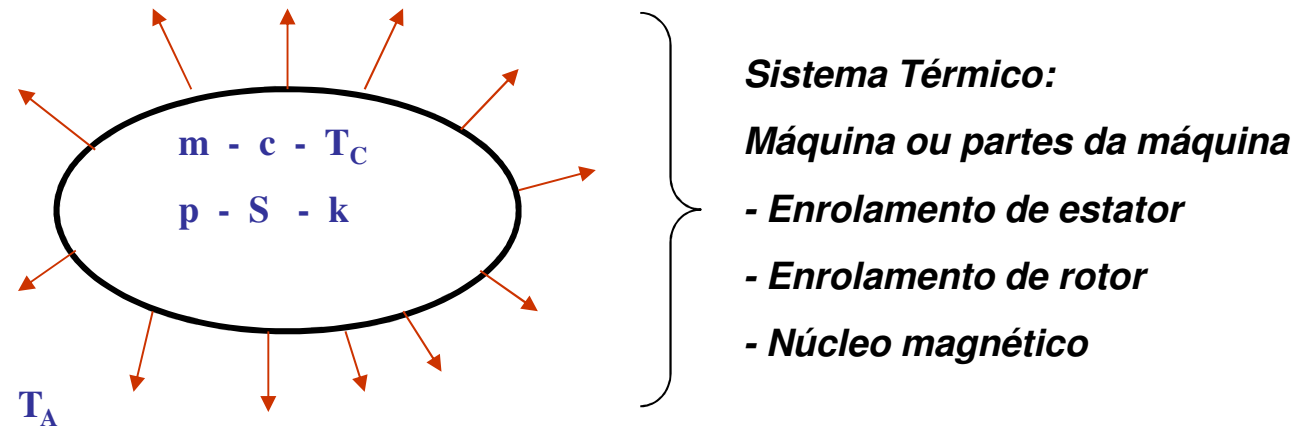


***CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA TÉRMICO NOS
EQUIPAMENTOS E MÁQUINAS ELÉTRICAS***

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]

θ : 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

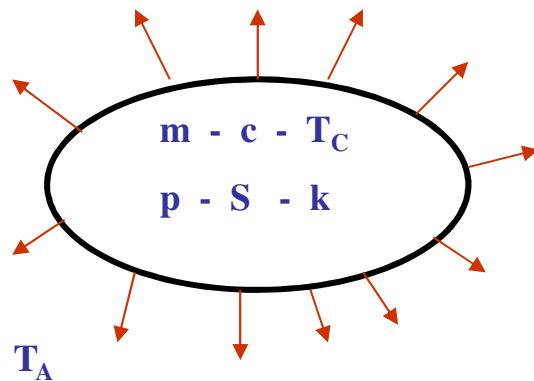
“CONSTANTE DE TEMPO TÉRMICA”

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 : [m²] \rightarrow SUPERFÍCIE TOTAL DO CORPO

k : [W / m².°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

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

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

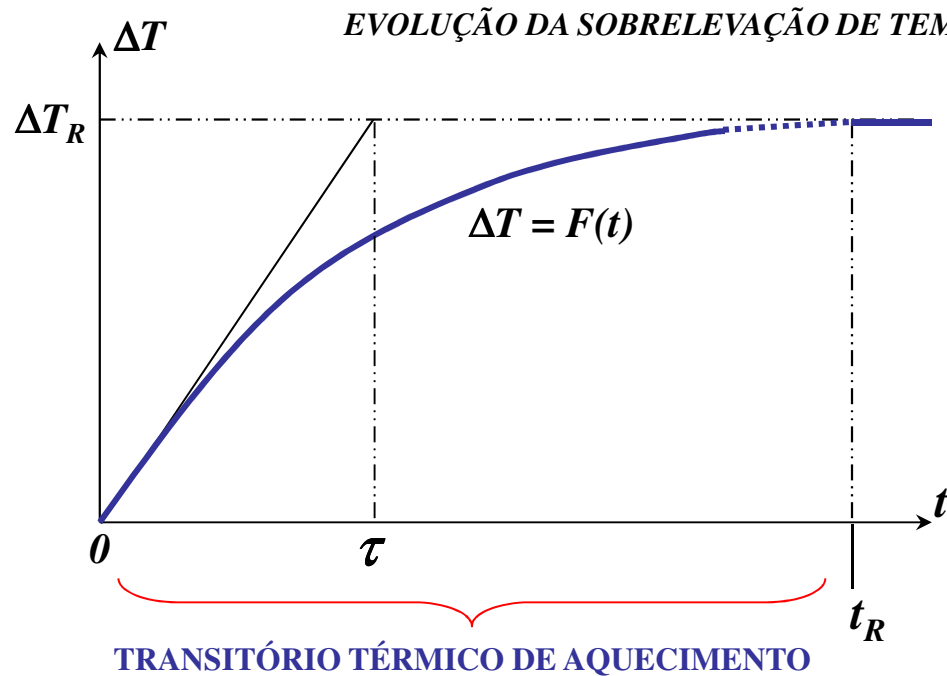
$$\Delta T = \frac{p}{k.S} \left(1 - e^{-\frac{t}{\left(\frac{m.c}{k.S} \right)}} \right) \quad \Rightarrow \quad \text{INSTANTES NOTÁVEIS} \left\{ \begin{array}{l} t = \infty \Rightarrow \Delta T = \frac{p}{k.S} = \Delta T_R \\ t' = \frac{m.c}{k.S} \Rightarrow \Delta T = 0,632 \cdot \Delta T_R \Rightarrow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

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

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

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

TRANSITÓRIO TÉRMICO



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

TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO DE TEMPERATURA

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

$$\Delta T_R = \frac{p}{k \cdot S} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{POTÊNCIA DE PERDAS} \\ \longrightarrow \text{CONDUTÂNCIA TÉRMICA [W/°C] - (CAPACIDADE DE DISSIPACÃO)} \end{array}$$

$$\tau = \frac{m \cdot c}{k \cdot S} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{CAPACIDADE TÉRMICA [J/°C]} \\ \longrightarrow \text{CAPACIDADE DE DISSIPACÃO} \end{array}$$

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:

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

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

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

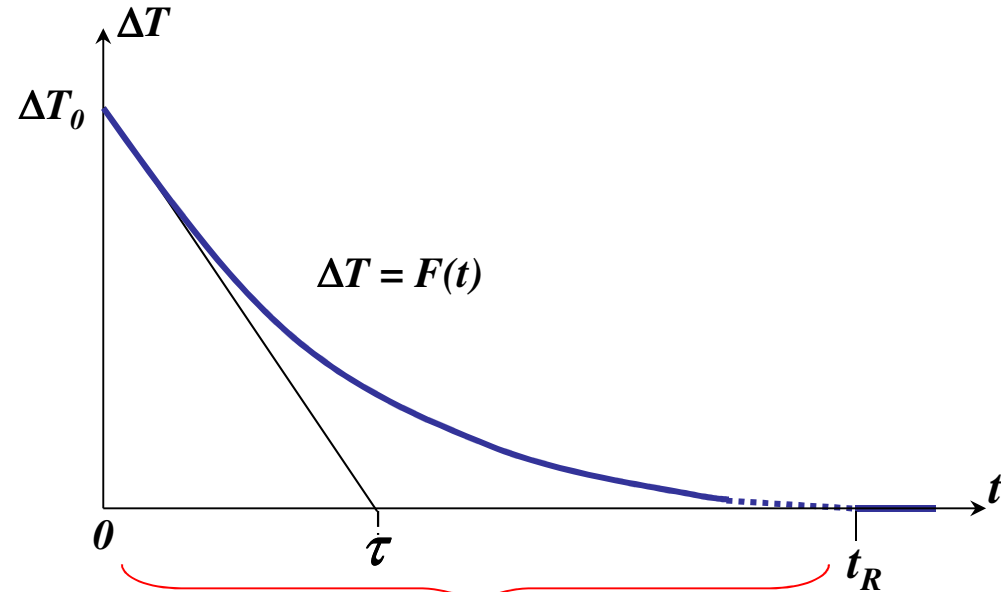
TRANSITÓRIO TÉRMICO

EVOLUÇÃO DA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA NO RESFRIAMENTO

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

TEMPO DE RESFRIAMENTO

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



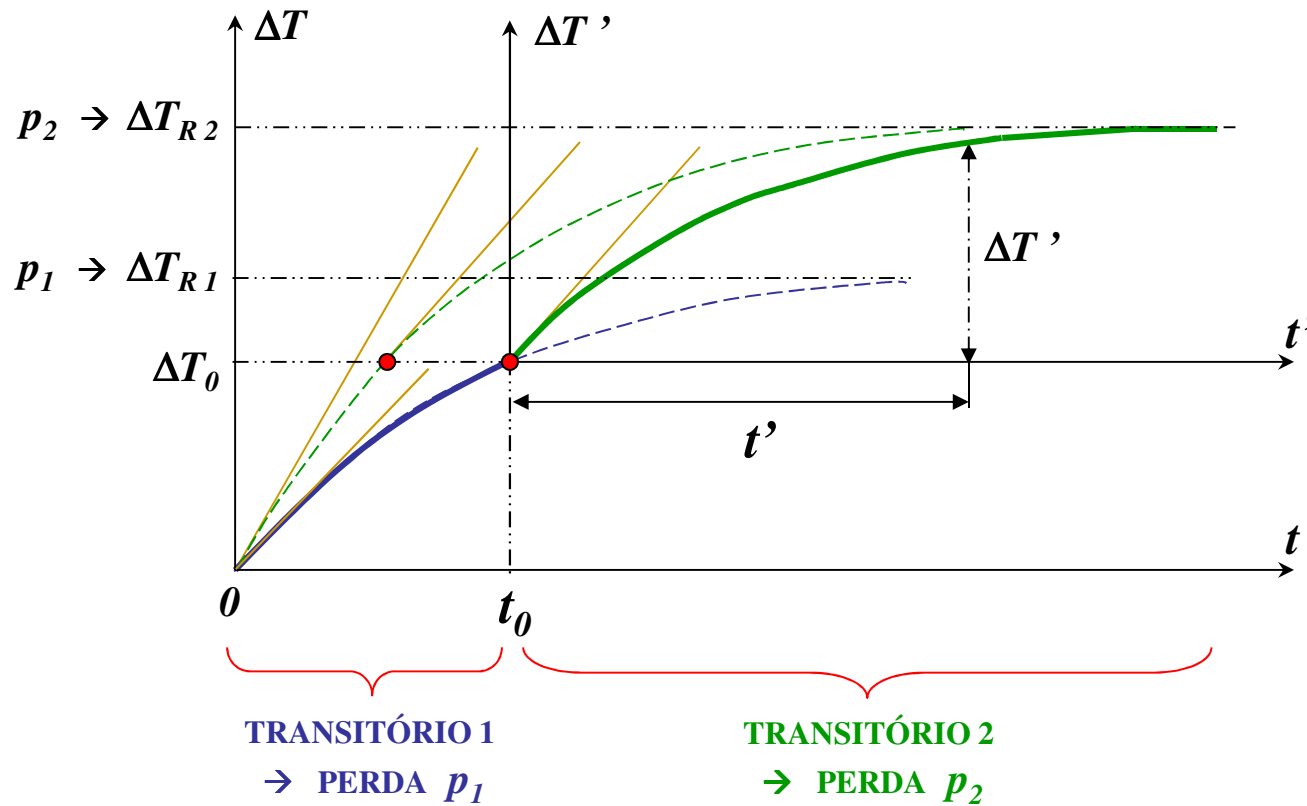
TRANSITÓRIO TÉRMICO DE RESFRIAMENTO

ΔT_0 → {
 → ELEVACÃO DE TEMPERATURA INICIAL DO PROCESSO DE RESFRIAMENTO
 → ELEVACÃO 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
 → CAPACIDADE DE DISSIPACÃO [W / °C] } → PODE SER IGUAL OU NÃO À DE AQUECIMENTO

TRANSITÓRIO TÉRMICO

EVOLUÇÃO DA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM VARIAÇÃO DE PERDAS

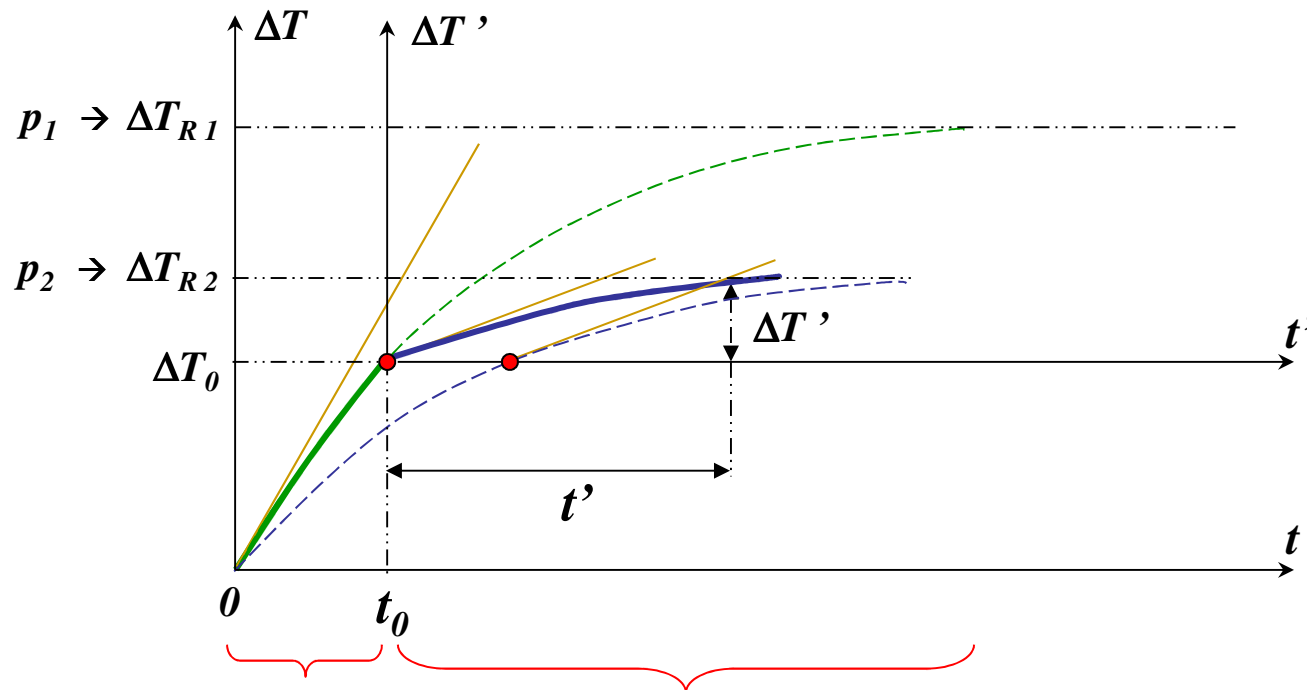


$$\Delta T_0 = \Delta T_{R1} \cdot \left(1 - e^{-t_0/\tau} \right)$$

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

TRANSITÓRIO TÉRMICO

EVOLUÇÃO DA SOBRELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM VARIAÇÃO DE PERDAS



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

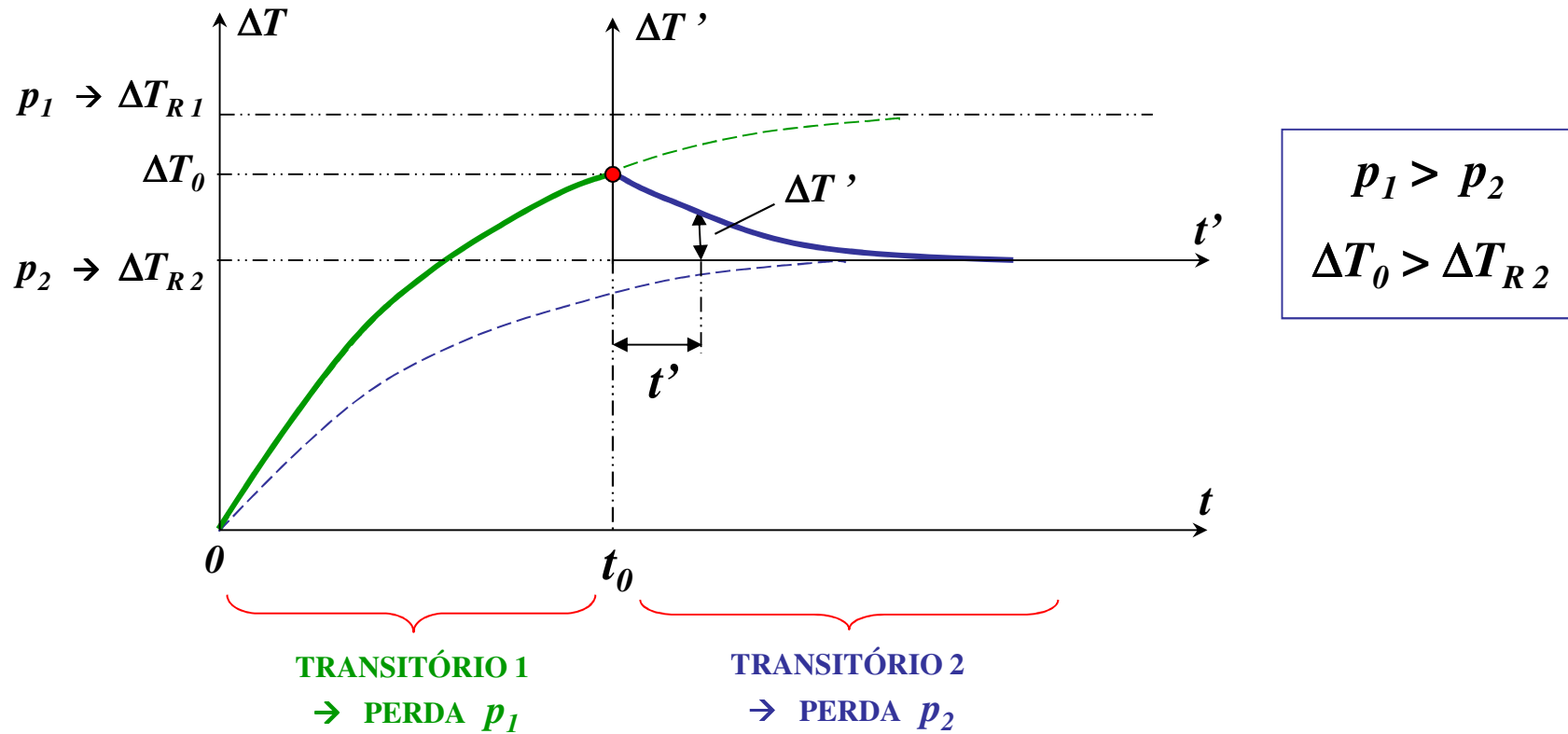
TRANSITÓRIO 1
 → PERDA p_1

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

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

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

“REGIMES DE OPERAÇÃO E DE GERAÇÃO DE CALOR”

CONDIÇÃO DE FUNCIONAMENTO AO LONGO DO TEMPO
 → LIGADA À GERAÇÃO DE PERDAS E AQUECIMENTO NO TEMPO
 → INFLUÊNCIA NO DIMENSIONAMENTO

REGIME CONTÍNUO (SI)

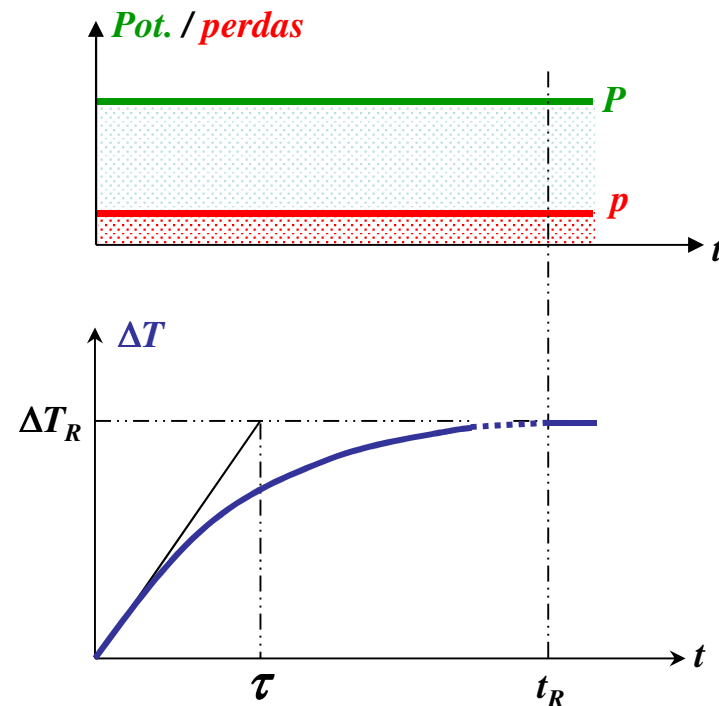
CARGA E PERDAS CONSTANTES AO LONGO DO
 TEMPO, POR UM PERÍODO MAIOR QUE O
 NECESSÁRIO PARA O REGIME TÉRMICO

$$(t_L > 4 \cdot \tau)$$

$P = \text{POTÊNCIA NOMINAL} \rightarrow \Delta T_R = \Delta T_N$

$\Delta T_N = \Delta T_{LIM}$ LIMITE DE ELEVAÇÃO DO SISTEMA ISOLANTE

$P = P_{N\text{CONT}}$ POTÊNCIA NOMINAL CONTÍNUA



REGIME DE TEMPO LIMITADO (S2)

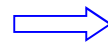
CARGA E PERDAS CONSTANTES POR TEMPO LIMITADO, MENOR QUE O NECESSÁRIO PARA O REGIME TÉRMICO.

$$(t_L < 4 \cdot \tau)$$

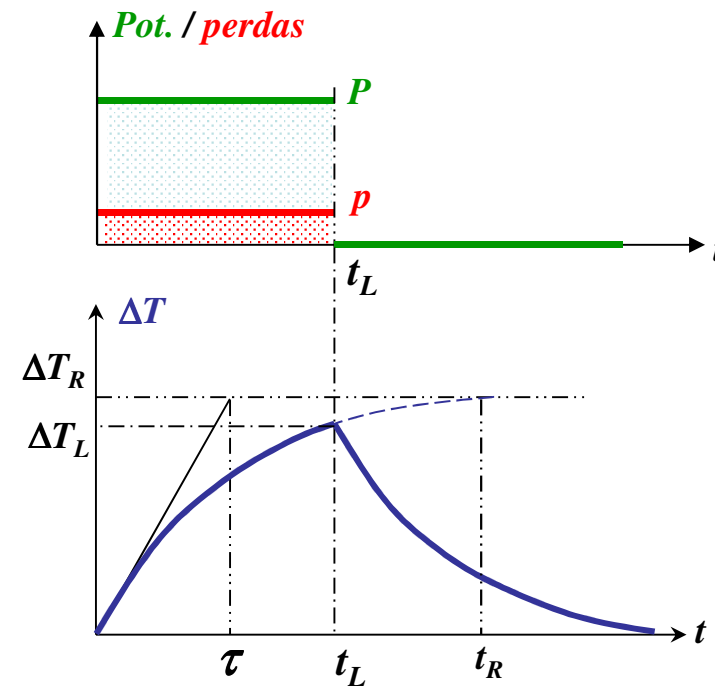
$t_L \rightarrow 60 \text{ min. ; } 30 \text{ min. ; } 15 \text{ min.}$

RELIGAÇÃO DA MÁQUINA APÓS ATINGIDA A CONDIÇÃO DE $\Delta T_R = 0$

$$\left. \begin{array}{l} P = P_{NCONT} \rightarrow \Delta T_L < \Delta T_R \\ \Delta T_L = \Delta T_N \rightarrow P > P_{NCONT} \end{array} \right\}$$



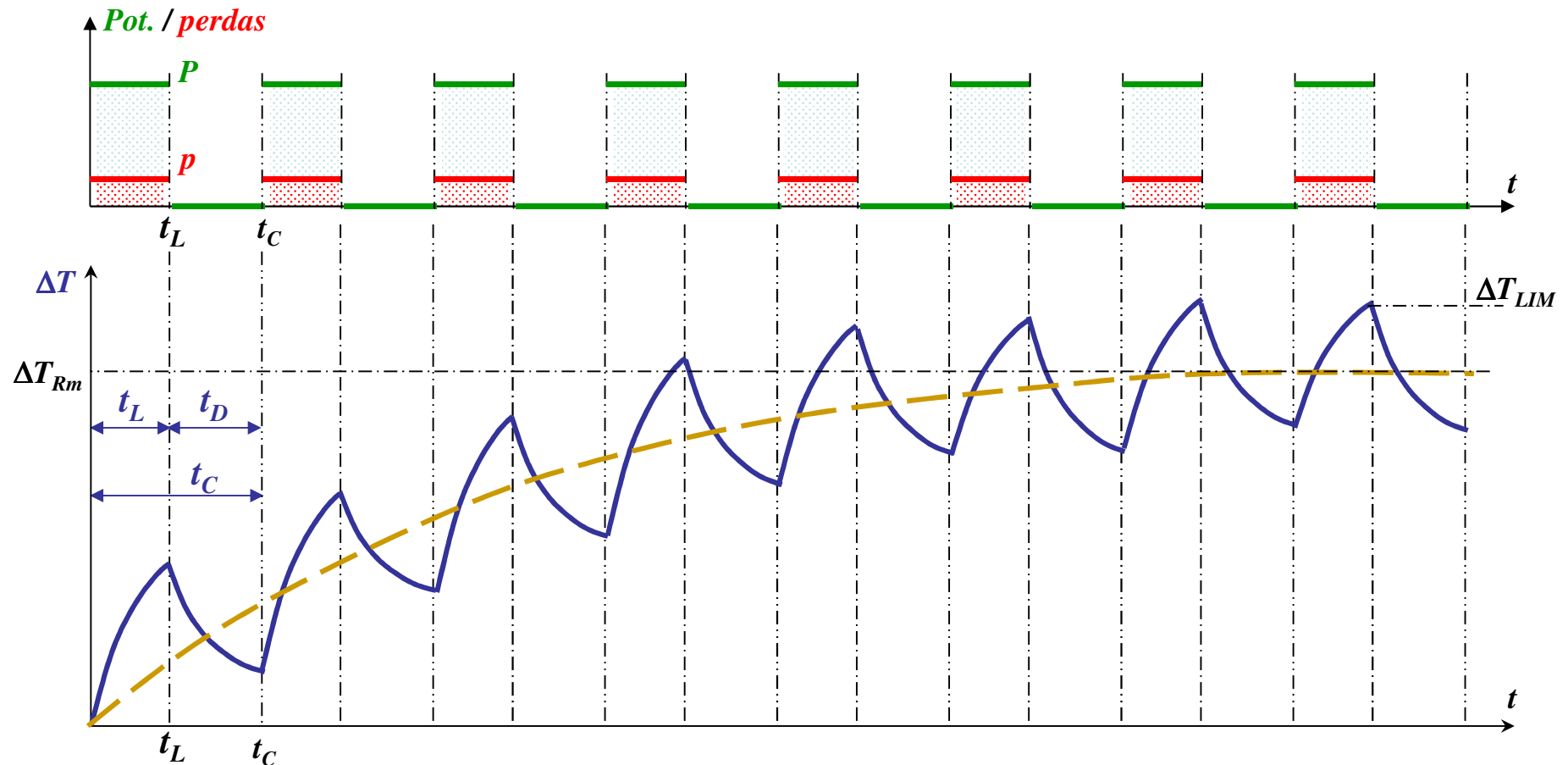
$$P \cong \frac{P_{NCONT}}{\sqrt{\left(1 - e^{-t_L/\tau}\right)}}$$

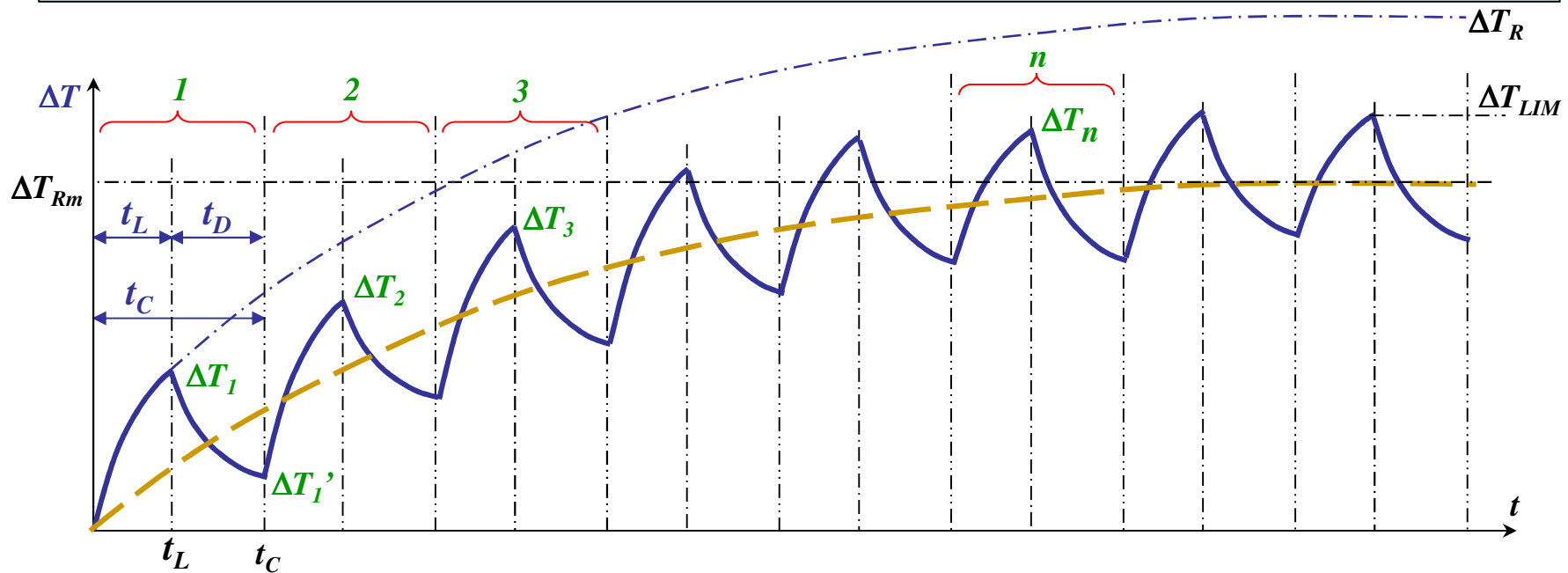


REGIME INTERMITENTE PERIÓDICO (S3 / S6)

CARGA E PERDAS CONSTANTES DURANTE INTERVALOS DEFINIDOS, EM CICLOS REPETITIVOS AO LONGO DO TEMPO → CARGA NULA (S3) / MÍNIMA (S6) NOS INTERVALOS COMPLEMENTARES DE CADA CICLO

FATOR DE DURAÇÃO DO CICLO: $FD = t_L / t_C$ [p.u.]





$$1^{\circ} \text{ CICLO} \rightarrow \Delta T_1 = \Delta T_R \cdot \left(1 - e^{-t_L/\tau}\right) \quad 2^{\circ} \text{ CICLO} \rightarrow \Delta T_2 = \Delta T_1' + (\Delta T_R - \Delta T_1') \cdot \left(1 - e^{-t_L/\tau}\right)$$

$$n^{\circ} \text{ CICLO} \rightarrow \Delta T_n = \Delta T_R \cdot \left(1 - e^{-t_L/\tau}\right) \cdot \frac{1 - e^{-n \cdot t_C/\tau}}{1 - e^{-t_C/\tau}}$$

$$n \rightarrow \infty \rightarrow \Delta T_{\infty} = \Delta T_{LIM} = \Delta T_R \cdot \left(1 - e^{-t_L/\tau}\right) \cdot \frac{1}{1 - e^{-t_C/\tau}}$$

POTÊNCIA NOMINAL DO CICLO
COM FATOR DE DURAÇÃO "FD"

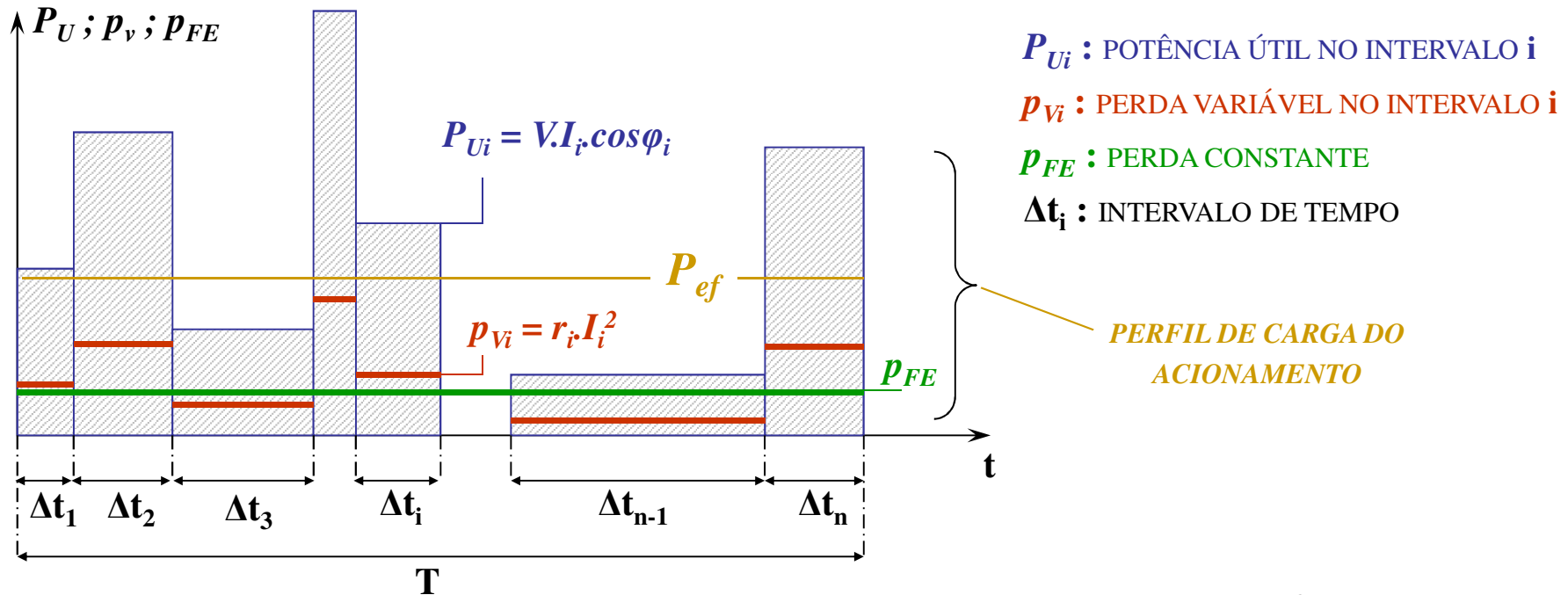
$$P_{NCICLO} = \sqrt{P^2 \cdot FD}$$

$$P_{NCICLO} \rightarrow \Delta T_{Rm}$$

$$\Delta T_{LIM} = \Delta T_N \rightarrow P_{NCICLO} \cong P_{NCONT}$$

REGIME VARIÁVEL APERIÓDICO

CARGA E PERDAS VARIÁVEIS AO LONGO DO TEMPO, COM PERFIL REPETITIVO POR PERÍODOS “T”, OU NÃO REPETITIVO POR TEMPO DETERMINADO “T” .



PERDA JOULE (VARIÁVEL COM A CARGA) $\rightarrow p_{Vi} = r.I_i^2 = r \cdot \left(\frac{P_{Ui}}{V.\cos\phi_i} \right)^2 = k.P_{Ui}^2$

POTÊNCIA EFICAZ → POTÊNCIA CONTÍNUA EQUIVALENTE QUE PRODUZ A MESMA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA DO REGIME REAL INTERMITENTE → MESMA PERDA MÉDIA → MESMA ENERGIA TÉRMICA

ENERGIA DAS PERDAS DO REGIME
REAL INTERMITENTE

ENERGIA DAS PERDAS DO REGIME
CONTÍNUO EQUIVALENTE

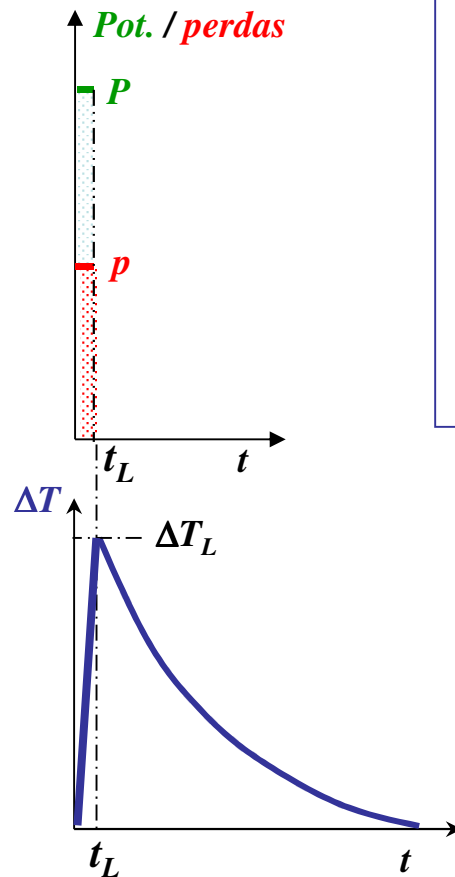
$$p_{FE} \cdot T + k \cdot \sum P_{Ui}^2 \cdot \Delta t_i = p_{FE} \cdot T + k \cdot P_{ef}^2 \cdot T$$

POTÊNCIA EFICAZ DO
REGIME INTERMITENTE

$$P_{ef} = \sqrt{\frac{\sum P_{Ui}^2 \cdot \Delta t_i}{T}}$$

MOTOR PARA REGIME INTERMITENTE OU VARIÁVEL

→ DIMENSIONADO PELA POTÊNCIA EFICAZ

REGIME DE OPERAÇÃO TRANSITÓRIO (ADIABÁTICO)

CONDIÇÃO DE FUNCIONAMENTO DE CURTA DURAÇÃO $\rightarrow t_L \ll \tau$

USUALMENTE CARREGAMENTOS DE GRANDE INTENSIDADE

\rightarrow TODA ENERGIA DE PERDAS FICA ARMAZENADA NO SISTEMA
(ENROLAMENTOS), CONSIDERADO ADIABÁTICO

\rightarrow UTILIZADO PARA CONSIDERAÇÃO DE PARTIDAS ISOLADAS OU
OPERAÇÃO POR TEMPO EXTREMAMENTE CURTO

$$p \cdot t_L = m \cdot c \cdot \Delta T_L \Rightarrow \Delta T_L = \frac{p \cdot t_L}{m \cdot c}$$

p \rightarrow POTÊNCIA DE PERDAS (JOULE)

m \rightarrow MASSA DO ENROLAMENTO ONDE OCORRE A PERDA

c \rightarrow CALOR ESPECÍFICO DO MATERIAL DOS CONDUTORES