

## ***COORDENAÇÃO DO SISTEMA DO MOTOR COM A CARGA***

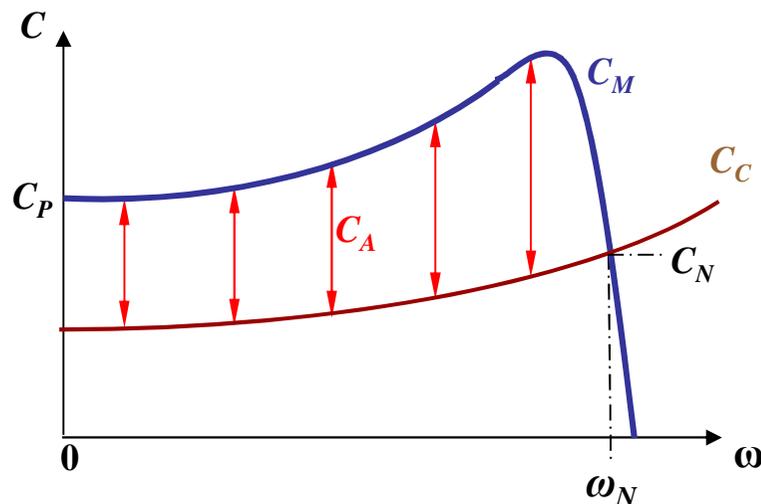
### COORDENAÇÃO DO SISTEMA: MOTOR + CARGA + CONTROLADOR

**FUNÇÃO DO ACIONAMENTO :**

→ **MOTOR DEVE TIRAR A CARGA DO REPOUSO**

→ **APLICAR CONJUGADO SUFICIENTE PARA IMPRIMIR ACELERAÇÃO ADEQUADA**

→ **LEVAR A CARGA ATÉ A ROTAÇÃO NOMINAL DE OPERAÇÃO, DE FORMA ESTÁVEL**



**DINÂMICA DO ACIONAMENTO:**

$$C_M = C_C + \underbrace{J_T \cdot \frac{d\omega}{dt}}_{C_A}$$

$C_M$  → **CONJUGADO MOTOR**

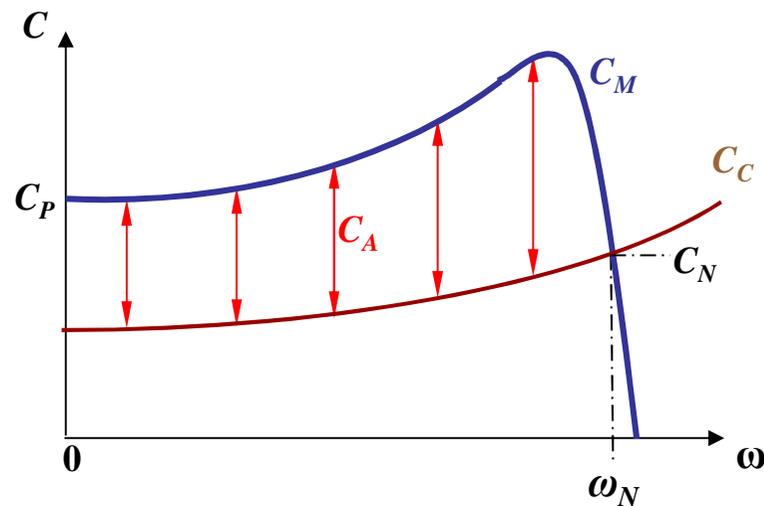
$C_C$  → **CONJUGADO RESISTENTE**  
( **COMPONENTE ATIVA** )

$C_A$  → **CONJUGADO ACELERANTE**  
( **COMPONENTE REATIVA** )

**CARACTERIZAÇÃO DE UM ACIONAMENTO ESTÁVEL:**

$$C_A = J_T \cdot \frac{d\omega}{dt} > 0 \quad \left. \vphantom{C_A} \right\} \text{EM TODA A FAIXA: } \omega = 0 \rightarrow \omega = \omega_N$$

$$\frac{dC_M}{d\omega} < \frac{dC_R}{d\omega} \quad \left. \vphantom{\frac{dC_M}{d\omega}} \right\} \text{NO PONTO DE OPERAÇÃO}$$

**TEMPO DE ACELERAÇÃO:**

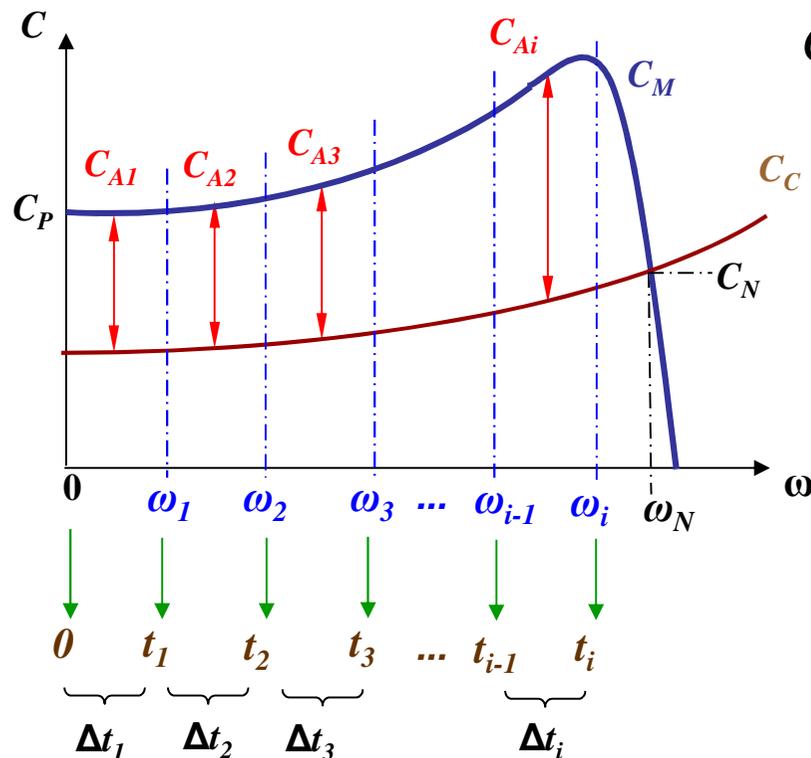
$$(C_M - C_C) \cdot dt = J_T \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

$$t_A = \int_0^{t_A} dt = \int_0^{\omega_N} \frac{J_T}{(C_M - C_C)} \cdot d\omega$$

APENAS EM CASOS PARTICULARES É POSSÍVEL EQUACIONAR:  $C_A = f(\omega)$

## DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ACELERAÇÃO → MÉTODO GERAL POR APROXIMAÇÃO

$C_{Ai}$  = CONJUGADO ACELERANTE MÉDIO NO INTERVALO ( $\omega_i - \omega_{i-1}$ )



$$C_A = J_T \cdot \frac{d\omega}{dt} \cong J_T \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t_i = J_T \cdot \frac{\Delta\omega_i}{C_{Ai}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_1 = (t_1 - 0) = J_T \cdot \frac{(\omega_1 - 0)}{C_{A1}} \\ \Delta t_2 = (t_2 - t_1) = J_T \cdot \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{C_{A2}} \\ \Delta t_i = (t_i - t_{i-1}) = J_T \cdot \frac{(\omega_i - \omega_{i-1})}{C_{Ai}} \end{array} \right.$$

TEMPO DE ACELERAÇÃO →

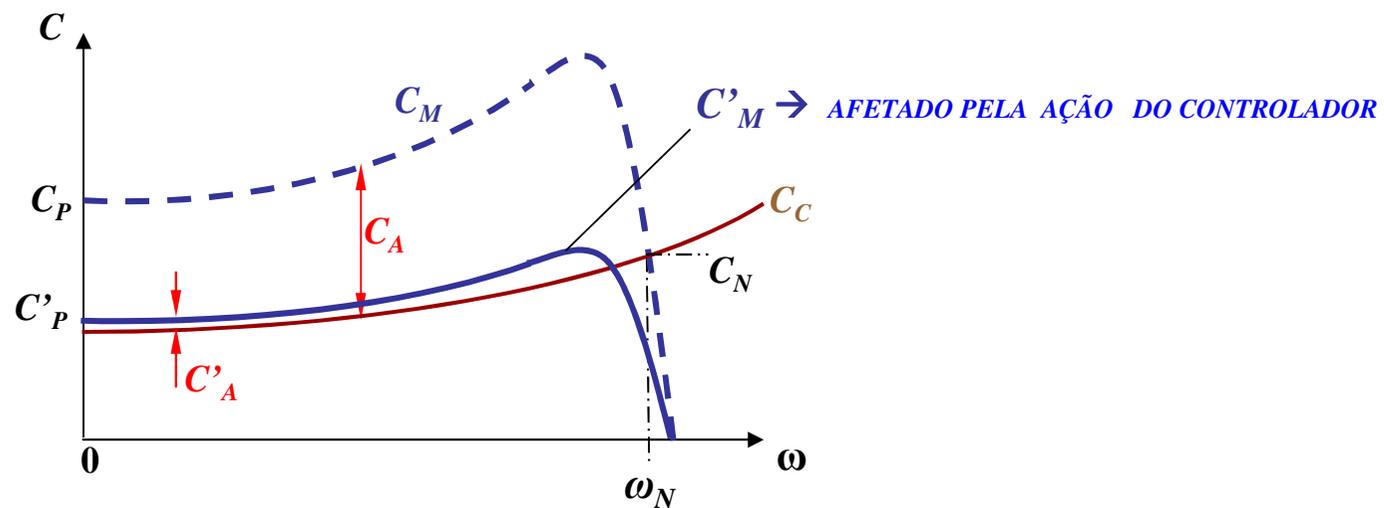
$$t_A = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$$

**AÇÃO DO CONTROLADOR SOBRE O SISTEMA:**

**CONTROLADOR → AGE SOBRE O MOTOR, PRINCIPALMENTE PARA LIMITAR O IMPACTO NA REDE ELÉTRICA DURANTE A PARTIDA**

**EFEITO DO CONTROLADOR SOBRE A CORRENTE, EM GERAL AFETA A CARACTERÍSTICA DE TORQUE DO MOTOR**

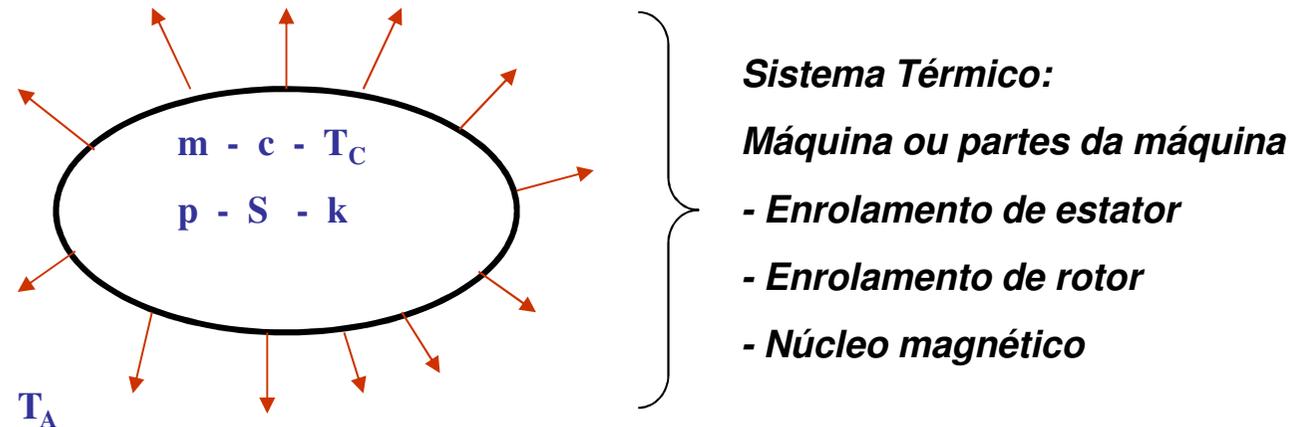
**EFEITO DEVE SER LIMITADO DE TAL MODO A GARANTIR A ESTABILIDADE DO ACIONAMENTO DURANTE A PARTIDA**



***CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA TÉRMICO NOS  
EQUIPAMENTOS E MÁQUINAS ELÉTRICAS***

## CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA TÉRMICO EM EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

## “NECESSIDADE DE DISSIPAÇÃO DE CALOR EM MÁQUINAS E TRANSFORMADORES”

CORPO “HOMOGÊNEO”

→ IMERSO NUM AMBIENTE A TEMPERATURA CONSTANTE “ $T_A$ ”

→ COM GERAÇÃO DE PERDAS INTERNAS “ $p$ ”

RESULTA:

→ AQUECIMENTO DO CORPO ATÉ UMA TEMPERATURA “ $T_C$ ”

→  $\Delta T = T_C - T_A$  → SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

→ COMPROMETIMENTO DA VIDA DOS MATERIAIS ISOLANTES

**CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ISOLANTE APLICADO À MÁQUINA**

**MATERIAIS ISOLANTES DETERMINAM A “CLASSE DE ISOLAÇÃO” DO EQUIPAMENTO:**

→ **CARACTERIZADA PELA MÁXIMA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ADMISSÍVEL (TIPO DE MATERIAL APLICADO)**

→ **CARACTERIZADA PELA CLASSE DE TENSÃO NOMINAL ( ESPESSURA / QUANTIDADE DE MATERIAL APLICADO )**

**SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NOMINAL:  $\Delta T = T_{ABSOLUTA} - T_{AMBIENTE} \rightarrow T_{AMBIENTE} = 40^{\circ}\text{C}$  (PADRÃO)**

**CONSIDERA-SE A NÃO UNIFORMIDADE NA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS DENTRO DA MÁQUINA**

→ **SOBRELEVAÇÃO ADMISSÍVEL DO MATERIAL APLICADO < SOBRELEVAÇÃO NOMINAL DO MATERIAL**

**CLASSE TÉRMICA “A” →  $T_{ABS.} = 105^{\circ}\text{C}$  →  $\Delta T_N = 60^{\circ}\text{C}$**

**CLASSE TÉRMICA “B” →  $T_{ABS.} = 130^{\circ}\text{C}$  →  $\Delta T_N = 80^{\circ}\text{C}$**

**CLASSE TÉRMICA “F” →  $T_{ABS.} = 155^{\circ}\text{C}$  →  $\Delta T_N = 100^{\circ}\text{C}$**

**CLASSE TÉRMICA “H” →  $T_{ABS.} = 180^{\circ}\text{C}$  →  $\Delta T_N = 125^{\circ}\text{C}$**

**CLASSE TÉRMICA “C” →  $T_{ABS.} = 220^{\circ}\text{C}$  →  $\Delta T_N = 165^{\circ}\text{C}$**

**SOBRELEVAÇÕES ADMISSÍVEIS PARA  
MATERIAIS JÁ APLICADOS À MÁQUINA**

TEMPO DE VIDA TÉRMICA DOS MATERIAIS ISOLANTES → FUNÇÃO INVERSA DA TEMPERATURA

$$L_H(T) \cong L_{H-NOM} \cdot \left( \frac{1}{2} \right)^{\left( \frac{T-T_{LIM}}{\theta} \right)}$$

} LEI DE ARRHENIUS

$L_H(T)$  : VIDA EM HORAS PARA OPERAÇÃO CONTÍNUA À TEMPERATURA  $T$  [°C]

$L_{H-NOM}$  : VIDA NOMINAL DO ISOLAMENTO EM HORAS OPERANDO NO LIMITE DA CLASSE TÉRMICA ( $T_{LIM}$ )

$T_{LIM}$  : TEMPERATURA LIMITE DA CLASSE TÉRMICA DO ISOLAMENTO [°C]

$\theta$  : PARÂMETRO DE TEMPERATURA QUE DEPENDE DO MATERIAL [°C]

→  $\theta \cong 8$  PARA MATERIAIS À BASE DE CELULOSE ( PAPEL KRAFT )

→  $\theta \cong 10$  PARA MATERIAIS À BASE DE FIBRA DE VIDRO IMPREGNADA COM RESINA POLIESTER / EPOXI

→ PAPEL KRAFT ( $\theta = 8$ ) → VIDA TÉRMICA CAI À METADE A CADA 8 °C ACIMA DA TEMPERATURA LIMITE

→ POLIESTER ( $\theta = 10$ ) → VIDA TÉRMICA CAI À METADE A CADA 10 °C ACIMA DA TEMPERATURA LIMITE

## TRANSITÓRIO TÉRMICO

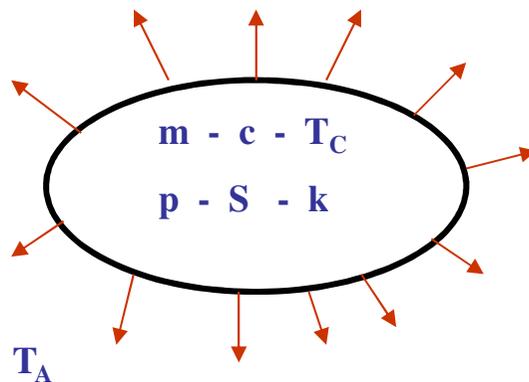
## “CONSTANTE DE TEMPO TÉRMICA”

CORPO HOMOGÊNEO NA TEMPERATURA AMBIENTE  $\rightarrow T_A$  [°C]

EXPOSTO A UMA FONTE DE PERDAS AO LONGO DO TEMPO (FLUXO DE CALOR)  $\rightarrow p.dt$  [W.s]

PROCESSO DE AQUECIMENTO TRANSITÓRIO  $\rightarrow T_C = F(p; m; c; S; k)$

SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ACIMA DO AMBIENTE  $\rightarrow \Delta T = T_C - T_A$  [°C]



$m$  : [kg]  $\rightarrow$  MASSA EQUIVALENTE DO CORPO

$c$  : [J / kg.°C]  $\rightarrow$  CALOR ESPECÍFICO MÉDIO DO CORPO

$S$  : [m<sup>2</sup>]  $\rightarrow$  SUPERFÍCIE TOTAL DO CORPO

$k$  : [W / m<sup>2</sup>.°C]  $\rightarrow$  COEFICIENTE DE TROCA DE CALOR

CONSERVAÇÃO DA ENERGIA TOTAL:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{ENERGIA TÉRMICA} \\ \text{GERADA (OU RECEBIDA)} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{ENERGIA TÉRMICA} \\ \text{ARMAZENADA} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{ENERGIA DISSIPADA} \end{array} \right]$$

$$p.dt = m.c.d\Delta T + k.S.\Delta T.dt$$

## TRANSITÓRIO TÉRMICO

$$\left(\frac{p}{k.S} - \Delta T\right).dt = \frac{m.c}{k.S} d\Delta T \quad \Rightarrow \quad \int dt = \frac{m.c}{k.S} \int \frac{1}{\left(\frac{p}{k.S}\right) - \Delta T} .d\Delta T$$

$$-t \cdot \frac{k.S}{m.c} = \ln\left(\frac{p}{k.S} - \Delta T\right) + C \quad \Rightarrow \quad \text{CONDIÇÕES INICIAIS} \left\{ \begin{array}{l} t = 0 \rightarrow \Delta T = 0 \Rightarrow C = \ln\left(\frac{k.S}{p}\right) \end{array} \right.$$

$$\Delta T = \frac{p}{k.S} \left(1 - e^{-\frac{t}{\left(\frac{m.c}{k.S}\right)}}\right) \quad \Rightarrow \quad \text{INSTANTES NOTÁVEIS} \left\{ \begin{array}{l} t = \infty \Rightarrow \Delta T = \frac{p}{k.S} = \Delta T_R \\ t' = \frac{m.c}{k.S} \Rightarrow \Delta T = 0,632 \cdot \Delta T_R \Rightarrow t' = \tau \end{array} \right.$$

$$\Delta T = \Delta T_R \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

$\Delta T_R \rightarrow$  TEMPERATURA DE REGIME TÉRMICO PERMANENTE

$\tau \rightarrow$  CONSTANTE DE TEMPO TÉRMICA DE AQUECIMENTO



## TRANSITÓRIO TÉRMICO

CORPO HOMOGÊNEO A UMA TEMPERATURA “ $T_C$ ” MAIOR QUE A TEMPERATURA AMBIENTE “ $T_A$ ”

CESSADAS AS FONTES DE PERDAS AO LONGO DO TEMPO (FLUXO DE CALOR)  $\rightarrow p \cdot dt = 0$

PROCESSO DE RESFRIAMENTO TRANSITÓRIO  $\rightarrow \Delta T = F(p; m; c; S; k)$

**SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA ACIMA DO AMBIENTE  $\rightarrow \Delta T = T_C - T_A \rightarrow$  TENDE A ZERO**

CONSERVAÇÃO DA ENERGIA TOTAL:

$$\left( \begin{array}{c} \text{ENERGIA TÉRMICA} \\ \text{GERADA (OU RECEBIDA)} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{ENERGIA TÉRMICA} \\ \text{ARMAZENADA} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{ENERGIA DISSIPADA} \end{array} \right)$$

$$0 = m \cdot c \cdot d\Delta T + k \cdot S \cdot \Delta T \cdot dt$$

$$t = -\frac{m \cdot c}{k \cdot S} \cdot \int \frac{1}{\Delta T} \cdot d\Delta T = -\frac{m \cdot c}{k \cdot S} \cdot \ln \Delta T + C \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{CONDIÇÕES INICIAIS DO RESFRIAMENTO:} \\ t = 0 \Rightarrow \Delta T = \Delta T_0 \end{array} \right.$$

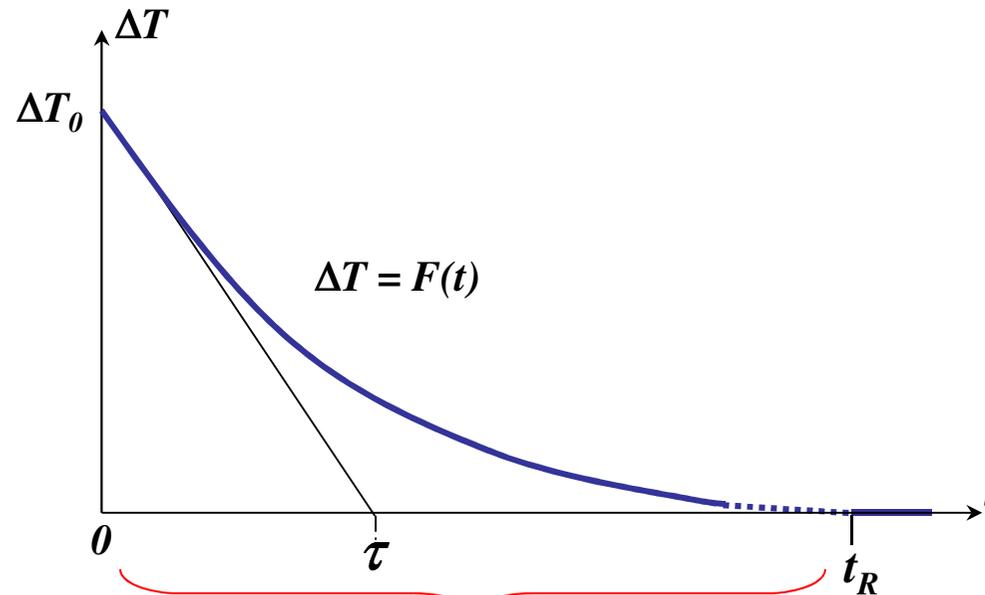
## TRANSITÓRIO TÉRMICO

EVOLUÇÃO DA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO RESFRIAMENTO

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

## TEMPO DE RESFRIAMENTO

$$t_R \cong 4 \cdot \tau$$

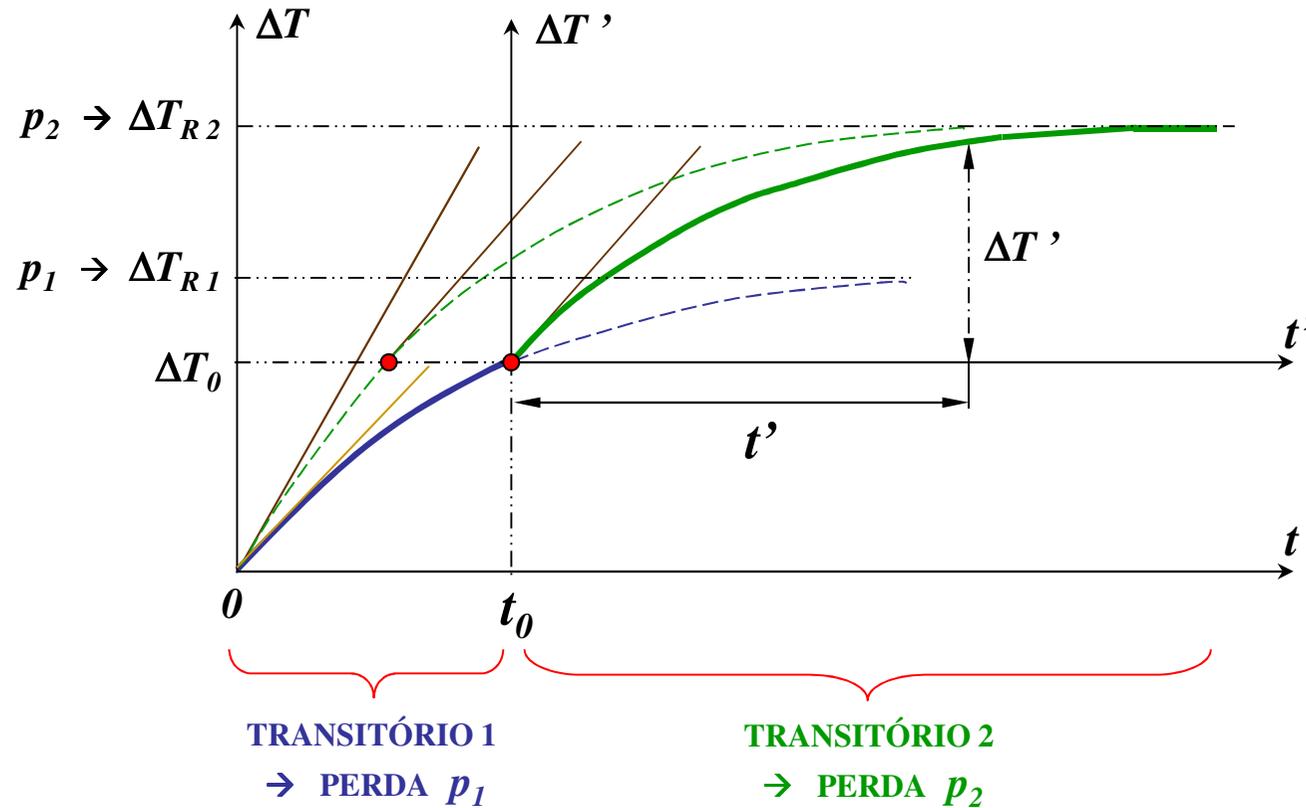


## TRANSITÓRIO TÉRMICO DE RESFRIAMENTO

$\Delta T_0$  → **ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA INICIAL DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO**  
 → **ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO INSTANTE DA SUPRESSÃO DAS PERDAS**  
 → **SE O SISTEMA ESTAVA PREVIAMENTE EM REGIME →  $\Delta T_0 = \Delta T_R$**

$\tau = \frac{m \cdot c}{k \cdot S}$  → **CAPACIDADE TÉRMICA [J / °C]** } **CONSTANTE DE TEMPO TÉRMICA DE RESFRIAMENTO**  
 → **PODE SER IGUAL OU NÃO À DE AQUECIMENTO**

## TRANSITÓRIO TÉRMICO

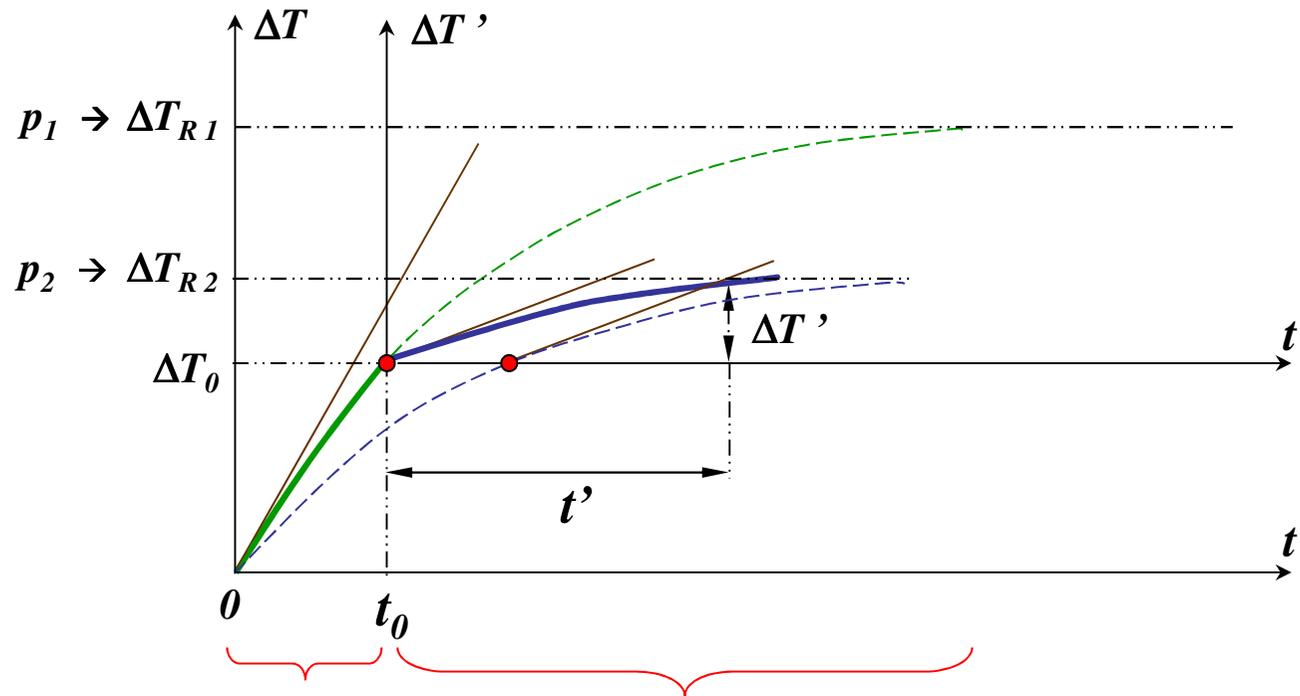
EVOLUÇÃO DA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM VARIAÇÃO DE PERDAS

$$\Delta T_0 = \Delta T_{R1} \cdot \left( 1 - e^{-t_0/\tau} \right)$$

$$\Delta T' = \Delta T_0 + (\Delta T_{R2} - \Delta T_0) \cdot \left( 1 - e^{-t'/\tau} \right)$$

TRANSITÓRIO TÉRMICO

EVOLUÇÃO DA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM VARIAÇÃO DE PERDAS



$p_1 > p_2$   
 $\Delta T_0 < \Delta T_{R2}$

TRANSITÓRIO 1  
 → PERDA  $p_1$

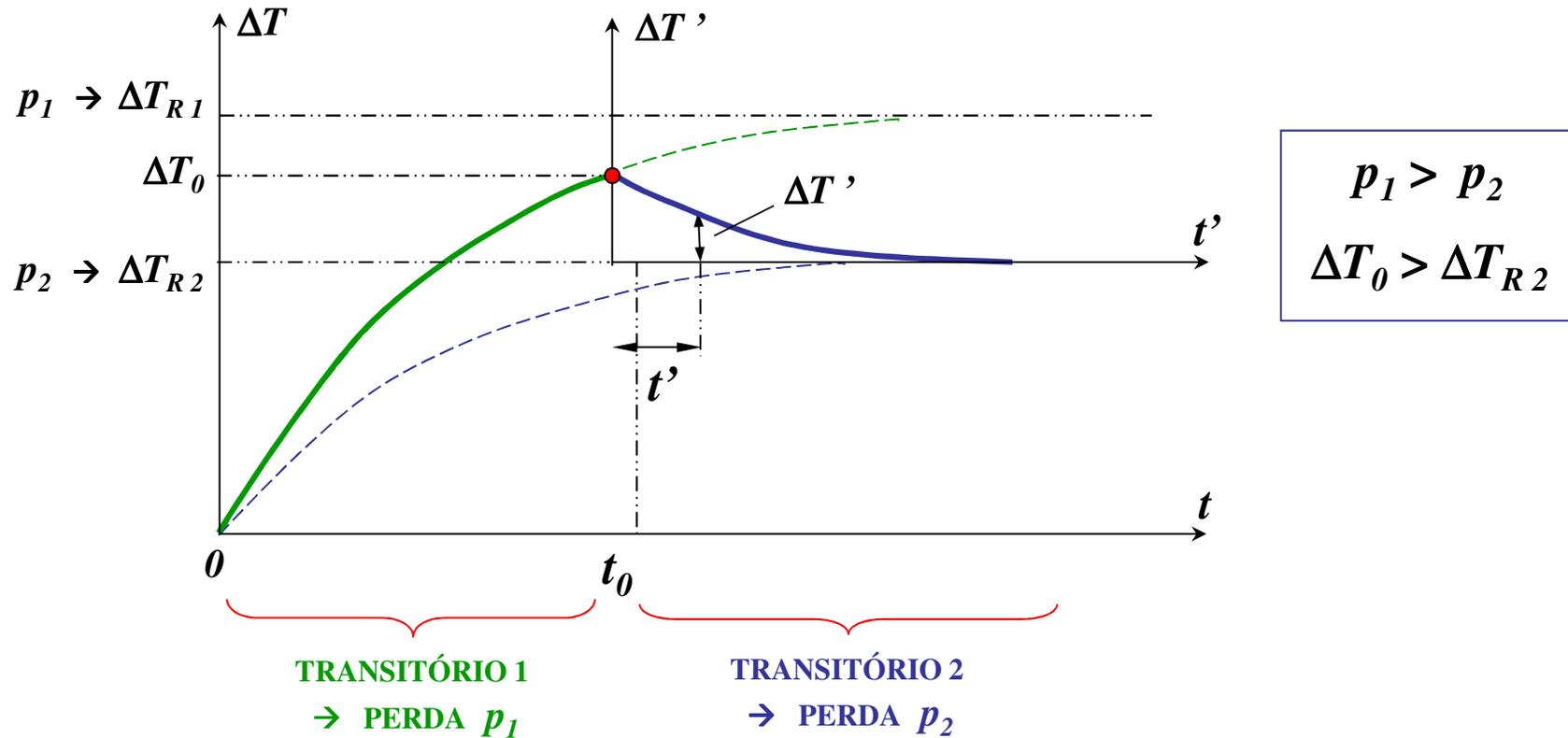
TRANSITÓRIO 2  
 → PERDA  $p_2$

$$\Delta T_0 = \Delta T_{R1} \cdot \left( 1 - e^{-t_0/\tau} \right)$$

$$\Delta T' = \Delta T_0 + (\Delta T_{R2} - \Delta T_0) \cdot \left( 1 - e^{-t'/\tau} \right)$$

TRANSITÓRIO TÉRMICO

EVOLUÇÃO DA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM VARIAÇÃO DE PERDAS



$$\Delta T_0 = \Delta T_{R1} \cdot \left( 1 - e^{-t_0/\tau} \right)$$

$$\Delta T' = \Delta T_{R2} + (\Delta T_0 - \Delta T_{R2}) \cdot e^{-t'/\tau}$$