

CÁLCULO DA CURVA DE PERDA DE CARGA DOS CIRCUITOS AXIAIS INTERNOS DE REFRIGERAÇÃO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS GIGANTES

Hilton Penha Silva¹

Alex Sandro Barbosa Passos²

¹Departamento de Engenharia do Produto – WM

²Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto –WMO

RESUMO

Tendo como objetivo o cálculo e otimização da refrigeração das máquinas elétricas girantes de grandes potências, figura 1, foi desenvolvido um método de cálculo da curva de perda de carga dos circuitos axiais de ventilação. Este método pressupõe a representação do circuito de ventilação de uma forma semelhante a dos circuitos elétricos. A maior dificuldade da solução do circuito está no fato de que as resistências de perda de carga são funções não lineares e, as equações que relacionam as pressões com as vazões são também não lineares. O método desenvolvido baseia-se na associação das curvas das resistências de perda de carga, de tal forma que, uma vez obtida a curva de resistência de perda de carga total do circuito o ponto de operação do ventilador pode ser facilmente obtido e conseqüentemente as vazões individuais em cada trecho do circuito.

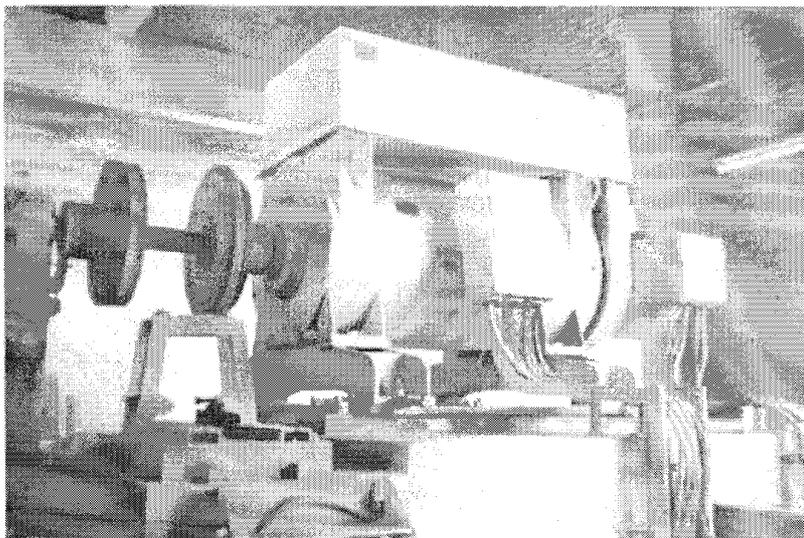


Fig. 1 - Motor elétrico 1600 HP, 10 Pólos carcaça KAF 560

INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas girantes de grandes potências possuem, em geral, um circuito interno de ventilação, cujo objetivo é o de retirar o calor diretamente das partes ativas da máquina. Este circuito pode ser aberto ou fechado, de acordo com as características ambientais de operação da máquina e de acordo com o grau de proteção necessário. Nos casos das máquinas elétricas fechadas, muitas vezes é necessário ainda um trocador de calor que poderá ser um trocador ar-ar carcaça e tubos ou um trocador semelhante aos radiadores ar-água de automóveis. Caso não utilize trocador de calor, a máquina elétrica fechada poderá possuir aletas que facilitem a troca térmica com o ambiente.

Dentre os diversos tipos de circuitos internos de refrigeração, tanto para máquinas fechadas, tanto para máquinas abertas, está o circuito axial.

A figura 2 apresenta uma máquina elétrica fechada com trocador de calor ar-ar, cujo circuito interno de ventilação é do tipo axial.

Nesta máquina, o ventilador interno localizado na sua parte dianteira, impulsiona o ar proveniente dos canais axiais do estator e do rotor transversalmente sobre os tubos do trocador de calor. O ar, após dois passes transversais sobre os tubos do trocador, entra novamente na carcaça da máquina, onde o fluxo Q_{total} se divide:

- uma parte do ar caminha axialmente entre o estator e a carcaça (Q_{cae});
- outra parte caminha diretamente pelos canais axiais do estator (Q_{cal});
- uma parte atravessa a cabeça de bobina traseira do estator (Q_{cabbt});
- uma parte passa paralelamente à cabeça de bobina traseira do estator (Q_{pcabbt}).

Os fluxos de ar que passam, respectivamente, pelos canais axiais do estator (Q_{cal}) e exatamente ao estator (Q_{cae}) se misturam na saída, para novamente se dividir:

- uma parte atravessa a cabeça de bobina dianteira (Q_{cabbd});
- a outra parte passa paralela à cabeça de bobina dianteira (Q_{pcabbd}).

O Fluxo de ar que passaram através (Q_{cabbt}) e paralelamente à cabeça de bobina traseira do estator (Q_{pcabbt}), também se misturam para também novamente se dividir:

- uma parte passa pela entreferro (Q_{delta});

- a outra parte passa pelos canais axiais do rotor (Q_{ca2})

Finalmente, os fluxos nas saídas do rotor e da cabeça de bobina dianteira se unem para passar através do ventilador, fechando o ciclo de ventilação.

Cada canal de passagem por onde escoo o fluxo de ar apresenta uma resistência a esse escoamento dada principalmente:

- pelo atrito do ar com as superfícies dos canais;
- pela bruscas variações das dimensões dos canais de passagem do ar.

A queda de pressão que ocorre nos canais por onde circula o ar, devido às resistências ao escoamento, é chamada da perda de carga. A perda de carga se altera com a alteração da velocidade de escoamento do ar (vazão).

O papel do ventilador no circuito de ventilação é de fornecer energia ao ar sob a forma de pressão, de tal maneira que sejam vencidas as resistências à circulação do ar e que seja garantida uma vazão de ar mínima necessária.

O trabalho de seleção do ventilador passa primeiramente pela determinação da curva de perda de carga total do sistema de ventilação (curva *Pressão x Vazão*).

Após esta determinação, é necessário encontrar um ventilador que possua uma curva característica *Pressão x Vazão*, cuja interseção com a curva de perda de carga do sistema forneça a vazão adequada ao sistema de refrigeração.

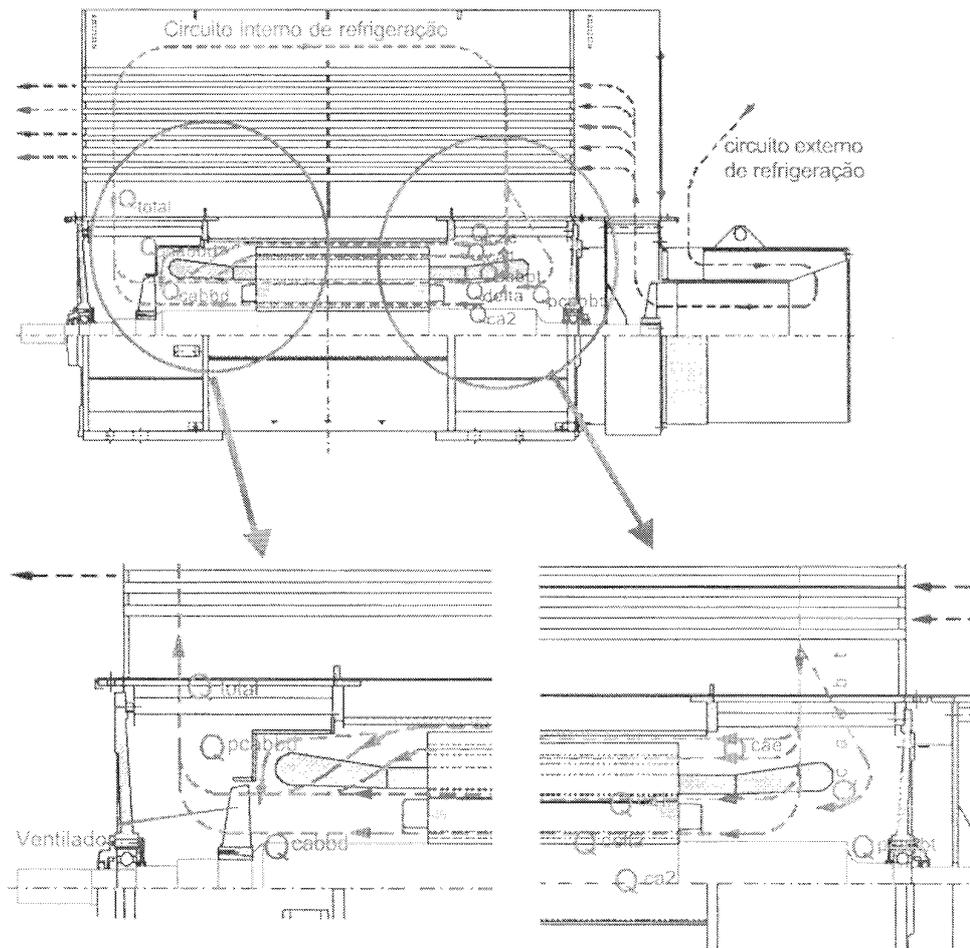


Fig. 2 - Representação de uma máquina com circuito interno axial de refrigeração

CIRCUITO DE RESISTÊNCIA DE PERDA DE CARGA EQUIVALENTE

O circuito físico de ventilação da figura 2 pode ser substituído por um *circuito equivalente* semelhante a um circuito elétrico, composto por resistências de perda de carga.

A figura 3 mostra o circuito das resistências da perda de carga equivalente ao circuito físico da figura 2.

Na figura 3 cada uma das resistências encontram-se representada de forma simplificada e têm os seguintes significados:

- R_{troc} é a resistência de perda de carga do trocador de calor;
- R_{cae} é a resistência de perda de carga nos canais axiais entre o estator e a carcaça;
- R_{ca1} é a resistência de perda de carga nos canais axiais do estator;
- R_{cabbd} é a resistência de perda de carga através da cabeça de bobina dianteira do estator;
- R_{pcabbd} é a resistência de perda de carga na região paralela à cabeça de bobina dianteira do estator;
- R_{cabbt} é a resistência de perda de carga através da cabeça de bobina traseira do estator;
- R_{pcabbt} é a resistência de perda de carga na região paralela à cabeça de bobina traseira do estator;
- R_{ca2} é a resistência de perda de carga nos canais axiais do rotor;
- R_{delta} é a resistência de perda de carga no entreferro;

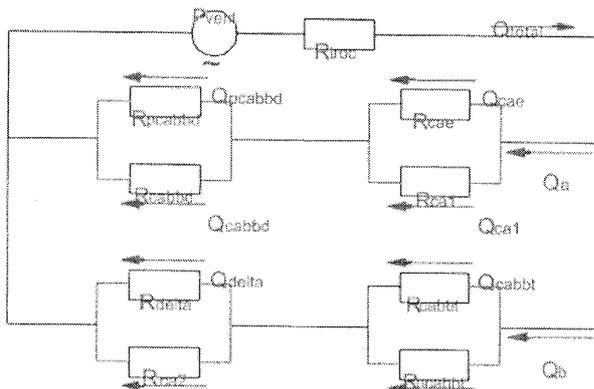


Fig. 3 - Circuito das resistências de perdas de cargas equivalentes

Na realidade, cada uma dessas resistências é composta das associações das resistências devido a um dos fatores mencionados anteriormente. Por exemplo, a resistência R_{cae} é composta pela soma da resistência de atrito na superfície interna dos canais axiais entre o estator e carcaça, com as resistências devido às contrações e expansões bruscas que ocorrem na entrada e saída dos canais, respectivamente.

RESISTÊNCIA DE PERDA DE CARGA POR ATRITO

Para obter uma expressão da resistência de perda de carga devido ao atrito de um fluido com as paredes é necessário uma análise do tipo de escoamento:

- o escoamento laminar caracteriza-se por possuir uma boa ordenação do movimento macroscópico das camadas fluidas, sendo dominado pelas chamadas forças viscosas;

- no escoamento turbulento prevalecem as forças de inércia e é caracterizado pela irregularidade no movimento das partículas de fluido, formando redemoinhos e flutuações locais de velocidade.

A razão entre as forças de inércia e as forças viscosas para uma dada situação de escoamento interno em um duto é relacionada através de um número adimensional chamado *Número de Reynolds* [1], definido por:

$$Re = \frac{\text{Força_de_inércia}}{\text{Força_viscosa}} = \frac{\rho.v.D}{\mu} \quad (1)$$

onde:

- ρ é a massa específica do fluido
- v é a velocidade média de escoamento do fluido
- D é o diâmetro hidráulico equivalente do duto
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido

Para escoamentos internos em dutos, existem gráficos obtidos experimentalmente [1] relacionando o *Número de Reynolds* à rugosidade relativa das superfícies internas dos dutos. A função experimental que relaciona essas duas grandezas é chamada *fator de atrito*.

O tipo de escoamento altera-se de acordo com a velocidade do fluido. Para *Números de Reynolds* abaixo de 2000, o escoamento é laminar e o fator de atrito f pode ser expresso analiticamente por:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

Para os *Números de Reynolds* acima de 4000 o escoamento é considerado turbulento e o fator de atrito pode ser expresso analiticamente, com boa precisão, por:

$$f = 0.25 \cdot \left[\log \left(\frac{\epsilon_r}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (3)$$

onde ϵ_r é a rugosidade relativa da superfície interna do duto.

A região de *Número de Reynolds* entre 2000 e 4000 é dita região de transição, pois nela ocorre a transição entre o regime laminar e o turbulento. Apesar das incertezas, uma boa aproximação é fazer uma interpolação do fator de atrito entre o valor para o *Número de Reynolds* igual a 2000, f_{2000} e para o *Número de Reynolds* igual a 4000, f_{4000} :

$$f = \frac{(Re - 2000)(f_{4000} - f_{2000})}{2000} + f_{2000} \quad (4)$$

A perda de carga devido ao atrito entre o fluido e superfície de escoamento pode ser expressa por:

$$\Delta P_r = f \frac{\rho.L.v^2}{2.D} = f \frac{\rho.L}{2.A^2.D} . Q^2 \quad (5)$$

onde:

- L é o comprimento do duto
- A é a área transversal de escoamento
- Q é a vazão do fluido

A equação 5 pode ainda ser conduzida à forma:

$$\Delta P_r = R(Q) \cdot Q^2 \quad (6) \quad e$$

e,

$$R(Q) = f(Q) \cdot \frac{\rho \cdot L}{2 \cdot A^2 \cdot D} \quad (7)$$

Onde, $R(Q)$ é a resistência de perda de carga por atrito na superfície interna do duto.

Note-se que essa resistência é a função da vazão, já que o fator de atrito é função do Número de Reynolds, que por sua vez é função da velocidade de escoamento e, portanto, da vazão.

RESISTÊNCIAS DE PERDA DE CARGA LOCALIZADAS

As resistências de perda de carga localizadas são aquelas devido às variações bruscas de dimensões dos canais de escoamento e mudanças de direção de escoamento. As perdas de carga localizadas podem ser expressas como:

$$\Delta P_L = K_L \cdot \frac{v^2}{2} = K_L \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot A^2} \quad (8)$$

onde K_L é a resistência de perda de carga ou simplesmente coeficiente de perda de carga localizada e, normalmente, é determinada experimentalmente.

Diversos autores trazem tabelas e gráficos das resistências de perda de carga localizadas.

As referências [1] e [2] são ricas em tabelas e gráficos de resistências de perda de carga localizadas.

ASSOCIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DE PERDA DE CARGA EM SÉRIE

Sejam duas resistências de perda de carga R_1 e R_2 da figura 4, as quais se encontram em série e pelas quais circula uma mesma vazão de ar Q , sendo P_A , P_B e P_C as pressões nos pontos A, B e C, respectivamente.

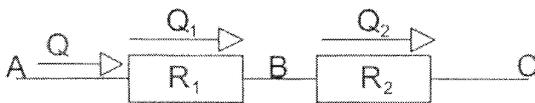


Fig. 4 - Resistências de perda de carga em série

A perda de carga na resistência R_1 entre os pontos A e B pode ser escrita:

$$\Delta P_{AB} = P_B - P_A = R_1 \cdot Q_1^2 \quad (9)$$

e

$$P_A = P_B - \Delta P_{AB} \quad (10)$$

A perda de carga na resistência R_2 entre os pontos B e C fica:

$$\Delta P_{BC} = P_C - P_B = R_2 \cdot Q_2^2 \quad (11)$$

$$P_C = P_B - \Delta P_{BC} \quad (12)$$

A perda de carga total entre os pontos A e C pode ser escrita:

$$\Delta P_{AC} = P_C - P_A \quad (13)$$

Substituindo 10 e 12 em 13 chega-se a:

$$\Delta P_{AC} = R_1 \cdot Q_1^2 + R_2 \cdot Q_2^2 \quad (14)$$

Mas, como $Q_1 = Q_2 = Q$, então,

$$\Delta P_{AC} = (R_1 + R_2) \cdot Q^2 = R_{eq} \cdot Q^2 \quad (15)$$

onde:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (16)$$

ASSOCIAÇÃO DE RESISTÊNCIAS DE PERDA DE CARGA EM PARALELO

Sejam as duas resistências de perda de carga R_1 e R_2 da figura 5, as quais se encontram em paralelo. Pela resistência R_1 circula uma vazão Q_1 e pela resistência R_2 circula uma vazão Q_2 , sendo P_A , P_B as pressões nos pontos A, e B, respectivamente.

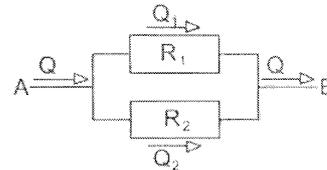


Fig. 5 - Resistências de perda de carga em paralelo

A vazão total que passa pelas duas resistências é:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (17)$$

A perda de carga na resistência R_1 entre os pontos A e B pode ser escrita:

$$\Delta P_{AB} = P_B - P_A = R_1 \cdot Q_1^2 \quad (18)$$

donde:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{\Delta P_{AB}}{R_1}} \quad (19)$$

Da mesma maneira, a perda de carga na resistência R_2 fica:

$$\Delta P_{AB} = P_B - P_A = R_2 \cdot Q_2^2 \quad (20)$$

donde:

$$Q_2 = \sqrt{\frac{\Delta P_{AB}}{R_2}} \quad (21)$$

Para uma resistência de perda de carga equivalente pela qual passasse uma vazão Q, a perda de carga seria:

$$\Delta P_{AB} = R_{eq} \cdot Q^2 \quad (22)$$

Substituindo-se as expressões 19 e 21 em 17 e, esta em 22, chega-se a seguinte expressão para a resistência equivalente de perda de carga da associação em paralelo:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{(\sqrt{R_1 + R_2})^2} \quad (23)$$

SOLUÇÃO DO CIRCUITO DE RESISTÊNCIAS DE PERDA DE CARGA

Um sistema de equações equivalentes para o circuito das resistências de perda de carga será de difícil solução, haja vista a natureza das equações. A perda de carga em cada resistência individual varia com o quadrado da vazão e a própria resistência de perda de carga também é função da vazão.

Mas, pode-se obter para cada resistência de perda de carga individual o gráfico da respectiva resistência em função da vazão.

A faixa de vazão a ser usada nos gráficos deve ser tal que atenda às condições finais de operação do sistema.

Observando a figura 3, o primeiro passo é fazer a associação das curvas das resistências de perda de carga que se encontram em paralelo, através do uso da equação 23.

O circuito equivalente da figura 3 reduz-se então ao da figura 6.

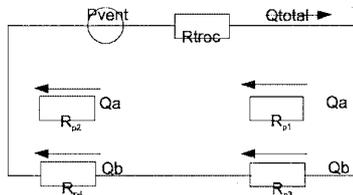


Fig. 6 - Circuito equivalente resultante das associações em paralelo da fig. 3

O passo seguinte é fazer a associação das curvas das resistências de perda de carga que se encontram em série, através da equação 16, reduzindo o circuito ao da figura 7.

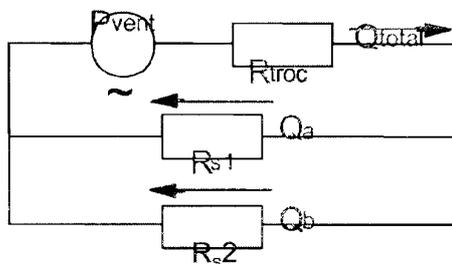


Fig. 7 - Circuito equivalente resultante das associações em série da figura 6

A seguir, basta associar as curvas das duas resistências que se encontram em paralelo, resultando no circuito da figura 8.

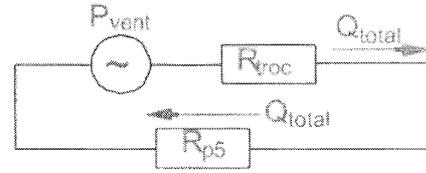


Fig. 8 - Circuito equivalente resultante da associação em paralelo da figura 7

Finalmente, a curva da resistência resultante anterior será associada em série com a curva da resistência de perda de carga do trocador de calor, obtendo-se a curva da resistência de perda de carga total do sistema.

De posse da curva da resistência de perda de carga de toda a associação, obtém-se a curva da perda de carga total do sistema em função da vazão através do produto da curva de resistência de perda de carga pelo quadrado da vazão em cada ponto (equação 6), originando a *Curva de Perda de Carga Total x Vazão* representada na figura 9.

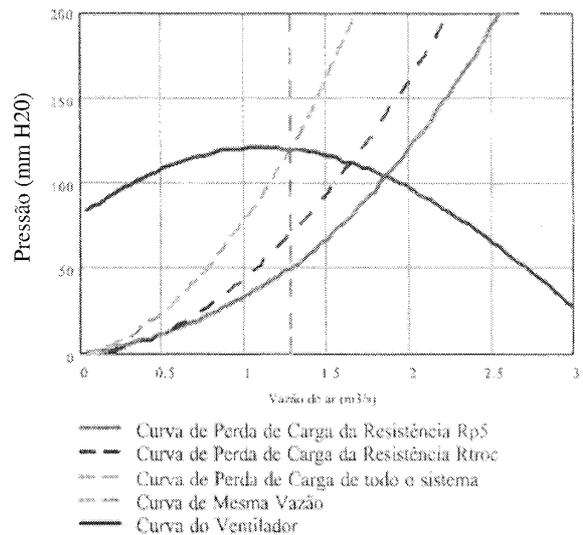


Fig. 9 - Curva do Ventilador e Curvas de Perda de Carga

Do mesmo modo, poderão ser obtidas também as curvas de perda de carga em função da vazão para cada associação de resistências e também para cada uma das resistências individuais através da mesma equação 6.

SELEÇÃO DO VENTILADOR E OBTENÇÃO DAS VAZÕES DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

O ponto de interseção da curva característica de *Pressão x Vazão* do Ventilador com a curva de *Perda de Carga Total do Sistema x Vazão*, indicará a vazão total capaz de ser fornecida pelo ventilador ao sistema (ver figura 9).

Uma vez determinada a vazão total que circula por todo o sistema, poderão ser determinadas as vazões individuais em cada trecho do circuito.

Partindo do princípio que em resistências em série as vazões são as mesmas, e que em resistências em paralelo as

pressões é que são comuns, pode-se, através das curvas *Pressão x Vazão* de cada associação de resistências, determinar as vazões em cada resistência da associação. Assim, sejam as curvas de perda de carga apresentadas na figura 9, relativas à resistência de perda de carga total e a cada uma das resistências R_{p5} e R_{troc} da figura 8.

Como as resistências R_{p5} e R_{troc} encontram-se em série, a vazão nestas resistências é a mesma. Assim, traçando-se uma reta de vazão constante passando pelo ponto de operação do ventilador, os pontos onde esta reta interceptar as curvas relativas a cada uma das resistências da figura 8, fornecerão as pressões em cada uma delas. A pressão total do ponto de operação será igual à soma das pressões em cada resistência individual R_{p5} e R_{troc} .

Como resistências em paralelo apresentam pressões comuns, as vazões nas resistências R_{s1} e R_{s2} em paralelo na figura 7 podem ser obtidas a partir do conhecimento da pressão obtida anteriormente na resistência R_{p5} . A figura 10 apresenta as curvas de *Pressão x Vazão* de cada uma das resistências R_{s1} e R_{s2} e da resistência R_{p5} resultante da associação em paralelo. Uma reta de pressão constante passando pelo ponto de pressão de operação na resistência R_{p5} interceptará cada uma das outras curvas fornecendo a vazão de operação em cada uma das resistências R_{s1} e R_{s2} . A vazão total na resistência R_{p5} será igual a soma das vazões nas resistências R_{s1} e R_{s2} .

Como cada resistência R_{s1} e R_{s2} da figura 7 foi obtida de uma associação de outras duas em série, conforme a figura 6, pode-se chegar aos valores de pressão e de vazão em cada uma das resistências R_{p1} , R_{p2} , R_{p3} e R_{p4} através do mesmo procedimento anterior para resistências em série.

Da mesma forma, como as resistências da figura 6 foram obtidas a partir de associações em paralelo das resistências originais da figura 3, pode-se também chegar aos valores e

pressões de operação em cada uma das resistências originais através do mesmo método gráfico anterior para resistências em paralelo.

CONCLUSÕES

A metodologia aqui apresentada procura levar em consideração cada um dos mecanismos de dissipação de energia de pressão do sistema de refrigeração. O conhecimento de curva de *Pressão x Vazão* final do sistema é fundamental para a correta seleção do ventilador. O fato da possibilidade de cálculo das vazões de ar em cada trecho individual da máquina elétrica é fundamental para a solução do circuito térmico de refrigeração, o que possibilitará o cálculo das temperaturas em cada ponto de interesse.

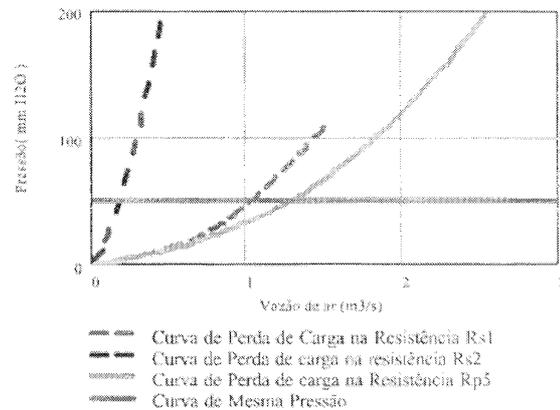


Fig. 10 - Curvas de Perda de Carga X Vazão das resistências R_{s1} , R_{s2} e R_{p5} , e determinação das vazões em cada uma das resistências associadas em paralelo

REFERÊNCIAS

[1] Fox, R. W. & McDonald, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1955

[2] Idelcik, M. *Memento des Pertes de Charge*, Eyrolles Editeur, Paris, 1969.