

ANEXOS

ANEXO 1 CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

ÍNDICE

ANEXO 1 CALIBRACIÓN DE EQUIPOS	3
A.1 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN	4
A.1.1 EQUIPO PARA CALIBRACIÓN DE SONDAS DE TEMPERATURA	4
A.1.2 EQUIPO PARA CALIBRACIÓN DE SONDAS DE HUMEDAD	5
A.1.3 EQUIPO PARA CALIBRACIÓN DE PLACAS ORIFICIO	6
A.2 CALIBRACIÓN DE SONDAS DE TEMPERATURA.	7
A.3 CALIBRACIÓN DE SONDAS DE HUMEDAD	10
A.4 CALIBRACIÓN DE PLACAS ORIFICIO	15
A.5 BIBLIOGRAFÍA:	24
REFERENCIAS EN PÁGINAS WEB:	24

A.1 Descripción de equipos utilizados para la calibración

En la experimentación realizada en este trabajo, es necesario contar con sondas de temperatura, de humedad y medidores de caudal.

Para una toma de datos más fiable y con menos incertidumbre, es necesario que todos los equipos utilizados en la medición, estén correctamente calibrados. Para ello se han usado diferentes equipos:

A1.1 Equipo para calibración de sondas de temperatura

Para la calibración de estas sondas se ha utilizado un horno de calibración de temperatura 'Fluke 9103'. Este dispositivo puede verse en la figura A.1



Figura A.1 Horno de calibración de temperatura 'FLUKE 9103'[W-1]

El dispositivo es un calibrador de horno seco con una precisión de $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$ y un rango de temperaturas de entre -25°C y $+140^{\circ}\text{C}$. Además tiene una estabilidad de 0.02°C [W-1]. Cuenta con tres secciones extraíbles para la introducción de sondas de $3/8''$, $1/2''$ y $3/16''$ que permiten introducir sondas de diferentes tamaños.

A.1.2 Equipo para calibración de sondas de humedad

Para la calibración de las sondas de humedad se utilizó el control de humedad del humidificador de la UTA (figura A.2). En esta disposición el recorrido de la sonda era menor que el sistema experimental y aunque había gran dispersión de datos, el valor medio no distaba mucho del valor marcado en consigna.



Figura A.2 Control de humidificador 'Humisteam xplus' [W-2]

Para comprobar que se respetaban los valores medios de consigna, se utilizó el medidor de climatización multifuncional testo 435 (figura A.3) descrito en el *Capítulo VII Descripción del equipo experimental*.



Figura A.3 medidor de climatización multifuncional 'Testo 435' [W-3]

Este dispositivo, teniendo conectado el módulo de medición de temperatura y humedad, permite el cálculo de valores medios en un rango de tiempo.

A.1.3 Equipo para calibración de placas orificio

Las placas orificio son las encargadas de medir el caudal que circula por los conductos. Este dispositivo ha resultado el más difícil de calibrar, debido a que se disponía de unos valores anteriores de calibración y primeramente no resultaron similares. Estas placas, al tratar con aire en condiciones incompresibles, para el caso particular de un fluido, tienen una pérdida de carga proporcional al cuadrado del caudal que pasa por ellas. Esta constante K es la que se ha querido calcular, para el caso particular del aire, en unas variaciones de densidad muy pequeñas.

Para conseguir esto, se ha utilizado una tobera convergente, perfectamente calibrada y certificada, (figura A.4)



Figura A.4 Tobera convergente calibrada.

Esta tobera, midiendo la diferencia de presiones existente entre la sección más estrecha o garganta y la entrada, tiene especificada una correlación con el caudal que pasa por ella. Para el buen funcionamiento de la tobera, es necesario que el flujo se haya desarrollado tanto aguas arriba como aguas abajo por lo que necesita de una longitud de 5 diámetros de conducto recto sin pérdidas de carga locales acentuadas previas a la misma.

Para la comprobación de que los caudales que se medían con la tobera y por tanto la calibración de las placas con este método eran correctos, se recurrió a otros dos métodos de comprobación simultáneos.

Una medida de velocidad, que multiplicado por la sección de salida de la tobera, proporcionaba el caudal.

Una medida a través del flujo de calor generado por una UTA auxiliar de la que se conoce el valor de potencia eléctrica disipado por las resistencias de calentamiento.

Para la medida de velocidad se ha usado el medidor de climatización multifuncional 'Testo 435' (figura A.3), descrito previamente, utilizando para ello dos módulos de medida de velocidad diferentes (figura A.5), uno de hilo caliente y otro de rodete.



Figura A.5 Módulos de medición de velocidad, de rodete (arriba), de hilo caliente (abajo). [W-4]

Para medir el flujo másico utilizando la potencia de las resistencias se ha utilizado una UTA auxiliar (figura A.6).

Esta UTA cuenta con una serie de resistencias eléctricas. Para la determinación de la potencia de calor disipa por estas resistencias por el efecto Joule, se ha utilizado una pinza amperimétrica (figura A.7) y conociendo el valor del voltaje de red, se ha determinado el valor de la potencia eléctrica consumida.

A.2 Calibración de sondas de temperatura.

La calibración de sondas de temperatura se ha hecho utilizando el horno de calibración de temperaturas descrito anteriormente. Se han introducido varias sondas en las secciones extraíbles del horno y se ha planificado una serie de valores constantes de temperatura. Estos valores de temperatura se han dejado durante el suficiente tiempo como para tener un rango de medida estables lo suficientemente grande como para calcular un valor medio de una forma fiables.

Se ha calibrado cambiado valores a distintas temperaturas de forma ascendente y descendente para evitar errores de posibles fenómenos de histéresis. Se ha calibrado en un rango de 5°C a 45°C, que es representativo del rango de temperaturas de trabajo posterior.

Puede verse la evolución temporal de la temperatura a continuación (figura A.8)

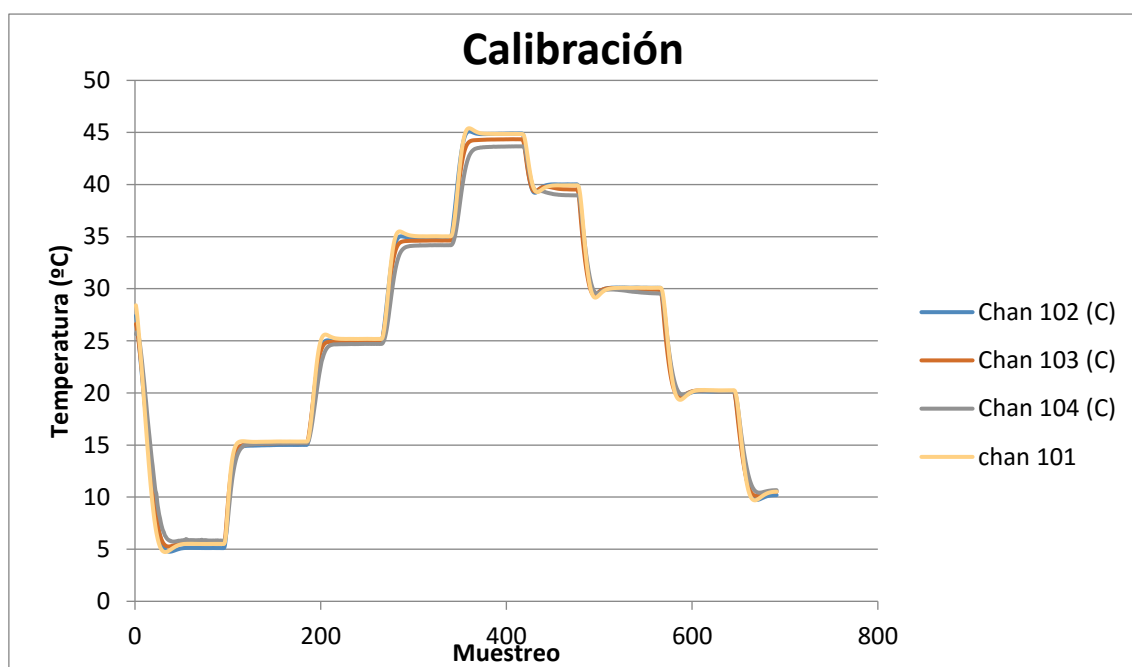


Figura A.8 Ejemplo de evolución de temperatura en la calibración

Este proceso se realiza para cada una de las 17 sondas de temperatura calibradas en el equipo para su posterior tratamiento de datos. Puede verse todos y cada uno de los procedimientos de calibración en la carpeta Excel adjunta al CD con el nombre *calibración de sondas de temperatura*.

Una vez obtenido estas gráficas se calcula los valores medios para cada tramo de temperatura constante de cada sonda. Estos valores calculados se enfrentan con la consigna introducida en el horno de calibración, que tiene una precisión de 0.25°C, formando las rectas de calibración de cada sonda.

Una muestra de recta de calibración puede verse a continuación (figura A.9).

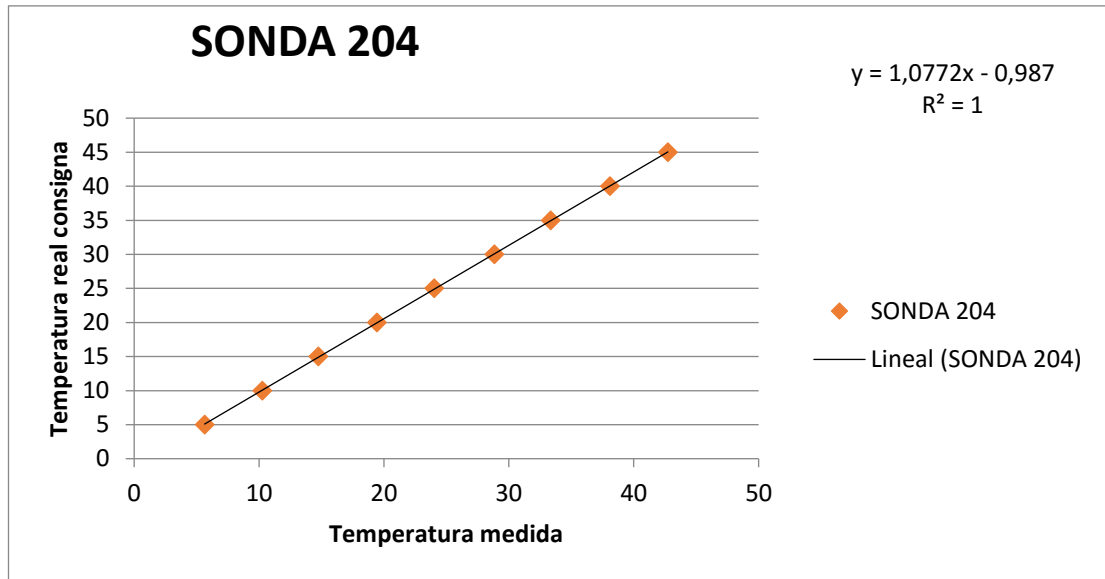


Figura A.9 Ejemplo de recta de calibración.

No se presentarán todas las rectas de calibración de las 11 sondas pero fueron obtenidas de igual manera y se recogen en Excel adjunto en la carpeta calibración con el nombre *calibración de sondas de temperatura*. Todas tienen un factor R mayor a 0.99, por lo que pueden considerarse rectas perfectas.

Una vez que se tienen calibradas todas las sondas, se realiza una tabla resumen en la que se ven los valores de la pendiente y el término independiente, necesarios para la corrección de las sondas (tabla A.1).

Sonda nº	PENDIENTE	TERMINO
101	1.0157	-0.5747
102	1.0051	-0.1555
103	1.0298	-0.7393
104	1.0569	-1.1828
105	1.0341	-1.212
106	1.0531	-1.2447
TP1	1.0546	-1.2008
TP2	1.0853	-1.7634
TP3		
TP4	1.0048	0.3371
TP5	1.0293	-0.5986
TP6	1.0932	-1.9235
*TH1	1.0164	-0.9175
TH2	1.1675	-3.2101
TH4	1.0772	-0.987
TH6		
TH7	1.0302	-0.6872

Tabla A.1 resumen de pendientes y términos independientes de las sondas

Como puede verse de las 17 sondas calibradas, hay dos que fallaron en la toma de datos por lo que se eliminaron del equipo experimental. Una vez se tienen estos términos puede programarse las hojas Excel de los experimentos para que corrijan automáticamente el valor de la sonda de lectura de temperatura por los valores ya calibrados. Basta con multiplicar el valor por la pendiente y sumarle el término independiente.

A.3 Calibración de sondas de humedad

La calibración de las sondas de humedad tiene un procedimiento más complicado que el de las sondas de temperatura. Esto es así porque estas proporcionan un valor de voltaje, correlacionado con la humedad relativa que son capaces de registrar. Sin embargo el comportamiento de la sonda depende de la temperatura, pues son dispositivos capacitivos, que actúan como condensadores, variando las propiedades del dieléctrico que contienen con la temperatura. Por ello hay que calibrar el voltaje de salida en función de la humedad relativa y también de la temperatura.

Para llevar a cabo la calibración, se han utilizado los equipos anteriormente descritos. Se impone una condición de temperatura y humedad en la Unión de tratamiento de aire recogiendo los datos. Utilizando el medidor de climatización multifuncional, se realizan cálculos medios de humedades, debido a que este valor varía mucho por la naturaleza del humidificador utilizado. Se comprueba que los valores son parejos y por tanto que el voltaje que se ha registrado en las sondas corresponde con la humedad impuesta por el control de la UTA. Existen pequeñas diferencias pero se coge como referencia el valor de humedad de la UTA debido a que será este sobre el que se tendrá control en el desarrollo experimental.

Puede verse la evolución de la humedad en las sondas para una temperatura dada en la figura A.10.

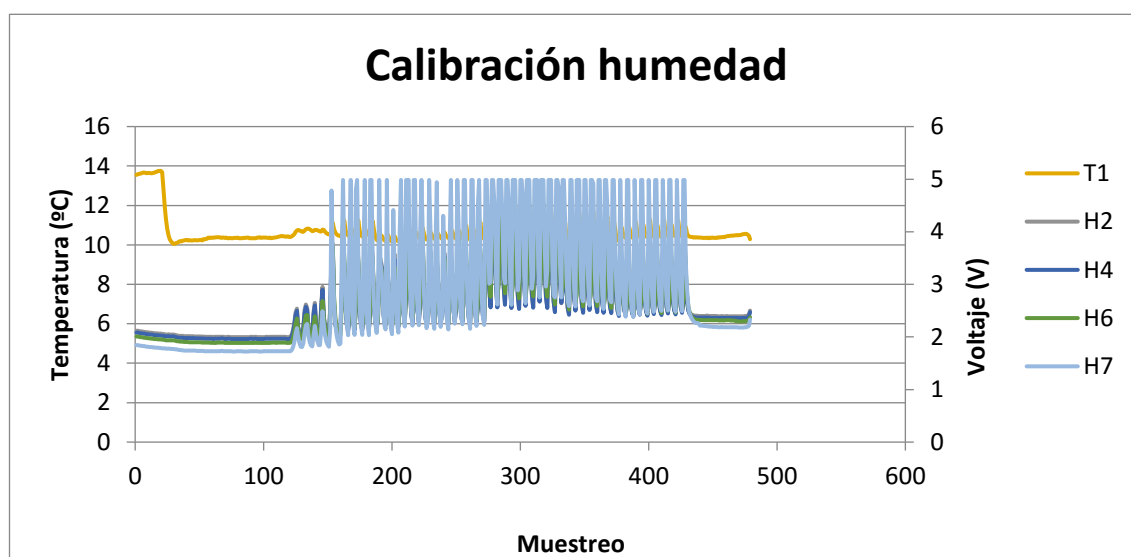


Figura A.10 Evolución de humedad con temperatura fija

Puede verse como la sonda H7 llega a valores de saturación muy rápido por lo que no se usará para medir humedades altas sino que se dispondrá en la entrada donde la calibración si es correcta.

Se introducen los datos recogidos por el adquisidor en una hoja Excel, calculando el voltaje medio medido para cada valor de humedad, con una temperatura fija. Se plantea la correspondencia del voltaje con la humedad impuesta en el controlador de la UTA representándose en gráficas (figura A.11).

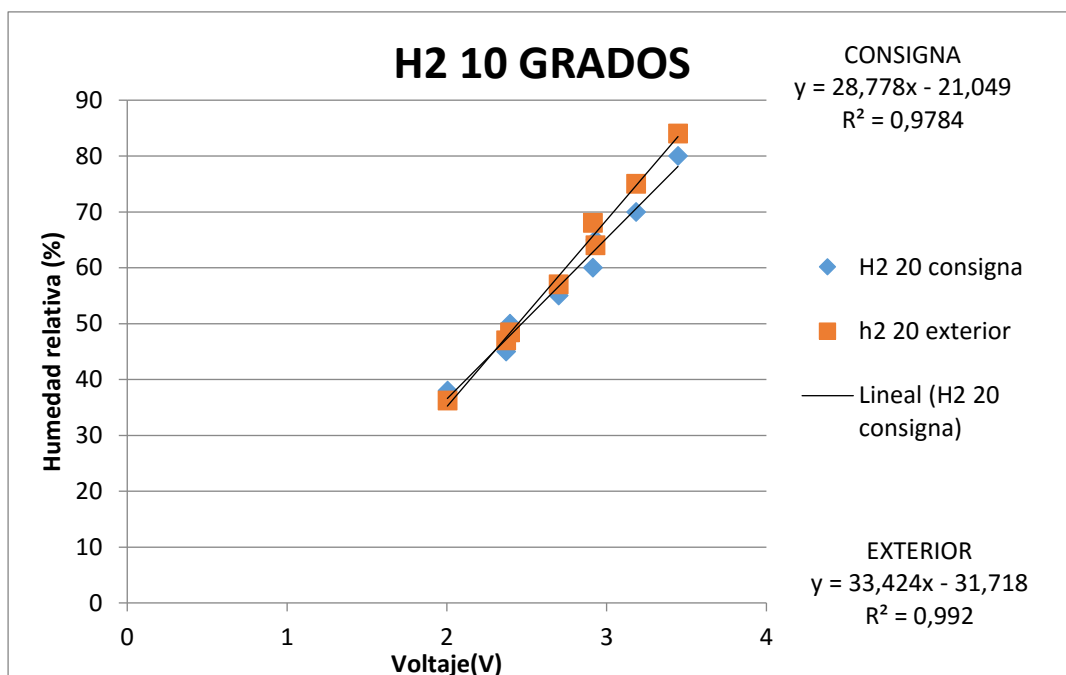


Figura A.11 Correlación ejemplo a 10°C según la humedad consigna y la humedad exterior medida por el medidor de climatización multifuncional.

No se van a introducir todas las correlaciones pues extenderían mucho este archivo. Pueden verse todas en la carpeta *Calibraciones*. *Calibraciones sondas de humedad*.

Este procedimiento se realiza para diferentes temperaturas obteniendo las tablas resumen como la que se presentan a continuación (tabla A.2). En ella se muestran las pendientes y el término independiente de las rectas de calibración cogiendo como referencia la temperatura de consigna. Se usará como en el ejemplo anterior la sonda H2.

H2	Consigna	
Temperatura	Pendiente	T indep
20	32.96714859	-25.7119364
30	37.10825282	-31.2458674
40	41.74386624	-35.2912265
50	55.19272533	-50.8510825
10	28.77767868	-21.0493276

Tabla A.2 Resumen de pendientes y términos independientes sonda H2

Con estos datos resumen, para cada sonda se plantea una correlación de la pendiente y el término independiente en función de la temperatura. El resultado para todas las sondas es similar al de la sonda H2 que se presenta a continuación (figura A.12):

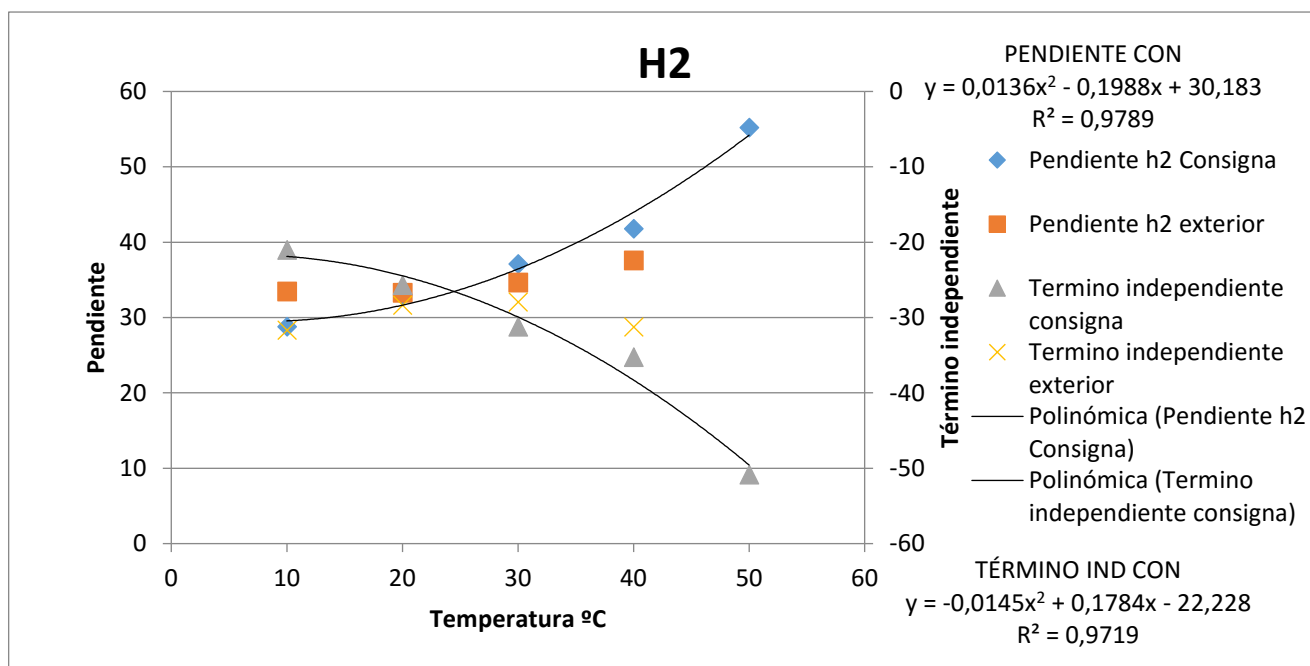


Figura A.12 Correlación pendiente y término independiente sonda H2

Esta sonda H2 tiene el peor factor R de todas las sondas siendo cercano a 0.98. Esto permite correlacionar la dependencia de lectura de voltaje con la temperatura de forma cuadrática o parabólica. Este resultado puede aprobarse pues las sondas utilizadas son capacitivas, las cuales leen humedad por la variación de la constante dieléctrica del material semiconductor interno con la humedad. Esta constante dieléctrica varía parabólicamente con la temperatura como puede verse en la figura A.13.

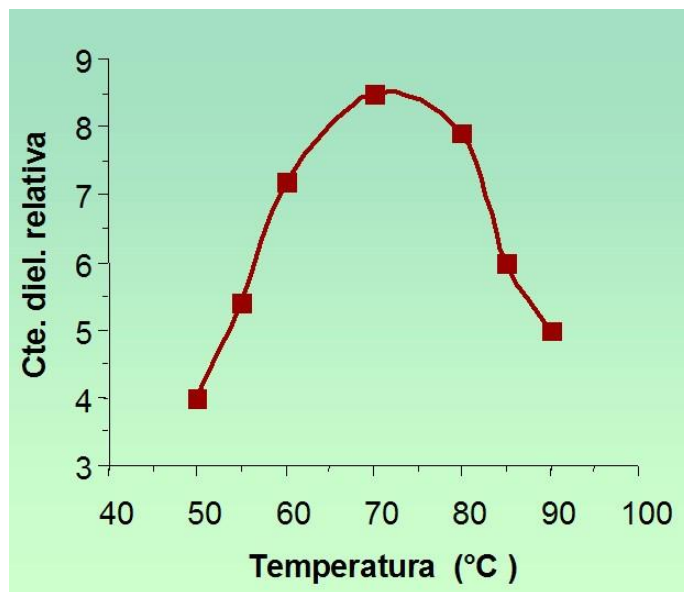


Figura A.13 Variación de la constante dieléctrica con la temperatura [W-5]

Bien es cierto que esta dependencia parabólica no se desarrolla hasta temperaturas altas, sin embargo existe otra dependencia de este tipo a temperaturas inferiores. (figura A.14)

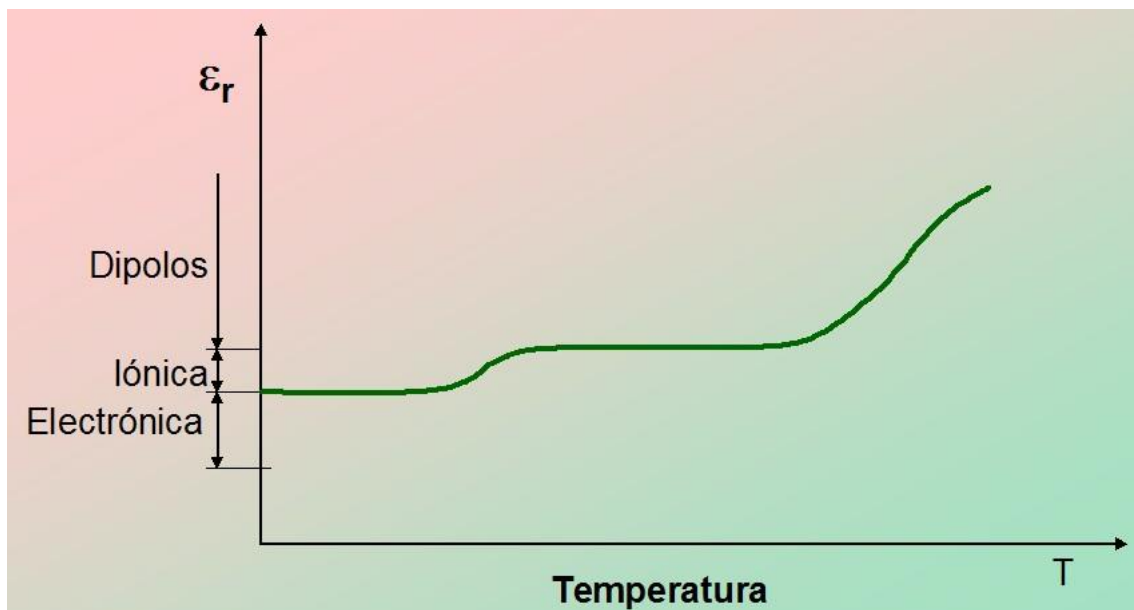


Figura A.14 Dependencia de constante dieléctrica relativa con temperatura general [W-5]

Una vez se realizan todas las correlaciones parabólicas que tienen las pendientes con la temperatura, se programa la corrección de datos experimentales en dos pasos.

1. Conocida la temperatura se calcula la pendiente y el término independiente de la recta de calibración voltaje-humedad utilizando la ecuación parabólica correspondiente a cada sonda.
2. Una vez se tiene el valor de la pendiente y del término independiente para una temperatura dada, se lee el valor de voltaje y se transforma en valor de humedad.

Estas transformaciones pueden leerse en los experimentos tratados en la carpeta Experimentos definitivos adjunta al CD.

A.4 Calibración de placas orificio

La calibración de estos equipos ha sido la más complicada de todo y finalmente se ha decidido utilizar directamente el elemento de calibración (tobera convergente) como elemento de medida en los experimentos.

Inicialmente se planteó una calibración únicamente utilizando la tobera convergente. Este elemento está calibrado con certificación, pudiendo conocer el caudal que circula por él, midiendo la diferencia de presiones entre la garganta y una sección aguas arriba alejada 5 diámetros. Conocido el caudal que circula por el conducto y disponiendo las placas orificio a continuación de la tobera, se puede conocer la constante de pérdida de cargas de las mismas midiendo la diferencia de presión aguas arriba y aguas debajo de las mismas.

Para corroborar la calibración se decidió colocar el orden de las placas en sentido inverso, dejando la tobera para el final de la instalación. El resultado varió pero no en exceso. Finalmente para acabar de comprobar la calibración se usaron dos métodos alternativos a la vez que se utilizaba la tobera convergente. Estos fueron el cálculo del flujo másico conocido el flujo de calor y el cálculo de la velocidad a la salida de la tobera, la cual estaba situada al final. La diferencia de presiones en todo el circuito es muy baja y la velocidad alcanzada por el aire también lo es. Por ello se puede considerar incompresible el fluido y considerar que los flujos másicos y volumétricos no se alteran a lo largo del sistema. El único punto donde sí se consideró el efecto de la densidad fue al medir los flujos másicos por intercambio de calor pues el efecto de la temperatura varía la densidad aunque tampoco considerablemente.

Con este último método de calibración se obtuvieron distintas tablas con ayuda de una hoja Excel. Lo primero ha sido introducir las diferencias de presiones medidas con el medidor de climatización multifuncional antes y después de cada placa orificio y de la tobera convergente (Tabla A.3)

Nº Experim	Hpa			mm c.a			Pa		
	Presión Tobera	Presión 4	Presión 6	Presión Tobera	Presión 4	Presión 6	Presión Tobera	Presión 4	Presión 6
1	2	1.33	1.49	20.4081633	13.5714286	15.2040816	200	133	149
2	2.51	1.7	1.78	25.6122449	17.3469388	18.1632653	251	170	178
3	2.53	1.77	1.81	25.8163265	18.0612245	18.4693878	253	177	181
4	3.89	2.66	2.75	39.6938776	27.1428571	28.0612245	389	266	275
5	1.96	1.24	1.3	20	12.6530612	13.2653061	196	124	130
6	0.57	0.39	0.38	5.81632653	3.97959184	3.87755102	57	39	38
7	0.57	0.38	0.39	5.81632653	3.87755102	3.97959184	57	38	39
8	1.2	0.81	0.83	12.244898	8.26530612	8.46938776	120	81	83
9	4.36	2.92	3.06	44.4897959	29.7959184	31.2244898	436	292	306
10	2.21	1.52	1.57	22.5510204	15.5102041	16.0204082	221	152	157
11	3.31	2.26	2.35	33.7755102	23.0612245	23.9795918	331	226	235

Tabla A.3 Resumen de presiones diferenciales en elementos

A continuación utilizando la ecuación de la tobera (Ec-A1), se puede calcular el caudal que pasa por la instalación (Tabla A.4):

$$\dot{V} = 10^{(0,0018+0,5044*\log(P))} \quad \text{Ec-A1}$$

Nº experimento	V real
1	4.59690043
2	5.15490888
3	5.17558634
4	6.42978049
5	4.55029475
6	2.44055638
7	2.44055638
8	3.55274951
9	6.81055575
10	4.83433821
11	5.92688919

Tabla A.4 Volumen leído con la ecuación de la tobera

Con este caudal y conocidas las diferencias de presión de la tabla A.3, se puede establecer una contante de pérdidas tanto como para la tobera como para cada una de las placas orificio. Esta constante de pérdidas puede definirse como se ha expresado anteriormente como sigue (Ec-A2):

$$K = \frac{\dot{V}}{\sqrt{\Delta P}}$$

Ec-A2

Esta ecuación puede usarse para el fluido aire pues tenemos un número de Mach menor de 0.3 considerando incompresible la corriente. Si se quisiera utilizar esta calibración para otro fluido con distinta densidad y viscosidad, habría que introducir en la ecuación de calibración un factor de densidad relativa. Se presenta a continuación esta constante de pérdidas (tabla A.5):

CÁLCULO DE K Unidades SI				
Nº Experimento	V real(m3/s)	Tobera	P4	P6
1	0.07661501	0.0054175	0.00664336	0.00627655
2	0.08591515	0.00542292	0.00658939	0.00643961
3	0.08625977	0.00542311	0.00648368	0.00641164
4	0.10716301	0.00543338	0.00657059	0.00646217
5	0.07583825	0.00541702	0.00681048	0.00665145
6	0.09878149	0.00542952	0.00657085	0.00644379
7	0.04067594	0.00538766	0.00651336	0.00659851
8	0.04067594	0.00538766	0.00659851	0.00651336
9	0.05921249	0.00540534	0.00657917	0.00649942
10	0.11350926	0.00543611	0.00664263	0.00648889
11	0.0805723	0.00541988	0.00653528	0.00643037
Media		0.00541637	0.0065943	0.00647416

Tabla A.5 Constante de pérdidas

N °	Caudales m3/min				Caudales m3/s			
	V real	V TOB	V P4	V P6	V real	V TOB	V P4	V P6
1	4.59690043	4.59594336	4.56294975	4.74163211	7.66E-02	7.66E-02	7.60E-02	7.90E-02
2	5.15490888	5.14868748	5.15874815	5.18256458	8.59E-02	8.58E-02	8.60E-02	8.64E-02
3	5.17558634	5.16915948	5.26388628	5.22605539	8.63E-02	8.62E-02	8.77E-02	8.71E-02
4	6.42978049	6.4096523	6.45298542	6.4417085	1.07E-01	1.07E-01	1.08E-01	1.07E-01
5	4.55029475	4.54975181	4.40586015	4.42900731	7.58E-02	7.58E-02	7.34E-02	7.38E-02
6	5.92688919	5.91253422	5.9480428	5.95482019	9.88E-02	9.85E-02	9.91E-02	9.92E-02
7	2.44055638	2.45356235	2.47088293	2.39456439	4.07E-02	4.09E-02	4.12E-02	3.99E-02
8	2.44055638	2.45356235	2.43899923	2.42586721	4.07E-02	4.09E-02	4.06E-02	4.04E-02
9	3.55274951	3.56000242	3.5609213	3.53894463	5.92E-02	5.93E-02	5.93E-02	5.90E-02
10	6.81055575	6.78582906	6.76100553	6.79509346	1.14E-01	1.13E-01	1.13E-01	1.13E-01
11	4.83433821	4.8312088	4.87799847	4.86726002	8.06E-02	8.05E-02	8.13E-02	8.11E-02

Tabla A.6 Caudales con constantes de pérdidas

Con los valores de las constantes de pérdidas medios, se puede calcular para cada experimento de calibración el caudal medido utilizando la constante de pérdidas de cada placa orificio y de la tobera y compararlo con el caudal supuesto real utilizando la ecuación certificada de la tobera (tabla A.6):

Comparando los valores de caudal medidos con las constantes y con la ecuación de la tobera se pueden sacar los valores de error relativos (tabla A.7)

Errores			
V real (m3/s)	Tobera	P4	P6
7.66E-02	-0.02%	-0.74%	3.15%
8.59E-02	-0.12%	0.07%	0.54%
8.63E-02	-0.12%	1.71%	0.98%
1.07E-01	-0.31%	0.36%	0.19%
7.58E-02	-0.01%	-3.17%	-2.67%
4.07E-02	0.53%	1.24%	-1.88%
4.07E-02	0.53%	-0.06%	-0.60%
5.92E-02	0.20%	0.23%	-0.39%
1.14E-01	-0.36%	-0.73%	-0.23%
8.06E-02	-0.06%	0.90%	0.68%
9.88E-02	-0.24%	0.36%	0.47%

Tabla A.7 Errores relativos calibración tobera

Puede verse como el error es muy bajo. Esto es normal pues se han definido las constantes de pérdidas en función de los datos de la tobera por lo que los errores relativos, variarán únicamente por la realización de ensayos a diferentes caudales.

	Velocidad Rodete (m/s)	Velocidad hilo (m/s)	V rodete (m3/s)	V hilo (m3/s)	V Medio (m3/s)
1	14.26	22.86	0.061329983	0.09831721	0.079823597
2	15.3	25.61	0.065802857	0.110144521	0.087973689
3	15.78	25.83	0.067867261	0.111090706	0.089478983
4	19.43	28.03	0.083565328	0.120552555	0.102058941
5	12.95	18.02	0.055695882	0.077501143	0.066598513
6	6.67	10.5	0.028686605	0.045158824	0.036922714
7	6.64	9.28	0.02855758	0.039911798	0.034234689
8	8.85	14.28	0.038062437	0.061416	0.049739219
9	20.12	29.32	0.086532908	0.126100639	0.106316773
10	14.23	20.01	0.061200958	0.086059815	0.073630387
11	16.78	25.46	0.072168101	0.109499395	0.090833748

Tabla A.8 Caudales por medidas de velocidad.

Para comprobar si la calibración ha resultado fiable, como se ha indicado anteriormente se han utilizado dos métodos a mayores de calibración. El primero ha sido medir la velocidad a la salida de la tobera con dos dinamómetros de naturalezas diferentes. Utilizando el diámetro de salida de la tobera convergente (0.074m) y calculando su área (0.0043m²), se ha podido calcular el caudal medio (tabla A.8)

Con este método puede compararse el caudal medido por las sondas de velocidad con el medido por la tobera para de este modo validar o no la calibración realizada. El resumen del error puede verse en la tabla A.9, tomando como valor real el dado por la ecuación de la tobera:

Nº Exp	Error rodete	Error hilo	Error Media
1	24.92%	-22.07%	4.02%
2	30.56%	-22.00%	2.34%
3	27.10%	-22.35%	3.60%
4	28.24%	-11.11%	5.00%
5	36.16%	-2.15%	13.87%
6	41.79%	-9.93%	10.17%
7	42.43%	1.91%	18.81%
8	55.57%	-3.59%	19.05%
9	31.17%	-9.99%	6.77%
10	31.65%	-6.38%	9.43%
11	36.88%	-9.79%	8.75%

Tabla A.9 Resumen de errores por medidas de velocidad.

Puede apreciarse un error en la media de las dos sondas no muy elevado, en casi todos los casos menor del 10%. Por ello puede validarse la calibración por este método.

El otro método de comprobación ha sido a través del cálculo del flujo másico y posteriormente del caudal con el uso de la densidad, conocido el flujo de calor transmitido por la UTA auxiliar. Para ello lo primero que se ha hecho es con la pinza amperimétrica calcular la intensidad de corriente que pasa por cada resistencia de la UTA y así calcular la potencia eléctrica de calentamiento que se usara como flujo de calor ganado por el aire (tabla A.10):

	Resistencia 1	Resistencia 2	Resistencia 3	Resistencia 4
Intensidad(A)	4.47	4.37	2.22	2.26
Voltaje(V)	230	230	230	230
Potencia(W)	1028.1	1005.1	510.6	519.8

Tabla A.10 Potencias eléctricas de las resistencias.

Para cada uno de los 11 experimentos, se encendieron aleatoriamente una serie de resistencias para calcular el flujo de calor que se traspasaba al aire. Con las sondas calibradas se han medido las temperaturas del aire a la entrada y la salida de la UTA así como la temperatura exterior para cada experimento (tabla A.11):

Nº Exp	Potencia(W)	T ext °c	T ent °c	T sal °c	T ext cor °C	T ent cor °c	T sal cor °c
1	1649.26079	18.6	18.5	31.9	18.08754	18.9412	34.03315
2	1696.78271	18.6	18.5	30.3	18.08754	18.9412	32.16515
3	2480.43303	18.7	18.6	38.7	18.18918	19.04892	41.97215
4	2652.92971	18.6	18.5	32.8	18.08754	18.9412	35.0839
5	1544.84715	18.8	18.7	35.6	18.29082	19.15664	38.3529
6	1375.99347	18.8	19.8	42.3	18.29082	20.34156	46.17515
7	1409.75826	18.9	18.8	32.1	18.39246	19.26436	34.26665
8	1546.89837	18.8	19.1	35.9	18.29082	19.58752	38.70315
9	2259.39097	18.8	18.8	32.5	18.29082	19.26436	34.73365
10	1666.8542	18.9	18.8	39.2	18.39246	19.26436	42.5559
11	2164.57686	18.8	18.7	35.6	18.29082	19.15664	38.3529

Tabla A.11 Resumen de temperaturas y potencias para cada experimento

Sabiendo las temperaturas y las potencias de calentamiento se puede calcular fácilmente el flujo másico y utilizando el volumen específico con ayuda del diagrama psicrométrico y mediante interpolación se puede calcularla densidad y con ello el caudal en las condiciones de salida de las resistencias de la UTA, las cuales son las condiciones de entrada al circuito formado por las placas orificio y la tobera. Esto puede verse en la tabla A.12:

Nº exp	Potencia(W)	Flujo más (kg/s)	Ve sal (m3/kg)	Densidad (kg/m3)	V sal (m3/s)	V sal (m3/min)
1	1649.26079	0.10841352	0.95947859	1.04223274	0.10402045	6.24122709
2	1696.78271	0.12729299	0.95364109	1.04861253	0.12139183	7.28350978
3	2480.43303	0.10734731	0.98428797	1.01596284	0.10566066	6.33963988
4	2652.92971	0.16303807	0.96276219	1.0386781	0.15696689	9.41801356
5	1544.84715	0.07983776	0.97297781	1.02777267	0.07768037	4.66082231
6	1375.99347	0.05284101	0.99742234	1.00258432	0.0527048	3.16228801
7	1409.75826	0.09322375	0.96020828	1.04144072	0.08951421	5.37085288
8	1546.89837	0.08028097	0.97407234	1.02661779	0.07819948	4.69196861
9	2259.39097	0.14489736	0.96166766	1.03986028	0.13934311	8.36058634
10	1666.8542	0.07099682	0.98611219	1.0140834	0.07001083	4.20064957
11	2164.57686	0.11186542	0.97297781	1.02777267	0.10884257	6.53055426

Tabla A.12 Resumen de caudales calculados por flujo de calor

Sin embargo estas condiciones de salida no coinciden con las condiciones de llegada a la tobera, la cual está al final del circuito de las placas orificio. Para calcular de una forma aproximada cuál sería el caudal en las condiciones de llegada a la tobera, sabiendo que el valor del flujo másico sí es correcto, hay que estimar las condiciones de temperatura a la llegada a la

tobera. Para ello se estiman las pérdidas de calor que se producen en la propia UTA y en todo el recorrido de los tubos. Para ello se miden dimensiones en la UTA y el circuito de tubería y placas orificio y se supone un coeficiente de película exterior del aire calmado. Los valores utilizados son los siguientes (tabla A.13):

Magnitud	Valor
Coeficiente película exterior h	12 W/m ² K
Área UTA tras resist 2x4x0.265m	2.12m ²
Perímetro conductos	0.7854m
Longitud conductos	12m

Tabla A.13 Consideraciones y medidas

Con estos datos pueden calcularse las pérdidas por convección tanto en la UTA como en los conductos, considerando que la diferencia de temperaturas equivale a la diferencia entre la temperatura de salida (tras resistencias) y la temperatura ambiental. Esta consideración no es del todo exacta debido a que a lo largo de la UTA y del conducto, las pérdidas de calor reducen la temperatura interior. Sin embargo nos vale como aproximación para comprobar si las medidas realizadas en la calibración se pueden considerar válidas. Con estas pérdidas se puede obtener el incremento de temperatura sufrido desde que se mide la temperatura de salida (tras las resistencias) hasta que llega a la tobera y de este modo calcular el volumen específico, la densidad y el caudal en este punto. El resumen de los resultados aparece en la tabla A.14:

Nº Exp	Pérdidas UTA (W)	Pérdidas tubos (W)	Incr Tsalida tubos(tobera)	Tsal tobera °C	Ve cor
1	392.619336	1745.452225	15.43315	18.6	0.91125
2	345.097416	1534.185909	13.56515	18.6	0.91125
3	592.043496	2632.024312	23.27215	18.7	0.9115625
4	419.350416	1864.289529	16.4839	18.6	0.91125
5	497.425776	2211.386063	19.5529	18.8	0.911875
6	696.423816	3096.063765	27.37515	18.8	0.911875
7	390.927576	1737.931235	15.36665	18.9	0.9121875
8	506.336136	2250.998497	19.90315	18.8	0.911875
9	405.352056	1802.057574	15.93365	18.8	0.911875
10	601.806096	2675.425516	23.6559	18.9	0.9121875
11	497.425776	2211.386063	19.5529	18.8	0.911875

Tabla A.14 Resumen de balance de pérdidas de calor.

Con este nuevo volumen específico puede calcularse el caudal corregido o “real” que circula por la tobera convergente y compararse con el caudal real medido con la ecuación de la tobera. El resultado se expresa en la tabla A.15:

Nº Exp	Caudal res(m3/min)	Caudal tob(m3/min)	Error
1	5.89631247	4.596900433	22%
2	6.924140884	5.154908875	26%
3	5.850215993	5.175586344	12%
4	8.884940596	6.429780487	28%
5	4.342469514	4.550294754	-5%
6	2.808665142	2.440556379	13%
7	5.135800129	2.440556379	52%
8	4.335485405	3.552749508	18%
9	7.855789959	6.810555754	13%
10	3.816362029	4.834338209	-27%
11	6.070239227	5.926889187	2%
	Media error		14%

Tabla A.15 Resumen de errores por flujo de calor.

Puede verse que la media del error es de un 14%, nada descabellado si se piensa en la serie de simplificaciones que se han realizado para calcular las pérdidas por calor. Hay casos puntuales dónde el error es muy grande, sin embargo en líneas generales puede validarse la calibración realizada utilizando el método del flujo de calor como comprobación.

Para ver todos los datos y relaciones que se han llevado a cabo en la calibración de las placas orificios puede utilizarse el archivo .xlf adjunto con el nombre de Calibración Placas Orificio Modificado Final, en la carpeta Calibraciones/Calibraciones placas orificio del CD adjunto al trabajo.

Como puede verse el trabajo de calibración de las placas orificio ha sido tortuoso y aunque la fiabilidad de las constantes obtenidas han sido corroboradas por los dos métodos propuestos, se ha decidido incluir la tobera convergente como equipo de medida en la parte experimental, obteniéndose una mayor certeza sobre el caudal que atraviesa por todo el dispositivo experimental.

A.5 Bibliografía:

Referencias en páginas web:

[W-1] Fluecal. Ficha técnica.

http://la.flukecal.com/sites/flukecal.com/files/imagecache/product-detail-large/assets/products/Fc-9141_03a_328%20px.jpg. Última visita 26/05/2016.

[W-2] Carel. Catálogo comercial. http://www.carel.com/immersed-electrode-humidifiers/-/journal_content/56_INSTANCE_i4q5KIMLInKK/10191/15404. Última visita 26/05/2016.

[W-3] Truetechtools. Catálogo comercial. http://www.truetechtools.com/Testo-435-2-Multifunction-Meter-ONLY-wMemory-Software_p_542.html. Última visita 26/05/2016.

[W-4] Testo. Catálogo comercial.

https://www.testo.es/resources/f7/4c/62f119a92803/testo-435-p-pr-mul-002809_pdpz.jpg. Última visita 26/05/2016.

[W-5] UPV. Materiales.

http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm09/pfcm9_3_5.html. Última visita 27/05/2016.