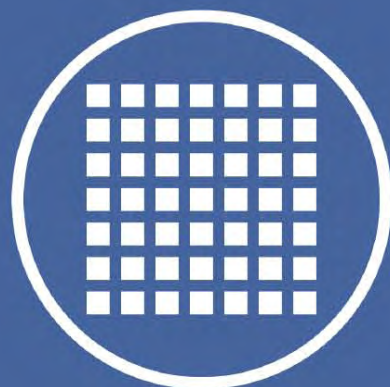


Copia No Controlada

Instituto Nacional
de Tecnología Industrial

Centro de Desarrollo e Investigación
en Física y Metrología



INTI



Procedimiento específico: PEC17

CALIBRACIÓN DE HIGRÓMETROS EN EL GENERADOR DE DOS PRESIONES

Revisión: Febrero 2017

Este documento se ha elaborado con recursos del Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
Sólo se permite su reproducción sin fines de lucro y haciendo referencia a la fuente.


PEC17 Lista de enmiendas: Febrero 2017

[illegible]

PEC17 Índice: Febrero 2017

NOMBRE DEL CAPÍTULO	REVISIÓN
Índice	Febrero 2017
Calibración de higrómetros en el generador de dos presiones	Febrero 2017
Anexo 1	Febrero 2017
Anexo 2	Febrero 2017

PREPARADO POR



FIRMA Y SELLO
Lic. JAVIER GARCIA SKABAR
COORD. U.T. CALOR
FISICA Y METROLOGIA
INTI

REVISADO POR

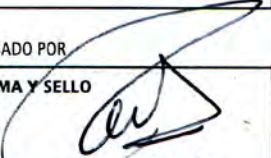
FIRMA Y SELLO

REVISADO POR

FIRMA Y SELLO

REVISADO POR


FIRMA Y SELLO



ING. PATRICIA VARELA
COORD. CALIDAD Y ADMINISTRACION
INTI - FISICA y METROLOGIA

APROBADO POR

FIRMA Y SELLO



Ing. JUAN A. FORASTERI
DIRECTOR TECNICO
INTI - FISICA Y METROLOGIA

PEC17: Febrero 2017

1. Objetivo

Establecer los métodos para la calibración de higrómetros en el generador de 2 presiones.

Determinar la corrección de la indicación del instrumento en humedad relativa y/o temperatura de punto de rocío y su incertidumbre.

2. Alcance

Este procedimiento afecta a higrómetros y termo-higrómetros con indicación digital y/o registro digital de datos en humedad relativa y/o temperatura de punto de rocío.

- Es aplicable para la calibración en al menos 8 puntos de humedad relativa y temperatura entre 10 %rh a 95 %rh a temperaturas entre -10 °C y 70 °C.
- Es aplicable para la calibración en al menos 4 puntos de temperatura de punto de rocío en el rango de -30 °C a 70 °C de temperatura de punto de rocío.

3. Definiciones y abreviaturas

3.1. rh: Humedad relativa

3.2. tdew/frost: temperatura de punto de rocío / escarcha

3.3. IR: instrumento de referencia

3.4. IBC: Instrumento bajo calibración

3.5. Tetc: Termómetro externo para medir temperatura de la cámara

3.6. TeGradt: Termómetros (Termistores) para medir gradientes de temperatura de la cámara

4. Documentación de referencia

4.1. A Guide to the Measurement of Humidity – Published 1996 by The Institute of Measurement and Control.

4.2. Temperature and humidity Measurement- Handbook of temperature measurement Vol. 1 edited by Robin E. Bentley NML CSIRO © Springer Verlag Singapore Pte. Ltd. 1998.

4.3. Uncertainty in humidity measurements (Publication of EUROMET Workshop P758) – MIKES Publication J4/2006 Martti Heinonen.

4.4. Serie 2500 Benchop two-pressure humidity generator Operation and maintenance manual – Copyright © 1991-2001 Thunder Scientific corporation.

4.5. Uncertainty analysis of the Thunder Scientific model 2500 two-pressure humidity generator – Copyright © 1998 Thunder Scientific corporation. Author: Bob Hardy.

4.6. Uncertainty analysis for humidity generators – April 2000 Measurement Standards Laboratory Industrial Research Limited Report N°988. Author: Jeremy Lovell-Smith.

4.7. Two-pressure, Two-temperature Humidity Generator RISP-5 – ©2002 by NCSL International. Authors: Two-pressure, Two-temperature Humidity Generator Working Group.

4.8. ControLog Automation and Control Software for the model 2500 Humidity Generator Reference Manual – Copyright ©1997 Thunder Scientific corporation.

4.9. Uncertainty Estimations for Standard Humidity Generator of INTI, J. Garcia Skabar, Int J Thermophys DOI 10.1007/s10765-015-1905-4.

5. Responsabilidades

5.1. Del Coordinador de la Unidad Técnica Calor

Supervisar la realización de las calibraciones. Verificar que se cumplan los procedimientos y revisar los resultados.

5.2. Del personal del laboratorio

Realizar las calibraciones aplicando el presente procedimiento. Procesar los datos correspondientes y emitir el certificado.

6. Instrumentos de referencia

6.1. Generador de humedad de dos presiones marca Thunder Scientific, modelo 2500ST-LT, número de serie 0607577.

PEC17: Febrero 2017

- 6.2. Termómetro digital Testo. Modelo 735, número de serie 01157025/512.
- 6.3. Termorresistencia Electrotherm, número de serie 2001-01.
- 6.4. ControLog Automation and Control Software for the model 2500 Humidity Generator.
- 6.5. Colector de cobre con termistores para estabilidad térmica y medición de gradientes
- 6.6. HP 34420
- 6.7. Scanner fabricado en INTI
- 6.8. Programas en labview para medición de gradientes
- 6.9. Programas en matlab para el análisis de datos y calculo de incertidumbre
- 6.10. TRP 37 identificación. SPRT marca ROSEMOUNT, modelo 162CE, rango de trabajo H₂O (T) a In (S) (156,5985 °C).
- 6.11. CHUB E4
- 6.12. TRP41 PT100 Hart alta exactitud
- 6.13. TRP42 PT100 Hart alta exactitud

7. Condiciones ambientales

La temperatura del laboratorio deberá estar comprendida en: $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$ y la humedad relativa ambiente menor que 80 %hr.

8. Instrucciones para la calibración

Al efectuar la calibración se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- 8.1. Se introducen los sensores de los IBC en la cámara del generador dentro del espacio destinado a la calibración (a mas de 10 cm de distancia de las paredes de la cámara), próximos al sensor de temperatura de la cámara. En caso de utilizarse un termómetro externo para medir la temperatura de la cámara (Tetc) y/o los gradientes de temperatura en la cámara durante la calibración, los IBC se colocan entre este y el sensor de la cámara. Para mejorar la respuesta en tiempo y la estabilidad térmica se puede utilizar el colector de cobre con los termistores para medir gradientes de temperatura (TeGradt). Si el IBC no puede o no es conveniente introducirlo dentro de la cámara del generador (ej.: higrómetros de punto de rocío de espejo enfriado) puede introducirse un tubo de teflón y extraer la muestra de aire de la cámara del generador con una bomba, cuidando que el flujo de aire sobre el espejo no supere el máximo recomendado por el fabricante, del orden de 1 l/min. Si se miden temperaturas de punto de rocío próximas al ambiente puede ser necesario aislar o calentar los tubos para evitar condensación.
- 8.2. Se inicia el programa para control y registro de datos del generador ControLog. Si el IBC y el Tetc (Si se lo utiliza) registran los datos se sincronizan temporalmente con ControLog y se inicia el registro. Si el IBC y el Tetc no registran los datos, cuando se llega a la condición de estabilidad indicada en 8.3. se puede registrar las lecturas manualmente en ControLog u en una planilla de cálculo registrando también la hora de lectura. Si se utiliza el sistema con los TeGradt, se registra en una planilla de cálculo registrando también la hora de lectura.
- 8.3. Se selecciona y estabiliza (aproximadamente 1 hora) la menor condición de humedad requerida para calibración. Una vez alcanzada la estabilidad, dispersión de la indicación de la rh / tdew del generador menor a 0,1%rh / 0,01 °C, se mantiene esta condición durante a lo menos 20 (veinte) minutos. Durante este tiempo se registran por lo menos 10 (diez) lecturas de la indicación del IBC igualmente separadas en el tiempo. Si se utiliza el sistema con los TeGradt se realizan una o dos corridas para medir los gradientes durante los 20 (veinte) minutos de estabilidad.
- 8.4. Se repite 8.3. seleccionando la condición de menor humedad entre las restantes hasta cubrir todas las condiciones de calibración requeridas en humedad a una dada temperatura.
- 8.5. Se repite 8.3. seleccionando nuevamente la menor condición de humedad requerida para calibración, con el objeto de evaluar efectos de histéresis del IBC.
- 8.6. En caso de considerarse necesario para una mejor evaluación de los efectos de reproducibilidad del IBC. Se puede omitir 8.5. y continuar la secuencia de medición seleccionando ahora las condiciones de humedad en orden descendente repitiendo 8.3. hasta cubrir todas las condiciones de calibración requeridas en humedad a la temperatura seleccionada. Realizando esta secuencia faltara repetir la condición de mayor humedad. Se repite 8.3. a esa condición.
- 8.7. Se selecciona otra temperatura definida en los requerimientos de la calibración y para ella se repite 8.3. a 8.7.
- 8.8. Se repite 8.7. hasta cubrir todas las condiciones de temperatura requeridas.

PEC17: Febrero 2017

8.9. Finalmente se obtienen por los menos 10 lecturas del IBC por cada condición de medición establecida y el registro permanente de los parámetros del generador medidos y calculados en el programa ControLog.

8.10. Se cierra el archivo de datos de ControLog y del IBC si es el caso.

9. Tratamiento de datos

9.1. De los archivos de datos de ControLog y de los registros del IBC, se obtiene por lo menos 10 datos de medición en cada condición de estabilidad de humedad y temperatura 8.3. Se determinan los promedios y las dispersiones para cada grupo de valores obtenidos en 8.3.

9.2. El valor de rh o $tdew/frost$ de la muestra de aire de referencia que genera el equipo y a la cual se expone el instrumento bajo calibración se calculan utilizando los valores de presión y temperatura calculados en 9.1. a partir de los registros de ControLog y utilizando el programa en matlab para el análisis de datos según se describe en la referencia 4.9 y el ANEXO 1 Cálculo de rh , $tdew/frost$ y sus incertidumbres para el Generador de dos presiones.

9.3. El valor de referencia para la temperatura de la cámara puede obtenerse de los registros de ControLog del sensor de temperatura de la cámara del generador o del Tetc si se lo utiliza.

10. Modelo de medición e incertidumbres

Humedad relativa

La corrección C_x del higrómetro es:

$$C_x = IRrh - IBCrh + \delta 1 + \delta 2 + \delta 3 \quad (1)$$

Y su incertidumbre $U(C_x)$ para cada valor obtenido en 9. será estimada de acuerdo al siguiente balance, donde:

C_x es la corrección a aplicar al valor indicado por el higrómetro a calibrar.

$IRrh$ es el valor de humedad generado por el equipo y al cual se expone el IBC, su incertidumbre $U(IRrh)$ se obtiene según el ANEXO 1.

$IBCrh$ es el promedio de los valores de humedad indicados por el IBC (obtenidas en 9.), su incertidumbre $U(BCrh)$ se obtiene del promedio de las dispersiones de los valores medidos.

$\delta 1$ es la corrección del valor indicado en humedad debida a la repetibilidad, reproducibilidad o efecto de "histéresis" del IBC, su incertidumbre $U(\delta 1)$ se obtiene de la desviación estándar de las correcciones de al menos el punto de calibración de menor humedad medido (ver 8.3 a 8.5).

$\delta 2$ es la corrección del valor indicado en humedad debido a la resolución del IBC, su incertidumbre $U(\delta 2)$ se considera $\frac{1}{2}$ dígito de la resolución en humedad del indicador del IBC.

$\delta 3$ es la corrección a las lecturas del IBC debida al **Efecto de la temperatura sobre el sensor de humedad del IBC**, su incertidumbre $U(\delta 3)$ se obtiene de considerar la variación de temperatura sobre el sensor de humedad multiplicada por un coeficiente de sensibilidad en humedad. Para el valor de variación de temperatura se considera la estabilidad de la cámara o la incertidumbre de calibración del IR en temperatura, la que resulta mayor. El coeficiente de sensibilidad se obtiene del análisis de los datos medidos o de las especificaciones del fabricante del instrumento.

Temperatura

La corrección C_x del termómetro es:

$$C_x = IRt - IBCt + \delta 1 + \delta 2 + \delta 3 \quad (2)$$

Y su incertidumbre $U(C_x)$ para cada valor obtenido en 8. será estimada de acuerdo al siguiente balance, donde:

C_x es la corrección a aplicar al valor indicado por el higrómetro a calibrar.

IRt es la indicación promedio de temperatura de los termómetros patrones (El sensor de temperatura de la cámara del generador o del Tetc), su incertidumbre $U(T_{ref})$ se obtiene según el ANEXO 1.

$IBCrh$ es el promedio de las temperaturas indicadas por el termómetro bajo calibración (obtenidas en 9), su incertidumbre $U(T_{ind})$ se obtiene del promedio de las dispersiones de los valores medidos.

PEC17: Febrero 2017

$\delta 1$ es la corrección del valor indicado en temperatura debida a la repetibilidad, reproducibilidad o efecto de “histéresis” del IBC, su incertidumbre $U(\delta 1)$ se obtiene de la desviación estándar de las correcciones de dos puntos de temperatura repetidos a un mismo valor de humedad.

$\delta 2$ es la corrección del valor indicado en temperatura debido a la resolución del IBC $U(\delta 2)$ se considera $\frac{1}{2}$ dígito de la resolución en humedad del indicador del IBC.

Temperatura de punto de rocío / escarcha (Dew / frost)

La corrección C_x del higrómetro es:

$$C_x = IRtdew - IBCtdew + \delta 1 + \delta 2 + \delta 3 \quad (1)$$

Y su incertidumbre $U(C_x)$ para cada valor obtenido en 9. será estimada de acuerdo al siguiente balance, donde:

C_x es la corrección a aplicar al valor indicado por el higrómetro a calibrar.

$IRtdew$ es el valor de humedad generado por el equipo y al cual se expone el IBC, su incertidumbre $U(IRtdew)$ se obtiene según el ANEXO 1.

$IBCtdew$ es el promedio de los valores de humedad indicados por el IBC (obtenidas en 9.), su incertidumbre $U(IBCtdew)$ se obtiene del promedio de las dispersiones de los valores medidos.

$\delta 1$ es la corrección del valor indicado en humedad debida a la repetibilidad, reproducibilidad o efecto de “histéresis” del IBC, su incertidumbre $U(\delta 1)$ se obtiene de la desviación estándar de las correcciones de al menos el punto de calibración de menor humedad medido (ver 8.3 a 8.5).

$\delta 2$ es la corrección del valor indicado en humedad debido a la resolución del IBC, su incertidumbre $U(\delta 2)$ se considera $\frac{1}{2}$ dígito de la resolución en humedad del indicador del IBC.

$\delta 3$ es la corrección a las lecturas del IBC debida al **Efecto de la temperatura sobre el sensor de humedad del IBC**, su incertidumbre $U(\delta 3)$ se obtiene de considerar la variación de temperatura sobre el sensor

11. Ejemplos de Balance de incertidumbre

Humedad relativa

Fuente de incertidumbre	Simb	Valor estimado	Tipo	Dis	Intervalo (±)	Fac	u_i	v_i	c_i	$(c_i u_i)^2$	W-S	%
Humedad relativa del IR	Irrh	10,01 %rh	A1	N			0,064 %rh	50	1	0,00	0,00	18,6%
Indicación del IBC	IBCrh	10,37 %rh	A1	N			0,010 %rh	10	1	0,00	0,00	0,4%
Repetibilidad del IBC	d 1	0,00 %rh	A1	N			0,134 %rh	10	1	0,02	0,00	81,0%
Resolución del IBC	d 2	0,00 %rh	BR	R	0,005	1,73	0,003 %rh	50	1	0,00	0,00	0,0%
Efecto de la temperatura IBC	d 3	0,00 %rh	BR	R	0,000	1,73	0,00 °C	50	0,20 hr/°C	0,00	0,00	0,0%
Corrección indicación instrumento	Cx	-0,36 %rh		N	0,32	2,13	0,15 °C	15				100%

Temperatura

Fuente de incertidumbre	Simb	Valor	Tipo	Dis	Intervalo	Fac	u_i	v_i	c_i	$(c_i u_i)^2$	W-S	%
Temperatura del IR	IRt	24,89 °C	A1	N			0,089 °C	4	1	7,91E-03	0,00	99,3%
Indicación del IBC	IBCt	24,83 °C	A1	N			0,003 °C	4	1	1,00E-05	0,00	0,1%
Repetibilidad del IBC	d 1	0,00 °C	A1	N			0,006 °C	4	1	3,83E-05	0,00	0,5%
Resolución del IBC	d 2	0,00 °C	BR	R	0,005	1,73	0,003 °C	50	1	8,33E-06	0,00	0,1%
Corrección indicación instrumento	Cx	0,06 °C		N	0,25	2,8	0,09 °C	4				100%

Temperatura de punto de rocío / escarcha (Dew / frost)

Fuente de incertidumbre	Simb	Valor estimado	Tipo	Dis	Intervalo (±)	Fac	u_i	v_i	c_i	$(c_i u_i)^2$	W-S	%
Indicación del IR	IRtdew	10,21 °C	A1	N			0,034 °C	50	1	0,00	0,00	2,9%
Indicación del IBC	IBCtdew	10,21 °C	A1	N			0,132 °C	10	1	0,02	0,00	43,7%
Repetibilidad del IBC	d 6	0,00 °C	A1	N			0,146 °C	10	1	0,02	0,00	53,4%
Resolución del IBC	d 7	0,00 °C	BR	R	0,005	1,73	0,003 °C	50	1	0,00	0,00	0,0%
Efecto de la temperatura IBC	d 8	0,00 °C	BR	R	0,000	1,73	0,00 °C	50	0,20 hr/°C	0,00	0,00	0,0%
Corrección indicación instrumento	Cx	0,00 °C		N	0,42	2,08	0,20 °C	21				100%

PEC17: Febrero 2017

12. Confección del certificado de calibración

Además de lo establecido en el Manual de calidad y procedimientos generales, en el certificado de calibración se informa:

12.1. Una breve descripción del método de calibración utilizado.

12.2. Una tabla con los valores humedad relativa o temperatura de punto de rocío indicados por el instrumento bajo calibración, la corrección obtenida para cada valor y su incertidumbre.

13. Registro de la calidad

Se conservan registros manuscritos de las observaciones originales, copia de los certificados emitidos, como así también copia de la orden de trabajo, salida de elementos y demás documentación relacionada, de acuerdo con el Manual de la Calidad del INTI - Física y Metrología, capítulo 11.

14. Apéndices y anexos

ANEXO	TÍTULO
1	Calculo de rh, tdew/frost y sus incertidumbres para el Generador de dos presiones.
2	Uncertainty Estimations for Standard Humidity Generator of INTI

PEC17 Anexo 1: Febrero 2017

CALCULO DE LA HUMEDAD DE LA MUESTRA DE AIRE PRODUCIDA CON EL GENERADOR DE DOS PRESIONES Y SU INCERTIDUMBRE**1. Objetivo**

Establecer los métodos para el cálculo de la humedad de la muestra de aire producida por el generador de 2 presiones en humedad relativa y/o temperatura de punto de rocío / escarcha y su incertidumbre.

2. Alcance

Este procedimiento es aplicable para cualquier punto del rango de funcionamiento del generador en humedad relativa y/o temperatura de punto de rocío / escarcha.

- humedad relativa y temperatura entre 10 %rh a 95 %rh a temperaturas entre -10 °C y 70 °C.
- temperatura de punto de rocío / escarcha en el rango de -30 °C a 70 °C de temperatura de punto de rocío.

3. Tratamiento de datos

Retomando la descripción del tratamiento de los datos del PEC17:

- 3.1.** De los archivos de datos de ControLog y de los registros del IBC, se obtiene por lo menos 10 datos de medición en cada condición de estabilidad de humedad y temperatura 8.3. Se determinan los promedios y las dispersiones para cada grupo de valores obtenidos en 8.3.
- 3.2.** El valor de rh o tdew/frost de la muestra de aire de referencia que genera el equipo y a la cual se expone el instrumento bajo calibración se calculan utilizando los valores de presión y temperatura calculados en 9.1. a partir de los registros de ControLog y utilizando el programa en matlab para el análisis de datos según se describe en la referencia 4.9 y **como describe en el presente anexo.**
- 3.3.** El valor de referencia para la temperatura de la cámara puede obtenerse de los registros de ControLog del sensor de temperatura de la cámara del generador o del Tetc si se lo utiliza.
- 3.4.** Cálculo de humedad relativa: La humedad relativa se calcula utilizando las ecuaciones de Hardy (1998) para la presión de vapor (e) y para el factor de aumento (f), salvo aclaración. Los valores de entrada para este cálculo son los promedios de los valores medidos de P_s , P_c , T_s , T_c , (Variables de entrada) corregidos según la correspondiente calibración de los instrumentos utilizados, generalmente los sensores y equipo de lectura del generador, salvo aclaración. Ver referencia 4.9 ecu. 1.
- 3.5.** Cálculo de temperatura de punto de rocío / escarcha: La temperatura de punto de rocío / escarcha se calcula utilizando las ecuaciones de Hardy (1998) para la presión de vapor (e) y para el factor de aumento (f), salvo aclaración. Los valores de entrada para este cálculo son los promedios de los valores medidos de P_s , P_c , T_s , (Variables de entrada) corregidos según la correspondiente calibración de los instrumentos utilizados, generalmente los sensores y equipo de lectura del generador, salvo aclaración. Ver referencia 4.9 ecu. 2.
- 3.6.** La incertidumbre del valor de humedad relativa y/o temperatura de punto de rocío / escarcha se calcula propagando las incertidumbres de las variables de entrada mencionados en 9.4 y 9.5 en las ecuaciones correspondientes, ver referencia 4.9 ecu. 4 y 5.
- 3.7.** La incertidumbre de las variables de entrada se calcula según lo descripto en la referencia 4.9.
- 3.8.** Para ello se utiliza la planilla de cálculo PEC17U1.xlsm
Hoja Dat0: Se guardan los datos de medición a analizar se calculan los promedios y los desvíos
Hoja Dat1: Se resume la hoja Dat0, solo promedios y desvíos.
Hoja UG2P: Se toman los datos de la hoja Dat1 y se calculan las incertidumbres de las variables de entrada.
En las siguientes tablas se describen las componentes de incertidumbre consideradas en este cálculo.

PEC17 Anexo 1: Febrero 2017

Presión del saturador / cámara

Uncertainty component	typicall value
Dispersion of readings in stable condition, more than 10 readings	Around 5 Pa for low pressure and 50 Pa for high pressure
Pressure resolution	(traducer range / 25000)*0.5/ $\sqrt{3}$
Pressure calibration INTI report OTI N°FM-102-090-unico	sensor low pressure < 344500 Pa U=68,94757 Pa sensor high pressure > 344500 Pa U=689,4757 Pa

Temperatura del saturador

Uncertainty component	typicall value
Dispersion of readings in stable condition, more than 10 readings (u_1)	desvest / \sqrt{n}
Temperature resolution (u_2)	(0,01 . 0.5 / $\sqrt{3}$) °C
Temperature calibration INTI report OTI N° FM-102-PCC-036-unico (u_3)	0,02 °C (k=2)
Saturator efficiency, saturator bath uniformity, contamination of supply gas and water	0,104 °C (k=2)

Temperatura de la cámara

Uncertainty component	typicall value
Dispersion of readings in stable condition, more than 10 readings (u_1)	desvest / \sqrt{n}
Temperature resolution (u_2)	(0,01 . 0.5 / $\sqrt{3}$) °C
Temperature calibration INTI report OTI N° FM-102-PCC-036-unico (u_3)	0,02 °C (k=2)
Chamber temperature uniformity	0,104 °C (k=2)

Hoja pMatlab: Se resumen los resultados de la hoja UG2P, valores variables de entrada e incertidumbre. Estos datos se importan al Matlab para usarlos como INPUT en los programas para calcular la rh, tdew/frost y sus incertidumbres, ver referencia 4.9. Luego en esta hoja se pegan los resultados, la salida de los programas de Matlab. En la carpeta *15 funciones ew fw de df u uMC* se encuentran las versiones vigentes y validadas de los programas para en Matlab para calcular la rh, tdew/frost y sus incertidumbres, tanto para realizarlo propagando incertidumbres como propagando distribuciones (Simulación por Monte Carlo).

Para el PEC17 solo se realiza el cálculo propagando incertidumbres. Se utiliza el programa *Para PEC17U1.m* se configura el valor de n según los puntos medidos, filas de datos de entrada. Este programa llama a las otras funciones que están en esta carpeta y se obtiene como variable *so* una matriz de n filas por 4 columnas con los valores de rh y tdew/frost con sus correspondientes incertidumbres.

La validación de estos cálculos se realizó en la referencia 4.9, en la planilla de cálculo *validación ucalctdew*.

Hoja Outrh: Se tiene el resumen de los resultados para utilizar en las planillas PEC17Urh2

Hoja Outtdew: Se tiene el resumen de los resultados para utilizar en las planillas PEC17Utdew2.

Uncertainty Estimations for Standard Humidity Generator of INTI

J. Garcia Skabar

International Journal of Thermophysics
Journal of Thermophysical Properties and Thermophysics and Its Applications

ISSN 0195-928X


Int J Thermophys
DOI 10.1007/s10765-015-1905-4


Volume 36 • Number 4 • April 2015

**ONLINE
FIRST**

**International
Journal of
Thermophysics**

IJOT • 10765 • ISSN 0195-928X
36(4) 603-808 (2015)

 Springer

 Springer

Your article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer Science +Business Media New York. This e-offprint is for personal use only and shall not be self-archived in electronic repositories. If you wish to self-archive your article, please use the accepted manuscript version for posting on your own website. You may further deposit the accepted manuscript version in any repository, provided it is only made publicly available 12 months after official publication or later and provided acknowledgement is given to the original source of publication and a link is inserted to the published article on Springer's website. The link must be accompanied by the following text: "The final publication is available at link.springer.com".

*Author's personal copy*Int J Thermophys
DOI 10.1007/s10765-015-1905-4

Uncertainty Estimations for Standard Humidity Generator of INTI

J. Garcia Skabar¹Received: 11 October 2013 / Accepted: 6 May 2015
© Springer Science+Business Media New York 2015

Abstract Two methods for the uncertainty estimation in the dew/frost-point temperature and relative humidity are shown. The uncertainty estimation was performed propagating the uncertainties of pressure and temperature measurements in the corresponding equations in the classic method, and propagating the distributions of the input variables, pressure and temperature, (Monte Carlo simulation) in an alternative method. The results obtained by the different methods are compared for analyzing the validity of the uncertainty calculations, and the assumption of negligible correlations between the input variables. The agreement between the presented uncertainty analysis and the outcomes of the comparison with INMETRO is discussed.

Keywords Humidity standard · Monte Carlo simulation · Uncertainty

List of symbols

rh	Relative humidity
t_{dew}	Dew-point temperature
t_{frost}	Frost-point temperature
$e_w(t)$	Vapor pressure
$f(t, P)$	Enhancement factor
P_s	Total pressure in saturator
P_c	Total pressure in test chamber
t_s	Temperature in saturator
t_c	Temperature in test chamber

✉ J. Garcia Skabar
jskabar@inti.gob.ar

¹ Unidad Técnica Calor, Centro de Investigación en Física y Metrología, Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Avda. General Paz 5445, C.C. 157, B1650WAB San Martín, Argentina

Author's personal copy

Int J Thermophys

$u(rh)$	Standard uncertainty in relative humidity
$u(t_{\text{dew}})$	Standard uncertainty in dew-point temperature
$u(t_{\text{frost}})$	Standard uncertainty in frost-point temperature
$u(e_w)$	Standard uncertainty in vapor pressure equation
$u(f)$	Standard uncertainty in enhancement factor equation
$u(P_s)$	Standard uncertainty of saturation pressure measurement
$u(P_c)$	Standard uncertainty of chamber pressure measurement
$u(t_s)$	Standard uncertainty of saturation temperature measurement
$u(t_c)$	Standard uncertainty of chamber temperature measurement

1 Introduction

INTI is the national metrology institute (NMI) of Argentina, Member State of the Metre Convention and Associate State and Economy of the General Conference on Weights and Measures CGPM. It has the responsibility of the maintenance, development, and dissemination of measurement standards of Argentina in agreement with the International System of Units (SI). The standards associated with the measurements of temperature and humidity are maintained at the Heat Technical Unit (UT Calor) of the Physics and Metrology Centre (Centro de Física y Metrología) of INTI. Traceability of temperature and humidity measurements is spread to various sectors of science, industry, commerce, health, and environment, through the calibration services.

In the year 2006, a primary humidity generator was acquired. This generator operates on the two-pressure principle, and today it is INTI's humidity standard. The traceability to the International System of Units (SI) is maintained via calibration of pressure and temperature sensors at INTI. INTI's humidity generator covers a range of 10 %rh to 95 %rh at temperatures between $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (approximately $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ in dew/frost-point temperatures). In the year 2011, the generator was used to carry out a comparison with the INMETRO hygrometry laboratory in the range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dew/frost-point temperatures at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ steps [1].

The aim of this work is to carry out an uncertainty analysis for INTI's humidity standard generator. In Sect. 2, INTI's two-pressure humidity generator, the equations used to compute rh and t_{dew} and the measurement procedure of INTI's laboratory are briefly described. In Sect. 3, two alternative methods for the estimation of the humidity uncertainty are developed, on one hand, the propagation of the uncertainties [2–4], and on the other hand, the propagation of the distributions [5,6]. Both methods are evaluated for different values of relative humidity and different values of dew/frost-point temperatures, and the analysis of the uncertainties of input variables is shown. In Sect. 4, the results of both methods are compared. Finally, the agreement of uncertainty estimation with the INMETRO-INTI comparison is shown and discussed, and a validation of INTI's humidity standard uncertainty estimations is demonstrated.

2 Experimental Apparatus and Procedures

INTI's humidity standard is a two-pressure primary humidity generator. The two-pressure principle for generating humidity air samples is a process that involves first

Author's personal copy

Int J Thermophys

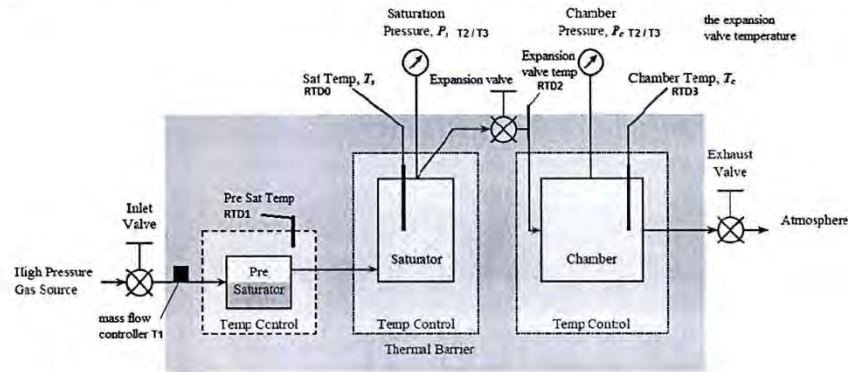


Fig. 1 Diagram of INTI's humidity standard

the saturation of an air sample at a certain level of pressure and then the expansion of this sample to produce a lower relative humidity (see Fig. 1) [7].

The humidity value of the generated air sample is determined by measurements of P_s , P_c , t_s , and t_c using Eq. 1 or 2 [3,4,7,8]. The symbols are listed in the Nomenclature.

$$rh(P_s, P_c, t_s, t_c) = \left(\frac{f(t_s, P_s) \cdot e_w(t_s) \cdot P_c}{f(t_c, P_c) \cdot e_w(t_c) \cdot P_s} \right) 100 \quad (1)$$

$$f(t_{\text{dew}}, P_c) \cdot e_w(t_{\text{dew}}) = \frac{f(t_s, P_s) \cdot e_w(t_s)}{P_s} P_c \quad (2)$$

In this generator, the only settable parameters are P_s , t_s , and the mass flow rate. The sample chamber is at atmospheric pressure and is stabilized to a temperature similar to that of the saturator. The measurement values of P_s , P_c , t_s , t_c , and the calculated relative humidity and dew-point temperature are shown in the front panel of the equipment or via data acquisition software.

This equipment has four temperature sensors (thermistors), namely RTD0, RTD1, RTD2, and RTD3. RTD0 measures the saturation temperature indirectly, by measuring the fluid temperature that surrounds the saturator. RTD1 measures the presaturator temperature, RTD2 the expansion valve temperature, and RTD3 the test chamber temperature. RTD0, RTD1, and RTD2 are used for indication and control, while RTD3 is only for indication.

For pressure measurements, the generator has two piezoresistive type transducers, T2 for low pressure (0 kPa to 345 kPa), and T3 for high pressure (345 kPa to 1034 kPa). When P_s is below 345 kPa, T2 is used to measure P_s and P_c and both measurements of pressure are made with the same transducer.

All pressure and temperature sensors are calibrated at INTI with traceability to SI through the national temperature and pressure standards [9].

Finally, for measuring and controlling the air mass flow rates through the generator, a mass flow controller (T1) is used. See Fig. 1 [7].

Author's personal copy

Int J Thermophys

To calculate the humidity of the generated sample only the indications of thermistors RTD0 and RTD3 and transducers T2 and T3 are used. Therefore, the uncertainty of the humidity value of the generated sample depends on the uncertainty of these measurements. In the case of relative humidity, it depends on the measurements of sensors RTD0 and RTD3 and transducers T2 and T3. In the case of dew/frost-point temperatures, it depends only on the measurements of sensor RTD0 and transducers T2 and T3.

For this work, and usually in our laboratory, to calculate the relative humidity or dew/frost-point temperature values of the generated sample, functions programmed in a software for mathematic calculus are used, instead of the generator display values or the values calculated by the acquisition software of the generator. These functions have the option to choose among the most typical formulae for $e_w(t)$ and $f(t, P)$ [8, 10–14]. This work was carried out with the Hardy formulae for $e_w(t)$ and $f(t, P)$. The formula for $f(t, P)$ is Greenspan's equation based on Hyland's correlations with coefficients adapted to ITS-90 by Hardy [3, 4].

The considered data are typical values from measurements made with the generator during the calibration of hygrometers. During the process of calibration, the data are acquired continuously at a rate of 1 sample per minute. The data used to calculate the relative humidity or dew/frost-point temperature come from an interval of at least 10 min in a stable condition.

3 Uncertainty Estimations

3.1 Uncertainty Evaluation of Input Variables: P_s , P_c , t_s , t_c , $e_w(t)$, and $f(t, P)$ Equations

The uncertainty of the pressure measurement was calculated by combining the components following the law of propagation of uncertainty [2]. In a calibration service, typical data dispersion, for a sample of 10 measurements, is around 5 Pa for low-pressure measurements (lower than 344 500 Pa) and 50 Pa for high-pressure measurements (higher than 344 500 Pa). The pressure resolution value is $((\text{transducer range}/25\,000) \times 0.5/\sqrt{3})$ Pa [7]. The calibration uncertainty of the pressure sensors was obtained from INTI's calibration report OTI N°FM-102-090-unico, and equals 34.5 Pa for the low-pressure sensor, and 345 Pa for the high-pressure sensor. The linearity and hysteresis are included in the pressure sensors' calibration uncertainty. As a result, the total combined uncertainty for low-pressure measurements is 36 Pa and for high-pressure measurements is 354 Pa.

The uncertainty of the saturator temperature measurement and the uncertainty of the chamber temperature measurement were calculated by combining the components following the law of propagation of uncertainty [2]. The typical dispersion of readings obtained in calibration services for a sample of more than 10 values and in a stable condition is lower than 0.01 °C. The temperature resolution value is $(0.01 \times 0.5/\sqrt{3})$ °C [7]. The calibration uncertainty of the temperature sensors was obtained from INTI's calibration report OTI N°FM-102-PCC-036-unico and is

Author's personal copy

Int J Thermophys

0.01 °C. Linearity and hysteresis are included in the temperature sensor uncertainty calibration.

To compute the uncertainty of the saturator temperature measurement, we add to previous components the uncertainty component by the saturator efficiency, the saturator bath uniformity, and the contamination of supply gas and water. This is not obtained by measurements or test data; it was estimated globally as 0.05 °C in agreement with [3,15]. As a result, the total combined uncertainty of the saturator temperature measurements is 0.05 °C.

The chamber sample uniformity can be estimated from a uniformity study and from the measurements of the chamber temperature carried out during the calibration services. The uniformity study was performed with nine temperature sensors at three different temperatures. During the calibration process, the chamber temperature is measured with two sensors simultaneously, in two positions close to the sensor of the instrument under calibration. In this case the uniformity was evaluated as the difference between the measurements of both sensors. The value considered, 0.1 °C, is a typical result of this kind of evaluation. The total combined uncertainty of the chamber's temperature measurements turns out to be 0.1 °C.

The long-term stability of the sensors, self-heating, heat conduction along the temperature probes, and the effect of thermal radiation contribute to the uncertainty but are negligible compared to the total combined uncertainty resulting from temperature measurements; therefore, they were not included in this analysis.

The uncertainty of the formulae for $e_w(t)$ and $f(t, P)$ was obtained from the bibliography and the following considerations were made.

In the $e_w(t)$ formula, an uncertainty larger than that calculated for Wexler and Hardy coefficients was considered [3,4,8,10,11]. For the range of 0.01 °C to 100 °C, a standard relative uncertainty of 0.005 % of the value of $e_w(t)$ was considered. For the range of -100 °C to 0.01 °C, a simplification of Wexler's formula that gives an expanded relative uncertainty $u = (0.0001 - 0.00005 \text{ °C}^{-1} \times t) \times e_w(t)$ ($k = 2$ at the 95 % confidence level) was used, but was considered as a standard relative uncertainty.

For the computation of $f(t, P)$, the formula given by Greenspan [13] with the coefficients updated by Hardy [8] was considered. The standard uncertainty was computed for the temperature range from -50 °C to 90 °C and for the pressure range from 1×10^5 Pa to 10×10^6 Pa (1 bar to 100 bar) using Eq. 3. This formula [3] was fitted to Hyland's results given in table 9 of [14],

$$u(f) = \left((-6 \times 10^{-7})t + 5 \times 10^{-5} \right) P^2 \\ + \left(3 \times 10^{-6}t^2 + (-5 \times 10^{-4})t + 3.07 \times 10^{-2} \right) P \\ + 3 \times 10^{-8}t^3 + (-2 \times 10^{-6})t^2 + (-1 \times 10^{-4})t + 3.5 \times 10^{-3} \quad (3)$$

3.2 Propagation of Uncertainties

The law of propagation of uncertainty was applied to Eqs. 1 and 2 in order to compute the respective uncertainties [2]. In both cases, the correlation between the input

Author's personal copy

Int J Thermophys

variables was not considered. The components, t_s , t_c , P_s , and P_c , are independent variables. Only in the case of the low-pressure measurements, which were made with the same sensor for the P_s and P_c , some correlation may be considered. The components that clearly are correlated are the successive evaluation of $e_w(t)$ and $f(t, P)$. The correlation coefficient is known only for similar vapor pressures and is 1, which reduces the uncertainty. But for the two-pressure generation systems, these components are considered uncorrelated, in a more conservative way and overestimating its contribution to the uncertainty [3,16]. In addition, one of the scopes of this work is to check the viability of considering no correlation between the input variables in the propagation of uncertainties.

3.2.1 Uncertainty Propagation in Relative Humidity Formulae

Applying the law of propagation of uncertainty as usual in the formulae for relative humidity (Eq. 1), the following expression is obtained for its uncertainty [2–4]:

$$\begin{aligned} (u(rh))^2 = & \left(rh \left(\frac{\partial f(t_s, P_s)}{\partial t_s} \cdot \frac{1}{f(t_s, P_s)} + \frac{1}{e_w(t_s)} \frac{\partial e_w(t_s)}{\partial t_s} \right) u(t_s) \right)^2 \\ & + \left(rh \left(-\frac{\partial f(t_c, P_c)}{\partial t_c} \cdot \frac{1}{f(t_c, P_c)} - \frac{1}{e_w(t_c)} \frac{\partial e_w(t_c)}{\partial t_c} \right) u(t_c) \right)^2 \\ & + \left(rh \left(\frac{\partial f(t_s, P_s)}{\partial P_s} \cdot \frac{1}{f(t_s, P_s)} - \frac{1}{P_s} \right) u(P_s) \right)^2 \\ & + \left(rh \left(-\frac{\partial f(t_c, P_c)}{\partial P_c} \cdot \frac{1}{f(t_c, P_c)} + \frac{1}{P_c} \right) u(P_c) \right)^2 \\ & + \left(\frac{rh}{e_w(t_s)} u(e_w(t_s)) \right)^2 + \left(-\frac{rh}{e_w(t_c)} u(e_w(t_c)) \right)^2 \\ & + \left(\frac{rh}{f(t_s, P_s)} u(f(t_s, P_s)) \right)^2 + \left(-\frac{rh}{f(t_c, P_c)} u(f(t_c, P_c)) \right)^2 \quad (4) \end{aligned}$$

3.2.2 Uncertainty Propagation in Dew/Frost-Point Temperature Formulae

To compute the dew/frost-point temperature, it is necessary to solve Eq. 2 by numerical methods. The propagation of the input variable uncertainty in this case cannot be computed as usual, because Eq. 2 is an implicit function of t_{dew} .

$$\begin{aligned} (u(t_{dew}))^2 = & \left(\frac{\frac{P_c}{P_s} \left(\frac{\partial f(t_s, P_s)}{\partial t_s} e_w(t_s) + f(t_s, P_s) \cdot \frac{\partial e_w(t_s)}{\partial t_s} \right)}{\frac{\partial f(t_{dew}, P_c)}{\partial t_{dew}} e_w(t_{dew}) + f(t_{dew}, P_c) \frac{\partial e_w(t_{dew})}{\partial t_{dew}}} u(t_s) \right)^2 \\ & + \left(\frac{\frac{P_c}{P_s} \left(-\frac{\partial f(t_s, P_s)}{\partial P_s} e_w(t_s) + f(t_s, P_s) \cdot e_w(t_s) \cdot \frac{1}{P_s} \right)}{\frac{\partial f(t_{dew}, P_c)}{\partial t_{dew}} e_w(t_{dew}) + f(t_{dew}, P_c) \frac{\partial e_w(t_{dew})}{\partial t_{dew}}} u(P_s) \right)^2 \end{aligned}$$

Author's personal copy

Int J Thermophys

$$\begin{aligned}
& + \left(\frac{\left(f(t_s, P_s) \cdot e_w(t_s) \frac{1}{P_s} - \frac{\partial f(t_{dew}, P_c)}{\partial P_c} \cdot e_w(t_{dew}) \right)}{\frac{\partial f(t_{dew}, P_c)}{\partial t_{dew}} e_w(t_{dew}) + f(t_{dew}, P_c) \frac{\partial e_w(t_{dew})}{\partial t_{dew}}} u(P_c) \right)^2 \\
& + \left(\frac{\frac{P_c}{P_s} \cdot f(t_s, P_s)}{\frac{\partial f(t_{dew}, P_c)}{\partial t_{dew}} e_w(t_{dew}) + f(t_{dew}, P_c) \frac{\partial e_w(t_{dew})}{\partial t_{dew}}} u(e_w(t_s)) \right)^2 \\
& + \left(\frac{\frac{P_c}{P_s} \cdot e_w(t_s)}{\frac{\partial f(t_{dew}, P_c)}{\partial t_{dew}} e_w(t_{dew}) + f(t_{dew}, P_c) \frac{\partial e_w(t_{dew})}{\partial t_{dew}}} u(f(t_s, P_s)) \right)^2 \\
& + \left(\frac{-f(t_{dew}, P_c)}{\frac{\partial f(t_{dew}, P_c)}{\partial t_{dew}} e_w(t_{dew})} u(e_w(t_{dew})) \right)^2 \\
& + \left(\frac{-e_w(t_{dew})}{f(t_{dew}, P_c) \frac{\partial e_w(t_{dew})}{\partial t_{dew}}} u(f(t_{dew}, P_c)) \right)^2 \quad (5)
\end{aligned}$$

3.3 Uncertainty Estimation of Relative Humidity by Propagation of the Distributions of the Input Variables

This method was applied following the supplement 1 of Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), *Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method* [5]. The Gaussian (or normal) distribution was chosen for the input variables. In all cases, the corresponding uncertainties originate from the combination of sources with different distributions, among which the more important ones are normal, such as the calibration uncertainties. By applying the central limit theorem to each of the input variables, it can be shown that their distribution converges to a normal distribution.

Their expectation and standard deviation were estimated, respectively, by the mean sample value and the uncertainty of the input variables used for computing the relative humidity uncertainty by propagation of uncertainty as described in Sect. 3.1. With these probability functions, the input data were generated using a dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator programmed in a software for mathematical calculations [17]. To propagate the distributions, Eq. 1 was evaluated with the generated data. To consider the uncertainty of $e_w(t)$ and $f(t, P)$ formulae, a Gaussian distribution was also proposed. The means were obtained by evaluating the equations of $e_w(t)$ and $f(t, P)$ with the simulated values of the input variables. For the standard deviation, the uncertainties of the equations were considered. With these probability functions, values of $e_w(t)$ and $f(t, P)$ were generated. For the resulting set of data, values of the relative humidity, expectation, uncertainty, and the 95 % confidence coverage interval were computed. The expectation and the uncertainty were computed as the mean and standard deviation of the dataset. The coverage interval was calculated as the interval resulting from excluding the 2.5 % smallest and largest subsets of the simulated dataset [5].

Author's personal copy

Table 1 Relative-humidity uncertainty: input data and results of the calculated uncertainty by the two studied methods are shown

Input variables				Uncertainty propagation				Propagation of distributions				
P_s (Pa)	$u(P_s)$ (Pa)	P_c (Pa)	$u(P_c)$ (Pa)	t_s (°C)	$u(t_s)$ (°C)	t_c (°C)	$u(t_c)$ (°C)	rh (%rh)	$U(rh)$ ($k = 2$) (%rh)	rh (%rh)	$U(rh)$ ($k = 2$) (%rh)	CI 95 % (%rh)
107 000	36	101 325	36	20.00	0.05	20.0	0.1	94.71	1.32	94.71	1.31	2.57
107 000	36	101 325	36	−10.00	0.05	−9.0	0.1	86.70	1.72	86.71	1.71	3.34
200 000	36	101 325	36	70.00	0.05	69.0	0.1	53.07	0.52	53.07	0.52	1.02
200 000	36	101 325	36	20.00	0.05	20.0	0.1	50.81	0.71	50.81	0.70	1.38
200 000	36	101 325	36	−10.00	0.05	−9.0	0.1	46.55	0.93	46.55	0.92	1.81
300 000	36	101 325	36	70.00	0.05	69.0	0.1	35.46	0.35	35.47	0.35	0.68
300 000	36	101 325	36	20.00	0.05	20.0	0.1	33.97	0.47	33.97	0.47	0.92
300 000	36	101 325	36	−10.00	0.05	−9.0	0.1	31.15	0.62	31.15	0.62	1.21
500 000	354	101 325	36	60.00	0.05	59.0	0.1	21.43	0.23	21.43	0.23	0.44
500 000	354	101 325	36	20.00	0.05	20.0	0.1	20.50	0.29	20.50	0.29	0.56
500 000	354	101 325	36	−10.00	0.05	−9.0	0.1	18.84	0.38	18.84	0.37	0.73
1034 214	354	101 325	36	60.00	0.05	59.0	0.1	10.48	0.11	10.48	0.11	0.22
1034 214	354	101 325	36	20.00	0.05	20.0	0.1	10.07	0.15	10.07	0.14	0.27

For the propagation of distributions, the confidence interval (CI) is shown

Author's personal copy

Table 2 Dew/frost-point-temperature uncertainty: input data and results of the calculated uncertainty by the two studied methods are shown

Input variables				Uncertainty propagation			Propagation of distributions		
P_s (Pa)	$u(P_s)$ (Pa)	P_c (Pa)	$u(P_c)$ (Pa)	t_s (°C)	$u(t_s)$ (°C)	$t_{\text{dew/frost}}$ (°C)	$U(t_{\text{dew/frost}})$ (°C)	$U(t_{\text{dew/frost}})$ (°C)	$CI_{95} \%$ (°C)
107 000	36	101 325	36	60.00	0.05	58.832	0.102	58.832	0.195
200 000	36	101 325	36	50.00	0.05	36.987	0.093	36.986	0.186
500 000	354	101 325	36	60.00	0.05	29.332	0.044	29.332	0.168
107 000	36	101 325	36	20.00	0.05	19.126	0.101	19.127	0.196
1034 214	354	101 325	36	60.00	0.05	17.494	0.042	17.494	0.165
900 000	354	101 325	36	40.00	0.05	4.611	0.088	4.611	0.171
300 000	36	101 325	36	20.00	0.05	3.670	0.091	3.670	0.175
500 000	354	101 325	36	20.00	0.05	-2.911	0.081	-2.911	0.156
107 000	36	101 325	36	-10.00	0.05	-10.610	0.103	-10.611	0.194
1034 214	354	101 325	36	20.00	0.05	-11.104	0.044	-11.104	0.173
1034 214	354	101 325	36	-10.00	0.05	-33.458	0.116	-33.459	0.219

For the propagation of distributions, the confidence interval (CI) is shown

Author's personal copy

Int J Thermophys

3.4 Uncertainty Estimation of Dew/Frost-Point Temperatures by Propagating the Distributions of the Input °C Variables

A similar procedure as that described in Sect. 3.3 was applied to the computation of the dew/frost-point temperature uncertainty by propagating the distributions, but in this case, Eq. 2 was used instead of Eq. 1. The dew/frost-point temperature is computed by a numerical iterative method (Newton–Raphson). For the resulting set of dew/frost-point-temperature data, values of the expectation, uncertainty, and the 95 % confidence coverage interval were computed in the same way as that previously for the relative humidity.

4 Results

The computation of the uncertainty was made by two methods for different values of relative humidity and for different dew/frost-point temperatures changing the values of the pressure and temperature of the saturator, which are the only controllable parameters in the INTI's two-pressure humidity generator.

The simulation was made with different number of events. The results we show correspond to 100 000 events in the case of the relative humidity and to 10 000 events in the case of dew-point temperatures, even though that the recommended number of events to obtain a 95 % confidence interval is at least 100 000 [5]. As the required computing time is too long for dew/frost-point temperature simulations made with 100 000 events, and since the simulation made with 10 000 events does not show any significant differences, this value was chosen to reduce the number of events in order to be able to compare all the proposed points.

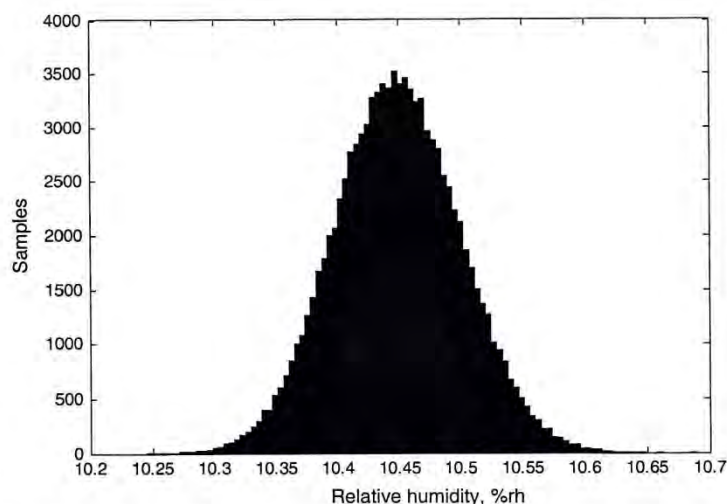
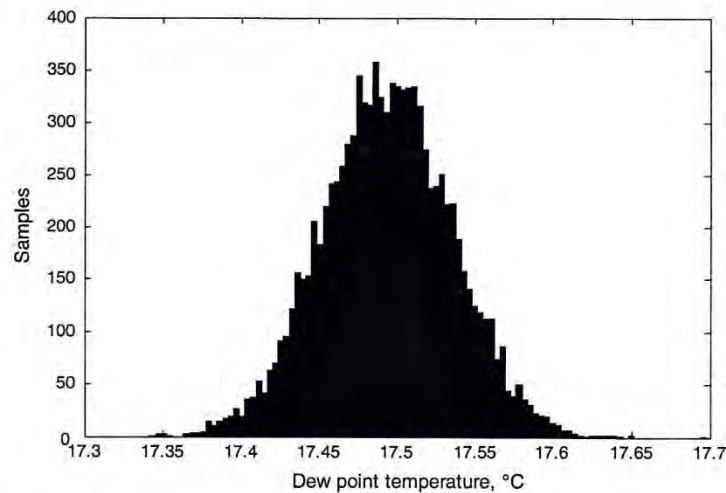


Fig. 2 Distribution of rh simulated with 100 000 events

Author's personal copy

Int J Thermophys

**Fig. 3** Distribution of $t_{\text{dew/frost}}$ simulated with 10 000 events

The results are shown in Tables 1 and 2. In both cases, it can be observed that the mean values and the uncertainties computed by both methods differ just in the third significant digit. Also, in both cases, we observe that the lengths of the computed confidence intervals are twice the uncertainty, or equivalently, four times the standard deviation of the set of simulated data.

In Figs. 2 and 3, examples of the distribution resulting from the propagation of the simulated distributions for the cases computed in Tables 1 and 2 are shown.

5 Conclusion

Comparing the results obtained by the two methods, it can be seen that the relative humidity uncertainty values obtained by propagation of distribution are, in the most extreme case, 0.01 %rh, lower than that calculated by propagation of the uncertainty, within 9 % of the total uncertainty. For the dew/frost-point-temperature uncertainty, these differences are less than 0.003 °C, which is less than 7 % of the total uncertainty. The confidence interval of 95 % for the case of the relative humidity resulted in a value smaller than the uncertainty interval with a coverage factor of $k = 2$. Only for few cases of the dew/frost-point temperature uncertainty, the confidence interval results in a value larger than the uncertainty interval with a coverage factor of $k = 2$ and the differences are below 0.04 °C. Then, the agreement between the results of the two uncertainty estimation methods, the distribution propagation method, and the uncertainty propagation method initially implemented in our laboratory was demonstrated for the input variable uncertainty values considered.

It is concluded that for the uncertainty values considered for the input variables shown in this paper, it is correct to disregard the correlation factors in Eqs. 3 and 4,

Author's personal copy

Int J Thermophys

as there are no relevant differences between the two uncertainty calculation methods shown.

In line with the results reported by other researchers, we observe that the value of $u(t_{\text{dew/frost}})$ is very close to the value of $u(t_s)$ [3, 4, 6].

The dew-point temperature uncertainty of the INTI humidity standard reported in the INMETRO-INTI comparison [1] was approximately 0.1°C with a coverage factor $k = 2$, which is in agreement with the results of the present work. The comparison results showed that the results of INMETRO and INTI were equivalent within the estimated uncertainties.

Therefore, the uncertainty propagation method proposed in this paper for the INTI two-pressure generator, supported by the INMETRO-INTI comparison, is validated for the uncertainty computation in rh and $t_{\text{dew/frost}}$ of the INTI humidity standard for an uncertainty level of the input variables considered.

It is easy to implement the method of the propagation of distributions [5]. The non-linearity of the model does not pose a problem, and it is not necessary to calculate the coefficients of sensitivity, as when the method of the propagation of uncertainties [2] is applied. In addition, it provides much more information about the measurand than the law of propagation of uncertainties. For example, it is possible to estimate, from the sample obtained, the 95 % confidence interval without making any assumptions about the kind of distribution of the sample, as described in Sects. 3.3 and 3.4 and shown in Tables 1 and 2.

Further work will include an analysis of the contribution of each uncertainty component to the combined uncertainty of the rh and the $t_{\text{dew/frost}}$ computed by the two methods, the propagation of uncertainties and the propagation of distributions. It will also include a repetition of this study with smaller values for the input variable uncertainties in order to analyze if the agreement between the two methods holds.

Acknowledgments The author thanks M. S. Valdora of the Instituto de Calculo de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (IC-FCEyN-UBA) and K. Bastida and G. Mingolla of the Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), for useful discussions and the revision of the work. This work was funded by the Argentina Government as part of INTI's activities to maintain the national measurement standards.

References

1. J.D. Brionizio, J.G. Skabar, *Metrologia* **50**, 03010 (2013)
2. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1st edn., 2008 (© JCGM 100:2008), <http://www.bipm.org/en/publications/guides/#gum>. Accessed 28 October 2014
3. J. Lovell-Smith, Uncertainty Analysis for Humidity Generators - I.R.L. Report N° 988 - Measurement Standards Laboratory of New Zealand (April 2000)
4. J. Lovell-Smith, *Metrologia* **46**, 607 (2009)
5. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, IUPAC, IUPAP, OIML, Supplement 1 to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, (© JCGM 101:2008), <http://www.bipm.org/en/publications/guides/#gum>. Accessed 28 October 2014
6. V. Carpentier, M. Megharfi, J. Quint, M. Priel, M. Desenfant, R. Morice, *Metrologia* **4**, 432 (2004)
7. Operation and Maintenance Manual of Series 2500 Bench Top Two-Pressure Humidity Generator (© 1991–2001 Thunder Scientific Corporation), http://www.thunderscientific.com/tech_info/index.html. Accessed 28 October 2014

Author's personal copy

Int J Thermophys

8. R. Hardy, *Papers and Abstracts from the Third ISHM 1998*, vol. 1 (NPL, London, 1998), pp. 214–222
9. The BIPM key comparison data base, CMCs in Mass and Related Quantities and Thermometry, Argentina, INTI <http://kcdb.bipm.org/appendixC/>. Accessed 28 October 2014
10. A. Wexler, L. Greenspan, J. Res. Natl. Bur. Stand. A **80A**, 775 (1976)
11. A. Wexler, J. Res. Natl. Bur. Stand. A **81A**, 50 (1977)
12. D. Sonntag, Z. Meteorol. **40**, 340 (1990)
13. L. Greenspan, J. Res. Natl. Bur. Stand. A **80A**, 41 (1976)
14. R.W. Hyland, J. Res. Natl. Bur. Stand. A **79A**, 551 (1975)
15. R. Hardy, RH Uncertainty Analysis of the Thunder Scientific Model 2500 Two-Pressure Humidity Generator (© 1998, Thunder Scientific Corporation), http://www.thunderscientific.com/tech_info/index.html. Accessed 28 October 2014
16. J. Lovell-Smith, Metrologia **43**, 556 (2006)
17. M. Matsumoto, T. Nishimura, ACM Trans. Model. Comput. Simul. **8**, 3 (1998)