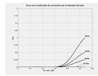
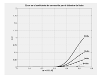
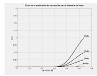
Anexo III Análisis de errores





Anexo III Análisis de errores



1. Introducción

Dos de las variables más importantes en la caracterización del comportamiento de una turbomáquina, como son el gasto y el rendimiento isentrópico se obtienen como resultado de cálculos en los que intervienen una gran cantidad de variables físicas y de factores empíricos; por lo que es importante conocer los errores que se cometen en el cálculo de las mismas, para tener un orden de magnitud de la exactitud de dichas variables.

2. Error en la medida del gasto

El error o incertidumbre en la medida del gasto por diferencia de presiones solo puede ser propiamente calculado por comparación directa con otro método de mayor precisión como métodos volumétricos directos o gravimétricos. No obstante el error puede estimarse sin experimentación teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Deben considerarse las diferentes fuentes de error.
- Valorar numéricamente cada una de estas fuentes de error.
- Relacionar los distintos errores parciales para obtener el error global.

Todas las fuentes de error que contribuyen a la diferencia entre el flujo real y el medido entran dentro de la estimación de precisión, estas fuentes de error se definen como errores sistemáticos, pero el signo de estos errores no tiene por que siempre el mismo, y el total de todos estos errores puede cancelarse parcialmente.

Los errores aleatorios son aquellos que pueden eliminarse estadísticamente por repetición del experimento.

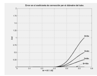
2.1. Fuentes de error.

Las primeras fuentes de error que afectan al error en la medida del flujo son los errores de las cantidades que aparecen intrínsecamente en el cálculo del flujo:

$$m = e\, C\, Z_D\, Z_{\mathrm{Re}}\, a\, E \sqrt{2\,\Delta P\, r}\ ,$$ es decir:

$$e, C, Z_D, Z_{\mathrm{Re}}, a, E, \Delta P, r$$

El error total o primario en cada una de estas cantidades depende de los errores en cada una de las magnitudes que se necesitan para calcularlos, o errores secundarios.



2.2. Tolerancias.

Se define como tolerancia a la magnitud del error de una cantidad dada, y se expresará con porcentaje, simbolizándose con el signo **X.**

En la norma británica se define tolerancia como los límites (superior o inferior) del intervalo alrededor del valor aparente, expresados como porcentaje del mismo; dentro del cual hay un 95 por ciento de probabilidades de encontrar el valor real.

Ej: $C = 0.96,\ X_C = 0.5 \quad \longrightarrow$

Hay un 95 % de probabilidades de que:

$$0.597 \leq C \leq 0.603$$

2.2.1 Cálculo de la tolerancia de un valor medio.

Para calcular la tolerancia de una medida que ha sido realizada como la media de una serie de medidas individuales, hay que calcular la desviación estándar de la medida, la desviación estándar de la media, y los límites de la zona de 95 %

La desviación estándar o típica "s" de una magnitud "x" medida "n" veces, de media "m" se define como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - 1)}{n-1}}$$

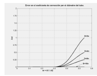
La desviación estándar de la media se define como:

$$s' = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Los límites de 95% de confianza del valor medio de obtienen multiplicando la desviación estándar de la media por un factor estadístico "t", que depende del número de medidas "n"**:**

n =	**6**	**8**	**10**	**15**	**>= 30**
t =	**2.6**	**2.4**	**2.3**	**2.1**	**2.0**

La tolerancia así calculada da el intervalo centrado en la media en el que hay un 95% de probabilidades de encontrar la media si se realizaran infinitas medidas.



2.2.2 Estimación de la tolerancia de un valor sencillo.

Cuando el valor de una cantidad se determina mediante una medida única, se estima que el valor real cae dentro de un cierto intervalo de probabilidad uniforme (distribución rectangular de probabilidad), la desviación estándar de esta distribución de límites $\pm X$, es $\frac{X}{\sqrt{3}}$, y los límites de 95% de confianza referidos a una distribución normal son $\pm 1.15X$, que caen fuera del intervalo, por lo que es suficiente tomar $\pm X$ **.**

2.2.3 Estimación de la tolerancia de factores empíricos.

Los valores de las tolerancias en tantos por cientos para los factores "C, Z_D"; (X_C, X_D) se obtienen a partir de las siguientes gráficas:

Error en el coeficiente básico

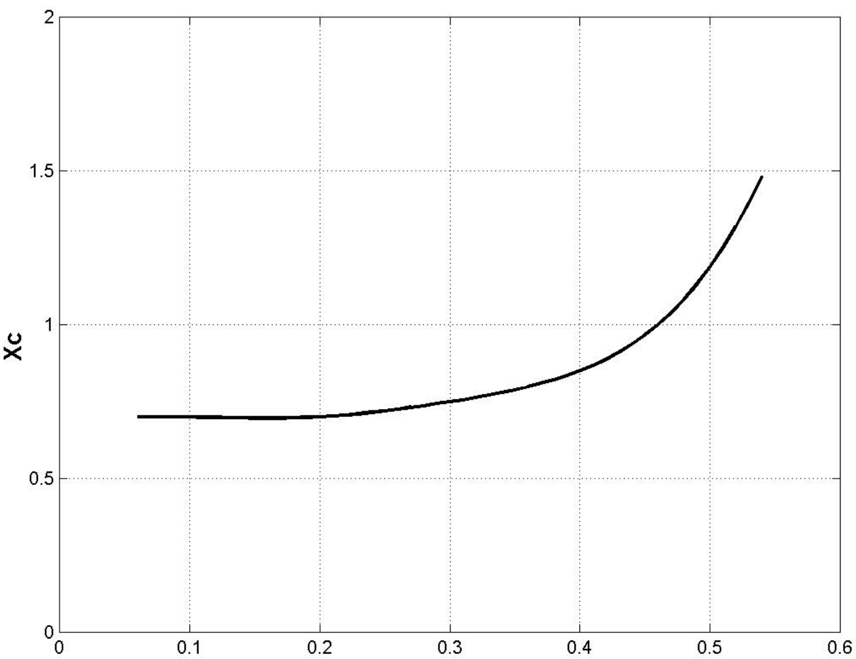
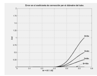


Fig III.1



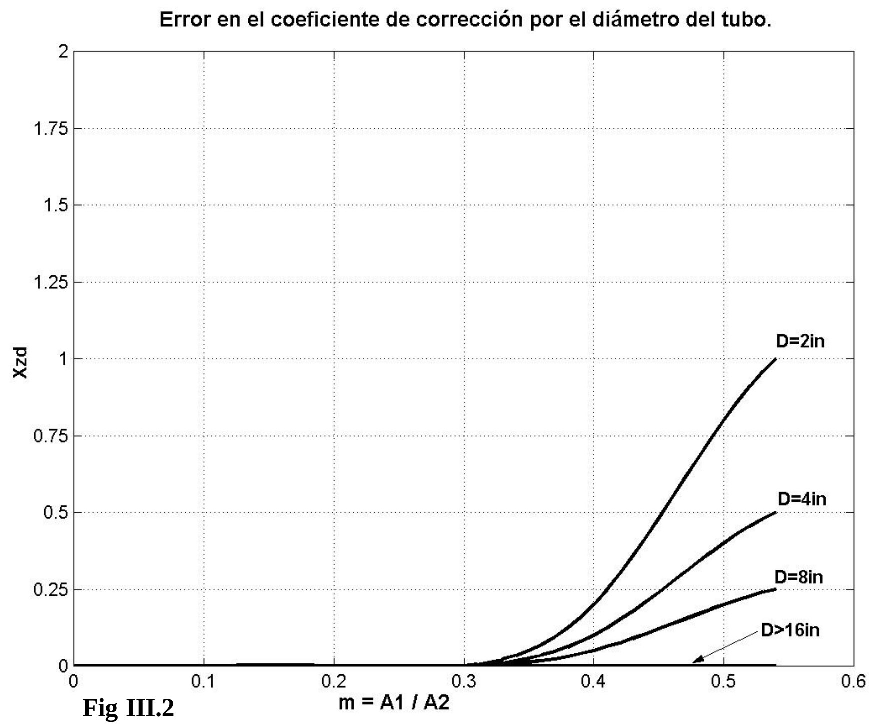


Fig III.2

Las tolerancias de “Z_{Re}” y de “e”, se obtienen de las siguientes expresiones:

$$X_{Z_{\mathrm{Re}}} = 33\left(1 - Z_{\mathrm{Re}}\right)$$

$$X_e = 10\left(1 - e\right)$$

2.2.4. Método para combinar tolerancias.

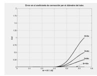
Cuando una variable y, se obtiene indirectamente como una función **f**, dependiente de las variables x1, x2…, xN; la tolerancia en la variable y se obtiene de acuerdo con la siguiente expresión en función de las tolerancias de las variables xi.

$$y = f\left(x_1,\ x_2, \ldots., x_n\right)$$

$$X_y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i}{y}\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 X_{x_i}^{\ 2}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} C_{x_i}^2 X_{x_i}^2}$$

Como se observa en la expresión anterior el coeficiente C_{x_i} es una medida de cómo afecta el error de la variable “x_i” a la función “y”.

Por tanto la tolerancia en el gasto vendrá dada por:



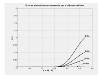
$$m = C\, Z_D\, Z_{\mathrm{Re}}\, a\; E \sqrt{2 \Delta P\, r}$$

$$X_m = \sqrt{X_C^2 + X_{Zd}^2 + X_{Z\,\mathrm{Re}}^2 + X_a^2 + X_e^2 + X_E^2 + \frac{X_{\Delta P}^2 + X_r^2}{2}}$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones para el cálculo de "E" y "a" y "r", desarrollando la expresión se obtiene que:

$$X_m = \sqrt{X_C^2 + X_{Zd}^2 + X_{Z\,\mathrm{Re}}^2 + X_e^2 + \left(\frac{2m^2}{1-m^2}\right)^2 X_D^2 + \left(\frac{2}{1-m^2}\right)^2 X_d^2 + \frac{X_{\Delta P}^2 + X_{P_2}^2 + X_{T_2}}{2}}$$

Una vez se ha relacionado el error en el gasto con el error en cada una de las variables de las que depende, se comenzará por estimar el error de cada una de esas variables



2.3 Diferencia de presiones DP en el Venturi

La diferencia de presiones se mide en un manómetro digital, para cada valor se toman 6 medidas, por tanto el error en la medida dependerá de estos seis valores, debido a que los valores de **DP** son muy dispersos, se calculará un error para cada punto de medida; a continuación y para tener una idea del orden de magnitud del mismo se estimarán los errores para los puntos correspondientes a la curva característica de la soplante de rotor abierto a 3600 **r.p.m.**

Dp (mbar)	s	s '	XDp %
119,50	2,26	0,92	**2,40**
110,70	1,75	0,72	**1,86**
97,45	1,87	0,76	**1,98**
91,15	1,08	0,44	**1,15**
79,13	1,36	0,56	**1,45**
75,13	1,56	0,64	**1,65**
71,33	0,94	0,39	**1,00**
65,03	1,38	0,56	**1,46**
61,32	1,03	0,42	**1,10**
53,90	0,71	0,29	**0,75**
50,75	0,42	0,17	**0,45**
45,80	0,35	0,14	**0,37**
39,83	0,41	0,17	**0,43**
35,00	0,21	0,09	**0,22**
30,03	0,14	0,06	**0,15**
25,53	0,18	0,07	**0,19**
19,85	0,10	0,04	**0,11**
14,85	0,10	0,04	**0,11**
9,83	0,08	0,03	**0,09**
4,4	0,11	0,04	**0,12**

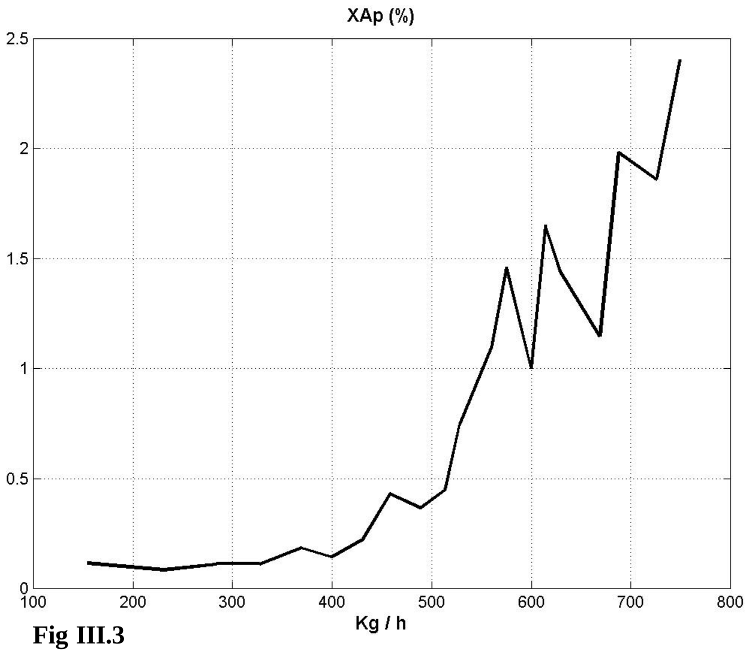


Fig III.3

Se repetirá el proceso con las demás variables.

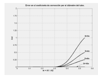
2.4. Presión de salida

La presión de salida también se mide con un manómetro, como este mide presión manométrica, habrá que tener en cuenta el error en la medición de la presión atmosférica o presión de entrada:

$$P_2 = p_2 + P_{atm}$$

$$X_{P_2} = \sqrt{\left(C_{p_2} X_{p_2}\right)^2 + \left(C_{P_{atm}} X_{P_{atm}}\right)^2}$$

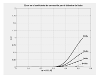
$$C_{p_2} = \frac{p_2}{P_{atm} + P_2} \qquad C_{p1} = \frac{P_{atm}}{P_{atm} + P_2}$$



2.4.1. Presión manométrica de salida p2

El procedimiento para estimar el error en la presión manométrica de salida es análogo al anterior, ya que también se obtiene como la media de seis medidas

m (Kg/h)	p2	s	s '	X_{p2} %
749.3	31.97	0.86	0.35	**0.92**
725.8	33.77	0.30	0.12	**0.32**
687.6	35.75	0.31	0.13	**0.33**
668.8	37.48	0.56	0.23	**0.59**
628.6	39.58	0.53	0.22	**0.57**
614.2	40.55	0.14	0.06	**0.15**
599.8	41.05	0.26	0.11	**0.27**
575.2	42.38	0.37	0.15	**0.39**
560.1	43.77	0.30	0.12	**0.32**
527.9	45.23	0.19	0.08	**0.20**
513.0	46.05	0.36	0.15	**0.38**
489.0	47.08	0.25	0.10	**0.26**
457.8	48.17	0.29	0.12	**0.31**
430.5	49.48	0.21	0.09	**0.23**
399.6	50.67	0.16	0.07	**0.17**
369.6	51.87	0.51	0.21	**0.54**
327.0	52.97	0.14	0.06	**0.15**
283.5	54.10	0.14	0.06	**0.15**
231.0	55.07	0.16	0.07	**0.17**
154.5	56.43	0.16	0.07	**0.17**



2.4.2. Presión de entrada (atmosférica)

La presión atmosférica se mide con un barómetro analógico cuya escala mínima es de un milibar, por lo que:

$$Error_{P_{atm}} = \pm 0.5\, mbar \qquad \rightarrow \qquad X_{P_{atm}} = \frac{50\, mbar}{P_{atm}} (\%)$$

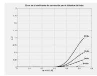
2.4.3. Presión absoluta de salida

m (Kg/h)	Xp2 %	XPatm %	Cp2	Cpatm	XP2 %
749.3	0.917	0.049	0.031	0.9699	**0.055**
725.8	0.320	0.049	0.033	0.9682	**0.048**
687.6	0.327	0.049	0.035	0.9664	**0.048**
668.8	0.591	0.048	0.036	0.9649	**0.051**
628.6	0.567	0.048	0.038	0.9630	**0.052**
614.2	0.146	0.048	0.039	0.9622	**0.047**
599.8	0.275	0.048	0.040	0.9617	**0.048**
575.2	0.394	0.048	0.041	0.9605	**0.049**
560.1	0.320	0.048	0.042	0.9593	**0.048**
527.9	0.198	0.048	0.044	0.9580	**0.047**
513.0	0.378	0.048	0.045	0.9572	**0.049**
489.0	0.264	0.048	0.046	0.9563	**0.048**
457.8	0.312	0.048	0.047	0.9554	**0.049**
430.5	0.227	0.048	0.048	0.9542	**0.048**
399.6	0.173	0.048	0.049	0.9532	**0.047**
369.6	0.544	0.048	0.050	0.9521	**0.054**
327.0	0.145	0.048	0.051	0.9511	**0.047**
283.5	0.150	0.048	0.052	0.9501	**0.047**
231.0	0.173	0.048	0.053	0.9493	**0.047**
154.5	0.173	0.048	0.055	0.9481	**0.047**

2.5. Temperatura de salida

La temperatura de salida de la soplante se mide con un termómetro digital, marca Fulke cuya precisión máxima es de una décima de grado Kelvin, por lo que el error máximo que se comete en la medida es de media décima de grado:

$$Error_{T_2} = \pm 0.05\, K \qquad \rightarrow \qquad X_{T_2} = \frac{5\, K}{T_2} (\%)$$



m (Kg/h)	T2 (ºC)	T2 (ºK)	XT2 %
749.3	33.2	306.35	0.0163
725.8	33.6	306.75	0.0163
687.6	33.9	307.05	0.0163
668.8	34.2	307.35	0.0163
628.6	34.3	307.45	0.0163
614.2	34.5	307.65	0.0163
599.8	34.8	307.95	0.0162
575.2	35.0	308.15	0.0162
560.1	35.1	308.25	0.0162
527.9	35.2	308.35	0.0162
513.0	35.7	308.85	0.0162
489.0	35.8	308.95	0.0162
457.8	36.1	309.25	0.0162
430.5	36.3	309.45	0.0162
399.6	37.3	310.45	0.0161
369.6	37.3	310.45	0.0161

2.6. Estimación de XC

El margen de error del coeficiente básico solo depende de la geometría del problema, a través de la relación de áreas del Venturi, por lo que es un valor constante:

$$m = 0.38 \quad \rightarrow \quad X_C = 0.8\%$$

2.7. Estimación de XZD

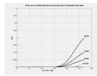
El error solo depende de la relación de áreas, y del diámetro del tubo:

$$m = 0.038 \quad D = 65mm = 2.6'' \quad \rightarrow \quad X_{Z_D} = 0.2\%$$

2.8. Estimación de XZRe

El error asociado a la corrección por el número de Reynolds es tanto mayor cuanto menor es el flujo, es decir cuanto más se aleje **ZRe** de la unidad.

$$X_{Z_{\mathrm{Re}}} = 33\left(1 - Z_{\mathrm{Re}}\right)$$



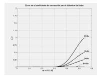
m (Kg/h)	ZRe	XZRe %
749.3	1.000	0.000
725.8	1.000	0.000
687.6	1.000	0.000
668.8	1.000	0.000
628.6	1.000	0.006
614.2	1.000	0.010
599.8	1.000	0.013
575.2	0.999	0.019
560.1	0.999	0.022
527.9	0.999	0.029
513.0	0.999	0.033
489.0	0.999	0.038
457.8	0.999	0.045
430.5	0.998	0.052
399.6	0.998	0.059
369.6	0.998	0.065
327.0	0.998	0.075
283.5	0.997	0.085
231.0	0.997	0.097

2.9. Error en el coeficiente de expansión Xe

El error aumenta cuando el valor del coeficiente se aleja de la unidad, lo que ocurre cuando aumenta la caída de presión en el estrechamiento, es decir cuando aumenta el flujo:

$$X_e = 10(1 - e)$$

m (Kg/h)	e	Xe %
749.3	0.926	**0.743**
725.8	0.931	**0.687**
687.6	0.940	**0.603**
668.8	0.944	**0.562**
628.6	0.951	**0.486**
614.2	0.954	**0.461**
599.8	0.956	**0.438**
575.2	0.960	**0.398**
560.1	0.962	**0.375**
527.9	0.967	**0.329**
513.0	0.969	**0.310**
489.0	0.972	**0.279**
457.8	0.976	**0.242**
430.5	0.979	**0.213**
399.6	0.982	**0.182**
369.6	0.985	**0.155**
327.0	0.988	**0.120**



2.10. Error en la medición de los diámetros del Venturi.

La precisión máxima del calibre es de una décima de milímetro, por lo que:

$$D = 65mm \quad \rightarrow \quad X_D = 0.077\%$$

$$d = 40mm \quad \rightarrow \quad X_d = 0.125\%$$

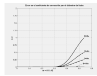
Conclusiones

Una vez realizados todos los cálculos, se tiene un orden de magnitud de la tolerancia en la medida del flujo en función del gasto medido:

m (Kg/h)	XC %	XZd %	XZRe %	XD %	Xd %	Xe %	XDp %	XP2 %	XT2 %	Xm %
749.3			0.000			0.743	2.40	0.06	0.0163	**2.0702**
725.8			0.000			0.687	1.86	0.05	0.0163	**1.7461**
687.6			0.000			0.603	1.98	0.05	0.0163	**1.7816**
668.8			0.000			0.562	1.15	0.05	0.0163	**1.3480**
628.6			0.006			0.486	1.45	0.05	0.0163	**1.4579**
614.2			0.010			0.461	1.65	0.05	0.0163	**1.5561**
599.8			0.013			0.438	1.00	0.05	0.0162	**1.2399**
575.2			0.019			0.398	1.46	0.05	0.0162	**1.4389**
560.1			0.022			0.375	1.10	0.05	0.0162	**1.2600**
527.9	0.8	0.2	0.029	0.1	0.1	0.329	0.75	0.05	0.0162	**1.1112**
513.0			0.033			0.310	0.45	0.05	0.0162	**1.0206**
489.0			0.038			0.279	0.37	0.05	0.0162	**0.9954**
457.8			0.045			0.242	0.43	0.05	0.0162	**0.9993**
430.5			0.052			0.213	0.22	0.05	0.0162	**0.9573**
399.6			0.059			0.182	0.15	0.05	0.0161	**0.9439**
369.6			0.065			0.155	0.19	0.05	0.0161	**0.9432**
327.0			0.075			0.120	0.11	0.05	0.0161	**0.9328**
283.5			0.085			0.090	0.11	0.05	0.0161	**0.9302**
231.0			0.097			0.059	0.09	0.05	0.0160	**0.9276**
154.5			0.188			0.027	0.12	0.05	0.0160	**0.9417**

Tal y como se observa en la gráfica, la tendencia del error en el cálculo del gasto es a aumentar con el gasto, sobre todo debido a que pesa más el error en la medida de las presiones, que aumenta con el gasto, que el error en los coeficientes que bajan con el.

El error en el gasto sigue la misma tendencia que el error en el salto de presiones en el Venturi.



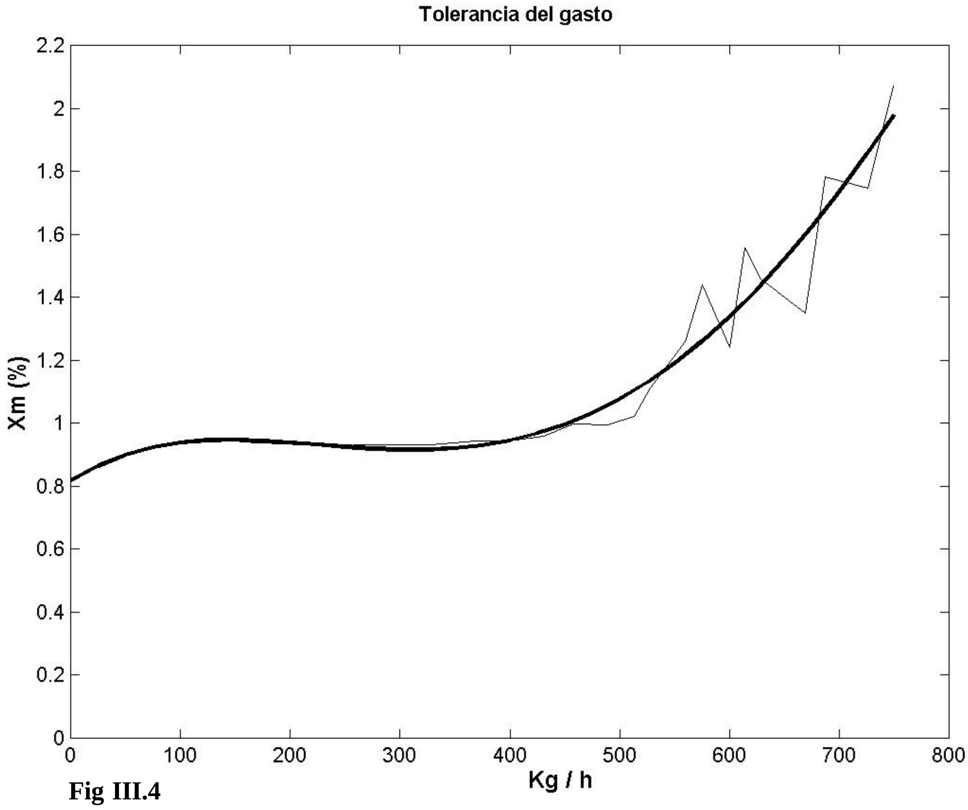
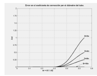

Tolerancia del gasto
Xm (%)
Kg / h
2.2
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
100
200
300
400
500
600
700
800

Fig III.4



3. Error en el rendimiento isentrópico.

Para evaluar el error cometido se estiman primero los errores en las variables que intervienen en la expresión matemática del mismo:

$$h_{ss} = \frac{T_{02ss} - T_{01}}{T_{02} - T_{01}}$$

A continuación a la par que se va exponiendo el desarrollo matemático se expondrán tablas con los valores de las distintas variables que intervienen, el ejemplo que se usa es el mismo que se usó en la evaluación de los errores en el cálculo del flujo, es decir la curva característica de la soplante de rotor abierto girando a 3600 r.p.m.

Si se desarrolla la expresión del error total en función de las variables $T_{01}, T_{02}\ y\ T_{02ss}$; se obtiene la expresión:

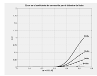
$$X_{h_{ss}} = \sqrt{\left(C_{T_{01}} X_{T_{01}}\right)^2 + \left(C_{T_{02}} X_{T_{02\,atm}}\right)^2 + \left(C_{T_{02\,ss}} X_{T_{02ss}}\right)^2}$$

Donde los coeficientes $C_{T\,01}, C_{T\,02}\ y\ C_{T\,02ss}$ reflejan como afecta el error en la variable correspondiente al error en el rendimiento:

$$C_{T_{01}} = \frac{T_{02} - T_{02\,ss}}{\left(T_{02} - T_{01}\right)\left(T_{02\,ss} - T_{01}\right)} T_{01} \qquad C_{T_{02}} = \frac{T_{02}}{T_{02} - T_{01}} \qquad C_{T_{02\,ss}} = \frac{T_{02ss}}{T_{02} - T_{01}}$$

Lógicamente al tratarse de un cociente entre dos cantidades obtenidas de una resta, la expresión del error es mucho más complicada que cuando solo había productos entre las variables, además el error se amplifica mucho si el salto de temperatura real e isentrópico es pequeño, como se verá más adelante.

Seguidamente y atendiendo a las definiciones de temperaturas de remanso y de salto isentrópico, se evaluaran los errores en las variables: $T_{01}, T_{02}\ y\ T_{02ss}$



3.1. Temperatura de remanso de entrada.

Por definición la temperatura de remanso a la entrada coincide con la atmosférica

$$T_{01} = T_1 \quad \rightarrow \quad X_{T_{01}} = X_{T_1}$$

$$X_{T_{01}} = X_{T_1} = \frac{5\,K}{T_1}$$

3.2. Temperatura de remanso de salida.

La temperatura de remanso a la salida tiene un componente de temperatura estática y otra asociada a la energía cinética

$$T_{02} = T_2 + \frac{v_2^2}{2\,c_P}$$

$$X_{T_{02}} = \sqrt{\left(C_{T_2} X_{T_2}\right)^2 + \left(C_{v_2} X_{v_2}\right)^2}$$

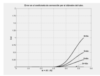
$$C_{T_2} = \frac{1}{1 + \frac{v_2^2}{2\,c_p T_2}} \qquad C_{v_2} = \frac{\frac{v_2}{2\,c_p T_2}}{1 + \frac{v_2^2}{2\,c_p T_2}}$$

Expresando la velocidad en función del gasto, la densidad y el área de paso se llega a:

$$v_2 = \frac{4\,\dot{m}}{r\,p D^2} \quad \rightarrow \quad X_{v_2} = \sqrt{X_{\dot{m}}^2 + X_r^2 + 4 X_D^2}$$

Donde:

$$r = \frac{P_2\, PM_a}{R T_2} \quad \rightarrow \quad X_r = \sqrt{X_{T_2}^2 + X_{P_2}^2}$$

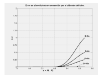


La tolerancia de la densidad de salida para cada valor del gasto es:

m (Kg/h)	X_{T2} %	X_{P2} %	X_r (%)
749.3	0.0163	0.0551	**0.0575**
725.8	0.0163	0.0482	**0.0509**
687.6	0.0163	0.0483	**0.0510**
668.8	0.0163	0.0515	**0.0540**
628.6	0.0163	0.0516	**0.0541**
614.2	0.0163	0.0470	**0.0498**
599.8	0.0162	0.0479	**0.0505**
575.2	0.0162	0.0493	**0.0519**
560.1	0.0162	0.0485	**0.0511**
527.9	0.0162	0.0473	**0.0500**
513.0	0.0162	0.0494	**0.0520**
489.0	0.0162	0.0479	**0.0505**
457.8	0.0162	0.0485	**0.0512**
430.5	0.0162	0.0476	**0.0502**
399.6	0.0161	0.0470	**0.0497**
369.6	0.0161	0.0536	**0.0559**
327.0	0.0161	0.0468	**0.0495**
283.5	0.0161	0.0467	**0.0494**
231.0	0.0160	0.0469	**0.0496**

La tolerancia en la velocidad del fluido “v_2” es:

m (Kg/h)	X_m%	X_r (%)	X_D %	X_{V2} (%)
749.3	2.363	0.0551	0.077	**2.3689**
725.8	2.054	0.0482	0.077	**2.0599**
687.6	2.054	0.0483	0.077	**2.0607**
668.8	1.665	0.0515	0.077	**1.6728**
628.6	1.728	0.0516	0.077	**1.7353**
614.2	1.800	0.0470	0.077	**1.8077**
599.8	1.529	0.0479	0.077	**1.5377**
575.2	1.680	0.0493	0.077	**1.6881**
560.1	1.515	0.0485	0.077	**1.5238**
527.9	1.378	0.0473	0.077	**1.3876**
513.0	1.298	0.0494	0.077	**1.3078**
489.0	1.267	0.0479	0.077	**1.2777**
457.8	1.260	0.0485	0.077	**1.2705**
430.5	1.215	0.0476	0.077	**1.2257**
399.6	1.194	0.0470	0.077	**1.2050**
369.6	1.184	0.0536	0.077	**1.1950**
327.0	1.167	0.0468	0.077	**1.1779**
283.5	1.156	0.0467	0.077	**1.1676**
231.0	1.148	0.0469	0.077	**1.1588**
154.5	1.150	0.0469	0.077	**1.1612**



Por tanto los márgenes de tolerancia para la temperatura de remanso de salida X_{T02} son:

m (Kg/h)	T2 (ºC)	T2 (ºK)	v2 (m/s)	T02 (K)	X_{T2} %	X_{v2} (%)	X_{T02} (%)
749.3	33.2	306.35	52.20	307.71	0.0163	2.3689	**0.0193**
725.8	33.6	306.75	50.54	308.02	0.0163	2.0599	**0.0183**
687.6	33.9	307.05	47.82	308.19	0.0163	2.0607	**0.0179**
668.8	34.2	307.35	46.39	308.42	0.0163	1.6728	**0.0172**
628.6	34.3	307.45	43.53	308.39	0.0163	1.7353	**0.0171**
614.2	34.5	307.65	42.52	308.55	0.0163	1.8077	**0.0170**
599.8	34.8	307.95	41.54	308.81	0.0162	1.5377	**0.0167**
575.2	35.0	308.15	39.80	308.94	0.0162	1.6881	**0.0167**
560.1	35.1	308.25	38.72	309.00	0.0162	1.5238	**0.0166**
527.9	35.2	308.35	36.45	309.01	0.0162	1.3876	**0.0165**
513.0	35.7	308.85	35.45	309.48	0.0162	1.3078	**0.0164**
489.0	35.8	308.95	33.77	309.52	0.0162	1.2777	**0.0163**
457.8	36.1	309.25	31.60	309.75	0.0162	1.2705	**0.0163**
430.5	36.3	309.45	29.70	309.89	0.0162	1.2257	**0.0162**
399.6	37.3	310.45	27.62	310.83	0.0161	1.2050	**0.0162**
369.6	37.3	310.45	25.52	310.77	0.0161	1.1950	**0.0161**
327.0	37.6	310.75	22.57	311.00	0.0161	1.1779	**0.0161**
283.5	38.3	311.45	19.59	311.64	0.0161	1.1676	**0.0161**
231.0	39.5	312.65	16.01	312.78	0.0160	1.1588	**0.0160**

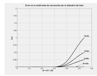
3.3. Temperatura de remanso de salida isentrópica.

Es la temperatura de remanso de salida si el proceso de compresión fuera isentrópico, atendiendo a la definición se obtiene que:

$$T_{02ss} = \left(\frac{P_{02}}{P_{01}}\right)^{\frac{g-1}{g}} T_{01}$$

$$X_{T_{02ss}} = \sqrt{\left(C_{T_1} X_{T_1}\right)^2 + \left(C_{P_{01}} X_{P_{01}}\right)^2 + \left(C_{P_{02}} X_{P_{02}}\right)^2}$$

$$C_{T_1} = 1 \qquad C_{P02} = \frac{g-1}{g} \qquad C_{P01} = \frac{g-1}{g}$$



A su vez es necesario también introducir la definición de presiones de remanso:

$$P_{01} = P_1 \quad \rightarrow \quad X_{P_{01}} = X_{P_1}$$

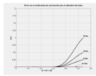
$$P_{02} = \left(\frac{T_{02}}{T_2} \right)^{\frac{g}{g-1}} P_2$$

$$X_{P_{02}} = \sqrt{\left(C_{P_2} X_{P_2}\right)^2 + \left(C_{T_{02}} X_{T_{02}}\right)^2 + \left(C_{T_2} X_{T_2}\right)^2}$$

$$C_{P2} = 1 \qquad C_{T\,02} = \frac{g}{g-1} \qquad C_{T2} = \frac{g}{g-1}$$

Evaluando la expresión en cada punto, los márgenes de tolerancia de la presión de remanso de salida son:

m (Kg/h)	X_{P2} %	X_{T2} %	X_{T02} (%)	X_{P02} %
749.3346	0.0551	0.0163	0.0206	**0.1072**
725.7902	0.0482	0.0163	0.0194	**0.1009**
687.5527	0.0483	0.0163	0.0187	**0.0993**
668.7671	0.0515	0.0163	0.0179	**0.0990**
628.6292	0.0516	0.0163	0.0175	**0.0983**
614.2070	0.0470	0.0163	0.0174	**0.0958**
599.7903	0.0479	0.0162	0.0171	**0.0954**
575.1877	0.0493	0.0162	0.0170	**0.0960**
560.1059	0.0485	0.0162	0.0168	**0.0951**
527.9037	0.0473	0.0162	0.0166	**0.0941**
513.0318	0.0494	0.0162	0.0165	**0.0949**
489.0461	0.0479	0.0162	0.0164	**0.0939**
457.7765	0.0485	0.0162	0.0164	**0.0940**
430.5082	0.0476	0.0162	0.0163	**0.0934**
399.5716	0.0470	0.0161	0.0162	**0.0927**
369.6266	0.0536	0.0161	0.0162	**0.0962**
327.0169	0.0468	0.0161	0.0161	**0.0924**
283.5041	0.0467	0.0161	0.0161	**0.0922**
231.0176	0.0469	0.0160	0.0160	**0.0920**

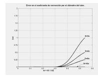


Por tanto, operando, los márgenes de tolerancia de la temperatura de salida de remanso isentrópica “ X_{T02ss} ” son:

m (Kg/h)	XT1 %	XP1 (%)	XP02 %	XT02ss (%)
749.3346	0.0168	0.0486	0.1072	**0.0376**
725.7902	0.0168	0.0486	0.1009	**0.0361**
687.5527	0.0168	0.0486	0.0993	**0.0358**
668.7671	0.0168	0.0485	0.0990	**0.0357**
628.6292	0.0168	0.0485	0.0983	**0.0355**
614.2070	0.0168	0.0485	0.0958	**0.0350**
599.7903	0.0168	0.0485	0.0954	**0.0349**
575.1877	0.0168	0.0485	0.0960	**0.0350**
560.1059	0.0168	0.0485	0.0951	**0.0348**
527.9037	0.0168	0.0485	0.0941	**0.0346**
513.0318	0.0168	0.0485	0.0949	**0.0348**
489.0461	0.0168	0.0485	0.0939	**0.0345**
457.7765	0.0168	0.0485	0.0940	**0.0346**
430.5082	0.0168	0.0485	0.0934	**0.0344**
399.5716	0.0168	0.0485	0.0927	**0.0343**
369.6266	0.0168	0.0485	0.0962	**0.0350**
327.0169	0.0167	0.0485	0.0924	**0.0342**
283.5041	0.0167	0.0485	0.0922	**0.0342**
231.0176	0.0167	0.0485	0.0920	**0.0341**
154.5375	0.0167	0.0485	0.0918	**0.0341**

Finalmente ya se disponen de todas las variables necesarias para evaluar la exactitud en el cálculo del rendimiento isentrópico:

m (Kg/h)	XT1 %	XT02 (%)	XT02ss (%	CT02	CT01	CT02ss	Xh ss %
749.3346	0.0168	0.0193	0.0376	29.71	46.80	29.09	**1.46**
725.7902	0.0168	0.0183	0.0361	30.29	45.07	29.68	**1.42**
687.5527	0.0168	0.0179	0.0358	30.10	44.71	29.50	**1.40**
668.7671	0.0168	0.0172	0.0357	29.74	43.86	29.14	**1.37**
628.6292	0.0168	0.0171	0.0355	29.82	43.01	29.22	**1.36**
614.2070	0.0168	0.0170	0.0350	29.39	42.84	28.79	**1.33**
599.7903	0.0168	0.0167	0.0349	29.53	42.72	28.93	**1.33**
575.1877	0.0168	0.0167	0.0350	29.18	42.42	28.58	**1.32**
560.1059	0.0168	0.0166	0.0348	29.30	41.15	28.71	**1.31**
527.9037	0.0168	0.0165	0.0346	27.94	41.96	27.33	**1.26**
513.0318	0.0168	0.0164	0.0348	27.57	41.86	26.96	**1.25**
489.0461	0.0168	0.0163	0.0345	27.23	41.80	26.61	**1.24**
457.7765	0.0168	0.0163	0.0346	26.94	41.81	26.32	**1.23**
430.5082	0.0168	0.0162	0.0344	26.40	41.62	25.78	**1.21**
399.5716	0.0168	0.0162	0.0343	24.71	42.78	24.07	**1.16**
369.6266	0.0168	0.0161	0.0350	25.22	41.66	24.58	**1.18**
327.0169	0.0167	0.0161	0.0342	25.18	41.42	24.54	**1.16**
283.5041	0.0167	0.0161	0.0342	23.99	42.19	23.34	**1.13**
231.0176	0.0167	0.0160	0.0341	22.14	43.83	21.46	**1.10**
154.5375	0.0167	0.0160	0.0341	21.24	44.16	20.56	**1.07**



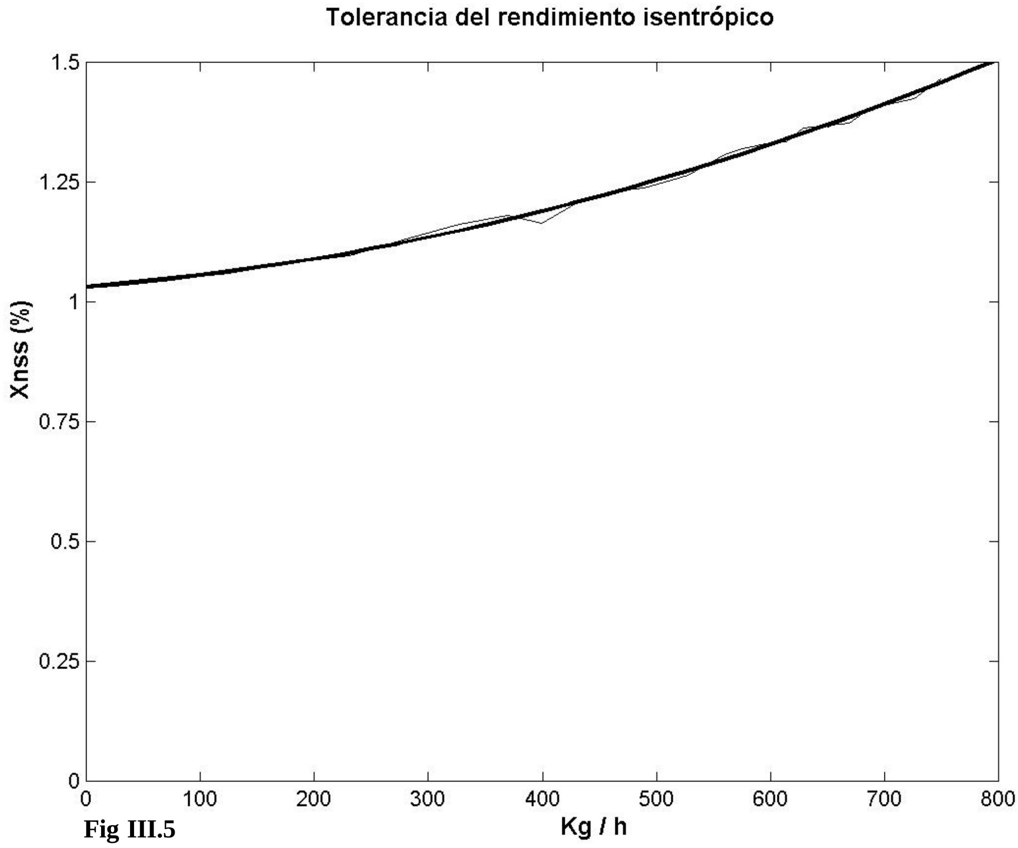
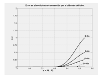


Fig III.5

La magnitud del error frente a los errores en las temperaturas se explica debido al valor que alcanzan los coeficientes de error, ya que la función está mal condicionada; es decir errores muy pequeños en las variables provocan errores muy grandes en el resultado, ya que los coeficientes antes mencionados aumentan mucho cuando los saltos de temperatura son muy pequeños, que es el caso en soplante.

Por ejemplo si C_{T02ss} vale 30, el error cometido en la variable T_{02ss} T02ss se amplificará 30 veces al calcular el error del rendimiento. (Ver definición de coeficientes de error)

La tendencia del error es a aumentar con el gasto, sobre todo debido a que al aumentar el gasto, cae el salto térmico, y el error se vuelve muy sensible a los errores cometidos en las temperaturas.



4. Error en la relación de compresión.

El error en la relación de compresión estará inducido principalmente por el error en la medida de la presión, ya que debido a las bajas velocidades de circulación, las presiones de remanso son muy próximas a las estáticas.

$$rc = \frac{P_{02}}{P_{01}} \quad \rightarrow X_{rc} = \sqrt{X_{P_{02}}^{2} + X_{P_{01}}^{2}}$$

m (Kg/h)	XP1 (%)	XP02 %	Xrc(%)
749.3	0.0486	0.1072	**0.1177**
725.8	0.0486	0.1009	**0.1120**
687.6	0.0486	0.0993	**0.1106**
668.8	0.0485	0.0990	**0.1103**
628.6	0.0485	0.0983	**0.1096**
614.2	0.0485	0.0958	**0.1074**
599.8	0.0485	0.0954	**0.1070**
575.2	0.0485	0.0960	**0.1075**
560.1	0.0485	0.0951	**0.1068**
527.9	0.0485	0.0941	**0.1058**
513.0	0.0485	0.0949	**0.1066**
489.0	0.0485	0.0939	**0.1057**
457.8	0.0485	0.0940	**0.1058**
430.5	0.0485	0.0934	**0.1052**
399.6	0.0485	0.0927	**0.1047**
369.6	0.0485	0.0962	**0.1077**
327.0	0.0485	0.0924	**0.1044**
283.5	0.0485	0.0922	**0.1042**
231.0	0.0485	0.0920	**0.1040**
154.5	0.0485	0.0918	**0.1039**

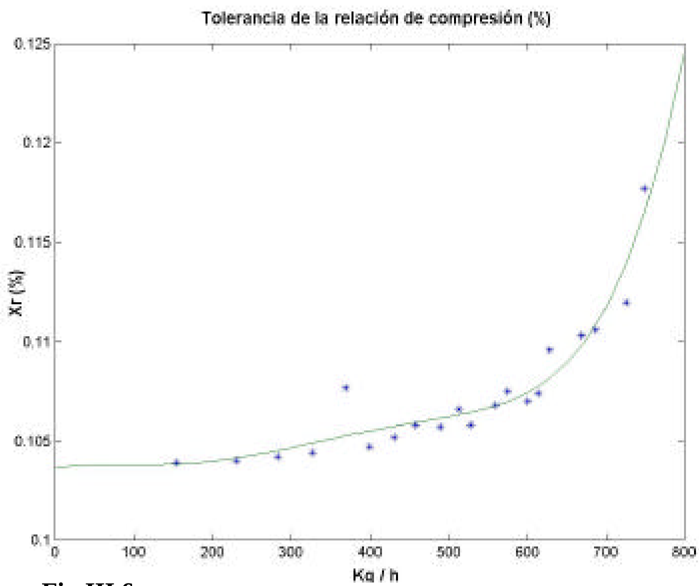


Fig III.6