



## Máquinas elétricas girantes refrigeradas por manto d'água

Fredemar Runcos Dr. Eng.  
WEG  
Brasil  
[fredemar@weg.net](mailto:fredemar@weg.net)

James Giacomazzi Junior MS.  
WEG  
Brasil  
[jamesg@weg.net](mailto:jamesg@weg.net)

Alcides Fediuk Junior Eng.  
WEG  
Brasil  
[alcidesf@weg.net](mailto:alcidesf@weg.net)

**Abstract** – As máquinas elétricas têm evoluído bastante nos últimos anos, devido principalmente às exigências do mercado, que demanda por máquinas mais leves, mais silenciosas, com tamanho reduzido e que apresentem desempenho que atenda a necessidade da aplicação. No aspecto do desempenho, o maior apelo é no sentido de aumentar o rendimento, ou seja, a eficiência da máquina; e com relação ao uso, o maior apelo é no sentido de reduzir o volume da máquina. Em consonância com esta demanda do mercado, os fabricantes de máquinas elétricas procuram desenvolver máquinas com maiores rendimentos e com maiores densidades volumétricas de energia, isto é, com menores perdas e menor volume.

Neste artigo serão analisados os diversos sistemas de refrigeração utilizados no desenvolvimento das máquinas elétricas destacando as partes construtivas e os fundamentos teóricos da transferência de calor no qual cada sistema se baseia. O foco principal é mantido no sistema de refrigeração por manto d'água, onde são mostradas em detalhes as partes construtivas e aprofundado na fundamentação teórica da transferência de calor deste sistema. Uma análise comparativa do desempenho térmico entre os diversos sistemas de refrigeração é feito para máquinas de 2, 4, 6 e 8 polos. Nesta análise é mostrada uma comparativa entre a densidade volumétrica de energia de cada sistema. No final do artigo também é feito uma análise comparativa dos níveis de ruído emitido para os diversos sistemas de refrigeração.

### ÍNDICE DE TERMOS: SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO, MANTO D'ÁGUA;

#### 1. INTRODUÇÃO

A evolução das máquinas elétricas nos últimos anos foi acelerada pela exigência do mercado que constantemente está demandando máquinas de melhor desempenho com níveis de ruído menores e, principalmente, menores em volume, ocupando menor espaço na instalação. O volume de uma máquina elétrica está diretamente relacionado com a capacidade de troca térmica do sistema de refrigeração utilizado na máquina.

Para atender esta demanda, os fabricantes de máquinas elétricas desenvolveram vários sistemas de refrigeração no sentido de atender o grau de proteção e, ao mesmo tempo, maximizar a troca térmica. Podemos citar basicamente cinco sistemas de refrigeração mais aplicados às máquinas elétricas:

- O sistema aletado: a troca térmica é feita através de aletas axiais, aonde o calor chega até elas por condução e é retirado

da superfície das aletas por convecção forçada.

- O sistema com trocador ar-ar: a troca térmica é realizada entre um circuito interno de ar forçado e um externo através das paredes dos tubos que constituem o trocador.
- O sistema com trocador ar-água: a troca térmica é feita entre o circuito de ar forçado internamente à máquina e o circuito de água externo.
- O sistema aberto: o calor é retirado do interior da máquina por um fluxo de ar externo que é forçado através da máquina.
- O sistema por manto d'água: neste sistema o calor é retirado da máquina através de uma lâmina de água circulante ao redor da carcaça na qual o calor chega por condução do interior da máquina.

O sistema de refrigeração no projeto da



máquina é, normalmente, escolhido em função da aplicação, sempre levando em conta a proteção do invólucro e a eficiência da refrigeração. Quanto à proteção do invólucro, as condições do ambiente onde a máquina será instalada são determinantes. O volume da máquina está relacionado à eficiência da troca térmica.

O sistema de refrigeração por manto d'água permite projetar uma máquina com um volume menor e também menor nível de ruído, quando comparado com os demais sistemas de refrigeração.

A máquina com o sistema de refrigeração por manto d'água pode ser aplicado nos mais diversos ambientes. Por possuir um design robusto e compacto, a sua construção é totalmente fechada apresentando um alto grau de proteção, podendo ser até IP66. Além disso, a troca térmica é feita diretamente com a água, podendo operar normalmente em ambientes agressivos, tais como, temperaturas ambientes elevadas, poeira, lama etc., desde que a água refrigerante que forma o manto apresente a temperatura especificada.

Neste artigo serão analisados os cinco sistemas de refrigeração aplicados às máquinas elétricas girantes, com foco no princípio de transferência de calor em máquinas refrigeradas por manto d'água. Será abordado também como projetar a circulação de água pela máquina. Também serão abordadas as vantagens e desvantagens do projeto de máquinas elétricas refrigeradas por manto d'água, comparando-a com máquinas com outros sistemas de refrigeração. No final do artigo serão mostradas algumas sugestões de aplicações da máquina de indução refrigeradas por manto d'água.

## 2. ANÁLISE DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

O sistema de refrigeração de motores elétricos deve ser capaz de retirar todo o calor gerado devido as perdas geradas no interior da máquina. Estas perdas consistem em perdas joules nos condutores da máquina, em perdas no ferro do circuito magnético da máquina e nas perdas mecânicas por atrito no ar e nos mancais da máquina que se convertem em calor no interior da mesma.

Os cinco principais sistemas de refrigeração, já mencionados na introdução,

são definidos pelas normas ABNT-NBR 5110 e a IEC-60034.6.

### 2.1 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM ALETAS AXIAIS - IC 0411 - IC 0416

No sistema de refrigeração com aletas axiais a máquina é totalmente fechada podendo ser autoventilada, isto é, possui um ventilador montado no próprio eixo, que de acordo com a norma IEC-60034.6 o sistema é identificado como IC 0411.

Quando o ventilador responsável pela circulação do ar externo sobre as aletas é acionado por um motor independente, de acordo com a norma IEC-60034-6, o sistema de refrigeração é identificado como sendo IC 0416.

Em máquinas de maior porte, para equalizar a distribuição da temperatura no interior da máquina entre as partes dianteira e traseira, um ventilador interno pode ser montado no eixo da máquina conforme mostrado na figura 01(a). O ventilador externo promove uma convecção forçada aumentando a eficiência de troca térmica entre o ar externo e as paredes das aletas da carcaça. O ventilador interno, quando utilizado, faz com o que o ar quente no interior do motor circule da parte dianteira para a traseira, deixando a temperatura interna mais homogênea.

No sistema de refrigeração com aletas as perdas internas da máquina são levadas para fora através da condução térmica até as aletas. Das paredes das aletas as perdas são transferidas para o ar ambiente através da convecção obedecendo à equação:

$$P_{\text{Perdas}} = h_{\text{Aletas}} \cdot A_{\text{Aletas}} \cdot \Delta T_{\text{Aletas}} \quad (1)$$

Onde:

- $P_{\text{Perdas}}$ : Perdas a serem dissipadas pelas aletas [W];
- $h_{\text{Aletas}}$ : Coeficiente de convecção das aletas [W/m<sup>2</sup> K];
- $A_{\text{Aletas}}$ : Área de dissipação térmica das aletas [m<sup>2</sup>];
- $\Delta T_{\text{Aletas}}$ : Variação de temperatura média entre aletas e ar ambiente em [K] que é dada por:

$$\Delta T_{\text{Aletas}} = T_{\text{Aletas}} - T_{\text{Ambiente}} \quad (2)$$

A equação (1) mostra que para garantir uma boa refrigeração da máquina é importante dimensionar as aletas e o



circuito de ventilação externo para que a constante de convecção  $h_{\text{Aletas}}$  seja maximizada.

A figura 01(a) mostra um corte esquemático da máquina com o sistema de refrigeração com aletas axiais e com ventilação interna. Na figura 01 (b) é mostrada uma máquina WEG com sistema de refrigeração por aletas axiais IC 0411.



Figura 01- Máquina com sistema de refrigeração por aletas axiais e ventilador interno - IC0411

## 2.2 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM TROCADOR AR-AR - IC 0611 - IC 0666

Neste sistema de refrigeração a troca térmica é feita pelo trocador de calor ar-ar normalmente montado na parte superior da máquina conforme mostrado na figura 02. Com este sistema a máquina é totalmente fechada podendo ser aplicada em ambientes mais agressivos.

De acordo com a norma IEC-60034-6 o sistema de refrigeração é denominado IC 0611 quando os dois ventiladores, interno e externo, estão montados sobre o eixo da máquina constituindo um sistema autoventilado. De acordo com a mesma norma, quando os dois ventiladores forem acionados por motores independentes o sistema de refrigeração é denominado de IC 0666.

Nos dois sistemas o ventilador interno força a circulação do ar através das partes quentes da máquina e por entre os tubos do trocador de calor. Já o ventilador externo força a circulação do ar externo por dentro dos tubos do trocador de calor. Quando estes dois fluxos de ar são opostos o trocador é de correntes opostas e quando estão no mesmo sentido o trocador é denominado de correntes paralelas. Normalmente o trocador utilizado é de correntes opostas, também conhecido como por contra correntes, por apresentar maior eficiência na troca térmica. O de correntes paralelas só é usado quando não for possível usar o de correntes opostas.

Na figura 02 (a) é mostrado um diagrama

esquemático do sistema de refrigeração da máquina IC0611, onde indica a disposição dos ventiladores interno e externo com fluxo de ar opostos formando um trocador de correntes opostas e na figura 02 (b), uma máquina WEG com o sistema de refrigeração IC 0611.

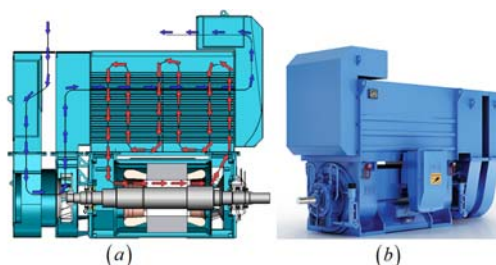


Figura 02- Máquina totalmente fechada com trocador de calor ar-ar por contra correntes e autoventilada - IC 0611.

O trocador de calor ar-ar obedece à equação de troca térmica dada por:

$$P_{\text{Perdas}} = k_{\text{Trocador}} \cdot A_{\text{TrocaTérmica}} \cdot \Delta T_{\text{ML}} \quad (3)$$

Onde:

- $P_{\text{Perdas}}$ : perdas a serem retiradas pelo trocador [W];
- $k_{\text{Trocador}}$ : coeficiente de troca térmica do trocador em [W/m<sup>2</sup> K];
- $A_{\text{TrocaTérmica}}$ : área de troca térmica do trocador [m<sup>2</sup>];
- $\Delta T_{\text{ML}}$ : variação de temperatura média logarítmica do trocador em [K] que é dada por:

$$\Delta T_{\text{ML}} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\log \left( \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} \right)} \quad (4)$$

Estes parâmetros são definidos pelo fabricante na fase de desenvolvimento da máquina.

Na figura 03 (a) é mostrada o diagrama das temperaturas no trocador ar-ar por contra correntes e, na figura 03 (b), o diagrama das temperaturas do trocador por correntes paralelas. Comparando os dois diagramas de temperatura observa-se claramente que a eficiência do trocador por correntes paralelas é menor do que a eficiência do trocador por correntes opostas.

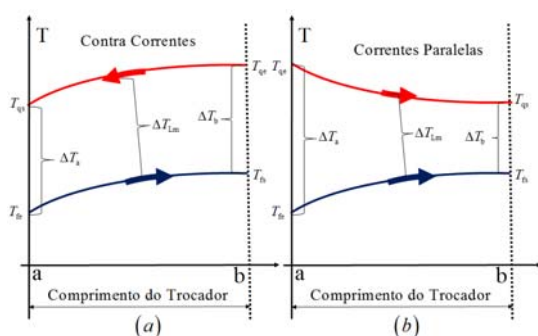


Figura 03- Diagrama de temperaturas no trocador de calor ar-ar - (a) Contra correntes - (b) Correntes paralelas.

### 2.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO COM TROCADOR AR-ÁGUA - IC W37A81 - IC W37A86

Neste sistema o meio refrigerante interno continua sendo o ar interno que circula pelas partes quentes da máquina e o meio refrigerante externo é constituído de água. Este trocador, também conhecido com o nome de radiador, normalmente é instalado na parte superior da máquina, conforme figura 4 (a) e (b), mas dependendo do espaço disponível no local da instalação, pode ser montado na lateral ou em baixo da máquina. Neste sistema de refrigeração a máquina elétrica normalmente é fechada, pode ser fabricada no grau de proteção IP55 ou IP56.

De acordo com a norma IEC, quando a máquina apresentar um ou dois ventiladores internos montados sobre o eixo, o sistema de refrigeração recebe a denominação de IC W 37A81, sendo neste caso uma máquina autoventilada e fechada. De acordo com a mesma norma, quando a máquina apresentar um ou dois ventiladores acionados independentemente do eixo da máquina, o sistema de refrigeração recebe a denominação de IC W 37A86, constituindo uma máquina com ventilação independente e fechada. A eficiência da troca térmica do sistema de refrigeração com trocador de calor ar-água é muito boa, sendo praticamente tão eficiente quanto uma máquina aberta. A grande vantagem deste sistema, além da alta eficiência na troca térmica, é o fato da máquina apresentar um nível de ruído muito baixo quando comparado com os demais sistemas de refrigeração.

A figura 4 (a) mostra um diagrama do

circuito de refrigeração da máquina IC W37A81 autoventilada e totalmente fechada, destacando o fluxo do ar interno. Para o usuário da máquina com este sistema de refrigeração é importante conhecer qual a vazão mínima de água que deve circular a través do trocador. Com esta informação é possível projetar a instalação para que a quantidade de água esteja disponível ao correto funcionamento da máquina.

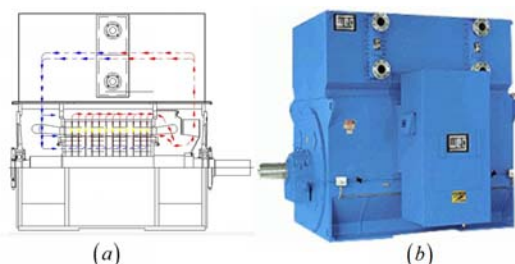


Figura 04- Máquina fechada com trocador de calor ar-água autoventilada - IC W37A81.

Considerando que as perdas totais da máquina  $P_{Perdas}$  sejam transformadas em calor e que este calor deve ser removido do interior da mesma, a vazão mínima de água  $Q_{Água}$  através do trocador pode ser calculada por:

$$Q_{Água} = \frac{P_{Perdas}}{\gamma_{Água} \cdot c_{Água} \cdot \Delta T_{Água}} \quad (5)$$

Onde:

- $P_{Perdas}$ : perdas a serem retiradas pelo trocador [W];
- $\gamma_{Água}$ : massa específica da água em [kg/m<sup>3</sup>];
- $c_{Água}$ : calor específico da água em [J/kgK];
- $\Delta T_{Água}$ : variação de temperatura da água ao passar no trocador de calor em [K].

Para uma boa especificação do trocador de calor, a massa específica da água é considerada  $\gamma_{Água} = 1000\text{kg/m}^3$ , o calor específico  $c_{Água} = 4186\text{J/kgK}$  e a variação de temperatura da água na faixa de  $3\text{K} \leq \Delta T_{Água} \leq 5\text{K}$ . A vazão obtida na equação (4) é expressa em [m<sup>3</sup>/s].



## 2.4 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO ABERTO - IC 01 - IC 06 - IC 33

O sistema de refrigeração aberto consiste num circuito de refrigeração onde o ar ambiente externo entra na máquina e passando pelas partes quentes, retira o calor e retorna ao meio ambiente. Neste sistema a máquina é denominada aberta. Devido ao fato de ser aberta só pode ser aplicada em ambientes não contaminados, isto é, em ambientes cuja atmosfera não contenha agentes capazes de atacar o isolamento da máquina.

No sistema aberto também podemos ter os ventiladores montados sobre o eixo sendo então a máquina autoventilada, ou com ventilação independente, quando os ventiladores são acionados independentemente do eixo a máquina. De acordo com a norma IEC, quando a máquina apresentar um ou dois ventiladores internos e montados sobre o eixo, o sistema de refrigeração é denominado de IC-01.

Quando o ventilador é acionado independentemente ao eixo da máquina, o sistema de refrigeração é denominado de IC 06. Quando o ambiente próximo a máquina estiver contaminado, a entrada do ar na máquina pode ser feita por um duto que traz ar de outra área não contaminada. Este sistema de refrigeração é denominado de IC 33. Para os três sistemas comentados, a máquina precisa uma vazão mínima de ar através das partes internas para que a retirada do calor seja garantida e que a temperatura das partes quentes não exceda a temperatura limite da classe térmica. Esta vazão é dependente das perdas internas e pode ser calculada como:

$$Q_{Ar} = \frac{P_{Perdas}}{\gamma_{Ar} \cdot c_{Ar} \cdot \Delta T_{Ar}} \quad (6)$$

Onde:

- $P_{Perdas}$ : Perdas a serem dissipadas pelas aletas [W];
- $\gamma_{Ar}$ : Massa específica do ar em [kg/m<sup>3</sup>];
- $c_{Ar}$ : Calor específico do ar em [J/kgK];
- $\Delta T_{Ar}$ : Variação de temperatura do ar ao passar pelas partes quentes da máquina em [K].

No cálculo da vazão de ar necessária dada por (6) o valor da massa específica do ar é

considerada  $\gamma_{Ar} = 1.10\text{kg/m}^3$ , o calor específico  $c_{\text{Água}} = 1000\text{J/kgK}$  e a variação de temperatura do ar na faixa de  $15\text{K} \leq \Delta T_{Ar} \leq 25\text{K}$ . A vazão obtida na equação (6) também é expressa em [m<sup>3</sup>/s].

O sistema de refrigeração aberto apresenta uma alta eficiência no arrefecimento da máquina fazendo com que a máquina apresente a maior densidade volumétrica de energia quando comparada com os demais sistemas de refrigeração. Esta eficiência reside no fato de que o ar que entra na máquina sempre se encontra na temperatura ambiente, temperatura esta que normalmente é mais baixa se comparada com a temperatura do ar interno que circula em máquinas fechadas.

Na figura 05 (a) é mostrado um diagrama esquemático do sistema de refrigeração da máquina aberta IC01, onde é mostrada a disposição dos ventiladores internos com fluxo de ar e, na figura 05 (b) uma máquina WEG com o sistema de refrigeração IC 01.

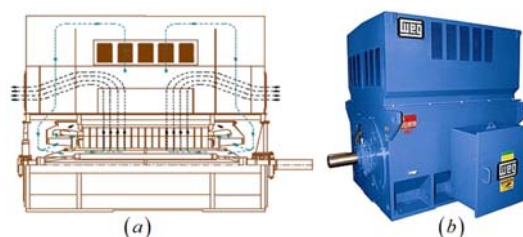


Figura 05- Máquina aberta auto-ventilada - IC 01.

## 2.5 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR MANTO D'ÁGUA - IC 71W

No sistema de refrigeração por manto d'água a transferência do calor gerado internamente na máquina para fora da carcaça é feito por condução e retirado da máquina através do manto d'água que circula ao redor da carcaça. O manto d'água apresenta certa espessura e é projetado para circular no interior da parede da carcaça da máquina. A máquina com este sistema de refrigeração apresenta um grau de proteção fechado, podendo ser aplicada em ambientes agressivos. O sistema de refrigeração por manto d'água, de acordo com a norma IEC, é denominado de IC 71W.

Para melhorar a eficiência do arrefecimento da máquina, no interior da máquina pode ser instalado no eixo um ventilador interno que força a circulação do ar da dianteira



para a traseira da máquina, ou vice versa. Esta circulação de ar equaliza a temperatura interna melhorando a transferência do calor.

Na figura 06 (a) é mostrado esquematicamente o circuito da água e o caminho da circulação do ar interno da máquina. Na figura 06 (b) uma máquina WEG com o sistema de refrigeração IC 71W.

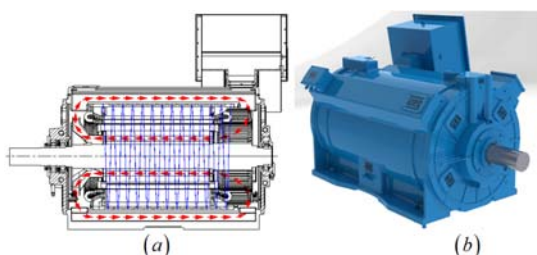


Figura 06- Motor totalmente fechado com manto d'água - IC 71W.

No sistema de refrigeração por manto d'água a transferência do calor de dentro para fora é feito por condução e retirado da máquina por convecção realizada pelo manto d'água. Para garantir um bom arrefecimento é necessário impor uma vazão mínima de água circulando ao redor da carcaça. Esta vazão pode ser determinada pela mesma expressão mostrada na equação (5). Aqui também os termos da equação (5) assumem os mesmos significados e valores.

Para ter uma noção da vazão de água necessária para refrigerar uma máquina com sistema por manto d'água, segue abaixo o cálculo da vazão de água, conforme a equação (5). O cálculo abaixo é referente a um motor de indução WGM450 de 1800kW, 1V polos, 4160V em 60Hz, cujas perdas a serem dissipadas são  $p_{Perdas} = 52000 \text{ W}$ . Considerando os parâmetros para a água na equação (5) como:

- $\gamma_{\text{Água}}$ :  $1000 \text{ kg/m}^3$ ;
- $c_{\text{Água}}$ :  $4186 \text{ J/kgK}$ ;
- $\Delta T_{\text{Água}}$ :  $5 \text{ K}$ .

Obtemos a vazão de água necessária:

$$Q_{\text{Água}} = \frac{52000\text{W}}{1000\text{kg/m}^3 \times 4186\text{J/kgK} \times 5\text{K}}$$

$$Q_{\text{Água}} = 2.48 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 2.48\text{l/s} = 8.93\text{m}^3/\text{h}$$

Fazendo-se uma análise comparativa com o cinco sistemas de refrigeração aqui analisados e que normalmente são aplicados no arrefecimento das máquinas elétricas, pode ser observado que todos utilizam como meio para troca térmica a convecção, que pode ser forçada ou natural e os fluidos utilizados normalmente o ar ambiente ou água. Se analisarmos as capacidades caloríficas do ar e da água em mesmas condições termodinâmicas observa-se que a água possui um coeficiente de transferência de calor muito superior ao ar, podendo-se afirmar que a eficiência da troca de calor com a água como fluido se torna mais eficiente.

Uma das principais características da refrigeração por manto d'água é não depender do meio ambiente que circunda a máquina, mas basicamente da qualidade e da temperatura de entrada da água. Sendo o sistema de refrigeração IC 71W altamente eficiente na troca térmica a máquina elétrica apresenta uma alta densidade volumétrica de energia, fazendo com que o volume ocupado seja pequeno, isto é, a máquina apresenta-se compacta. Esta é uma grande vantagem para aplicações onde o espaço disponível para instalação é reduzido, como por exemplo, em navios.

As máquina com o sistema de refrigeração IC 71W, conforme já foi comentado, são bastante compactas. O pequeno volume aliado ao fato da máquina não apresentar convecção sobre os mancais, pode apresentar temperaturas elevadas nos mancais. Para evitar este problema o sistema de manto d'água pode ser estendido aos mancais garantindo uma excelente troca térmica do calor gerado pelos mesmos. Uma boa refrigeração dos mancais permite dimensionar mancais menores e, conseqüentemente, mais adequados para cada aplicação, aumentando a vida útil e reduzindo os custos. Na figura 07 é mostrado em detalhes o circuito da água ao redor da carcaça e dos mancais. As linhas azuis representam o fluxo de água ao redor dos mancais e carcaça, sendo as setas as entrada e saída de água no circuito.

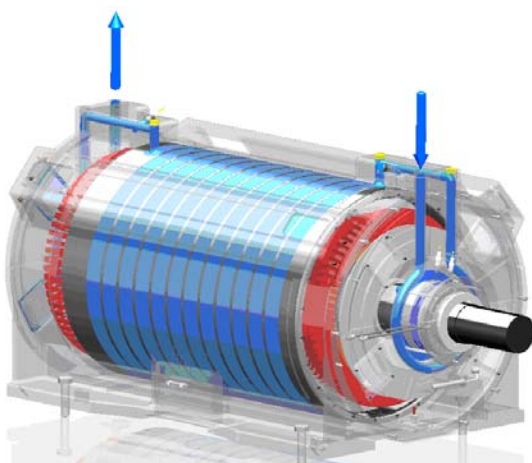


Figura 07- Circuito de refrigeração da máquina com manto d'água ao redor da carcaça e nos mancais.

Nas máquinas refrigeradas por manto d'água a circulação de água é feita ao redor da carcaça em forma espiral conforme mostrado na figura 07. Na circulação a velocidade da água no canal da espiral de refrigeração é um fator que deve ser analisado. Se a velocidade da água for muito alta, pode ocorrer a remoção das paredes do canal ao longo do tempo e se a velocidade for muito baixa, pode afetar a eficiência de troca térmica do sistema. Por este motivo a vazão de água especificada pelo fabricante deve ser mantida durante o funcionamento da máquina. Para manter esta vazão é necessário um sistema de bombeamento da água capaz de fornecer a pressão necessária.

Preferencialmente a água deve ser tratada ou que pelo menos tenha um grau de pureza para evitar as incrustações nas paredes das espirais por onde a água circula. A seção dos canais normalmente é dimensionada pelo fabricante para que pequeno nível de incrustação seja permitido ao longo da vida útil da máquina, porém, caso seja necessário, é possível efetuar a limpeza periódica do canal da espiral utilizando para um líquido decapante que vai efetuar a remoção dessas incrustações.

O canal em espiral por onde circula a água refrigerante é construída em duas partes: uma formando a parte interna onde o caminho em espiral para a água é feito diretamente no material do tubo cilíndrico e a segunda parte constitui a carcaça propriamente dita que, além da função de direcionar o fluxo de água, também apresenta a função estrutural mecânica da

máquina. Antes da montagem do cilindro interno na carcaça é feita uma proteção contra a corrosão na superfície que irá ficar em contato com a água, garantindo a vida útil da máquina. A figura 08 mostra as duas partes responsáveis pela formação do caminho em espiral para a água.

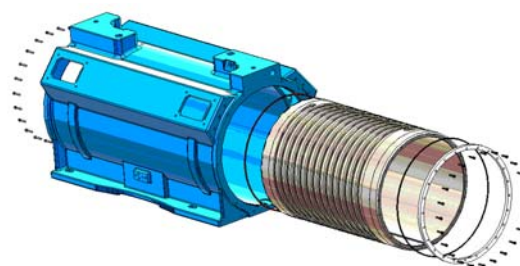


Figura 08: Montagem do sistema de refrigeração por manto d'água mostrando o caminho em espiral para a água.

A vedação para evitar o vazamento da água é feito através de sistemas de anéis de borracha adequadamente dimensionados. A principal preocupação com relação a fabricação das máquinas com este sistema de refrigeração é garantir que o sistema seja totalmente vedado, pois na própria carcaça interna onde está montado parte eletromagnética ativa, isto é, energizada, é que estará circulando a água que fará a refrigeração do sistema, e qualquer vazamento é desastroso para a isolamento elétrico da mesma.

### 3. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Para compreender melhor qual sistema de refrigeração é mais eficiente do ponto de vista da dissipação do calor gerado pela máquina e, conseqüentemente, qual é o sistema que permite uma densidade volumétrica de energia maior para a máquina, neste parágrafo faremos uma comparação entre os sistemas de refrigeração discutidos neste artigo. Para esta comparação iremos considerar os cinco sistemas de refrigeração abordados neste trabalho, ou seja:

1. O sistema aletado IC 0411 conforme figura 01;
2. O sistema com trocador ar-ar IC0611 conforme figura 02;
3. O sistema com trocador ar-água IC37A81 conforme mostrado na figura 04;
4. O sistema aberto IC01 conforme



mostrado na figura 05. Para fins de comparação do aproveitamento do volume a máquina aberta pode ser considerada igual a máquina com trocador de calor ar-água IC37A81;

5. O sistema com refrigeração por manto d'água IC71W conforme mostrado na figura 06.

A comparação será feita levando em consideração o aproveitamento eletromagnético do volume ativo da máquina, o aproveitamento do volume total ocupado pela máquina e também um terceiro parâmetro de comparação será o nível de ruído da máquina. Na análise comparativa do volume total da máquina não será considerado o volume da caixa de ligação, porque esta não depende do sistema de refrigeração, mas apenas das condições da rede elétrica e dos acessórios que devem estar no seu interior. Vamos começar fazendo a análise comparativa do aproveitamento eletromagnético da máquina.

Considerando que a potência nominal  $P_{Nominal}$  em [kW] e a rotação síncrona  $n_{Síncrona}$  em [Hz] da máquina sejam conhecidas a conversão eletromecânica para máquinas elétricas girantes pode ser escrita como:

$$P_{Nominal} = C_{AVA} \cdot D_1^2 \cdot L_{Ferro1} \cdot n_{Síncrona} \quad (7)$$

Onde:

$C_{AVA}$ : Representa a constante de aproveitamento do volume ativo da máquina dado em [ $W \cdot s/m^3$ ];

$D_1$ : O diâmetro interno do núcleo magnético do estator da máquina em [m];

$L_{Ferro1}$ : Comprimento de ferro do pacote de chapas do núcleo magnético do estator em [m];

A rotação síncrona da máquina  $n_{Síncrona}$  em [Hz] pode ser determinada se a frequência da rede  $f_{Rede}$  e o número de pares de polos  $P$  da máquina são conhecidos por:

$$n_{Síncrona} = \frac{f_{Rede}}{P} \quad (8)$$

Na equação (7) que representa a conversão eletromecânica da energia para máquinas elétricas a constante de aproveitamento do volume ativo CAVA depende fortemente do sistema de refrigeração da máquina. Isto significa que quanto melhor a eficiência do sistema de refrigeração maior será a constante de aproveitamento do volume ativo  $C_{AVA}$  e, conseqüentemente, menor o volume ativo da máquina. Na figura 09 é

mostrada a constante de aproveitamento eletromagnético do volume ativo das máquinas para cada sistema de refrigeração. A constante de aproveitamento CAVA é expressa em função da potência da máquina em kW por rps, ou seja [kW/rps].

Observa-se que o sistema por aletas IC 0411 se mostra menos eficiente apresentando uma menor densidade volumétrica de energia sendo o seu aproveitamento do volume ativo  $C_{AVA}$  o menor dos cinco sistemas de refrigeração. O sistema com trocador de calor ar-ar IC 0611 já apresenta um aproveitamento do volume eletromagnético um pouco melhor quando comparado com o sistema aletado IC 0411. Quanto maior a relação da potência da máquina com a rotação [kW/rps] mais se distancia da curva do fator  $C_{AVA}$  da máquina aletada. Para valores menores de 50kW/rps a máquina aletada apresenta a constante de aproveitamento do volume ativo maior que o sistema com trocador de calor ar-ar, mostrando que para máquinas menores o sistema de refrigeração por aletas é mais eficiente quando comparado com o sistema de refrigeração ar-ar.

A máquina com refrigeração com manto d'água aparece em terceiro lugar em termos de aproveitamento do volume eletromagneticamente ativo mostrando-se melhor que a máquina aletada e a máquina com trocador de calor ar-ar.

A figura 9 confirma o que foi afirmado no capítulo II.5, onde foi afirmado que as máquinas fechadas que utilizam o ar como fluido para convecção, apresentam a menor eficiência na troca térmica e, por conseqüência, um fator  $C_{AVA}$  menor.

Também é possível notar que há um cruzamento das curvas das máquinas com trocador de calor e das máquinas refrigeradas por manto d'água em valores inferiores a 50kW/rps, o que pode ser explicado que, em máquinas de menor porte, a retirada de calor do interior da máquina por condução é mais eficiente do que a troca de calor via convecção do ar interno em máquinas com trocador ar-água. Já em máquinas de maior porte a situação se inverte. Assim, por serem menos eficientes em máquinas de maior porte, as carcaças aletadas ou refrigeradas por





manto d'água são comumente projetadas até a carcaça 630.

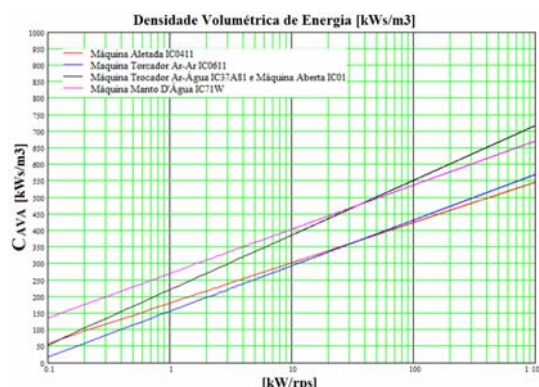


Figura 09 – Constante de aproveitamento do volume ativo da máquina  $C_{AVA}$ .

As mesmas razões justificam o que acontece com as curvas das máquinas aletadas e as das máquinas com trocador ar-ar, comentadas anteriormente. O segundo aspecto importante na análise comparativa dos sistemas de refrigeração é considerar o volume total da máquina. O volume total assume importância numa aplicação quando o espaço disponível para a instalação da máquina é reduzido. É possível determinar um coeficiente de aproveitamento do volume total da máquina se considerarmos que o volume total é função do volume ativo e da construção mecânica. Portanto, a relação da potência com o volume total da máquina, por analogia à equação (7) pode ser escrita como:

$$P_{\text{Nominal}} = C_{\text{AVT}} \cdot V_{\text{Total}} \cdot n_{\text{Síncrona}} \quad (9)$$

Onde:

$C_{\text{AVT}}$ : Representa a constante de aproveitamento do volume total da máquina dado em  $[W \cdot s/m^3]$ ;

$V_{\text{Total}}$ : Volume total da máquina  $[m^3]$ ;

A figura 10 mostra a constante de aproveitamento do volume total  $CAVT$  das máquinas em função da relação de potência com a rotação  $[kW/rps]$ .

O menor aproveitamento volumétrico total é a máquina refrigerada com trocador de calor ar-ar. Isto se explica porque neste sistema o trocador precisa uma área de troca grande para garantir o arrefecimento da máquina.

A máquina com trocador de calor ar-água, apesar de apresentar excelente aproveitamento eletromagnético do volume

ativo, apresenta um aproveitamento do volume total melhor que a de trocador de calor ar-ar, porém inferior a máquina aletada IC 0411 e máquina refrigerada por manto d'água.

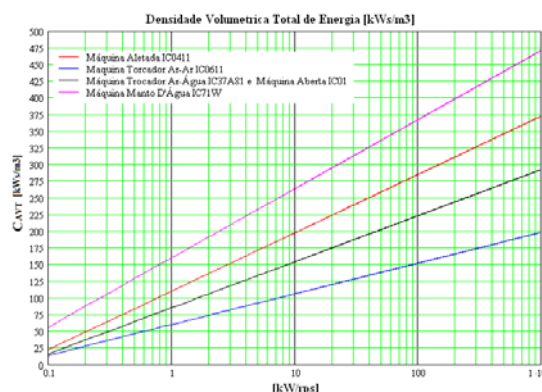


Figura 10 – Constante de aproveitamento do volume total da máquina  $C_{AVT}$ .

Quando comparamos a máquina refrigerada por manto d'água IC71W com as demais se verifica que o seu aproveitamento volumétrico total é bem superior, fazendo com que o volume necessário disponível para sua instalação seja reduzido. Esta é a grande vantagem da máquina refrigerada por manto d'água, ou seja, é uma máquina compacta e, como veremos, de baixo ruído. Em média, comparando os  $C_{\text{AVT}}$  dos métodos de refrigeração com o  $C_{\text{AVT}}$  do manto d'água, as máquinas aletadas apresentam um  $C_{\text{AVT}}$  21% inferior; as máquinas com trocador ar-água apresentam  $C_{\text{AVT}}$  38% inferior; e as máquinas com trocador ar-ar apresentam  $C_{\text{AVT}}$  58% inferior.

O terceiro parâmetro, não menos importante que os dois anteriores, é o nível de ruído. Devido às exigências por qualidade de vida e respeito à natureza, o nível de ruído em máquinas elétricas passa a ser um ponto muito importante quando se faz uma avaliação do desempenho da máquina.

O nível de ruído está diretamente relacionado com o sistema de refrigeração devido ao fato que a maior fonte de ruído é o ventilador utilizado para movimentar o ar necessário ao arrefecimento da mesma. Na tabela 01 é mostrado o nível de ruído médio medido a um metro de distância da máquina em dBA para os cinco sistemas de refrigeração analisados neste trabalho para as máquinas de 2 e 4 polos em 60 Hz.



Tabela 1 - Nível de ruído médio a 1m de distância para as máquinas dos cinco sistemas de refrigeração.

Carcaça	Ruído Médio a 1m (dB(A)) 60Hz									
	IC0411		IC 0611		IC37A81		IC01		IC 71W	
	II	IV	II	IV	II	IV	II	IV	II	IV
315	82	85	82	82	82	81	86	85	79	78
355	85	88	83	83	83	82	86	86	79	78
400	88	88	83	83	83	82	86	86	79	78
450	90	90	84	84	83	82	87	87	80	79
500	90	90	84	84	83	82	87	87	80	79
560	90	90	85	85	83	83	88	88	80	79

Os valores mostrados na tabela 1 mostram que as máquinas aletadas IC0411 e com trocador de calor ar-ar IC 0611 apresentam níveis de ruído bem maior que a máquina refrigerada com trocador de calor ar-água IC W37A81. Já a máquina refrigerada por manto d'água é a mais silenciosa.

Este sistema apresenta o menor nível de ruído pelo fato da máquina não apresentar ventilador externo e a parte interna da máquina estar envolta por duas estruturas metálicas que constituem os guias para a espiral do manto d'água ao redor da carcaça. Portanto, a máquina refrigerada por manto d'água é ideal para aplicações onde o ambiente requer níveis de ruído muito baixos.

#### 4. CONCLUSÃO

Foram apresentados neste artigo os cinco principais métodos de refrigeração de máquinas elétricas, destacando os princípios da transferência de calor utilizados em cada método de refrigeração. O foco foi dado ao método de refrigeração por manto d'água, apresentando algumas características construtivas com relação ao sistema de circulação de água.

Através do comparativo das constantes de aproveitamento eletromagnético do volume ativo  $C_{AVA}$  apresentado no artigo, é possível concluir que entre as máquinas fechadas, as que utilizam água como fluido de refrigeração apresentam uma maior eficiência na troca térmica, conforme esperado, obtendo fatores de aproveitamento superiores. Nesta comparação foi possível identificar que os sistemas que retiram o calor do interior da máquina por condução, ou seja, as máquinas aletadas IC0411 e as máquinas com manto d'água IC71W apresentam uma

eficiência na troca térmica maior do que as máquinas que retiram o calor interno por convecção que são as máquinas com trocador ar-ar IC 0611 e com trocador ar-água IC W37A81 em potências menores, com valores de kW/rps abaixo de aproximadamente 20 kW/rps.

Na comparação das constantes de aproveitamento do volume total  $C_{AVT}$  foi possível destacar a grande vantagem do sistema por manto d'água, que é a sua grande eficiência na troca térmica, proporcionando um volume total reduzido. Em toda a faixa de kW/rps, as máquinas refrigeradas por manto d'água apresentam  $C_{AVT}$  muito superior aos demais métodos de refrigeração. As máquinas refrigeradas por manto d'água também apresentam baixo nível de ruído, inferiores aos demais métodos de refrigeração.

Para as aplicações onde o espaço para instalação é reduzido e a exigência por nível de ruído baixo, a máquina refrigerada por manto d'água se apresenta como a melhor solução, sendo ideal para aplicações como:

- Na indústria naval onde o espaço disponível é reduzido e o nível de ruído baixo é importante;
- Nas usinas de cana de açúcar e mineração por apresentarem condições ambientais adversas exigindo máquinas robustas e com proteção adequada;
- Na indústria do petróleo onde, por exemplo, as máquinas perfuratrizes, exigem também robustez e volume reduzido.
- Nas companhias de saneamento, que pelo fato de normalmente se encontrarem em regiões urbanas, é importante que as máquinas apresentem nível de ruído baixo.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] IEC-60034-6 - Rotating Electrical Machines. Part 6: Methods of Cooling (IC Code). 2° Edição. 1991.  
 [2] TABOREK, J.; HEWITT, G.F.; AFGAN, N. Heat Exchangers - Theory and Practice .Hemisphere Publishing Corporation, Washington 1983.  
 [3] INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 5° Edição. John Wiley & Sons