n_0 p_0 + n_0 p' + n' p_0 + n' p'$$

▪ **Injecção Fraca**



$$np \approx n_0 p_0 + n' p_0$$

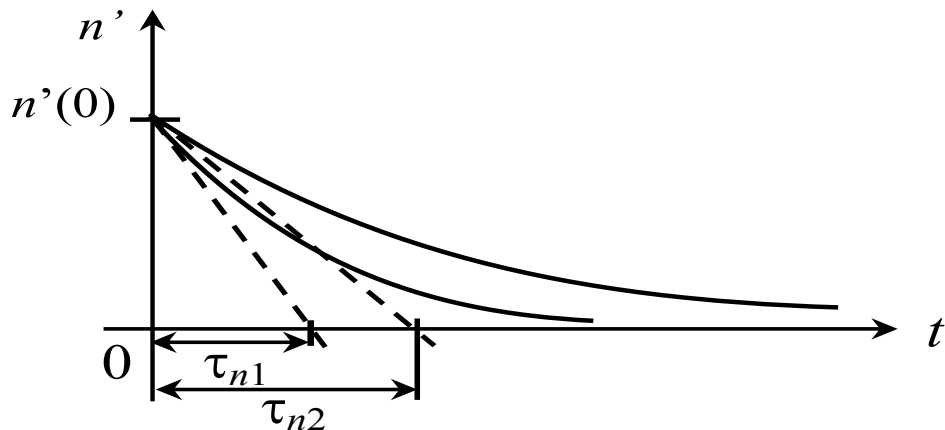


$$\tau_n = 1/(r p_0)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn'}{dt} = -r p_0 n'$$



- **tempo de vida médio** dos eletrões: tempo que em média, o excesso de eletrões demoram a desaparecer por recombinação.



$$\frac{dn'}{dt} = -\frac{n'}{\tau_n}$$



$$n'(t) = A e^{-t/\tau_n}$$



- **Evolução da densidade de minorias com iluminação**

- Para os elétrons, a equação da continuidade escreve-se como:

$$\frac{dn}{dt} = G - R$$

- Neste caso:

$$G = G_{fe} + G_{ter}$$

- No seguimento do estudo feito pode escrever-se:

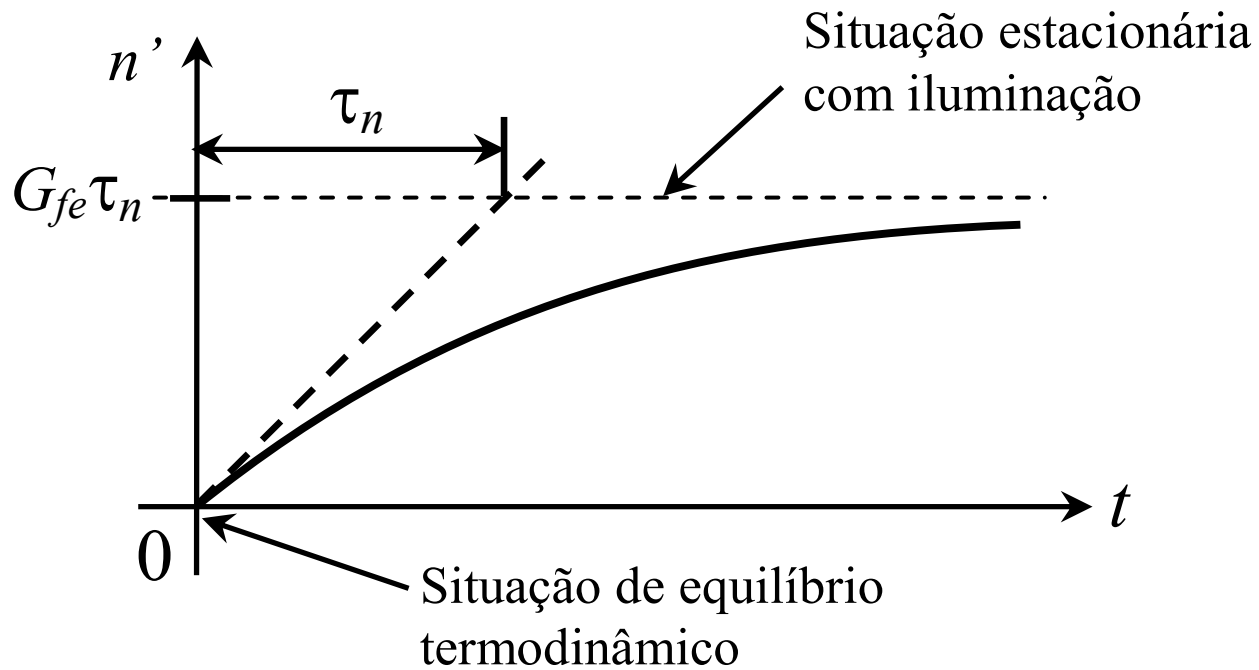
$$\frac{dn'}{dt} = -\frac{n'}{\tau_n} + G_{fe} \quad \text{com} \quad \tau_n = \frac{1}{rp_0}$$

- cuja solução é dada por:

$$n'(t) = A e^{-t/\tau_n} + G_{fe} \tau_n$$

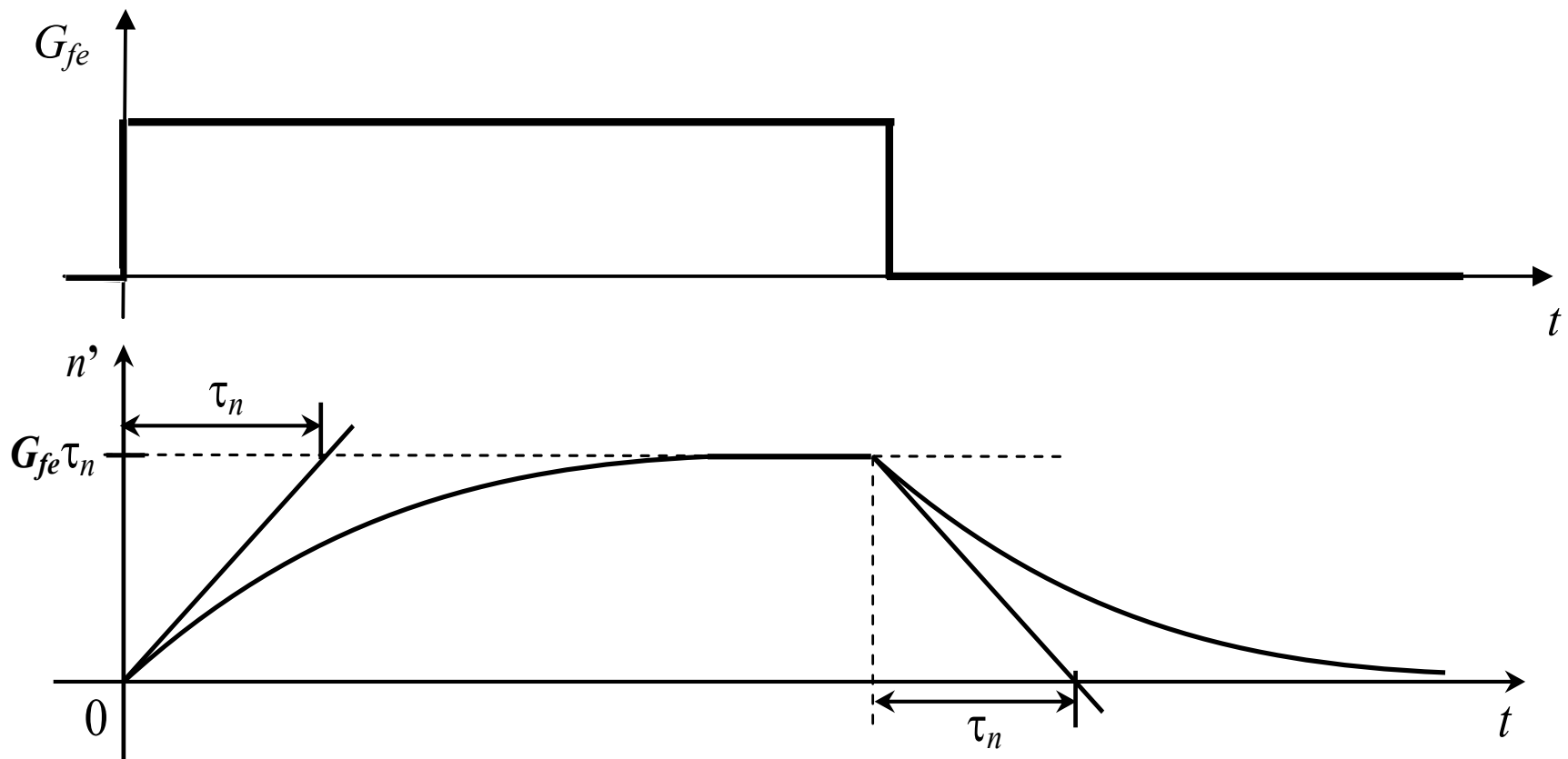
$$n'(0) = 0 \Rightarrow A = -G_{fe} \tau_n$$





- A situação estacionária está praticamente alcançada quando $t \geq 4 \tau_n$.
- a diferença entre o valor de n' e o valor final é menor do que $(G_{fe}\tau_n)/e^4$, ou seja, um erro inferior a 1,8%.
- τ_n representa o tempo que, em média, o excesso de elétrons demora a atingir o valor final.

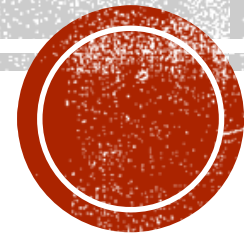
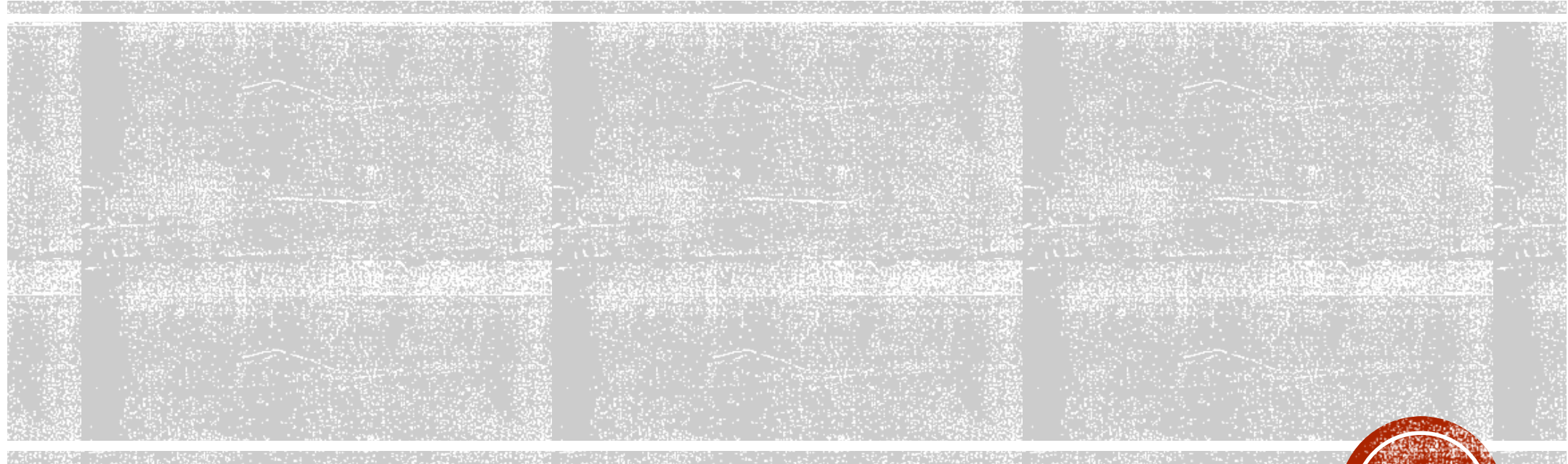




- **Difusão com recombinação na situação estacionária**
 - **Hipoteses:**
 1. semicondutor do tipo- p em regime estacionário sujeito a uma perturbação que só afeta os portadores minoritários (eletrões), ou seja, uma **injeção fraca**.
 2. Admita-se que na região em análise não há iluminação, isto é, $G=G_{\text{ter}}$.

Estas condições têm lugar numa situação muito importante e que envolve **os díodos de junção quando sujeitos a uma tensão constante entre os seus terminais**. A relação corrente-tensão para o diodo assenta nas soluções da equação da continuidade para os portadores minoritários dos lados p e n nas condições referidas.





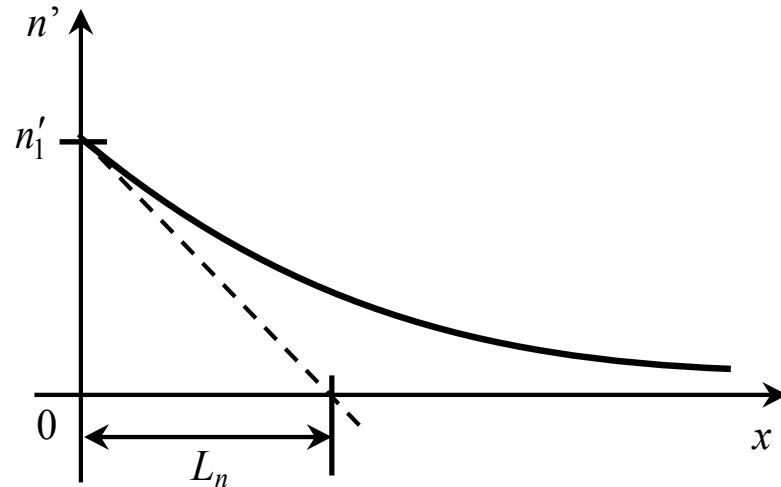
■ Cristal semi-infinito

- Condições de fronteira:

$$\begin{aligned} n'(0) &= n_1' \\ n'(\infty) &= 0 \end{aligned}$$



$$n'(x) = n_1' e^{-x/L_n}$$



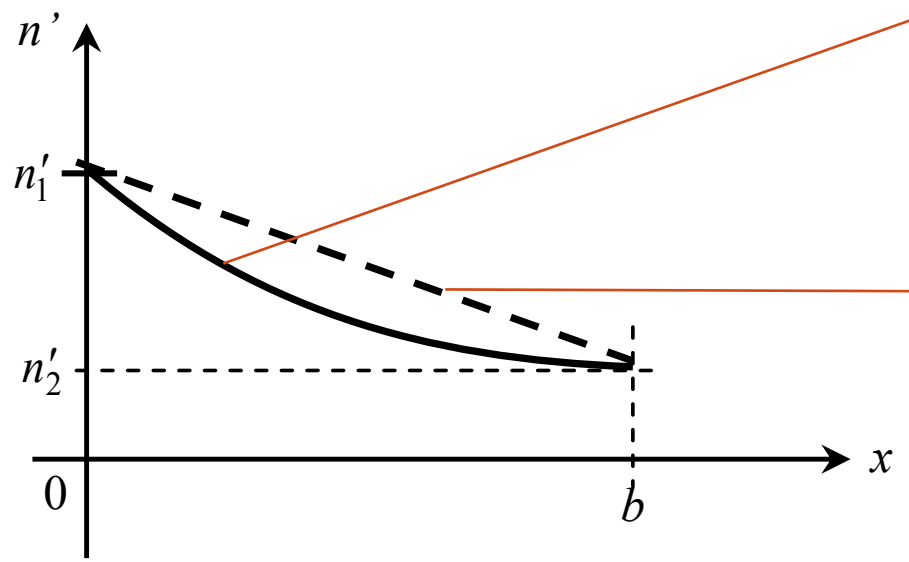
- ✓ L_n representa a distância, que em média, os minoritários percorrem por difusão até se recombinarem.
- ✓ A maioria dos excessos se recombinam, desde que estejam a uma distância da origem maior ou igual a $4L$.



- **Cristal finito**

- Condições de fronteira:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{\begin{array}{l} n'(0) = n'_1 \\ n'(b) = n'_2 \end{array}} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\begin{cases} n'_1 = A + B \\ n'_2 = Ae^{-b/L_n} + Be^{b/L_n} \end{cases}} \quad \longrightarrow \quad \boxed{n'(x) = \frac{1}{\sinh(b/L_n)} \left[n'_1 \sinh\left(\frac{b-x}{L_n}\right) + n'_2 \sinh\left(\frac{x}{L_n}\right) \right]}
 \end{array}$$



Para cristais curtos ($b \ll L_n$)

$$\boxed{n'(x) = \frac{(n'_1 - n'_2)}{b} x}$$

