

Experimentación.

1. Introducción	17
2. Variables necesarias.....	18
3. Forma de la medición	22
4. Discretización	23
4.1. Soplane de rotor abierto	25
4.2. Soplane de rotor cerrado	25

1. Introducción

Antes de plantearse la forma de realizar las mediciones necesarias, se deben tener claros los resultados que se persiguen.

En primer lugar se quieren obtener las curvas características de las dos soplantes a estudiar, es decir la relación de compresión que da la máquina para un gasto de aire; en unas condiciones dadas de presión y temperatura; y un régimen de giro dado, en unas determinadas condiciones ambientales.

En términos matemáticos se trata de relacionar matemáticamente las variables que definen el comportamiento de la turbomáquina:

$$\frac{P_{02}}{P_{01}}, h_s, \Delta T_0 = f\left(\dot{m}, w, m, D, R, g\right)$$

Para que los resultados obtenidos sean extrapolables (aplicando el teorema “Pi” de Buckingham) al funcionamiento de cualquier otra máquina semejante y que funcionara con cualquier otro gas que no fuera aire, las curvas obtenidas se pasarán a variables adimensionales:

$$\frac{P_{02}}{P_{01}}, h_{ss}, \frac{\Delta T_0}{T_{01}} = f\left(\frac{\dot{m}\sqrt{gRT_{01}}}{D^2 P_{01}}, \frac{wD}{\sqrt{gRT_{01}}}, Re\right)$$

El rendimiento isoentrópico de la máquina se define:

$$h_{ss} = \frac{T_{02ss} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}} \quad \text{con} \quad T_{02s} = \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{g-1}{g}} T_{01}$$

El gas de trabajo está caracterizado por sus condiciones de entrada al rotor “ P_{01}, T_{01} ”, la constante politrópica del mismo “ g ”, la constante de Rydberg “ R ” del gas y la viscosidad cinemática “ m ”.

Las dimensiones del rotor por su diámetro “ D ”

El régimen del fluido: laminar, turbulento o intermedio por el número de Reynolds:

$$Re = \frac{r_{01} w D^2}{m}$$

Además se quiere caracterizar también la potencia eléctrica consumida por la turbomáquina.

$$W_e = \sqrt{3} V I \cos(j)$$

2. Variables necesarias.

Todos los demás resultados que se desean pueden evaluarse a partir de los ya mencionados, por tanto para cada medida se deberán anotar los valores de las siguientes magnitudes físicas:

- T_{01} : temperatura de remanso de entrada, coincidirá aproximadamente con la temperatura estática, dadas las bajas velocidades del fluido a la entrada del compresor:

$$T_{01} = T_1 + \frac{1}{2} \frac{c_1^2}{c_p}$$
$$c_1 \approx 5 \text{ m/s} \quad \text{---} \quad \frac{1}{2} \frac{c_1^2}{c_p} \approx 0.012$$

La medición se realiza directamente con un termómetro digital de una décima de grado de precisión.

- T_{02} : temperatura de remanso de salida, y se medirá con un termopar colocado en la mitad del tubo:

$$T_{02} = T_2 + \frac{c_2^2}{2c_p}$$

T_2 : es la temperatura estática de salida y se obtendrá restándole a la temperatura de remanso e término cinético.

- P_{01} : presión de remanso de entrada, coincide con la estática " P_a " que se mide con un barómetro analógico colocado cerca de la admisión.

- P_{02} : presión de remanso a la salida, se obtiene de la presión estática " P_{02} " a través de la expresión:

$$P_{02} = \left(\frac{T_{02}}{T_2} \right)^{\frac{g}{g-1}} P_2$$

“ P_2 ” se obtiene sumando la presión atmosférica a la lectura de un manómetro conectado a la primera toma de presión del venturi.

- w : es la velocidad de giro del rotor, y la proporciona el variador de frecuencia.
- V : es la tensión de alimentación del motor eléctrico.
- I : es la intensidad de alimentación del motor.
- $\dot{m}$: es el gasto que atraviesa la turbomáquina, y como ya se ha señalado se obtiene indirectamente a través de la caída de presión en el Venturi.

$$\dot{m} = e C Z_D Z_{Re} a E \sqrt{2 \Delta P r}$$

La explicación detallada de esta fórmula puede verse en el anexo dedicado a medidores de caudal.

- ΔP : es la caída de presión en el *Venturi*, se obtiene directamente de un manómetro digital con dos tomas de presión, la positiva conectada a la toma de presión aguas arriba del Venturi, y la negativa conectada a la garganta, del mismo.

➤ $r = r_2$: es la densidad de salida del fluido:

$$r_2 = K \left(\frac{(P_2 - P_{w2})PM_a}{RT_2} + \frac{P_{w2}PM_w}{RT_2} \right) r_2$$

“ P_{w2} ” es la presión parcial de vapor a la salida de la soplante, para calcularla se toma el dato de la humedad relativa a la entrada de la turbomáquina: “ w_1 ” medido con un higrómetro analógico, la humedad relativa es el cociente entre la presión parcial de vapor y la de saturación:

$$w_1 = \frac{P_{w1}}{P_{w1,sat}} \quad P_{w1,sat} = f(T_1)$$

Una vez calculada “ $P_{w1,sat}$ ” se despeja “ P_{w1} ”, y se calcula la presión parcial de aire seco **Pa1**:

$$P_{a1} = P_1 - P_{w1}$$

$$r_{a1} = K \frac{P_{a1}PM_a}{RT_1} \quad r_{w1} = K \frac{P_{w1}PM_w}{RT_1}$$

Para calcular la presión parcial de vapor a la salida, se tendrá en cuenta que la relación vapor de agua-aire seco (humedad absoluta) se mantendrá constante:

$$W_1 = \frac{r_{w1}}{r_{a1}} = cte$$

$$P_2 = P_{a2} + P_{w2} = \frac{RT_2}{K} \left(\frac{r_{a2}}{PM_a} + \frac{r_{w2}}{PM_w} \right) = \frac{RT_2 r_{a2}}{K} \left(\frac{1}{PM_a} + \frac{W_1}{PM_w} \right)$$

Se despeja la densidad de aire seco **ra2**, y de ahí se obtienen las presiones parciales y la densidad de salida.

Experimentación.

En resumen tenemos por un lado como variables independientes:

- ✓ Condiciones ambientales: T_1, P_1, w_1
- ✓ Salto de presiones, en el Venturi: ΔP
- ✓ Velocidad del rotor: w

Y como variables dependientes:

- ✓ Condiciones de salida del fluido: T_2, P_2
- ✓ Alimentación del motor eléctrico: V, I

Como las condiciones ambientales están incluidas en el resultado final a obtener, solo se deberá actuar sobre dos variables independientes, la caída de presión en el Venturi, y la velocidad del rotor.

La velocidad del rotor se controla con el variador de frecuencia, y la caída de presión, que es aproximadamente proporcional al cuadrado del gasto con la válvula de mariposa.

3. Forma de la medición

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente como y donde se toman cada una de las medidas a las que se ha hecho referencia anteriormente.

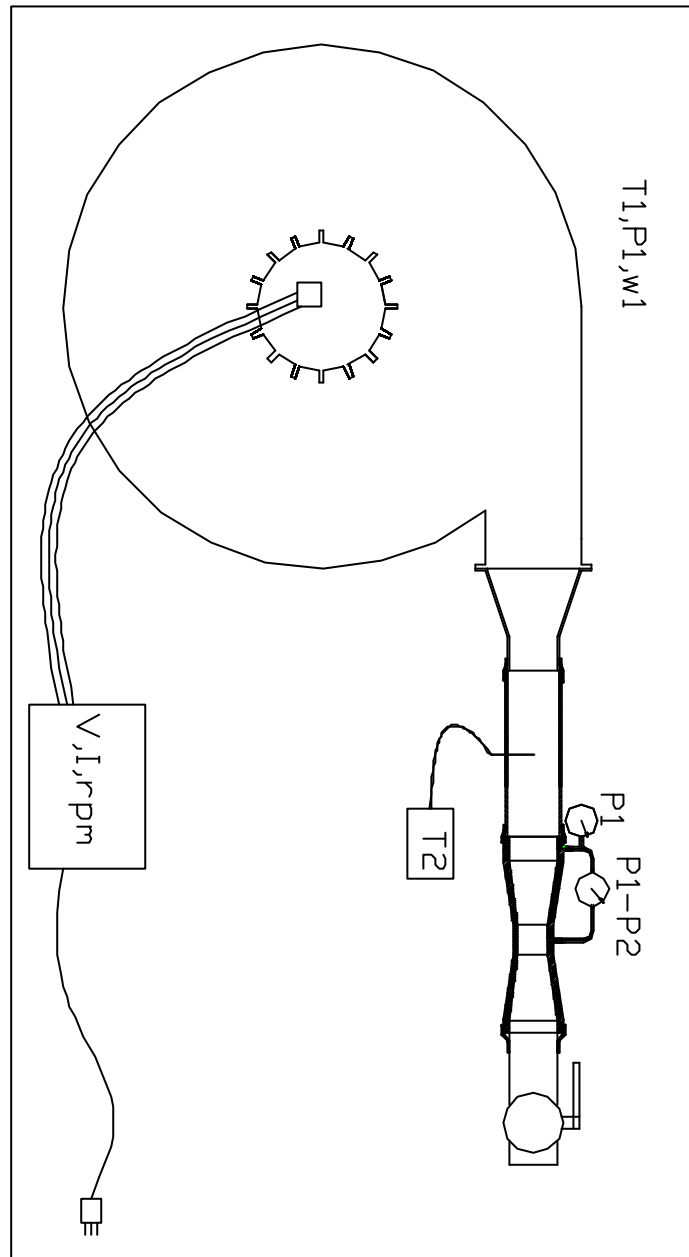


Fig. 3.1

4. Discretización

El objetivo de la misma es obtener para las variables dependientes funciones de interpolación de las dos variables independientes (**DP, w**), lo ideal sería tomar puntos de modo que al representarlos en un plano formaran una malla rectangular.

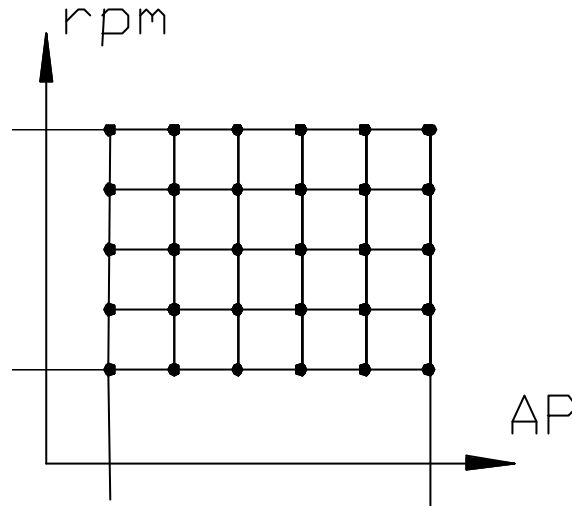


Fig. 3.2

La forma de la malla no puede ser rectangular porque a medida que aumentamos el régimen de giro del rotor, el gasto máximo que proporciona la turbomáquina aumenta, y en consecuencia la caída de presión en el Venturi aumenta. Además el gasto se regula cerrando o abriendo la válvula, y esto no es lo suficientemente preciso, para que el incremento de gasto sea uniforme entre todos los puntos, sí se puede conseguir no obstante que la diferencia de revoluciones sea constante al disponer el variador de un mando digital, con lo que la malla, resultante tiene una forma similar a la figura:

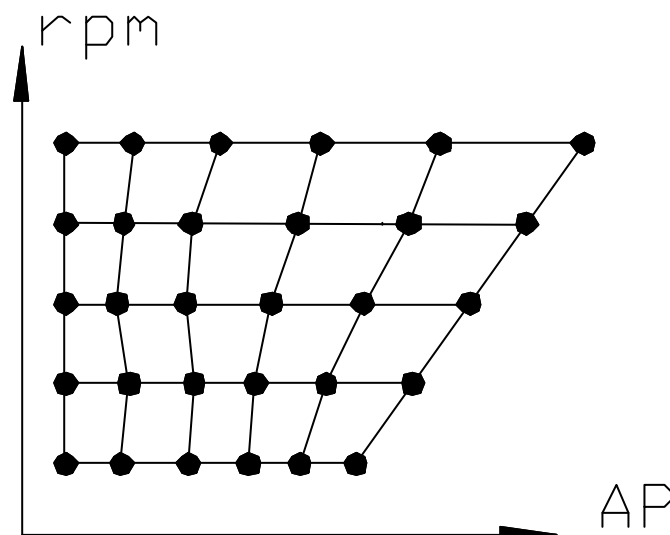


Fig. 3.3

Experimentación.

Es fundamental para el cálculo algebraico de interpolación que haya el mismo número de puntos en cada línea de la malla, ya que así pueden introducirse como una matriz. Para recoger los datos se recorrerá la malla horizontalmente, se fijará un régimen de giro con el variador de frecuencia, y se tomarán puntos de un extremo a otro variando la posición de la válvula, aunque no pueda conseguirse un espaciado regular de los mismos, siempre habrá el mismo número de puntos por fila, y se procurará estén lo más uniformemente distribuidos posible.

En cada punto de la malla se anotarán los valores de todas las variables dependientes e independientes, en este proceso caben destacar los siguientes aspectos:

- Las anotaciones se hacen manualmente lo que implica que no son simultaneas
- Todas las mediciones realizadas con sensores digitales: " $\Delta P, T_2, P_2, T_1, P_1, V, I$ "; fluctúan continuamente, por lo que en cada punto de medición, se efectúan seis anotaciones de cada una y se anota el valor medio.
- Para cada valor del régimen de giro se tomarán veinte puntos de medida.
- Cuando el gasto tiende a cero, el error en la medida del caudal se hace muy grande, y las fluctuaciones que se producen en " ΔP ", son del orden de " ΔP ", por lo que para cada régimen de giro las mediciones llegan al valor nulo de la caída de presión. Por esta misma razón se establece un límite mínimo de vueltas del rotor, ya que el caudal suministrado por las soplantes es demasiado pequeño cuando estas trabajan por debajo de la mitad de su régimen máximo.

4.1. Soplane de rotor abierto

El rango de régimen de giro del rotor va de 1500 a 3600 revoluciones por minuto, tomándose veinte puntos para cada velocidad del rotor, las velocidades de giro elegidas son:

1500 1750 2000 2250 2500 2750 3000 3350 3600

De este modo para cada variable de estudio, los valores se almacenan en una matriz, de dimensión 9 x 20, de tal modo que una vez acabado el experimento, se tiene toda la información necesaria del problema en nueve matrices.

4.2. Soplane de rotor cerrado

Al ser menor el diámetro del mismo, el gasto cae a valores poco significativos a una velocidad mayor del rotor, por lo que las velocidades de giro elegidas son:

2000 2250 2500 2750 3000 3350 3600

Las matrices de datos en este caso son de dimensión 7 x 20

A modo de ejemplo se presenta la matriz de datos correspondiente a ΔP (mbar)

1500 r.p.m	1750 r.p.m	2000 r.p.m	2250 r.p.m	2500 r.p.m	2750 r.p.m	3000 r.p.m	3350 r.p.m	3600 r.p.m
0,32	0,45	0,90	1,00	1,00	1,00	0,45	0,87	4,40
0,85	1,27	2,10	2,10	4,00	2,00	0,90	1,97	9,83
1,53	2,95	4,00	4,10	6,00	3,85	3,47	5,18	14,85
2,37	4,12	6,20	6,17	7,93	8,07	6,42	10,23	19,85
3,17	5,17	8,15	8,13	11,93	12,03	10,03	15,17	25,53
4,05	6,12	10,02	9,95	15,55	16,17	15,00	20,25	30,03
4,93	7,05	11,88	12,12	19,92	20,20	20,43	24,87	35,00
5,77	8,08	14,07	14,08	24,77	23,88	25,07	30,78	39,83
6,97	10,42	15,97	15,85	28,22	28,20	30,03	35,22	45,80
8,02	12,07	18,28	18,07	30,52	32,43	34,78	40,10	50,75
9,92	13,88	20,22	20,97	32,53	35,75	40,15	44,88	53,90
11,07	16,38	22,07	24,10	37,13	40,43	44,48	49,77	61,32
12,00	18,20	23,90	27,23	40,23	44,65	49,75	56,07	65,03
12,75	20,25	26,13	29,12	44,23	49,80	55,07	60,38	71,33
13,98	22,67	28,55	34,67	48,82	55,60	59,90	63,77	75,13
14,68	23,73	30,15	37,55	50,80	60,40	64,93	69,65	79,13
15,82	25,38	31,80	42,48	54,85	64,77	70,52	76,13	91,15
18,15	27,42	33,60	45,82	59,47	69,73	74,82	81,63	97,45
20,38	30,20	35,68	50,92	60,00	72,78	79,35	92,43	110,70
22,32	30,98	39,33	50,23	62,88	75,18	86,65	106,18	119,50

Tabla 3.1. Puntos de medida para la soplante de rotor abierto (salto de presión en el Venturi en (mbar)