

Máquinas de Fluxo

Ventiladores



Prefácio

Prezados alunos,

O objetivo deste conteúdo é proporcionar uma síntese teórica por meio de atividades experimentais. A bancada de ventiladores foi desenvolvida internamente na FAT, fruto de uma colaboração entre o Laboratório de Motores, Hidráulica e Pneumática, e a Administração da Unidade Acadêmica FAT, com o apoio da doação dos ventiladores industriais provenientes da antiga Kodak.

Os ventiladores presentes na bancada incluem modelos centrífugos, Siroco e axiais, todos preparados para um acionamento seguro, por meio de chaveamento com inversor de frequência, o que garante uma operação progressiva e segura. Além disso, conseguimos construir um túnel de vento seguindo as diretrizes da AMCA (Air Movement and Control Association International), possibilitando o desenvolvimento de estudos relacionados à análise de escoamento, perda de carga, mapeamento de pressões e velocidades.

Recomendo que aproveitem ao máximo o conteúdo proposto, aprofundando-se nas técnicas sugeridas e realizando as análises para cada tipo de ventilador presente na bancada.

Boa sorte

Prof. Luiz Cordeiro

Sumário

Objetivos:.....	6
1 - VENTILADOR CENTRÍFUGO	7
1.1 Dimensões Características:	7
1.2 Cálculo do ângulo complementar “ ϕ ” ao ângulo “ β ” de inclinação das pás do ventilador:.....	8
1.3 Medições das velocidades de sucção e recalque:	8
1.4 Medição da velocidade de Rotação do Ventilador:	10
1.5 Cálculo da velocidade tangencial na entrada/saída	11
1.6 Composição do Triângulo de velocidades:	12
1.7 Definir a área do recalque	14
1.8 Definir a vazão do recalque.....	14
1.9 Cálculo da Vazão do rotor no recalque	14
1.10 Cálculo vazão de fuga/recirculação do ventilador	15
1.11 Cálculo do rendimento volumétrico do ventilador.....	15
1.12 Cálculo da componente tangencial da velocidade absoluta da corrente fluida na saída do ventilador (Cu5)	16
1.13 Velocidade da partícula na saída do rotor (C5)	17
1.14 Cálculo do salto energético da pá considerando um número infinito de pás para a máquina de fluxo.....	17
1.15 Cálculo da potência no eixo utilizando o freio de Prony.....	18
1.16 Cálculo da pressão de sucção do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U” 19	
1.17 Cálculo da pressão de recalque do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U” 19	
1.18 Cálculo da elevação de pressão do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U” 20	
1.19 Cálculo do salto energético da máquina	21
1.20 Cálculo do rendimento total da máquina.....	21
1.21 Cálculo da potência recebida pelo fluido ao passar pela máquina.....	22
1.22 Cálculo do salto energético na pá da máquina de fluxo.....	23
1.23 Definição da altura elevação útil do ventilador.....	24
1.24 Definição da potência útil do Ventilador.....	24
1.25 Definição da potência total de elevação do ventilador centrífugo.....	25
1.26 Definição do rendimento Mecânico.....	25
1.27 Definição do rendimento Hidráulico	26
1.28 Definição do rendimento Total.....	26

2	- VENTILADOR AXIAL.....	27
2.1	Dimensões Características:.....	27
2.2	Cálculo do ângulo de inclinação das pás “ β ” do ventilador:	27
2.3	Medições das velocidades de sucção e recalque:	29
2.4	Composição do triângulo de velocidade	30
2.5	Cálculo do passo do ventilador axial	31
2.6	Cálculo da vazão de recalque/sucção.....	31
2.7	Medição da velocidade de Rotação do Ventilador:.....	33
2.8	Cálculo da velocidade tangencial na entrada/saída	34
2.9	Velocidade relativa da corrente fluida na saída (w_5)......	34
2.10	Cálculo da componente tangencial da velocidade absoluta da corrente fluida na saída do ventilador (Cu_5)	35
2.11	Cálculo do salto energético da pá com um número infinito de pás.....	36
2.12	Cálculo da elevação de pressão do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U”	36
2.13	Cálculo do salto energético da máquina de fluxo	37
2.14	Cálculo da potência recebida pelo fluido ao passar pela máquina	37
2.15	Definir rendimentos do ventilador Axial.	38
2.16	Definir o salto energético da pá da máquina de fluxo	38
2.17	Definir a potência no eixo do ventilador	39
3	- VENTILADOR SIROCCO (Grande – modelo na cor laranja)	40
3.1	Dimensões Características:.....	40
3.2	Cálculo do ângulo complementar “ ϕ ” ao ângulo “ β ” de inclinação das pás do ventilador:.....	40
3.3	Medições das velocidades de sucção e recalque:	41
3.4	Velocidade de Rotação do ventilador:.....	41
3.5	Cálculo da velocidade tangencial na entrada/saída.....	42
3.6	Composição do triângulo de velocidade:	43
3.7	Definir área de recalque:	44
3.8	Definir a vazão na saída do ventilador:	44
3.9	Cálculo da Vazão do rotor no recalque	45
3.10	Cálculo do rendimento volumétrico do ventilador.....	45
3.11	Cálculo da componente tangencial da velocidade absoluta da corrente fluida na saída do ventilador (Cu_5)	46
3.12	Velocidade da partícula na saída do rotor (C_5)	46
3.13	Cálculo do salto energético da pá considerando um número infinito de pás para a máquina de fluxo.....	47

3.14	Cálculo da elevação de pressão do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U”	48
3.15	Cálculo do salto energético da máquina	48
3.16	Cálculo da potência recebida pelo fluido ao passar pela máquina.....	49
3.17	Cálculo do salto energético na pá da máquina de fluxo.....	49
4	VENTILADOR SIROCCO (TÚNEL DE VENTO)	50

Objetivos:

O conteúdo abaixo tem como objetivo o complemento ao conceito apresentado na disciplina de Máquinas Térmicas e de Fluxo, no equacionamento das máquinas de fluxo. Neste trabalho, serão apresentadas as análises para os seguintes modelos de ventiladores:

- Ventilador Centrífugo;
- Ventilador Axial;
- Ventilador Siroco (grande – modelo na cor laranja);
- Ventilador Siroco (pequeno – modelo na cor amarelo)

Com base nesta análise, os alunos serão estimulados ao estudo utilizando técnicas, ferramentas e equipamentos que serão apresentados a cada proposta de estudo.

Atenção!

Para este experimento é necessário a utilização de óculos de segurança, e deve-se manter peças de roupas, acessórios e os cabelos presos, afim de evitar que possam ser sugadas pelo ventilador.

1 - VENTILADOR CENTRÍFUGO

Ventilador centrífugo é um dispositivo mecânico no qual o ar acesa o ventilador através de forma axial e a projeção de saída radial. Conforme apresentado em sala de aula, o mesmo apresenta diversas aplicações e principalmente na indústria auxilia nos processos de exaustão, calefação, sopradores entre outros. O propósito desta análise, será avaliado nas condições básicas de utilização do ventilador mostrado na figura abaixo, e conforme a ordem de análise que será apresentada.



Figura 1 - Ventilador Centrífugo

1.1 Dimensões Características:

Diâmetro do bocal de entrada:	0,47 metros
Dimensões do bocal de saída:	0,30m de largura e 0,20m de altura
Largura da pá na entrada do rotor:	170 milímetros

Largura da pá na saída do rotor:	135 milímetros
Diâmetro interno do Rotor:	334 milímetros
Diâmetro externo do Rotor:	444 milímetros

1.2 Cálculo do ângulo complementar “ ϕ ” ao ângulo “ β ” de inclinação das pás do ventilador:

A importância deste ângulo, é devido a identificação do perfil de funcionamento do ventilador, em relação ao ângulo de ataque das pás deste rotor.

Para medir o ângulo de inclinação das pás, foi realizado por intermédio das funções trigonométricas, como pode ser observado na imagem abaixo:



Figura 2 – Projeção das pás

Com a projeção realizada pelo software AutoCAD obtivemos um ângulo β de 46°.

1.3 Medições das velocidades de sucção e recalque:

Para realizar as medidas das velocidades do ventilador, fora utilizado o anemômetro. Abaixo tem-se a imagem do mesmo:

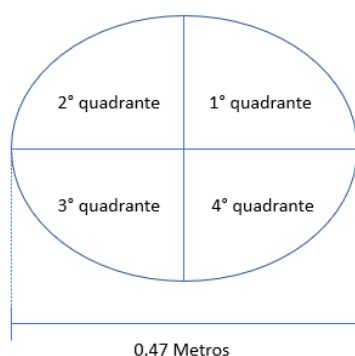


figura 3 – Anemômetro

Devido ao perfil aerodinâmico nos bocais de sucção e recalque não seguirem um perfil de escoamento uniforme, é necessário definir um critério para avaliação das velocidades. Para esta análise, a proposta é dividir ambos os bocais em quadrantes e realizar a medição com o uso de um anemômetro para os registros das velocidades por quadrante, e posteriormente o cálculo da velocidade média para ambos os bocais.

Obs: Poderia também ser realizado a medição das velocidades dos bocais por intermédio de um tubo de Pitot, porém optou-se pelo anemômetro por ser mais dinâmico e prático.

Área de sucção do ventilador



Área de recalque do Ventilador

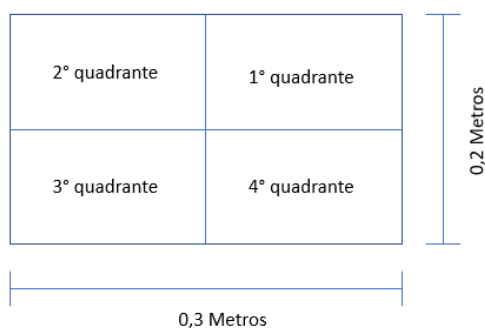


figura 4 – Área de recalque e sucção

Após a realização das medições obteve-se a velocidade média para a sucção e recalque, de 19,30 m/s e 24,58 m/s respectivamente.

1.4 Medição da velocidade de Rotação do Ventilador:

Para definir a velocidade de rotação do rotor da máquina de fluxo fora utilizado o tacômetro, onde se obteve a rotação de 1215 RPM.



figura 5 – Tacômetro

Para utilizar o tacômetro é necessário colar um papel refletivo no eixo de rotação do ventilador, onde a rotação é identificada pelo reflexo recebido de volta pelo tacômetro. A imagem do local no ventilador onde fora anexado a fita refletiva que tem por finalidade medir sua rotação encontra-se na imagem abaixo:

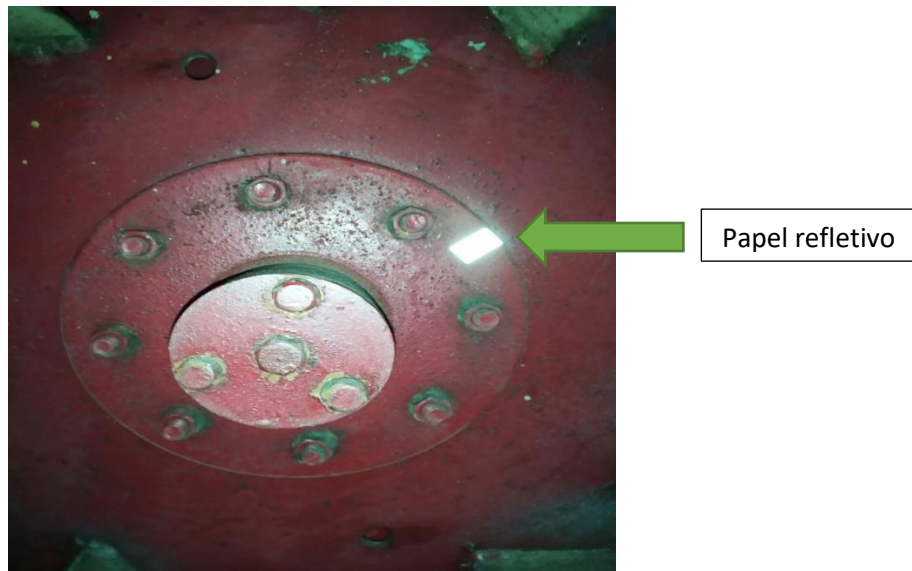


figura 6 – Fita adesiva colada no rotor do ventilador

1.5 Cálculo da velocidade tangencial na entrada/saída.

Para definir a velocidade tangencial do ventilador fora utilizado a fórmula:

$$U = \frac{\pi D n}{60}.$$

Com isso, obtém-se para a entrada (índice 4) do perfil da hélice da máquina de fluxo a seguinte fórmula:

$$U_4 = \frac{\pi D_4 n}{60}$$

$$U_4 = \frac{\pi * 0,33 * 1215}{60}$$

$$U_4 = 20,99 \text{ m/s}$$

Analogamente para obter-se a velocidade tangencial para o perfil de saída (índice 5) da pá da hélice do ventilador utiliza-se a seguinte fórmula:

$$U_5 = \frac{\pi D_5 n}{60}$$

$$U_5 = \frac{\pi * 0,44 * 1215}{60}$$

$$U_5 = 27,99 \text{ m/s}$$

1.6 Composição do Triângulo de velocidades:

Com a identificação do ângulo β , é possível realizar a construção do triângulo de velocidade, conforme estudo em sala de aula, figura 7, triângulo de velocidade conceito e desta forma o triângulo de velocidade real do ventilador, figura 8 e figura 9, na entrada e na saída respectivamente.

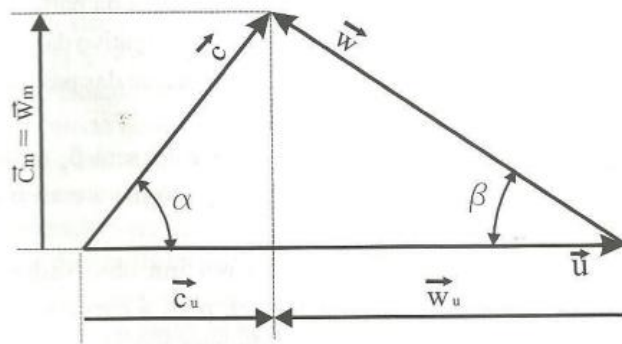


figura 7 – Triângulo de velocidade conceito

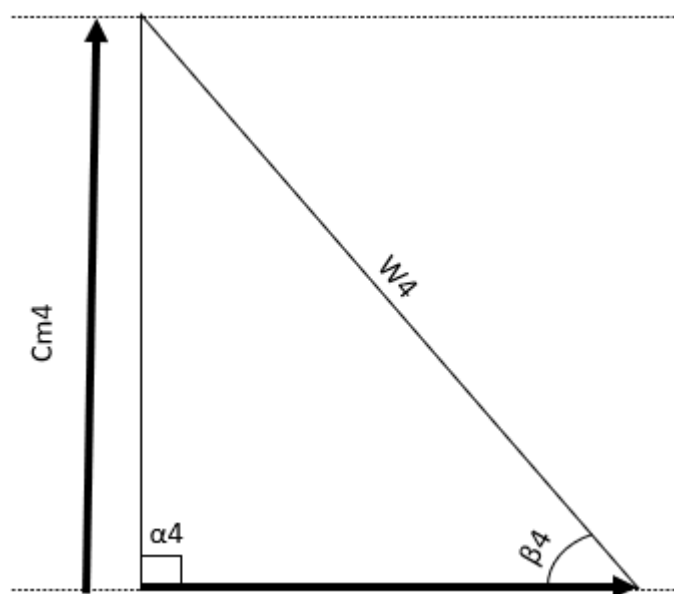


figura 8 – Triângulo de velocidade do ventilador para a entrada

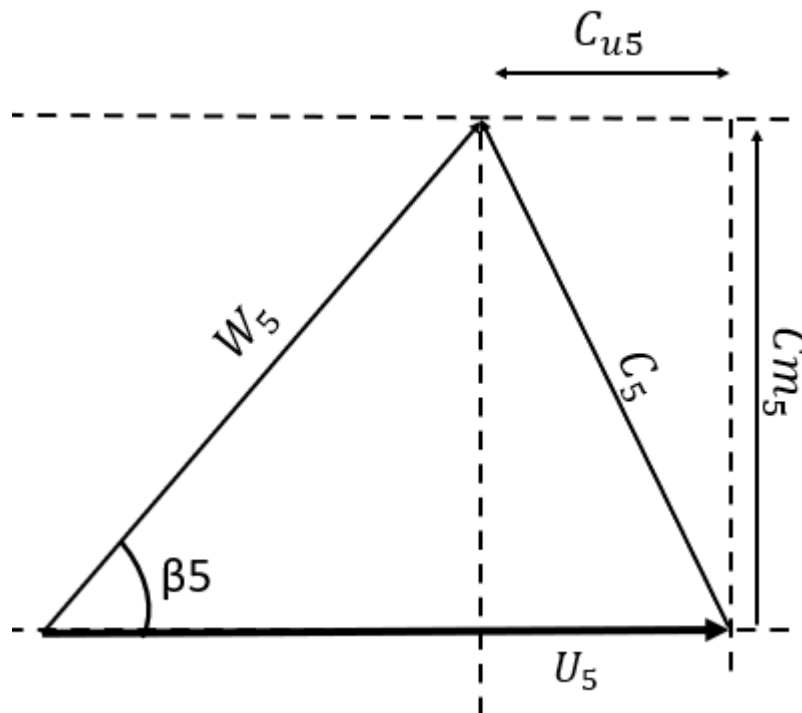


figura 9 – Triângulo de velocidade do ventilador para saída

Onde:

C_{m5} = É a velocidade meridiana, (velocidade real) na saída do ventilador medida com o anemômetro;

U_5 = É a velocidade tangencial na saída do ventilador calculada no tópico anterior.

C_{u5} = É a projeção da velocidade absoluta sobre a componente tangencial da velocidade.

1.7 Definir a área do recalque

Para definir essa área foi utilizado a trena para medir a largura e a altura do bocal de recalque (figura 4), multiplicando os dois valores e se obteve a área de 0,06 m² s como pode ser observado abaixo:

$$A = L * H$$

$$A = 0,3 * 0,2$$

$$A = 0,06 \text{ m}^2$$

1.8 Definir a vazão do recalque

Para calcular a vazão do fluido foi utilizado a fórmula: $Q = Av$ onde a letra “Q” representa a vazão do ar, “A” representa a área em que o fluido passa e “V” a velocidade média do fluido. Com isso obteve-se a vazão no recalque de 0,78 m³/s como pode ser observado abaixo:

$$Q = Av$$

$$Q = 0,06 * 24,580$$

$$Q = 1,47 \text{ m}^3/\text{s}$$

1.9 Cálculo da Vazão do rotor no recalque

Para definir a vazão do rotor deste ventilador, é necessário utilizar a fórmula: $Qr = \pi D_5 B_5 C m_5$, onde “cm5” é a velocidade medida com o Anemômetro no recalque da máquina de fluxo, “B₅” é a largura da pá na saída do ar e “D₅” é distância do centro do rotor à saída de ar. Com isso foi obtido uma vazão de 1,21m³/s no rotor como pode ser observado abaixo:

$$Qr = \pi D_5 B_5 C m_5$$

$$Q_r = \pi * 0,44 * 0,135 * 24,58$$

$$Q_r = 4,59 \text{ m}^3/\text{s}$$

1.10 Cálculo vazão de fuga/recirculação do ventilador

Para calcular a vazão de fuga basta fazer a diferença entre a vazão medida e a vazão do rotor, com isso foi obtido o valor para vazão de fuga de 0,43 m³/s como pode ser observado abaixo:

$$Q_f = Q_r - Q$$

$$Q_f = 4,59 - 1,47$$

$$Q_f = 3,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

1.11 Cálculo do rendimento volumétrico do ventilador

Para calcular o rendimento volumétrico do ventilador centrífugo deve-se utilizar a seguinte fórmula: $\eta_v = \frac{Q}{Q_r}$, onde “Q” é a vazão medida e “Q_r” é a vazão do rotor. Com isso obteve-se um rendimento volumétrico de 0,64 como pode ser observado abaixo:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_r}$$

$$\eta_v = \frac{1,47}{4,59}$$

$$\eta_v = 0,32$$

1.12 Cálculo da componente tangencial da velocidade absoluta da corrente fluida na saída do ventilador (Cu5)

Para definir esta velocidade basta analisarmos o triângulo de velocidade descrito na figura 6, como a parte do triângulo que está desenhada com linha pontilhada possui o formato de um triângulo retângulo, pode-se fazer o uso das funções trigonométricas e do teorema de Pitágoras para definir o valor das incógnitas.

A equação matemática para definir a velocidade que se obtém é:

$$C_{U_5} = U_5 - \frac{Cm_5}{\tan(46^\circ)}$$

Desta forma, se obtém a velocidade de 39,77 m/s, como pode ser observado abaixo:

$$C_{U_5} = U_5 - \frac{Cm_5}{\tan(46^\circ)}$$

$$C_{U_5} = 27,99 - \frac{24,58}{\tan(46^\circ)}$$

$$C_{U_5} = 27,99 - (-11,78)$$

$$C_{U_5} = 39,77 \text{ m/s}$$

1.13 Velocidade da partícula na saída do rotor (C_5)

Para definir esta velocidade é necessário observar o triângulo de velocidade da máquina de fluxo demonstrado na figura 9, com isso pode-se utilizar o teorema de Pitágoras para defini-la, pode-se observar o cálculo passo-a-passo abaixo:

$$C_5 = \sqrt{C_{m_5}^2 + C_{u_5}^2}$$

$$C_5 = \sqrt{(24,58)^2 + (39,77)^2}$$

$$C_5 = \sqrt{2185,83}$$

$$C_5 = 46,75 \text{ m/s}$$

1.14 Cálculo do salto energético da pá considerando um número infinito de pás para a máquina de fluxo

Considerando a entrada do ventilador radial $\alpha_4 = 90^\circ$ e $C_{u_4} = 0$. Com isso, é possível definir o salto energético para uma máquina de fluxo com números infinitos de pás, pela seguinte fórmula:

$$\gamma_{pá \infty} = U_5 C_{u_5}$$

Onde se obtém o resultado de 2673,60 J/Kg, como pode ser observado abaixo:

$$\gamma_{pá \infty} = U_5 C_{u_5}$$

$$y_{p\acute{a}\infty} = 27,99 * 46,75$$

$$y_{p\acute{a}\infty} = 1308,53 \text{ J/Kg}$$

1.15 Cálculo da potência no eixo utilizando o freio de Prony

Através da utilização do freio de Prony, é possível definir a potência no eixo do ventilador. Onde utiliza-se um “braço” que é acoplado no eixo do ventilador, e com a utilização do braço é medida a reação sobre a balança gerada por este ventilador, com isso utiliza-se para definir a potência no eixo a seguinte fórmula:

$$Pe = \frac{PRN}{716,2}$$

Onde “P” é o peso medido na balança em kg, “R” é o comprimento do braço medido em metros e “N” é a rotação do eixo em RPM.

Através desta medição, é obtido a potência no eixo de 0,64 cv, que convertido para watts é 419,41 w, como pode ser observado abaixo:

$$Pe = \frac{PRN}{716,2}$$

$$Pe = \frac{1,5 * 0,25 * 1215}{716,2}$$

$$Pe = 0,64 \text{ cv} = 467,90 \text{ w}$$

1.16 Cálculo da pressão de sucção do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U”

Com a utilização de um tubo em “U”, definiu-se a pressão de sucção do ventilador, para esta ação será acoplado um tubo de Pitot na face de entrada do ventilador. Por intermédio de um tubo em “U” acoplado ao Pitot e a atmosfera, é possível fazer o registro.

A partir da fórmula: $\Delta_{P_t} = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H$, onde " $\rho_{\text{água}}$ " é a massa específica da água em kg/m³, " g " é a força da gravidade da terra e ΔH a variação da altura da água presente no tubo em “U” em metros. O resultado obtido é de 29,34 Pa para a pressão de sucção do ventilador, como pode ser observado abaixo:

$$\Delta_{P_t} = \rho_{\text{água}} * g * \Delta H$$

$$\Delta_{P_t} = 997 * 9,81 * 0,003$$

$$\Delta_{P_t} = 29,34 \text{ Pa}$$

1.17 Cálculo da pressão de recalque do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U”

Com a utilização de um tubo em “U”, definiu-se a pressão de recalque do ventilador, para esta ação será acoplado um tubo de Pitot na face de saída do ventilador. Por intermédio de um tubo em “U” acoplado ao Pitot e a atmosfera, é possível fazer o registro.

A partir da fórmula: $\Delta p_t = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H$, onde " $\rho_{\text{água}}$ " é a massa específica da água em kg/m³, " g " é a força da gravidade da terra e ΔH a variação da altura da água presente no tubo em "U" em metros. O resultado obtido é de 166,27 Pa para a pressão de recalque do ventilador, como pode ser observado abaixo:

$$\Delta p_t = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H$$

$$\Delta p_t = 997 \cdot 9,81 \cdot 0,017$$

$$\Delta p_t = 166,27 \text{ Pa}$$

1.18 Cálculo da elevação de pressão do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em "U"

Com a utilização de um tubo em "U", definiu-se a elevação de pressão do ventilador, para esta ação será acoplado um tubo de Pitot em ambas as faces do ventilador (entrada e saída). Por intermédio de um tubo em "U" acoplado a estes tubos de Pitot, é possível fazer o registro.

A partir da fórmula: $\Delta p_t = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H$, onde " $\rho_{\text{água}}$ " é a massa específica da água em kg/m³, " g " é a força da gravidade da terra e ΔH a variação da altura da água presente no tubo em "U" em metros. O resultado obtido é de 176,05 Pa para a elevação de pressão do ventilador, como pode ser observado abaixo:

$$\Delta p_t = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H$$

$$\Delta p_t = 997 \cdot 9,81 \cdot 0,018$$

$$\Delta p_t = 176,05 \text{ Pa}$$

1.19 Cálculo do salto energético da máquina

Para definir o salto energético do ventilador, utiliza-se a seguinte fórmula: $y = \frac{\Delta p_T}{\rho_{ar}}$, onde Δp_T é a elevação de pressão do ventilador e ρ_{ar} é a massa específica do ar. Com estes valores, o salto energético da máquina obtido é de 147,08 J/Kg, como pode ser observado abaixo:

$$y = \frac{\Delta p_T}{\rho_{ar}}$$

$$y = \frac{176,5}{1,2}$$

$$y = 147,08 \text{ J/kg}$$

1.20 Cálculo do rendimento total da máquina

Para definir o rendimento total deste ventilador Centrífugo, deve-se utilizar a seguinte fórmula: $n_T = \frac{Qy\rho_{ar}}{Pe}$, onde "Q" é a vazão do rotor, "y" é o salto energético do ventilador, " ρ_{ar} " é a massa específica do ar e "Pe" é a potência que temos no eixo de nosso ventilador.

Com base nestes dados, é obtido o resultado de 0,55 para o rendimento total deste ventilador, como pode ser observado abaixo:

$$n_T = \frac{Qy\rho_{ar}}{P_e}$$

$$n_T = \frac{1,47 * 147,08 * 1,2}{467,90}$$

$$n_T = 0,55 = 55 \%$$

Obs: devido ao procedimento "Prony" onde não foi possível acoplar 100% o braço, e também pelo fato do deslizamento da correia, pode-se obter um resultado maior de potência para este ventilador, e consequentemente um valor de rendimento total menor do que foi obtido.

1.21 Cálculo da potência recebida pelo fluido ao passar pela máquina

Para definir a potência recebida pelo ar ao passar pelo ventilador centrífugo será utilizado a fórmula: $P = \rho_{ar}Qy$, onde "Q" é a vazão do rotor, "y" é o salto energético do ventilador e " ρ_{ar} " é a massa específica do ar. Desta forma, obtém-se uma potência de 810,12 w, como pode ser observado abaixo:

$$P = \rho_{ar}Qy$$

$$P = 1,2 * 4,59 * 147,08$$

$$P = 810,12 \text{ w}$$

1.22 Cálculo do salto energético na pá da máquina de fluxo.

Para definir o salto energético na pá do ventilador basta dividirmos o salto energético da máquina pelo rendimento hidráulico da mesma, com isso a nossa fórmula será: $Y_{pá} = \frac{y}{n_h}$. Como não foi possível fazer a medida do valor do rendimento hidráulico na máquina será considerado que o valor é igual a 0,75, e desta forma obtém o valor de 196,11 J/Kg para o salto energético na Pá, como pode ser observado abaixo:

$$Y_{pá} = \frac{y}{n_h}$$

$$Y_{pá} = \frac{147,08}{0,75}$$

$$Y_{pá} = 196,11 \text{ J/kg}$$

1.23 Definição da altura útil de elevação do ventilador.

A altura útil do ventilador é fundamental em situações em que é preciso direcionar efetivamente o fluxo de ar em distâncias verticais específicas.

Para cálculo da altura de elevação útil do ventilador é utilizado a seguinte equação abaixo:

$$H_u = \left(\frac{P_3}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_3^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

$$H_u = \left(\frac{166,27}{12,1} - \frac{29,34}{12,1} \right) + \left(\frac{24,57^2}{2 \times 9,8} - \frac{19,34^2}{2 \times 9,8} \right)$$

$$H_u = (11,31) + (30,80 - 19,08)$$

$$H_u = 11,31 + 11,72$$

$$H_u = 23,03 \text{ mcf}$$

Onde P_2 é a elevação de pressão registrada na entrada do ventilador, P_3 a elevação de pressão registrada na saída do ventilador, V_3 e V_2 é a velocidade coletadas na saída e na entrada do ventilador respectivamente, g a aceleração da gravidade e γ o peso específico do ar.

1.24 Definição da potência útil do Ventilador.

A potência útil é de extrema importância para avaliar sua eficiência e realizar o dimensionamento correto do equipamento, para o cálculo é utilizado a equação apresentada abaixo:

$$P_u = \gamma * Q * H_u$$

$$P_u = 12,1 * 1,47 * 23,03$$

$$P_u = 409,63 \text{ w}$$

Onde γ é o peso específico do ar, Q a vazão do ventilador e H_u a altura útil de elevação.

1.25 Definição da potência total de elevação do ventilador centrífugo

Para cálculo iremos presumir que para a obtenção da altura útil teve-se uma perda, portanto deve-se considerar um valor estimado para as perdas provocadas pelos acoplamentos do ventilador, como os mancais e correia, e também por sua vedação, consideraremos um valor de perdas de aproximadamente 5%.

Para o cálculo da potência total de elevação do ventilador é utilizado a seguinte equação abaixo:

$$P_{el} = \gamma * Q * (H_u * 1,05)$$

$$P_{el} = 12,1 \times 1,47 \times (23,03 \times 1,05)$$

$$P_{el} = 430,12 \text{ w}$$

1.26 Definição do rendimento Mecânico

Para o cálculo do rendimento Mecânico do ventilador é utilizado a seguinte equação abaixo:

$$n_m = \frac{P_{el}}{P_e}$$

$$n_m = \frac{430,12}{467,9}$$

$$n_m = 0,92$$

1.27 Definição do rendimento Hidráulico

Para o cálculo do rendimento Hidráulico do ventilador é utilizado a seguinte equação abaixo:

$$n_h = \frac{P_u}{P_{el}}$$

$$n_h = \frac{409,63}{430,12}$$

$$n_h = 0,95$$

1.28 Definição do rendimento Total

Para o cálculo do rendimento total do ventilador é utilizado a seguinte equação abaixo:

$$n_t = \frac{P_u}{P_e}$$

$$n_t = \frac{409,63}{467,90}$$

$$n_t = 0,88$$

2 - VENTILADOR AXIAL

2.1 Dimensões Características:

Diâmetro do bocal de entrada: 47,5 Cm

Diâmetro do bocal de saída: 47,5 Cm

Diâmetro do Rotor: 22 Cm

2.2 Cálculo do ângulo de inclinação das pás “ β ” do ventilador:

Para realizar o cálculo do ângulo de inclinação da pá do ventilador axial é necessário medi-la por meio da tangente à face inferior do perfil como pode ser observado pela imagem abaixo:

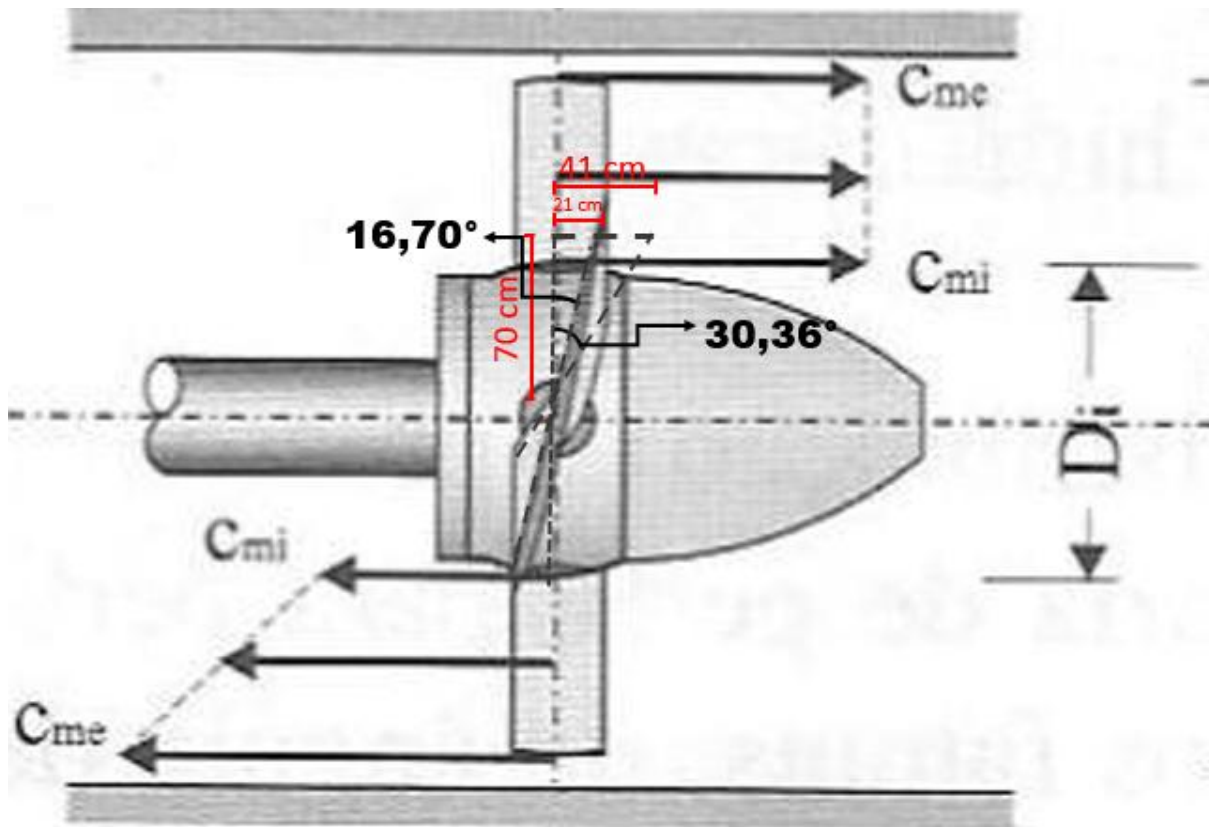


figura 10 – ângulo de inclinação da pá do ventilador

Com isso realiza-se o seguinte cálculo para obter-se o ângulo de inclinação da pá do ventilador centrífugo onde “Tan” é o valor da tangente do ângulo, “C.A” é o cateto adjacente ao ângulo e “C.O” é o cateto oposto ao ângulo do triângulo trigonométrico, como pode ser observado devemos achar o ângulo de entrada do ventilador e o de saída e depois tirar uma média dos ângulos. Pode-se observa o cálculo passo a passo abaixo:

Ângulo interno:

$$\tan \beta_i = \frac{C.o}{C.a}$$

$$\tan \beta_i = \frac{41}{70}$$

$$\beta_i = \text{Arctan}(41/70)$$

$$\beta_i = 30,36^\circ$$

Ângulo externo:

$$\tan \beta_e = \frac{C.o}{C.a}$$

$$\tan \beta_e = \frac{21}{70}$$

$$\beta_e = \arctan(21/70)$$

$$\beta_e = 16,70^\circ$$

Ângulo médio:

$$\beta_m = \frac{\beta_i + \beta_e}{2}$$

$$\beta_m = \frac{30,36 + 16,70}{2}$$

$$\beta_m = 23,53^\circ$$

Pode-se considerar para os cálculos que o ângulo de inclinação da pá do ventilador (β_5) é equivalente à $23,53^\circ$.

2.3 Medições das velocidades de sucção e recalque:

Para medir a velocidade de sucção foi utilizado o anemômetro como no tópico 1.3. Onde realiza-se a medida em quatro pontos e tira-se a média da velocidade medida pelo instrumento, a região onde realiza-se a medição é delimitada pela região azul na imagem demonstrada pela figura abaixo:

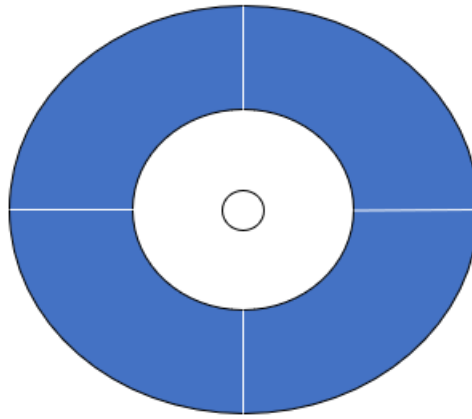


figura 11 – Região para medição das velocidades recalque/sucção

Com isso obtêm-se uma média de velocidade para de aproximadamente 6,2 m/s para o recalque e para sucção.

2.4 Composição do triângulo de velocidade

Para definir o triângulo de velocidade deste ventilador utiliza-se o triângulo conceito como base demonstrado na figura 5, com isso obtém-se o seguinte triângulo de velocidade para entrada e a saída do ventilador:

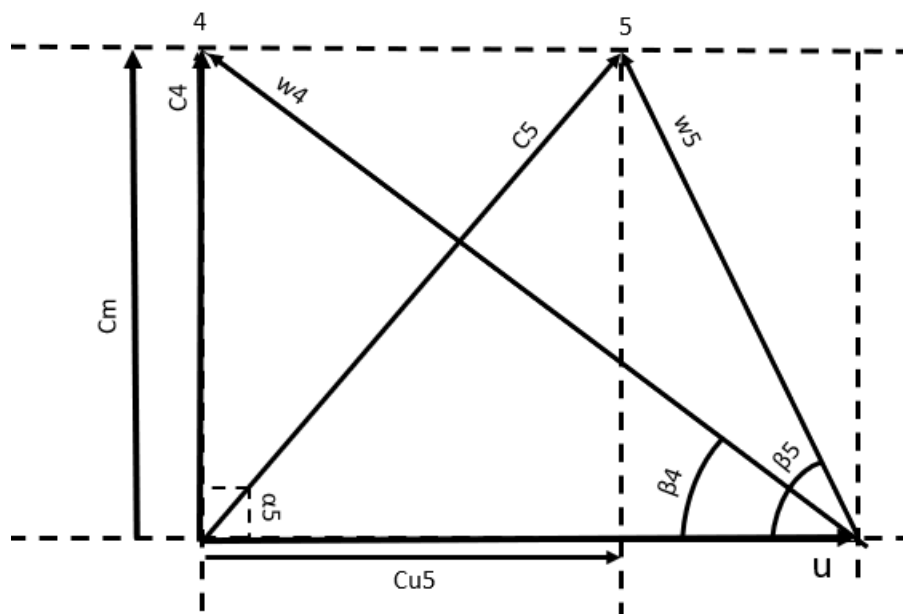


figura 12 – Triângulo de velocidade do ventilador axial

2.5 Cálculo do passo do ventilador axial

Para definir o passo do ventilador é necessário utilizar a seguinte fórmula: $t = \frac{\pi * D_m}{z}$, onde “Dm” é o diâmetro médio do ventilador e “z” que é o número de pás do ventilador. Com isso é possível realizar os seguintes cálculos para definição do passo do ventilador:

$$t = \frac{\pi * D_m}{z}$$

$$t = \frac{\pi * 0,3425}{6}$$

$$t = 0,17933m \text{ ou } 179,33 \text{ mm}$$

2.6 Cálculo da vazão de recalque/sucção

Para definir a vazão é necessário calcular a área de passagem do ar que é obtido pela fórmula: $A = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)$, onde D_e é o diâmetro externo do ventilador D_i é o diâmetro interno, na figura abaixo pode-se observar as medidas dos diâmetros interno e externo:

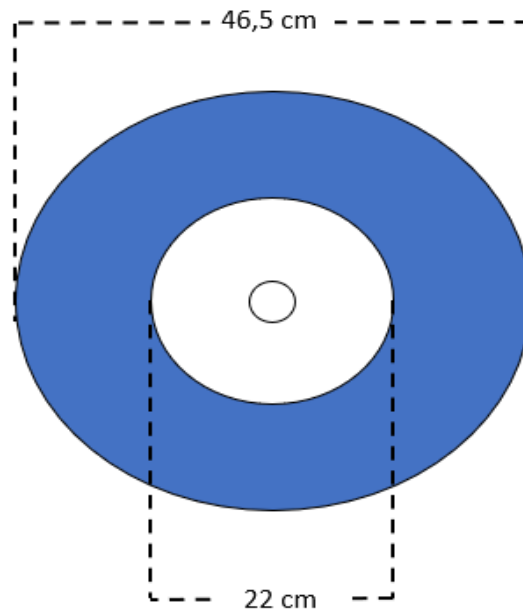


figura 13 – Figura com medida dos diâmetros

Segue o cálculo abaixo:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (0,465^2 - 0,22^2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (0,167825)$$

$$A = 0,132 \text{ m}^2$$

A partir da obtenção do valor da área, pode-se calcular a vazão pela fórmula $Q = v * A$, onde o "Q" representa a vazão do ar, "v" representa a velocidade média

do fluido e " A " representa a área de passagem do ar pelo ventilador, conforme abaixo:

$$Q = v * A$$

$$Q = 6,2 * 0,132$$

$$Q = 0,818 \text{ m}^3/\text{s}$$

Outra maneira de definir a vazão do ventilador utilizado é pela fórmula $Q = 8 * t * b * cm$, onde t é o passo do ventilador, b a espessura do eixo do ventilador e cm a velocidade medida com o anemômetro. Pode-se observar o cálculo abaixo:

$$Q = 8 * t * b * cm$$

$$Q = 8 * 0,1793326 * 0,09 * 6,2$$

$$Q = 0,801 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.7 Medição da velocidade de Rotação do Ventilador:

Para definir a velocidade de rotação do rotor da máquina de fluxo fora utilizado o tacômetro, onde se obteve a rotação de 1100 RPM.

Pode-se observar pela figura 6 a imagem do dispositivo utilizado para a medição da velocidade de rotação, abaixo têm-se a figura de onde foi realizada a medição:

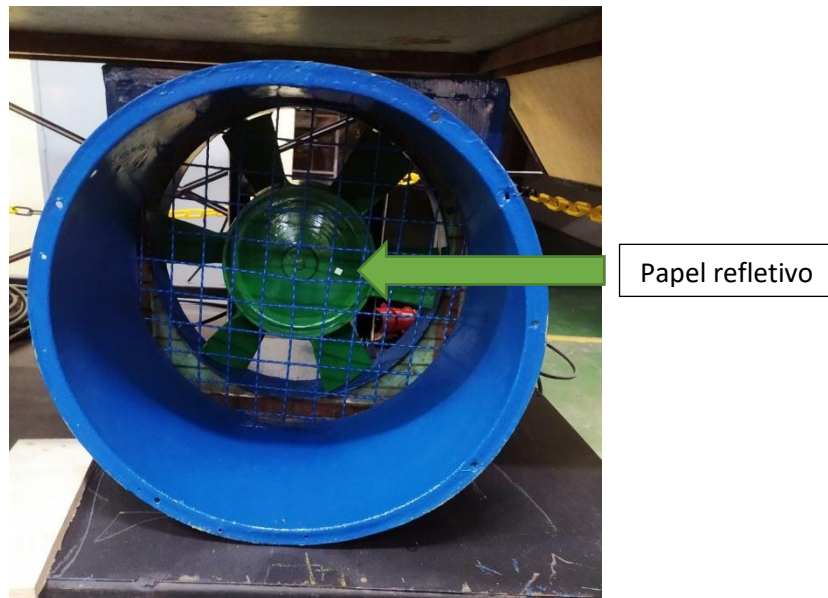


figura 14 – Figura do papel refletivo no ventilador

2.8 Cálculo da velocidade tangencial na entrada/saída

Para definir a velocidade tangencial do ventilador fora utilizado a fórmula a $U = \frac{\pi D_m N}{60}$ onde “Dm” é o diâmetro médio do ventilador e “N” é a velocidade de rotação do ventilador axial.

Com isso obtém-se a seguinte velocidade tangencial.

$$U = \frac{\pi D_m n}{60}$$

$$U = \frac{\pi * 0,3425 * 1100}{60}$$

$$U = 19,73 \text{ m/s}$$

2.9 Velocidade relativa da corrente fluida na saída (w_5)

Para definir a velocidade relativa da corrente fluida, é necessário utilizar o triângulo de velocidade com base nas relações trigonométricas, ao observar o triângulo realiza-se os seguintes cálculos:

$$\text{sen } \beta_5 = \frac{Cm}{w_5}$$

$$\text{sen } 23,53^\circ = \frac{6,2}{w_5}$$

$$w_5 = \frac{6,2}{0,4}$$

$$w_5 = 15,5 \text{ m/s}$$

2.10 Cálculo da componente tangencial da velocidade absoluta da corrente fluida na saída do ventilador (Cu5)

Ao analisar novamente o triângulo de velocidade obtido para o ventilador axial pode-se utilizar as relações trigonométricas para definir a componente tangencial da velocidade absoluta da corrente fluida na saída do ventilador (Cu5). Com isso realiza-se os seguintes cálculos abaixo para defini-la.

$$Cu5 = U5 - \frac{Cm}{\text{sen } 23,53^\circ}$$

$$Cu5 = 19,73 - \frac{6,2}{0,4}$$

$$Cu5 = 19,73 - 15,50$$

$$Cu5 = 4,23 \text{ m/s}$$

2.11 Cálculo do salto energético da pá com um número infinito de pás

Considerando a entrada do ventilador radial $\alpha_4 = 90^\circ$ e $Cu_4 = 0$. Com isso, é possível definir o salto energético para uma máquina de fluxo com números infinitos de pás, pela seguinte fórmula:

$$y_{pá \infty} = U_5 Cu_5$$

$$y_{pá \infty} = 19,73 * 4,23$$

$$y_{pá \infty} = 83,46 \text{ J/Kg}$$

2.12 Cálculo da elevação de pressão do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U”

A partir da fórmula: $\Delta_{P_t} = \rho_{água} . g . \Delta H$, onde " $\rho_{água}$ " é a massa específica da água, "g" é a força da gravidade da terra e ΔH a variação da altura da água presente no tubo em “U” em metros. Onde o deslocamento observado fora de aproximadamente 6mm. Com isso realiza-se os seguintes cálculos para definir a elevação de pressão.

$$\Delta_{P_t} = \rho_{água} . g . \Delta H$$

$$\Delta_{P_t} = 997 * 9,81 * 0,006$$

$$\Delta_{P_t} = 58,68 \text{ Pa}$$

2.13 Cálculo do salto energético da máquina de fluxo

Para definir o salto energético do ventilador, utiliza-se a seguinte fórmula: $y = \frac{\Delta p_T}{\rho_{ar}}$, onde Δp_T é a elevação de pressão do ventilador e ρ_{ar} é a massa específica do ar. Com estes valores, o salto energético da máquina pode ser observado abaixo:

$$y = \frac{\Delta p_T}{\rho_{ar}}$$

$$y = \frac{58,68}{1,2}$$

$$y = 48,90 \text{ J/Kg}$$

2.14 Cálculo da potência recebida pelo fluido ao passar pela máquina

Para definir a potência recebida pelo ar ao passar pelo ventilador centrífugo será utilizado a fórmula: $P = \rho_{ar} Q y$, onde " Q " é a vazão do rotor, " y " é o salto energético do ventilador e " ρ_{ar} " é a massa específica do ar. Desta forma, obtém-se a potência como pode ser observado abaixo:

$$P = \rho_{ar} Q y$$

$$P = 1,2 * 0,818 * 48,90$$

$$P = 48 \text{ w}$$

2.15 Definir rendimentos do ventilador Axial.

A partir do cálculo da potência recebida pelo fluido, é possível definir o valor estimativos para rendimento do ventilador, para cada rendimento temos:

- Rendimento Total: Com base na potência recebida pelo fluido, a literatura faz a estimativa de rendimento total de cerca de 0,80.

- Rendimento Volumétrico: Este rendimento para ventilador axial fica compreendido em valores entre 0,98 e 0,995, geralmente e desconsiderado esse rendimento para o cálculo de rendimento total do ventilador.

- Rendimento Mecânico: Para o rendimento mecânico a literatura considera o valor de 0,95, para o ventilador utilizado.

- Rendimento hidráulica: O rendimento Hidráulico para o ventilador axial é definido pela fórmula: $n_h = \frac{n_t}{n_v + n_m}$. Desta forma é possível determina-la conforme demonstrado abaixo:

$$n_h = \frac{n_t}{n_v + n_m}$$

$$n_h = \frac{0,80}{0,98 + 0,95}$$

$$n_h = 0,41$$

2.16 Definir o salto energético da pá da máquina de fluxo

Para definir o salto energético na pá do ventilador basta dividirmos o salto energético da máquina pelo rendimento hidráulico da mesma, com isso a nossa fórmula será: $Y_{pá} = \frac{y}{n_h}$. onde " $Y_{pá}$ " é o salto energético da pá, " y " é o salto energético da máquina de fluxo e " n_h " é o rendimento hidráulico do ventilador. Assim pode se observar o cálculo que fora realizado abaixo:

$$Y_{pá} = \frac{y}{n_h}$$

$$Y_{p\acute{a}} = \frac{48,90}{0,41}$$

$$Y_{p\acute{a}} = 119,27 \text{ J/Kg}$$

2.17 Definir a potência no eixo do ventilador

Para definir a potência no eixo da máquina de fluxo utilizada fora utilizado a fórmula: $P_e = \frac{QyP_{ar}}{n_t}$. Onde " P_e " é a potência no eixo da máquina de fluxo, " Q " é a vazão de ar do ventilador, " P_{ar} " massa específica do ar e " n_t " o rendimento total do ventilador. Com isso pode-se definir a potência do eixo ao realizar os seguintes cálculos abaixo:

$$P_e = \frac{QyP_{ar}}{n_t}$$

$$P_e = \frac{0,818 * 48,90 * 1,2}{0,80}$$

$$P_e = \frac{0,818 * 48,90 * 1,2}{0,80}$$

$$P_e = 60 \text{ w}$$

3 - VENTILADOR SIROCCO (Grande – modelo na cor laranja)



figura 15 – Ventilador Sirocco

3.1 Dimensões Características:

Diâmetro do bocal de entrada:	0,4 metros
Diâmetro do bocal de saída:	0,50m de largura e 0,50m de altura
Largura da pá na entrada e na saída do rotor:	410 milímetros
Diâmetro interno do Rotor:	340 milímetros
Diâmetro externo do Rotor:	400 milímetros

3.2 Cálculo do ângulo complementar “ ϕ ” ao ângulo “ β ” de inclinação das pás do ventilador:

Para realizar a medida do ângulo de inclinação da pá " β " foi necessária realizar a projeção do ventilador no software AutoCAD, onde obteve-se o ângulo complementar a ele como pode-se observar nas figuras abaixo.

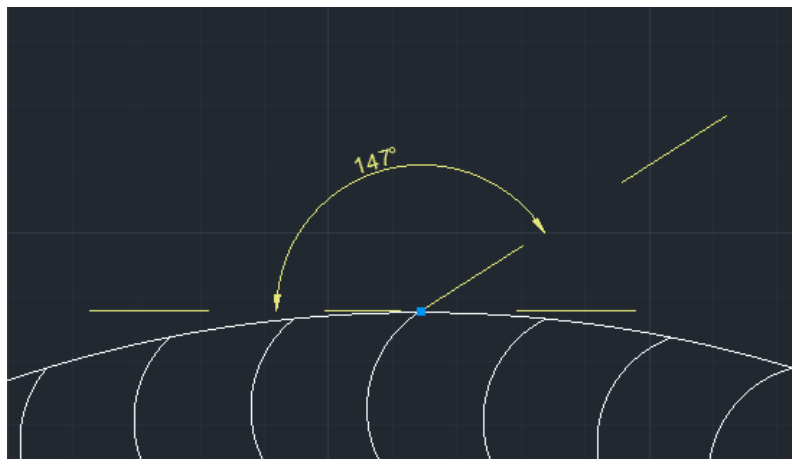


figura 16 – Ângulo de inclinação da pá do ventilador sirocco

Obteve-se o valor de 34° para o ângulo complementar da pá do ventilador, com isso têm-se que o ângulo de inclinação da pá do ventilador Sirocco é de 146° , ou seja, o valor de " β_5 ".

3.3 Medições das velocidades de sucção e recalque:

Para a medida das velocidades do ventilador Sirocco fora utilizado o anemômetro, onde obteve-se para a sucção e para o recalque a média de 11,08m/s e de 14,7m/s respectivamente.

3.4 Velocidade de Rotação do ventilador:

Com a utilização do tacômetro foi feita a medida da velocidade de rotação do ventilador, onde fora obtido o valor de 606 RPM.

3.5 Cálculo da velocidade tangencial na entrada/saída

Para definir a velocidade tangencial do ventilador foi utilizado a fórmula abaixo:

$$U = \frac{\pi D n}{60}.$$

Com isso, obtém-se para a entrada (índice 4) do perfil da hélice da máquina de fluxo a seguinte fórmula:

$$U_4 = \frac{\pi D_4 n}{60}$$

$$U_4 = \frac{\pi * 0,34 * 606}{60}$$

$$U_4 = 10,79 \text{ m/s}$$

Analogamente para obter-se a velocidade tangencial para o perfil de saída (índice 5) da pá da hélice do ventilador utiliza-se a seguinte fórmula:

$$U_5 = \frac{\pi D_5 n}{60}$$

$$U_5 = \frac{\pi * 0,4 * 606}{60}$$

$$U_5 = 12,69 \text{ m/s}$$

3.6 Composição do triângulo de velocidade:

Com a identificação do ângulo β , é possível realizar a construção do triângulo de velocidade, com isso tem-se para a saída do ventilador o seguinte triângulo de velocidade para a entrada e para a saída, respectivamente:

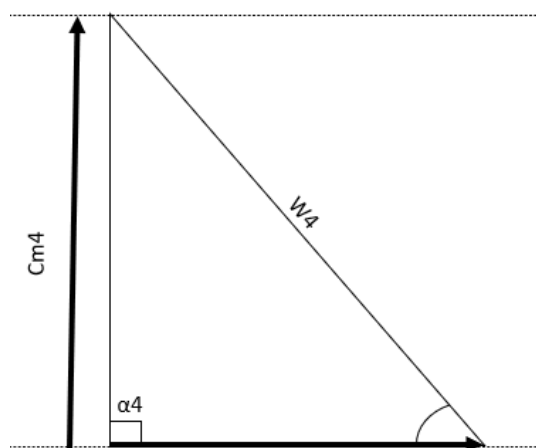


figura 17 – Triângulo de velocidade do ventilador na entrada do ventilador

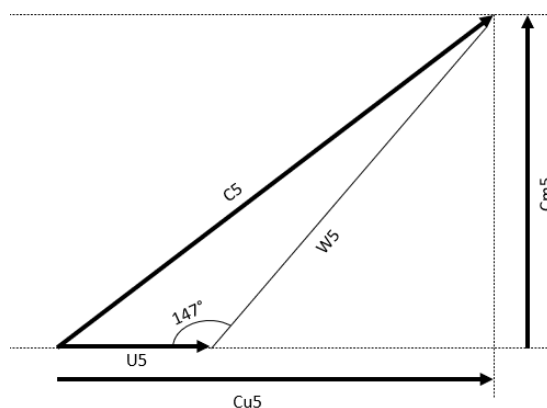


figura 18 – Triângulo de velocidade do ventilador na saída do ventilador

Onde:

$Cm5$ = É a velocidade meridiana, (velocidade real) na saída do ventilador medida com o anemômetro;

U_5 = É a velocidade tangencial na saída do ventilador calculada no tópico anterior.

Cu_5 = É a projeção da velocidade absoluta sobre a componente tangencial da velocidade.

3.7 Definir área de recalque:

Para definir a área de recalque com ventilador Sirocco foi utilizado a trena, onde obteve-se o valor de 50cm para a largura e 50cm para a altura, obtêm-se a área efetuando os seguintes cálculos abaixo:

$$A = L * H$$

$$A = 0,5 * 0,5$$

$$A = 0,25 \text{ m}^2$$

3.8 Definir a vazão na saída do ventilador:

Para definir a vazão na saída do ventilador foi utilizada a fórmula: $Q = Av$ onde a letra “Q” representa a vazão do ar, “A” representa a área em que o fluido passa e “V” a velocidade média do fluido. Com isso obteve-se a vazão no recalque de 4,12 m³/s como pode ser observado abaixo:

$$Q = Av$$

$$Q = 0,25 * 14,7$$

$$Q = 3,68 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.9 Cálculo da Vazão do rotor no recalque

Para definir a vazão do rotor deste ventilador, é necessário utilizar a fórmula: $Q_r = \pi D_5 B_5 C m_5$, onde "cm5" é a velocidade medida com o Anemômetro no recalque da máquina de fluxo, "B₅" é a largura da pá na saída do ar e "D₅" é distância do centro do rotor à saída de ar. Com isso foi obtido uma vazão de 7,57m³/s no rotor como pode ser observado abaixo:

$$Q_r = \pi D_5 B_5 C m_5$$

$$Q_r = \pi * 0,4 * 0,41 * 14,7$$

$$Q_r = 7,57 \text{ m}^3/\text{s}$$

3.10 Cálculo do rendimento volumétrico do ventilador

Para calcular o rendimento volumétrico do ventilador centrífugo deve-se utilizar a seguinte fórmula: $\eta_v = \frac{Q}{Q_r}$, onde "Q" é a vazão medida e "Q_r" é a vazão do rotor. Com isso obteve-se um rendimento volumétrico de 0,54 como pode ser observado abaixo:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q_r}$$

$$\eta_v = \frac{3,68}{7,57}$$

$$\eta_v = 0,49$$

3.11 Cálculo da componente tangencial da velocidade absoluta da corrente fluida na saída do ventilador (Cu5)

Para definir esta velocidade basta analisarmos o triângulo de velocidade, como a parte do triângulo que está desenhada com linha pontilhada possui o formato de um triângulo retângulo, pode-se fazer o uso das funções trigonométricas e do teorema de Pitágoras para definir o valor das incógnitas.

A equação matemática para definir a velocidade que se obtém é:

$$C_{U_5} = \frac{Cm_5}{\tan(20^\circ)} + U_5$$

Desta forma, se obtém a velocidade de 35,33 m/s, como pode ser observado abaixo:

$$C_{U_5} = \frac{Cm_5}{\tan(33^\circ)} + U_5$$

$$C_{U_5} = \frac{14,7}{\tan(33^\circ)} + 12,69$$

$$C_{U_5} = 22,64 + 12,69$$

$$C_{U_5} = 35,33 \text{ m/s}$$

3.12 Velocidade da partícula na saída do rotor (C₅)

Para definir esta velocidade é necessário observar o triângulo de velocidade da máquina de fluxo demonstrado na figura 6, com isso pode-se utilizar o teorema de Pitágoras para defini-la, pode-se observar o cálculo passo-a-passo abaixo:

$$C_5 = \sqrt{cm_5^2 + Cu_5^2}$$

$$C_5 = \sqrt{(14,7)^2 + (35,33)^2}$$

$$C_5 = \sqrt{1464,30}$$

$$C_5 = 38,27 \text{ m/s}$$

3.13 Cálculo do salto energético da pá considerando um número infinito de pás para a máquina de fluxo

Considerando a entrada do ventilador radial $\alpha_4 = 90^\circ$ e $Cu_4 = 0$. Com isso, é possível definir o salto energético para uma máquina de fluxo com números infinitos de pás, pela seguinte fórmula:

$$y_{p\acute{a} \infty} = U_5 Cu_5$$

Onde se obtém o resultado de 448,34 J/Kg, como pode ser observado abaixo:

$$y_{p\acute{a} \infty} = U_5 Cu_5$$

$$y_{p\acute{a} \infty} = 12,69 * 35,33$$

$$y_{p\acute{a} \infty} = 448,34 \text{ J/Kg}$$

3.14 Cálculo da elevação de pressão do ventilador com tubo de Pitot e manômetro em “U”

Com a utilização de um tubo em “U”, definiu-se a elevação de pressão do ventilador, para esta ação será acoplado um tubo de Pitot em ambas as faces do ventilador (entrada e saída). Por intermédio de um tubo em “U” acoplado a estes tubos de Pitot, é possível fazer o registro.

A partir da fórmula: $\Delta_{P_t} = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H$, onde " $\rho_{\text{água}}$ " é a massa específica da água, " g " é a força da gravidade da terra e ΔH a variação da altura da água presente no tubo em “U” em metros. O resultado obtido é de 215,17 Pa para a elevação de pressão do ventilador, como pode ser observado abaixo:

$$\Delta_{P_t} = \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \Delta H$$

$$\Delta_{P_t} = 997 \cdot 9,81 \cdot 0,022$$

$$\Delta_{P_t} = 215,17 \text{ Pa}$$

3.15 Cálculo do salto energético da máquina

Para definir o salto energético do ventilador, utiliza-se a seguinte fórmula: $y = \frac{\Delta_{P_T}}{\rho_{\text{ar}}}$, onde Δ_{P_T} é a elevação de pressão do ventilador e ρ_{ar} é a massa específica do ar. Com estes valores, o salto energético da máquina obtido é de 179,31 J/Kg, como pode ser observado abaixo:

$$y = \frac{\Delta_{P_T}}{\rho_{\text{ar}}}$$

$$y = \frac{215,17}{1,2}$$

$$y = 179,31 \text{ J/kg}$$

3.16 Cálculo da potência recebida pelo fluido ao passar pela máquina

Para definir a potência recebida pelo ar ao passar pelo ventilador centrífugo será utilizado a fórmula: $P = \rho_{ar} Q y$, onde " Q " é a vazão do rotor, " y " é o salto energético do ventilador e " ρ_{ar} " é a massa específica do ar. Desta forma, obtém-se uma potência de 260,36 w, como pode ser observado abaixo:

$$P = \rho_{ar} Q y$$

$$P = 1,2 * 7,57 * 179,31$$

$$P = 1628,85 \text{ w}$$

3.17 Cálculo do salto energético na pá da máquina de fluxo.

Para definir o salto energético na pá do ventilador basta dividirmos o salto energético da máquina pelo rendimento hidráulico da mesma, com isso a nossa fórmula será: $Y_{pá} = \frac{y}{n_h}$. Como não foi possível fazer a medida do valor do rendimento hidráulico na máquina será considerado que o valor é igual a 0,70 e desta forma obtém o valor de 256,16 J/Kg para o salto energético na Pá, como pode ser observado abaixo:

$$Y_{pá} = \frac{y}{n_h}$$

$$Y_{pá} = \frac{179,31}{0,70}$$

$$Y_{pá} = 256,16 \text{ J/kg}$$

4 - VENTILADOR SIROCCO (TÚNEL DE VENTO)