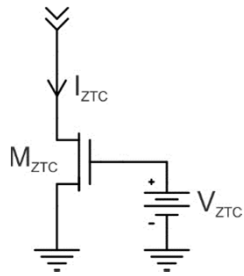


## Fonte de Referência de Corrente

A ideia por trás da fonte de corrente independente da variação de temperatura é manter o transistor sempre polarizado no ponto ZTC, Zero Temperature Coefficient.



$$\phi_T = \frac{k_B T}{q} = \frac{k_B T_0}{q} \frac{T}{T_0} = \phi_{T_0} \frac{T}{T_0} \rightarrow \phi_{T_0} = \frac{k_B T_0}{q} \cong 26mV \rightarrow \text{Tensão térmica}$$

$$k_p = k_{p_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-\alpha_\mu} \rightarrow \text{Dependência da mobilidade com a temperatura}$$

$$V_{T_0} = V_{T_0} (1 - \alpha_{V_T} (T - T_0)) \rightarrow \text{Dependência do } V_{T_0} \text{ com a temperatura}$$

## Equações do modelo EKV

$$I_{DS} = \frac{I_{ESP} \left( \left( \text{LambertW} \left( 2e^{\frac{V_G - V_{T_0}}{n\phi_T}} \right) + 1 \right)^2 - 1 \right)}{4}$$

$$I_{ESP} = 2n\phi_T^2 k_p \frac{W}{L} = 2n\phi_{T_0}^2 \frac{T^2}{T_0^2} k_{p_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-\alpha_\mu} \frac{W}{L} \rightarrow I_{ESP} = 2n\phi_{T_0}^2 k_{p_0} \frac{W}{L} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{2-\alpha_\mu} \rightarrow I_{ESP} = I_{ESP_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{2-\alpha_\mu}$$

$$I_{ESP_0} = 2n\phi_{T_0}^2 k_{p_0} \frac{W}{L}$$

## Dependência da temperatura

$$I_{DS} = \frac{I_{ESP_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{2-\alpha_\mu} \left( \left( LambertW \left( 2e^{\frac{V_G - (V_{T_0} - \alpha_{V_T}(T-T_0))}{n\phi_{T_0} \frac{T}{T_0}}} \right) + 1 \right)^2 - 1 \right)}{4}$$

Condição ZTC  $\longrightarrow$   $V_G = V_{ZTC} = V_{T_0} + \alpha_{V_T} T_0$   
 $\alpha_\mu = 2 \longrightarrow \alpha_\mu \cong 2$  nos transistores NMOS

$$V_{ZTC} = V_{T_0} + \alpha_{V_T} T_0$$

$$I_{ZTC} = \frac{I_{ESP_0}}{4} \left( \left( LambertW \left( 2e^{\frac{\alpha_{V_T} T_0}{n\phi_{T_0}}} \right) + 1 \right)^2 - 1 \right)$$

$\longrightarrow$  Para uma determinada tensão  $V_{ZTC}$ , a equação se mantém independente da temperatura

## Coeficiente de inversão no ponto ZTC - $IC_{ZTC}$

$$IC_{ZTC} = \frac{I_{ZTC}}{I_{ESP_0}} \longrightarrow IC_{ZTC} = \frac{1}{4} \left( \left( LambertW \left( 2e^{\frac{\alpha_{V_T} T_0}{n\phi_{T_0}}} \right) + 1 \right)^2 - 1 \right)$$

## Exemplo para um transistor NMOS de um processo CMOS de 180nm

$$V_{T_0} = 0.39V$$

$$\alpha_{V_T} = 740 \mu k^{-1}$$

$$\alpha_{\mu} = 1.72$$

$$n = 1.23$$

$$T_0 \cong 300k$$

$$\phi_{T_0} \cong 26mV$$

$$k_{p_0} = 293.4 \mu A/V^2$$



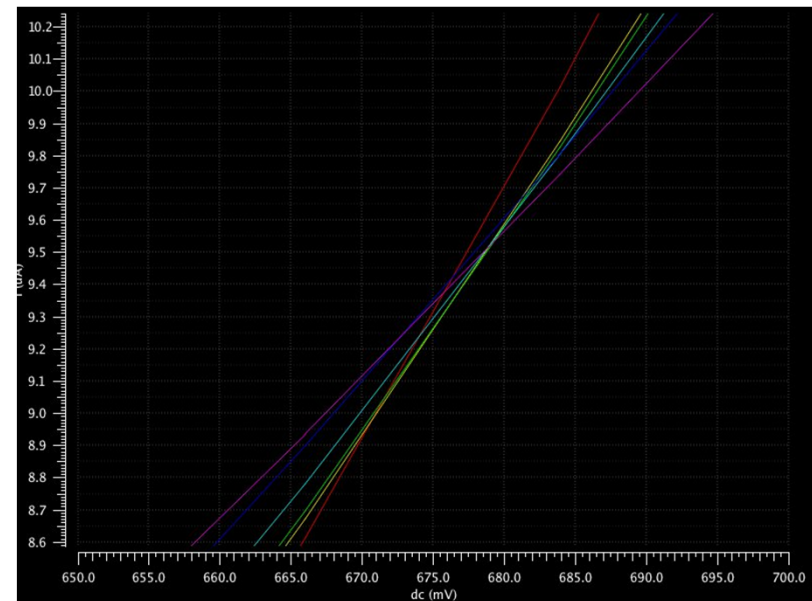
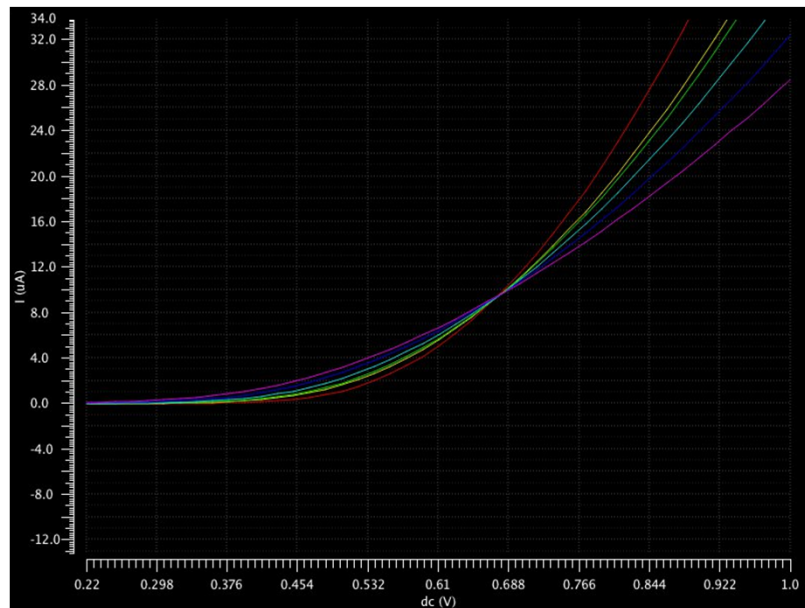
$$V_{ZTC} = 0.61V$$

$$IC_{ZTC} = 11.5$$

$$V_{ZTC} = V_{T_0} + \alpha_{V_T} T_0$$

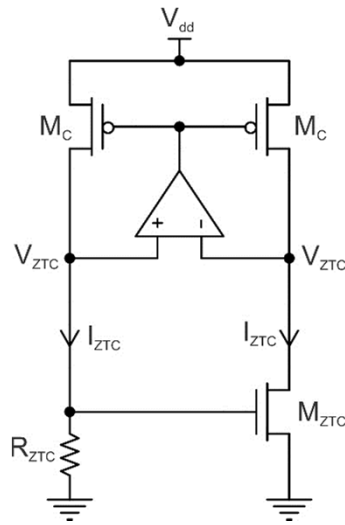
$$IC_{ZTC} = \frac{1}{4} \left( \left( LambertW \left( 2e^{\frac{\alpha_{V_T} T_0}{n\phi_{T_0}}} \right) + 1 \right)^2 - 1 \right)$$

Ponto ZTC -  $-40^{\circ}C \leq T \leq +175^{\circ}C$



## Gerador de Corrente ZTC

A corrente ZTC é responsável por gerar a própria tensão ZTC



$$I_{ZTC} = \frac{I_{ESP_0}}{4} \left( \left( \text{LambertW} \left( 2e^{\frac{\alpha_{V_T} T_0}{n\phi_{T_0}}} \right) + 1 \right)^2 - 1 \right)$$

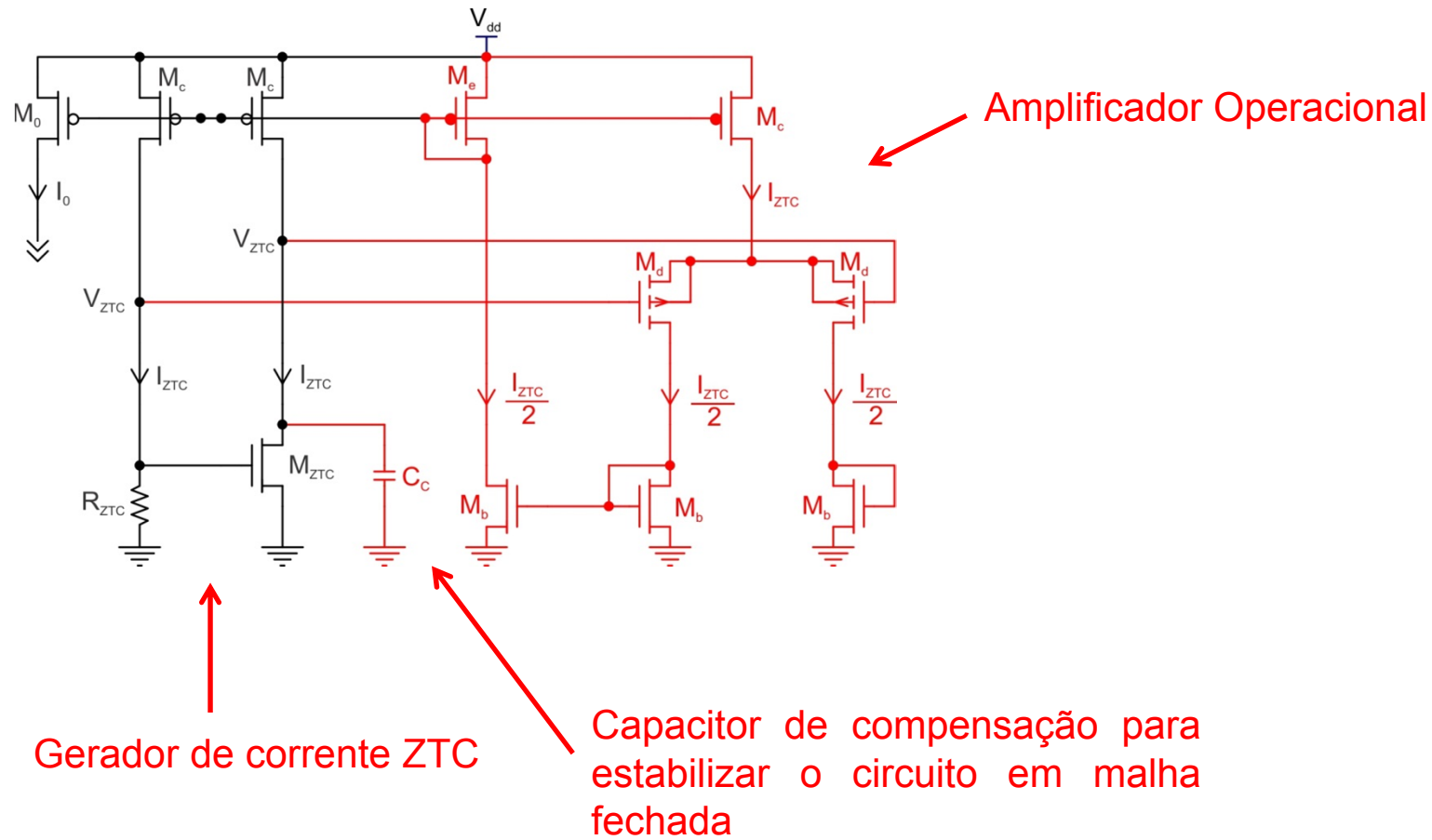
$$I_{ZTC} R_{ZTC} = V_{ZTC}$$

$$V_{ZTC} = V_{T_0} + \alpha_{V_T} T_0$$

$$R_{ZTC} = \frac{V_{ZTC}}{I_{ZTC}} \rightarrow R_{ZTC} = \frac{V_{T_0} + \alpha_{V_T} T_0}{\frac{I_{ESP_0}}{4} \left( \left( \text{LambertW} \left( 2e^{\frac{\alpha_{V_T} T_0}{n\phi_{T_0}}} \right) + 1 \right)^2 - 1 \right)}$$

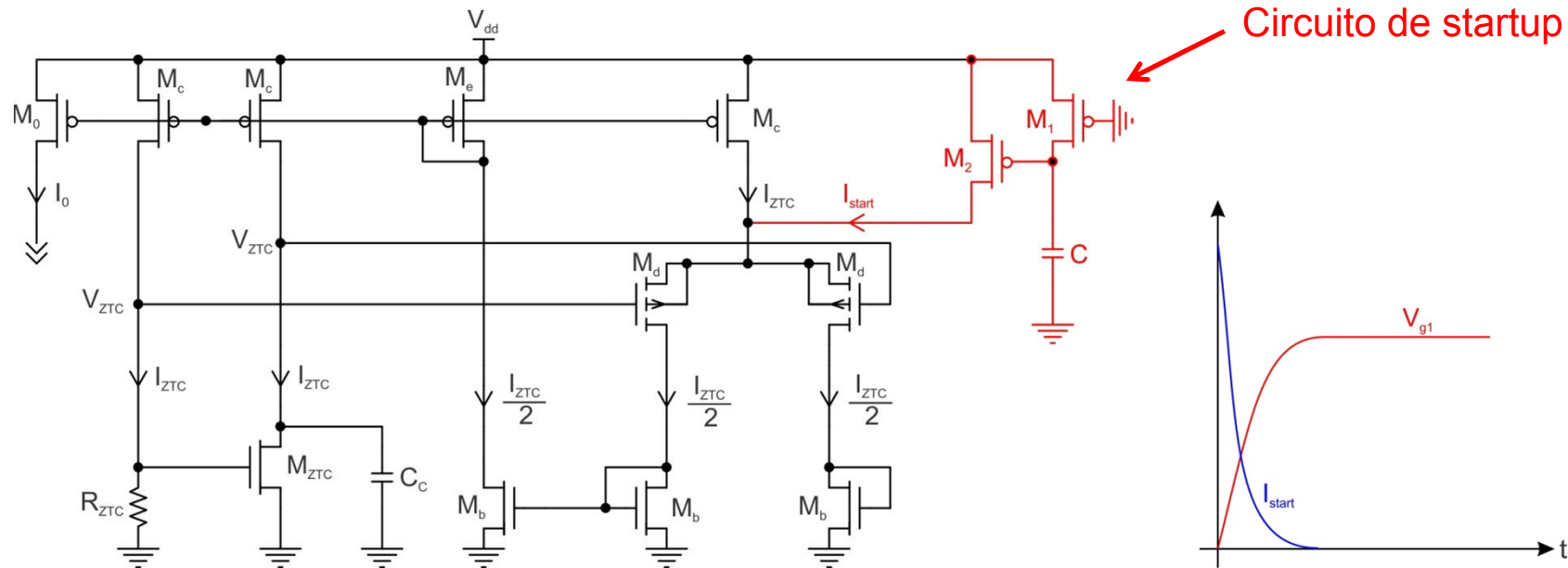
Nos transistores NMOS, o parâmetro  $\alpha_{\mu}$  é muito próximo de 2. O mesmo não acontece para o PMOS. O resistor  $R_{ZTC}$  deve ter muito baixa dependência da temperatura. Muitos processos de integração oferecem esta opção.

## Implementação Prática

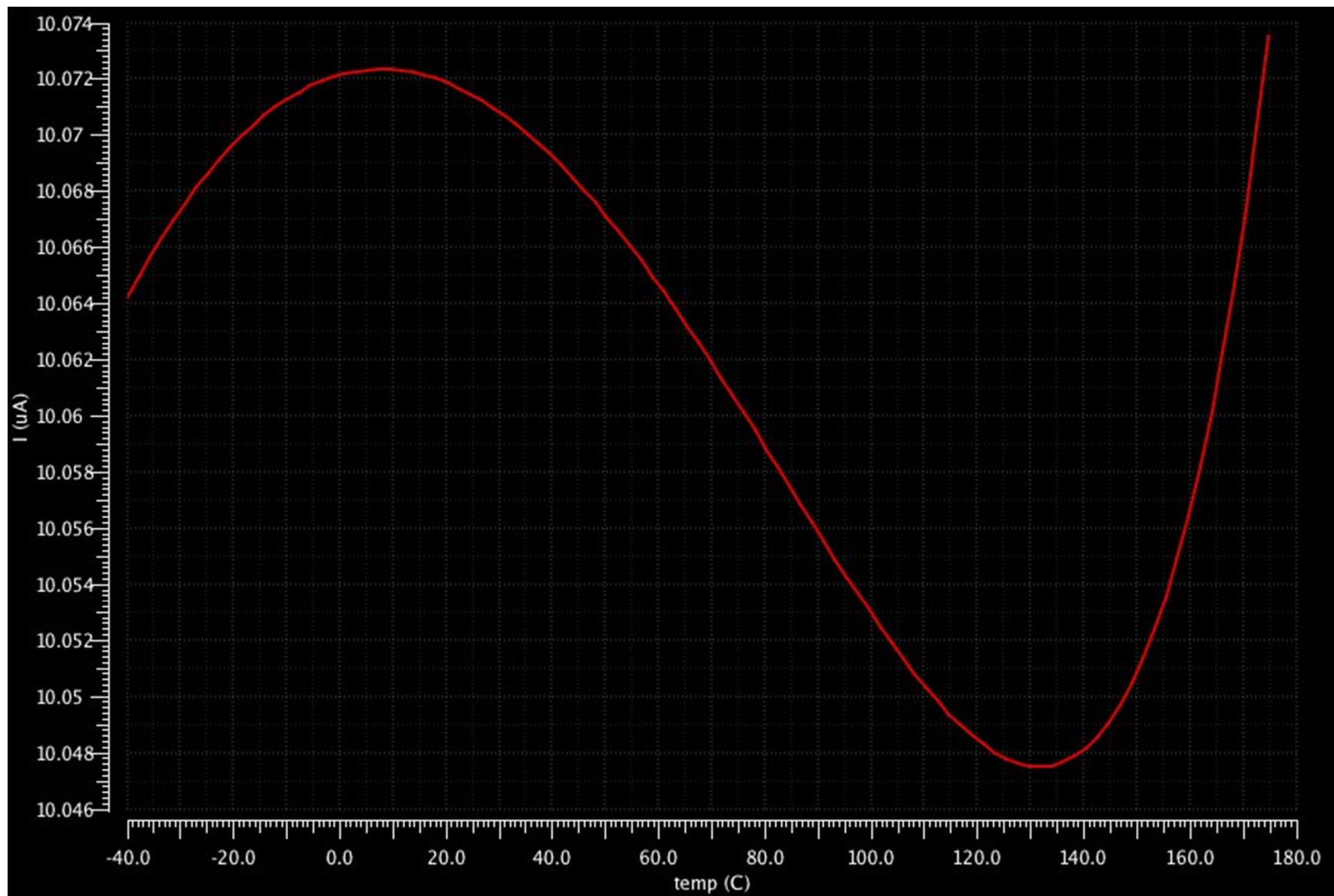


## Circuito de Startup

Tal como o circuito de referência de tensão, o gerador de corrente possui dois estados estáveis, sendo um deles com todas as correntes iguais a zero. Para evitar este estado indesejável, utiliza-se um circuito de startup, que polariza todo o circuito com correntes maiores que zero no instante em que é energizado.



## Gráfico da Corrente no Ponto ZTC



**Final deste  
Tópico**