

Evaluación del Efecto del Uso de Aire Atmosférico, Aire Sintético y la Actualización del Modelado Matemático de las Propiedades del Aire Involucradas Sobre la Calibración de los Principales Medidores de Volumen y Flujo de Gas de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

Luis Miguel Sarmiento Palomino

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Gabriel Fernando García Sánchez

PhD. Ingeniería Mecánica

Codirector

Carlos Eduardo García Sánchez

PhD. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenieras Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Programa de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

## Tabla de Contenido

Introducción .....	13
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2. Planteamiento del problema .....	15
3. Marco Teórico .....	15
3.1 Antecedentes .....	15
3.1.1 Estándar de calidad del aire.....	17
3.2 Cálculo y expresión de la humedad.....	18
3.3 Medición de humedad .....	21
3.4 Técnicas de secado de aire .....	22
3.4.1 Secado por adsorción .....	23
3.5 Medidores y patrones de flujo de gas.....	28
3.5.1 Patrón laminar basado en diferencial de presión (LFE).....	28
3.5.2 Patrón tipo campana gasométrica.....	30
3.5.3 Patrón tipo pistón .....	31
4. Metodología Del Proyecto .....	32
4.1 Etapa I: Evaluación de la capacidad del sistema de secado de aire. ....	33
4.1.1 Equipo de secado.....	34
4.1.2 Recuperación del secador.....	35
4.1.3 Equipo de medición de humedad .....	39
4.1.4 Medidor de caudal y presión .....	40
4.1.5 Sistema de aire comprimido .....	41
4.1.6 Ajuste de la presión y caudal.....	42

4.1.7 Montaje .....	44
4.1.8 Puesta en marcha y conexión de equipos .....	46
4.1.9 Ajuste de parámetros .....	46
4.1.10 Toma de datos .....	47
4.1.11 Cálculos .....	48
4.1.12 Resultados .....	49
4.2 Etapa II: Evaluación del efecto de la composición sobre las propiedades y caudal del fluido de calibración .....	52
4.2.1 Identificación de propiedades empleadas en los procesos de calibración.....	52
4.2.2 Composición de los gases involucrados en la calibración: .....	54
4.2.3 Comparación de composiciones de aire consideradas . .....	58
4.2.4 Comparación de la densidad para distintas composiciones de aire.....	60
4.2.5 Comparación de la viscosidad para distintas composiciones de aire.....	64
4.2.6 Evaluación del efecto de la composición sobre las propiedades.....	67
4.2.7 Efecto de la composición sobre la determinación del caudal.....	68
4.3 Etapa III: Evaluación de modelos para la determinación de las propiedades y su incidencia sobre el caudal de calibración. ....	73
4.3.1 Modelos empleados para la determinación de las propiedades.....	73
4.3.2 Modelos nuevos para el cálculo de las propiedades.....	78
4.3.3 Evaluación de modelos para la determinación de propiedades de las distintas composiciones del aire. ....	88
4.3.4 Comparación de los modelos nuevos y anteriores para la determinación de las propiedades. ....	98
4.3.5 Evaluación del efecto de la actualización de los modelos sobre la determinación del caudal. ....	101

4.4 Etapa IV: Evaluación experimental del efecto del tipo de aire sobre la calibración de medidores de flujo.....	102
4.4.1 Calibraciones en banco de patrón LFE .....	103
4.4.2 Calibraciones en banco de patrón tipo pistón.....	110
4.4.3 Calibraciones en campana gasométrica.....	112
5. Conclusiones .....	113
5.1 Conclusiones de la etapa I.....	113
5.2 Conclusiones de la etapa II.....	114
5.3 Conclusiones de la etapa III .....	115
5.4 Conclusiones de la etapa IV .....	116
Referencias Bibliográficas .....	118

## Tabla de Figuras

Figura 1 Estructura del sensor de óxido de aluminio. ....	21
Figura 2 Imagen de kit de higrómetro PM880. ....	22
Figura 3 Capacidad de adsorción de humedad de distintos desecantes. ....	23
Figura 4 Capacidad de adsorción de la alúmina activada. ....	24
Figura 5 Circuito general de secadores desecantes de regeneración dinámica. ....	26
Figura 6 Estados del lecho desecante durante la etapa de secado. ....	27
Figura 7 Secador DA25IM, propiedad del CDT de Gas. ....	28
Figura 8 Banco de calibración con patrones de flujo laminar. ....	29
Figura 9 Imagen campana gasométrica propiedad del CDT de Gas ....	31
Figura 10 Banco calibrador con patrón tipo pistón propiedad del CDT de Gas. ....	32
Figura 11 Válvula direccional del secador bloqueada. ....	36
Figura 12 Comportamiento del nivel de secado tras el reemplazo de la válvula direccional. .	37
Figura 13 Disminución del nivel de humedad del aire proporcionado por el secador, en el tiempo. ....	38
Figura 14 Comportamiento de nivel de secado tras 4 semanas de operación diaria del secador. ....	39
Figura 15 Medidor de volumen de gas AL-1000 marca Elster. ....	40
Figura 16 Medidores de presión a la entrada y salida del secador. ....	41
Figura 17 Controlador de presión en almacenamiento de aire comprimido. ....	42
Figura 18 Presión y caudal en línea de aire al ajustar estos parámetros con doble estrangulamiento. ....	44
Figura 19 Esquema de montaje experimental para la validación del comportamiento del secador. ....	44
Figura 20 Humedad del aire secado a distintas presiones y caudales, expresada en ppmv. ....	50

Figura 21 Humedad del aire secado a distintas presiones y caudales (expresada en HR) .....	50
Figura 22 Humedad del aire secado a distintas presiones y caudales (expresada en $T_d$ ). .....	51
Figura 23 Error relativo en la densidad molar de composiciones de aire sintético respecto al aire estándar.....	62
Figura 24 Error relativo en la densidad molar de aire húmedo respecto al aire estándar. ....	63
Figura 25 Error relativo en la viscosidad del aire sintético respecto a aire atmosférico estándar. ....	66
Figura 26 Error relativo en la viscosidad del aire húmedo respecto a aire atmosférico estándar. ....	67
Figura 27 Error relativo de caudal de patrones LFE al emplear distintas composiciones de aire respecto a aire estándar. ....	70
Figura 28 Desviación de viscosidad del aire calculada con distintos modelos respecto a valores de referencia de Kestin y Whitelaw (1964).....	83
Figura 29 Error relativo en la densidad de aire seco obtenida por distintas ecuaciones. ....	89
Figura 30 Diferencia relativa de la densidad de aire húmedo obtenida por la formula del CIPM 2007 respecto a valores de REFPROP. ....	90
Figura 31 Diferencia relativa de densidad de aire húmedo obtenido por la ecuación de Tetratrec a densidad de aire estándar.....	91
Figura 32 Diferencia relativa en densidad del aire sintético obtenida por distintas ecuaciones respecto a valores de REFPROP. ....	92
Figura 33 Error relativo de la densidad calculada con la ecuación de gas ideal respecto a densidad de distintas composiciones de aire con REFPROP.....	93
Figura 34 Error relativo en la viscosidad del aire sintético calculada con distintas ecuaciones respecto al valor de REFPROP. ....	95
Figura 35. Error relativo en la viscosidad del aire húmedo calculada con distintas ecuaciones	

respecto a valores de REFPROP. ....	96
Figura 36 Error relativo de la viscosidad del aire sintético obtenida por distintas ecuaciones respecto al valor dado por REFPROP. ....	97
Figura 37 Suministro de aire atmosférico seco y aire sintético calibraciones en banco de patrones laminares. ....	105
Figura 38 Montaje para la calibración de medidor térmico masico en banco de patrones laminares. ....	106
Figura 39 Montaje para la calibración de medidor Reciflow en banco de patrones laminares. ....	106
Figura 40 Montaje de calibración de medidor tipo cámara húmeda en patrón tipo pistón. ...	111
Figura 41 Montaje para la calibración de boquilla sónica en patrón tipo campana gasométrica. ....	112
Figura 42 Boquilla sónica empleada en calibración con patrón tipo campana. ....	113

## Listado de Tablas

Tabla 1 Nivel de contaminantes en el aire de acuerdo a clase ISO 8573.1: 2010.....	18
Tabla 2 Especificaciones técnicas del secador modelo DA25IM -40 Ingersoll Rand. ....	34
Tabla 3 Composición de aire atmosférico seco reportada por el CIPM 2007.....	55
Tabla 4 Composiciones simplificadas de aire atmosférico. ....	56
Tabla 5 Resultados de prueba de cromatografía sobre aire seco comercial (sintético).....	57
Tabla 6 Composiciones consideradas en el análisis.....	59
Tabla 7 Comparación de masa molar de las distintas composiciones de aire.....	59
Tabla 8 Ecuaciones empleadas por REFPROP versión 10.0 para cálculo de la densidad y su incertidumbre .....	60
Tabla 9 Ecuaciones empleadas por REFPROP versión 10.0 para cálculo de la viscosidad. ...	65
Tabla 10 Error relativo en las propiedades de distintas composiciones de aire respecto a aire atmosférico estándar.....	68
Tabla 11 Capacidad e incertidumbre en el caudal de patrones LFE, según su certificado. ....	70
Tabla 12 Error relativo en el caudal debido a la incertidumbre en las propiedades de acuerdo con el modelo de REFPROP. ....	71
Tabla 13 Error relativo en factor de conversión de caudal frente a caída de presión para distintas composiciones de aire. ....	72
Tabla 14 Error relativo en factor de conversión de caudal frente a aumento de temperatura para distintas composiciones de aire. ....	73
Tabla 15 Coeficientes para el cálculo del factor de compresibilidad de la formula del CIPM- 2007.....	74
Tabla 16 Coeficientes para el cálculo del factor de compresibilidad del aire húmedo según la ecuación de Tetratéc.....	75
Tabla 17 Coeficientes y exponentes para calcular la energía residual de Helmholtz en aire seco.	

.....	80
Tabla 18 Propiedades criticas para el cálculo de la viscosidad de sustancias según Lemmon et al (2004). .....	80
Tabla 19 Coeficientes y exponentes para el cálculo de la energía residual de Helmholtz para nitrogeno.....	81
Tabla 20 Coeficientes para cálculo de energía residual de Helmholtz para oxígeno, según modelo de Schmidt & Wagner (1985). .....	82
Tabla 21 Parámetros de cada fluido para el cálculo de la viscosidad en el modelo de Lemmon et al (2004). .....	84
Tabla 22 Coeficientes para cálculo de la integral de colisión en el modelo de Lemmon et al. (2004). .....	85
Tabla 23 Coeficientes para cálculo de viscosidad residual por el modelo de Lemmon et al. (2004). .....	86
Tabla 24 Error relativo en modelos para el cálculo de densidad del aire de distintas composiciones. ....	94
Tabla 25 Error relativo en modelos para el cálculo de densidad del aire de distintas composiciones. ....	98
Tabla 26. Modelos nuevos y anteriores para el cálculo de las propiedades. ....	99
Tabla 27 Comparación de error relativo en cálculo de densidad empleando los modelos nuevos y anteriores para distintas composiciones de aire. ....	100
Tabla 28 Comparación de error relativo en cálculo de viscosidad empleando los modelos nuevos y anteriores para distintas composiciones de aire .....	100
Tabla 29 Comparación de error relativo de caudal por la obtención de propiedades con modelos nuevos y antiguos para distintas composiciones de aire. ....	102
Tabla 30 Errores relativos de calibración utilizando LFE con medidor térmico masico. ....	107

Tabla 31 Puntaje $E_n$ de valores de promedio de error relativo de calibraciones de medidor térmico masico en banco de patrones LFE.....	108
Tabla 32. Errores relativos de calibración de medidor de principio volumétrico con banco de patrones laminares.....	109
Tabla 33 Promedios de error relativo e incertidumbre de calibración de medidor Reciflow en banco de patrones LFE.....	109
Tabla 34 Errores relativos e incertidumbre de calibración de medidor tipo cámara húmeda en banco de patrón tipo pistón. ....	111
Tabla 35 Errores relativos e incertidumbre de calibración de boquilla sónica en patrón tipo campana gasométrica. ....	113

## Resumen

**Título:** Evaluación del Efecto del Uso de Aire Atmosférico, Aire Sintético y la Actualización del Modelado Matemático de las Propiedades del Aire Involucradas Sobre la Calibración de los Principales Medidores de Volumen y Flujo de Gas de la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

**Autor:** Luis Miguel Sarmiento Palomino.

**Palabras clave:** Calibración, LFE, Desecante, Flujo de gas, Viscosidad, Densidad, Aire seco, Aire sintético, Humedad.

**Descripción:** En este trabajo se realiza una evaluación del efecto de la humedad y la variación en la proporción de nitrógeno y oxígeno del aire sintético, en los procesos de calibración de medidores de volumen y flujo de gas de la corporación CDT de Gas. La variación de estos parámetros de composición se debe al comportamiento del sistema de secado y el método de preparación del aire sintético. Se identifican la densidad y viscosidad como únicas propiedades que intervienen en el proceso de calibración, estando la viscosidad presente solo en la calibración con elementos de flujo laminar (LFE). Se realizan pruebas de secado de aire comprimido con equipo desecante regenerativo, y se diagnóstica y repara su falla obteniendo humedades de tan solo  $15 \pm 6$  ppmv. Se compara el valor de la densidad y viscosidad a las mismas condiciones para distintas composiciones del aire. Son identificados los modelos actualmente empleados por el CDT para el cálculo de la densidad y viscosidad del aire seco y húmedo, además de proponer nuevos modelos para las propiedades de estas composiciones y para el aire sintético. Los datos de referencia para las propiedades de las distintas composiciones de aire son obtenidos mediante el software REFPROP en su versión 10,0. Como producto de este análisis, se encuentra que la composición con la máxima desviación respecto al aire atmosférico estándar es el aire sintético con máximo contenido de nitrógeno, resultando en un 0.6% mayor en el valor del caudal en LFE. También se realiza la comprobación experimental del efecto de la composición al emplear aire secado por el equipo desecante y aire sintético, en calibraciones entre patrón laminar y medidor térmico másico, así como medidor de pistón recíprocante. En estas calibraciones se emplea el puntaje  $E_n$  como criterio estadístico para establecer si los errores relativos del caudal en los distintos tipos de aire son comparables entre si.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenieras Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Gabriel Fernando García Sánchez PhD Ingeniería Mecánica. Codirector: Carlos Eduardo García Sánchez PhD Ingeniería Química.

## Abstract

**Title:** Evaluation of the Effect of the Use of Atmospheric Air, Synthetic Air and the Update of the Mathematical Modeling of the Air Properties Involved in the Calibration of the Main Gas Volume and Flow Meters of the Development Center of Gas Technology Corporation.

**Author:** Luis Miguel Sarmiento Palomino.

**Keywords:** Calibration, LFE, Desiccant, Gas flow, Viscosity, Density, Dry air, Synthetic air, Humidity.

**Description:** This work contains an evaluation of the effect of humidity and the nitrogen-oxygen proportion variation for synthetic air over the calibration of gas volume and flow meters of the CDT de Gas corporation. The variation of these composition parameters is related to the behavior of the drying system and the method for preparing synthetic air. Density and viscosity are identified as the only properties involved in the calibration process, viscosity being present only in the calibration with laminar flow elements (LFE). Compressed air-drying tests are carried out in desiccant regenerative dryer, apart from diagnosing and repair a failure achieving a humidity of just  $15 \pm 6$  ppmv. The values of density and viscosity are compared at the same conditions for different air compositions. In the same way, the relative error in the value of the flow rate obtained in LFE is calculated by introducing the value of the properties of each type of air, with respect to the value of the flow rate for standard atmospheric air. The models currently used by the CDT to calculate the density and viscosity of dry and humid air are identified, in addition to proposing new models for the properties of these compositions and for synthetic air. The reference data for the properties of the different air compositions are obtained using the REFPROP software in its version 10.0. As a product of this analysis, it is found that the composition with the maximum property and flow deviation from standard atmospheric air is synthetic air with the maximum nitrogen content, resulting in a 0.6% higher flow value in LFE. Experimental verification of the effect of the composition is also carried out when using dry and synthetic air, in calibrations between laminar pattern and thermal mass meter, as well as reciprocating piston meter. In these calibrations, the  $E_n$  score is used as a statistical criterion to establish if the relative errors of the flow in the different types of air are comparable to each other.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Gabriel Fernando García Sánchez PhD Mechanical Engineering. Co-director: Carlos Eduardo García Sánchez PhD Chemical Engineering.

## Introducción

La Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de gas), entre sus servicios de soporte a la cadena de gas natural del país y la industria, realiza calibraciones a medidores de volumen y caudal de gas al determinar la fidelidad de las medidas de su mensurando. En este aspecto el CDT de Gas actúa como referencia en la cadena de trazabilidad en la calibración de medidores de gas a nivel nacional.

Para cumplir con estas funciones el CDT de Gas cuenta con varios patrones de volumen y caudal de gas, con una baja incertidumbre de medida respecto a los requerimientos de sus clientes. El uso de distintos patrones responde a diferencias en el rango de calibración, el régimen de flujo y ciertas consideraciones operacionales. Entre los principales patrones empleados por el CDT de Gas se encuentran el patrón de flujo laminar, el patrón tipo pistón y el patrón tipo campana gasométrica.

El proceso de calibración en estos bancos requiere la determinación de propiedades del gas como son la densidad y viscosidad. Para obtenerlas, se emplean modelos matemáticos validados por las principales autoridades metrológicas globales; representado un método indirecto de alta confiabilidad y precisión. Estos modelos permiten el cálculo de propiedades a partir de propiedades de estado que resultan más exacta y prácticamente medibles. En este caso las medidas incluyen temperatura, presión, volumen y humedad, siendo este último un parámetro de la composición del aire que es más susceptible a sufrir variaciones. En tal situación se plantea la pregunta de si los modelos actualmente empleados por el CDT de Gas para la determinación de estas propiedades se encuentran debidamente actualizados en relación a los gases utilizados en los procesos de calibración, de acuerdo con las más recientes indicaciones de las entidades metrológicas líderes a nivel global (CIPM, CENAM, PTB, entre otros).

# 1. Objetivos

## 1.1 Objetivo General

Analizar el posible sesgo en los resultados del proceso de calibración de medidores de volumen o caudal de gas al emplear aire atmosférico seco, aire atmosférico húmedo y aire sintético, así como la actualización del modelo matemático de las propiedades del aire involucradas, empleando los tres principales bancos de calibración del CDT de Gas, que son: el patrón tipo laminar, el patrón tipo campana gasométrica y el patrón tipo Pistón.

## 1.2 Objetivos específicos

- Determinar la capacidad de flujo y remoción de humedad, del sistema secador de aire del CDT de Gas para suministrar aire atmosférico seco en los procesos de calibración que utilizan el patrón tipo laminar, patrón tipo pistón y la campana gasométrica, mediante pruebas en los rangos de caudal empleados en cada banco, de 0.001 dm<sup>3</sup>/min a 200 dm<sup>3</sup>/min.
- Establecer el sesgo de calibración debido a la actualización de los modelos matemáticos de la densidad y viscosidad del aire, para determinar su incidencia sobre los resultados de las calibraciones, mediante la comparación del valor del mensurando calculado con los modelos matemáticos en uso por el CDT de Gas y los actualizados, empleando datos de calibración obtenidos en los patrones tipo laminar, tipo pistón y campana gasométrica.
- Calcular el sesgo de calibración debido al uso de aire atmosférico seco, aire atmosférico húmedo y aire sintético, para establecer su incidencia sobre los resultados de calibración, mediante la realización de calibraciones empleando estos fluidos en los patrones tipo laminar, tipo pistón y campana gasométrica dentro de

los intervalos de caudal de 0.001 dm<sup>3</sup>/min a 200 dm<sup>3</sup>/min, y comparando el valor del mensurando de las calibraciones desarrolladas.

## **2. Planteamiento del problema**

En el proceso de calibración, suele existir cierta influencia por el tipo de fluido empleado. Sin embargo, es una práctica común y ampliamente aceptada, utilizar aire atmosférico como fluido de calibración, siempre que las condiciones de viscosidad y otras propiedades sean similares a las del fluido con el que el medidor habrá de operar. De acuerdo al principio de funcionamiento del medidor, el número de Reynolds y otros factores adimensionales son criterios de semejanza suficientemente representativos, en función de los cuales puede ajustarse el experimento para el uso de distintos fluidos.

Actualmente el CDT de Gas emplea aire sintético (principalmente compuesto por N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en proporciones similares a las atmosféricas), adquirido en cilindros de gas, para los procesos de calibración realizados en los bancos de flujo laminar y patrón tipo pistón. El aire sintético es utilizado en reemplazo del aire atmosférico con el fin de evitar problemas relacionados con la condensación de la humedad.

El CDT de Gas en su constante búsqueda por mejorar sus procesos y brindar un alto grado de confiabilidad en sus servicios, ha considerado analizar teórica y experimentalmente el efecto de la composición del aire atmosférico y sintético sobre la calibración de medidores de flujo en los bancos de patrón tipo laminar, pistón y campana gasométrica; tal como confirmar que los modelos matemáticos empleados para la determinación de las propiedades del gas, estén acorde a las más recientes indicaciones de las autoridades metrológicas oficialmente aceptadas.

## **3. Marco Teórico**

### **3.1 Antecedentes**

Entre los estudios que han tenido enfoques similares al presente trabajo se puede destacar el documento titulado *“What is the best transfer standard for gas flow?”* publicado por John D Wright del Instituto Nacional de Estándares y tecnología (NIST) en mayo de 2003 [1]. En este artículo se busca establecer el mejor patrón de transferencia para comparaciones entre patrones primarios de medición de caudal de gas de distintos laboratorios. Como resultado de su revisión, encuentra que los patrones que operan por caída de presión en flujo laminar (LFE) y tobera de flujo crítico (CFV) son los más empleados con este objetivo. Al analizar modelos matemáticos que definen el comportamiento del flujo en estos elementos, realiza un análisis sobre el efecto de la humedad del aire y la temperatura. Este documento es un referente sobre la incidencia teórica de la humedad en estos elementos.

En el cálculo de la viscosidad se utiliza como principal referente el documento titulado *“Calculating a Viscosity Correction for Humid Air in a Laminar Flow Element”* publicado por Mark Koeroghlian, Matthew J. Hall, and Ronald Matthews de la universidad de Austin, Texas en abril de 2018 [2]. En el se comparan distintos modelos para determinación de la viscosidad de aire húmedo, lo cual implica la comparación de ecuaciones para aire seco y vapor de agua así como una ecuación que represente apropiadamente el mezclado entre estas. Este estudio brinda consideraciones respecto a la influencia de la humedad en los errores que pueden obtenerse en un medidor de flujo laminar.

En la determinación de la densidad del aire húmedo se toma como principal referente el estudio titulado *“Intercomparison of different state-of-the-art formulations of the mass density of humid air”* publicado por Olaf Hellmuth, Rainer Feistel y Thomas Foken en diciembre de 2021 [3]. En el se determinan los factores que inciden sobre la determinación precisa de la densidad másica con un enfoque hacia las propiedades del aire en el campo de la meteorología. Sin embargo su comparación permite ver que la densidad del aire húmedo por la fórmula del

CIPM 2007 resalta en medio de las ecuaciones propuestas por su precisión a pesar de ser aplicable a un  $r$

También es destacable el contenido del “Procedimiento ME-009 para la calibración de caudalímetros de gases”, publicado por el Centro Español de Metrología [4]. Este documento expone pautas generales para procesos de calibración en medidores de flujo. En se utiliza como guía para la realización de las prácticas experimentales aquí mencionadas y así minimizar los efectos de factores no considerados en el análisis.

### ***3.1.1 Estándar de calidad del aire***

La Organización Internacional de Normalización (ISO), mediante su norma técnica ISO 8573-1 de 2010 [5], categoriza la calidad del aire estableciendo límites sobre la presencia de sus principales contaminantes. Sobre los particulados y aerosoles o vapores de aceite, se establece un control en términos de concentración, siendo el primero categorizado en intervalos de tamaño. Para la humedad, por otra parte, se establece un control sobre la concentración de agua en forma de aerosoles, y la máxima presión de vapor, la cual última es función de la concentración de vapor de agua y la presión en el punto de control. En general, la presencia de cada contaminante puede encontrarse en una de 10 clases, de acuerdo con el límite que esta categorización impone [6]. Los sistemas de tratamiento de aire comprimido suelen indicar la calidad del aire que proveen al especificar la clase ISO del aire que proporcionan (Tabla 1).

**Tabla 1**

*Nivel de contaminantes en el aire de acuerdo con clase ISO 8573.1: 2010*

ISO8573- 1:2010 CLASS	Solid Particulate			Mass Concentration mg/m <sup>3</sup>	Water		Oil
	Maximum number of particles per m <sup>3</sup>				Vapour Pressure Dewpoint (PDP)	Liquid g/m <sup>3</sup>	Total Oil (aerosol liquid and vapour) mg/m <sup>3</sup>
	0,1 - 0,5 micron	0,5 - 1 micron	1 - 5 micron				
0	As specified by the equipment user or supplier and more stringent than Class 1						
1	≤ 20 000 ≤ 400	≤ 400	≤ 10	-	≤ -70°C	-	0,01
2	000	≤ 6000	≤ 100	-	≤ -40°C	-	0,1
3	-	≤ 90 000	≤ 1 000	-	≤ -20°C	-	1
4	-	-	≤ 10 000	-	≤ 3°C	-	5
5	-	-	≤ 100 000	-	≤ 7°C	-	-
6	-	-	-	≤ 5	≤ 10°C	-	-
7	-	-	-	5 - 10	-	≤ 0,5	-
8	-	-	-	-	-	0,5 - 5	-
9	-	-	-	-	-	5 - 10	-
X	-	-	-	> 10	-	> 10	> 10

*Nota.* . Tomado de Parker Hannifin Ltd. (2010) [6].

### 3.2 Cálculo y expresión de la humedad

La humedad puede expresarse como la concentración de moléculas de agua dentro de una solución gaseosa. Su forma básica es la fracción molar de vapor de agua, aunque también suele expresarse como la masa de agua por unidad de volumen (o masa) de la solución (o aire seco), de acuerdo con la aplicación. La Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) indica que algunas formas de representar la concentración de agua en el aire son: la relación de humedad ( $m_w/m_{as}$ ), la humedad específica ( $m_w/m_s$ ) y la humedad absoluta ( $m_w/V_{as}$ ) [7]. Para bajas concentraciones, la cantidad de vapor de agua puede expresarse en partes por millón volumen ( $ppm_v$ ) o partes por millón masa ( $ppm_w$ ) [7]. A partir de la ley de presiones parciales de Dalton y la ecuación de estado de gases ideales, la fracción molar de vapor de agua y su presión parcial guardan la relación indicada por la Ecuación 1.

$$x_w = P_w/P \quad (1)$$

Sobre el cálculo de ppmv es aplicable la ley de Amagat para gases ideales, según la cual el cociente entre el volumen parcial del agua y el volumen total de la mezcla es igual a la fracción molar de agua (Ecuación 2).

$$ppm_v = \frac{V_w}{V_t} \cdot 10^6 = x_w \cdot 10^6 \quad (2)$$

La concentración es un valor constante en sistemas cerrados con ausencia de reacciones químicas y cambios de fase, por lo que resulta ser una medida estable para definir el grado de humedad de una mezcla que es principalmente susceptible a cambios en sus propiedades de estado (P y T). Sin embargo, otras formas de expresar la humedad toman en cuenta el estado de saturación más cercano, que se obtiene al modificar alguna de sus propiedades.

El estado de saturación es definido como el equilibrio en la transferencia de masa entre la fase líquida y gaseosa de una misma sustancia. La obtención de este estado puede ser identificada cuando la presión de vapor alcanza la presión de saturación que corresponde a la temperatura del sistema. La presión de saturación es una propiedad estudiada y documentada para el agua pura, pero es mayor cuando el vapor de agua está en presencia de aire. Para considerar esta diferencia, se multiplica la presión de saturación del agua pura por el factor conocido como factor de fugacidad (f), el cual es función de la presión y temperatura de la mezcla.

Al contar con estas ecuaciones como herramienta para relacionar la presión y temperatura de saturación del agua, resulta práctico expresar la humedad en relación con su estado de saturación. La humedad relativa (HR) representa el cociente entre la presión de vapor ( $P_w$ ) y la presión de saturación ( $P_s$ ) que corresponde a la temperatura de la muestra (Ecuación 3).

$$HR = \frac{P_w}{P_s(T)} \quad (3)$$

La humedad relativa es especialmente utilizada por indicar la capacidad de una muestra de aire, para inducir la transferencia de agua de la fase líquida a la gaseosa provocando así el secado de las superficies con las que entre en contacto. Por esto es empleada en el acondicionamiento de interiores, donde el control de la humedad tiene por objeto mantener la tasa de disipación de calor por sudoración. De igual forma, es el principal factor de control en procesos de secado de alimentos y materiales con el fin prolongar su conservación.

Cuando el interés se centra en evitar la condensación, la humedad puede ser expresada como la temperatura a la cual la presión de vapor de una muestra pasa a ser la presión de saturación. Esta es la temperatura de rocío ( $T_d$ ) y es utilizada en sistemas de aire comprimido, debido a que cuando  $T_d$  es inferior a las temperaturas a las que el aire será expuesto, se puede garantizar que no ocurrirá condensación. La temperatura de rocío ( $T_d$ ) puede expresarse como lo indica la Ecuación 4.

$$T_d = T_s(P_w) \quad (4)$$

Aunque estas últimas medidas son función de las propiedades de estado (P y T), es posible inferir la cantidad de vapor de agua en términos de concentración utilizando las condiciones de medición para hallar  $P_w$  y finalmente el valor de  $x_w$  a través de la Ecuación 1.

El higrómetro disponible para la ejecución de este trabajo (PM880 de GE *Panametrics*) utiliza la ecuación de Arden Buck (1981) para presentar el valor de  $P_w$  captado por su sensor, en términos de temperatura de rocío. La ecuación de Buck (1981) tiene la forma indicada en la Ecuación 5 [8].

$$P_{sv} = \begin{cases} \text{si } t \leq 0[^\circ\text{C}], & 611,15 \exp\left(22,542 \frac{t}{t + 273,48}\right) \\ \text{si } t > 0[^\circ\text{C}], & 611,21 \exp\left(17,502 \frac{t}{240,97 + t}\right) \end{cases} \quad (5)$$

El procedimiento de cálculo de humedad de *GE sensing* no utiliza un factor de fugacidad para la ecuación de Buck (1981), por lo que para acercarse más al valor de  $P_w$  captado por el higrómetro, no es utilizado el factor de fugacidad en la conversión de  $T_d$  a  $P_w$  [12].

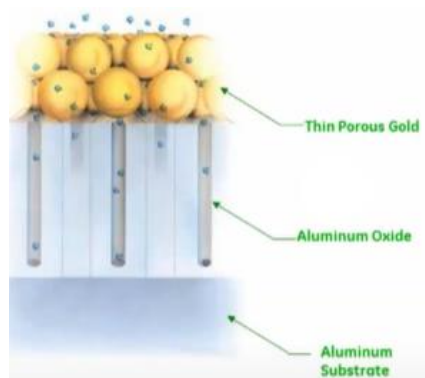
Esta temperatura es una medida de la capacidad de enfriamiento del aire, ya que, a menor humedad en el ambiente, mayor será la tasa de evaporación debido al potencial generado por el desequilibrio másico del agua en ambas fases.

### 3.3 Medición de humedad

El sensor capacitivo de óxido de aluminio está conformado por un sustrato de aluminio que es recubierto con una lámina de oro, entre los cuales se forma una capa de óxido de aluminio que actúa como dieléctrico (Figura 1) [9]. Este último material sufre cambios en su capacitancia al albergar distintas cantidades de vapor de agua en sus porosidades, lo cual ocurre por su carácter hidrofílico y por el paso de moléculas de agua a través de la membrana de oro. La capacitancia del sensor se relaciona con la presión de vapor de agua debido a su incidencia sobre la cantidad de agua que se aloja en las porosidades del óxido de aluminio [9]. Por tal motivo, el aumento de la presión del sistema y en consecuencia de la presión de vapor, mejora las mediciones de bajas concentraciones de humedad en una muestra.

#### **Figura 1**

*Estructura del sensor de óxido de aluminio.*



*Nota. Tomado de webinar de fundamentos de la medición de humedad de traza empleando sensores de óxido de aluminio [9].*

GE Sensing indica que para este tipo de sensores el tiempo de respuesta frente a cambios en la humedad depende no solo de la respuesta del sensor, sino también del secado del sistema de muestreo, proceso que puede llegar a tomar incluso una hora [10]. En general, este tiempo puede disminuir con altos flujos y temperaturas.

### **Figura 2**

*Imagen de kit de higrómetro PM880.*



*Nota.* Cortesía de CDT de Gas

### **3.4 Técnicas de secado de aire**

Al clasificar las técnicas de secado de aire según su principio operativo, pueden identificarse las técnicas de secado por enfriamiento, membrana, absorción (delicuescente) y adsorción (desecante). El secado por enfriamiento busca reducir el valor de la presión de saturación al disminuir la temperatura de la mezcla y así separar parte del contenido de vapor de agua en forma de condensado. Este método resulta práctico para sistemas de aire comprimido, pues la elevación de la presión hace que  $P_w$  presente valores de temperatura de rocío superiores a la temperatura ambiente. Esta técnica requiere la implementación de un intercambiador de calor que trabaje con un fluido a temperatura ambiente, acompañado de un separador de agua para retener y expulsar el condensado. Ante niveles de secado más exigentes, el intercambiador de calor cuenta con un sistema de refrigeración, para el cual debe tenerse la

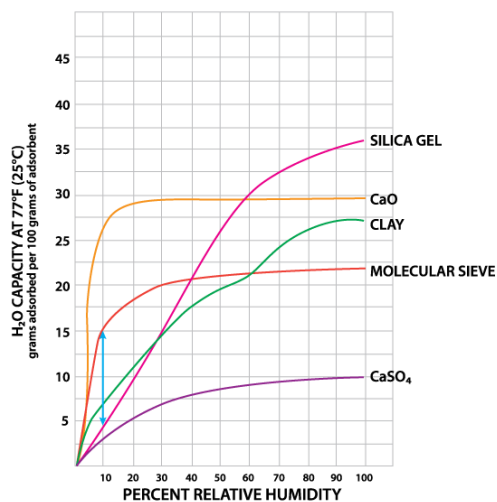
precaución de recalentar el aire, evitando la deposición de condensados sobre los equipos y tuberías con los que el aire entre en contacto.

### 3.4.1 Secado por adsorción

la adsorción es el aumento en la concentración de una sustancia que se encuentra disuelta en un fluido, la cual ocurre en la interfaz con el material adsorbente por la acción de fuerzas superficiales [11]. La capacidad de adsorción de un material varía de acuerdo con el grado de actividad del agua (HR) y la temperatura. Esta dependencia es descrita mediante isothermas de sorción (incluyendo adsorción y desorción), que son elaboradas por la toma de datos experimentales. La capacidad de adsorción es aquel máximo contenido de agua que el desecante es capaz de albergar para una HR y T dadas. Esta capacidad, es expresada como masa de agua adsorbida por unidad de masa de material desecante [12]. En la Figura 3 se compara la capacidad de adsorción de algunos materiales desecantes, al exponerse a distintas humedades relativas y una temperatura de referencia.

**Figura 3**

*Capacidad de adsorción de humedad de distintos desecantes.*



*Nota.* Tomado de sorbentsystems.com [12].

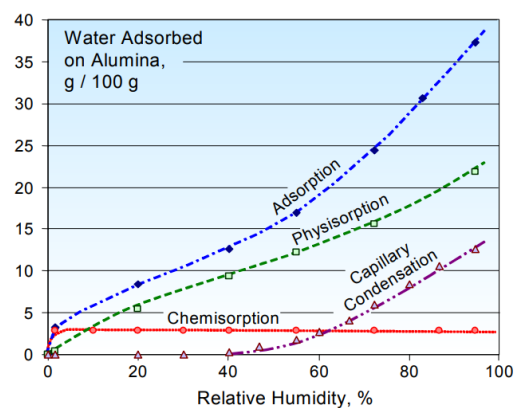
La sílica gel, el tamiz molecular y la arcilla son algunos de los desecantes más comunes. La sílica gel tiene una alta capacidad de adsorción, al ser expuesta a aire con altas humedades

relativas. Esto significa que son requeridas menores cantidades de producto para mantener controlada una humedad relativamente alta. En aplicaciones que requieren mantener humedades relativas más bajas se destacan el óxido de calcio y el tamiz molecular.

Para el secado de aire comprimido la alúmina activada (AA) es uno de los materiales preferidos, gracias a su afinidad por las moléculas polares, su resistencia química, resistencia al desgaste y al aplastamiento, y su alta capacidad de regeneración [13]. Este material es obtenido por la deshidroxilación del hidróxido de aluminio, con el que se consigue una forma de alúmina altamente porosa que permite una gran área superficial por gramo de material.

#### Figura 4

*Capacidad de adsorción de la alúmina activada.*



*Nota.* Tomado de publicación de Ducreux & Nedez (2001) [14].

Aunque de acuerdo con la Figura 3 y Figura 4 la alúmina activada no destaca por su capacidad de adsorción en comparación con algunos otros desecantes, sus propiedades físicas y de regeneración le hacen apropiado para equipos de secado regenerativo. La adsorción mediante AA es llevada a cabo por los mecanismos conocidos como quimisorción, fisisorción y capilaridad. Cada uno de ellos contribuye en diferente medida a la capacidad de adsorción total del material (Figura 4).

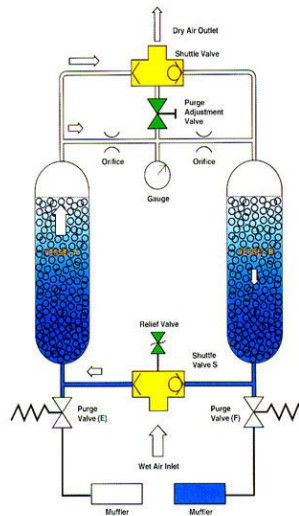
La quimisorción consiste en la transformación química del agua que entra en contacto con el material adsorbente, dando lugar a una monocapa de otra especie [14]. Este mecanismo

tiene una contribución relativamente pequeña y constante a la adsorción total; sin embargo, es el principal mecanismo de adsorción a bajas humedades. Por otra parte, la fisisorción resulta de la adición de múltiples capas de agua, atraídas por fuerzas de Van der Waals o puentes de hidrógeno. Este proceso captura la mayor proporción de agua. Por último, la condensación capilar ocurre por el aumento en la presión de vapor, en superficies curvas de la interfaz líquido-gas. Este fenómeno se presenta según lo expuesto por la ecuación de Kelvin. La curvatura se obtiene por la formación de meniscos como consecuencia de la adsorción multicapa o fisisorción en espacios capilares.

La regeneración de la AA es llevada a cabo por exposición a calor o corrientes de aire con una humedad relativa inferior a la humedad de equilibrio asociada al contenido de agua del material desecante. Este último método es conocido como adsorción dinámica, y utiliza dos lechos de desecante entre los que se alternan las funciones de secado y regeneración. El aire relativamente seco, utilizado para la función de regeneración, es tomado de la corriente de aire que sale de la torre que trabaja en la función de secado. Esta pequeña porción de aire es expandida a través de un orificio, con lo que disminuye su presión de vapor y en consecuencia su humedad relativa. El ciclo de adsorción y desorción presenta un cierto grado de histéresis, de modo que la desorción tiene lugar a humedades relativas más bajas que la humedad de equilibrio para el contenido de agua en la adsorción.

## Figura 5

*Circuito general de secadores desecantes de regeneración dinámica.*



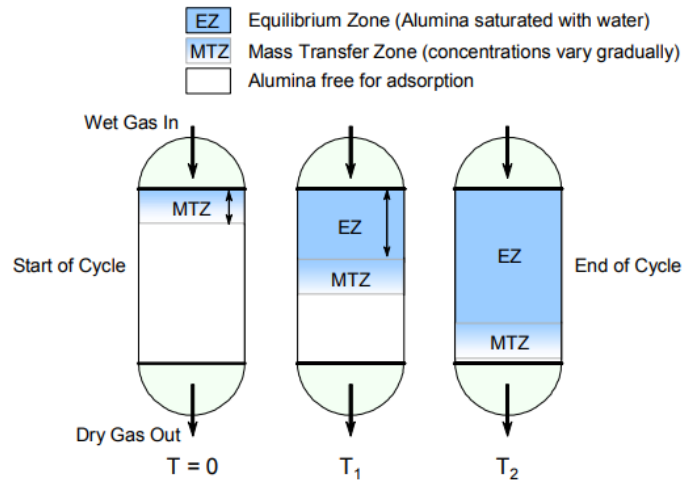
*Nota.* Tomado de vmacair.com [15].

En la función de secado, ocurre el proceso transitorio de saturación del desecante. En él, es posible identificar tres zonas del lecho desecante, que se desarrollan en la dirección del flujo. El aire que ingresa a una torre en la función de secado se encuentra inicialmente con material desecante cuyo contenido de agua es inferior al contenido de equilibrio que corresponde a la humedad relativa del aire. Por tal motivo, se da la captación de agua y el descenso de la humedad relativa del aire en esta sección conocida como zona de transferencia de masa (MTZ). A su paso por el lecho desecante, la humedad relativa del aire desciende hasta encontrarse en equilibrio con el contenido de agua de aquellas perlas de desecante que no han sido expuestas a altas humedades. Esta zona puede identificarse como una zona libre de adsorción, puesto que no ocurre captación de agua. Sin embargo, a medida que continúa la captación de agua en la zona de transferencia de masa, el contenido de agua en estas perlas iguala su capacidad de adsorción para la humedad relativa del aire en la entrada del secador, de manera que pasa a formarse una sección conocida como zona de equilibrio (EZ). El aire, con humedades relativas más altas, avanza hacia la zona libre de adsorción, convirtiéndola en una

zona de transferencia de masa. Cerca del final del tiempo de secado, la mayor parte del lecho desecante pasa a formar parte de la zona de equilibrio. El avance de estas zonas se representa en la Figura 6.

**Figura 6**

*Estados del lecho desecante durante la etapa de secado.*



*Nota.* Tomado de Ducreux & Nedez (2001) [14].

Olivier Ducreux et al. (2001) señalan que el desempeño de AA está principalmente determinado por la efectividad de la penetración del aire en las porosidades del desecante. A su vez, esta depende de las características del material y las condiciones de funcionamiento, las cuales involucran la presión, temperatura, humedad relativa y el flujo de aire [14].

## Figura 7

*Secador DA25IM, propiedad del CDT de Gas.*



### 3.5 Medidores y patrones de flujo de gas

A continuación, se describe el principio de funcionamiento y características generales de los principales patrones y medidores de flujo utilizados en el CDT de Gas, por su baja incertidumbre.

#### 3.5.1 Patrón laminar basado en diferencial de presión (LFE)

Este medidor consta de un elemento de flujo laminar (LFE), dentro del cual se obtiene y mantiene un flujo en el régimen laminar al paso por grupo de pasajes estrechos a través de los cuales ocurre una caída de presión. Este diferencial de presión se relaciona con el flujo que atraviesa el medidor mediante la ley de Hagen-Poiseuille.

$$Q = (P_1 - P_2) \pi r^4 / 8 \eta L = K(\Delta P) / \eta \quad (6)$$

En esta ecuación el factor K incluye el diámetro y la longitud del pasaje, y  $\eta$  representa la viscosidad dinámica del fluido a sus condiciones de presión y temperatura. El comportamiento entre el caudal y diferencial de presión es mejor descrito mediante una función polinomial, por lo que al aplicar series de Taylor sobre la Ecuación 6, es posible obtener un

polinomio de segundo o tercer grado, cuyos coeficientes son ajustados experimentalmente. Uno de estos modelos matemáticos es conocido como “Uniflow”.

El CDT de Gas posee un banco que garantiza las condiciones necesarias para la calibración de medidores de flujo con una incertidumbre de tan solo 0.43% utilizando 3 elementos de flujo laminar para distintos caudales. El medidor patrón (MM) es acompañado por un medidor de presión diferencial, medidor de presión absoluta y sensor de temperatura, estando también equipado con un medidor de temperatura y presión absoluta para el medidor bajo prueba (MUT).

### **Figura 8**

*Banco de calibración con patrones de flujo laminar.*



El banco utiliza 3 patrones dispuestos en una línea de flujo independiente, con rangos de caudal de operación de 0.001 a 0.01 L/min, 0.01 a 0.1 L/min y 0.1 a 11 L/min respectivamente. En general el banco opera a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  y presiones de 90.5 a  $200 \pm 5$  kPa, con una incertidumbre relativa del error de medición del patrón, menor a 0.4% ( $K=2$ ).

### **3.5.2 Patrón tipo campana gasométrica.**

La campana gasométrica en términos generales consiste en un vaso invertido (campana) cuya base abierta es sellada por el contacto con el aceite depositado en el espacio anular entre la estructura cilíndrica externa, y el tanque seco o estructura cilíndrica interna. El volumen encerrado por la campana y sello de aceite puede variar a medida que se sumergen las paredes de la campana en este líquido, y el gas es desplazado a través de la tubería interna que comunica este espacio con el medidor bajo prueba. La campana gasométrica permite conocer el volumen de gas que atraviesa el medidor bajo prueba mediante la bien caracterizada diferencia de volúmenes al iniciar y finalizar el proceso. El sistema que sostiene la campana y controla su movimiento, mantiene el equilibrio en las fuerzas que actúan sobre ella y le permite desplazarse a velocidad constante.

Este patrón posee altas cualidades metrológicas y es generalmente utilizado como patrón primario. Las principales condiciones para ser un patrón primario son, contar con una baja incertidumbre y valerse de una magnitud física diferente al caudal para su calibración, que en este caso consiste en longitudes.

## Figura 9

*Imagen campana gasométrica propiedad del CDT de Gas*

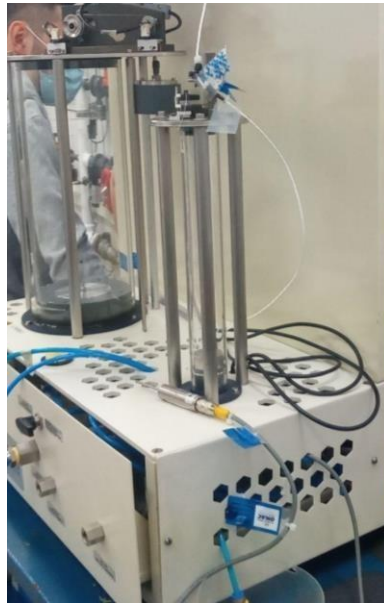


### **3.5.3 Patrón tipo pistón**

El patrón tipo pistón, tiene un principio operativo similar a la campana gasométrica, pues consiste en la medición del volumen de gas encerrado entre la pared de un cilindro de borosilicato y un émbolo. El émbolo se desplaza a lo largo del cilindro a velocidad constante gracias al contrapeso que equilibra las fuerzas que actúan sobre él. También es considerado un patrón primario ya que posee excelentes propiedades metrológicas, y su calibración parte de la medición del diámetro interno del cilindro. El sello requerido entre el émbolo y el cilindro es producido por una pequeña tolerancia entre ellos y un anillo de mercurio líquido que se aloja en ranuras perimetrales del émbolo en las que, gracias a la alta tensión superficial de este material, es posible mantener el líquido en movimiento con el émbolo.

## Figura 10

*Banco calibrador con patrón tipo pistón propiedad del CDT de Gas.*



*Nota.* Cortesía de CDT de Gas.

La temperatura del émbolo no debe estar fuera del rango  $20 \pm 2$  °C, pues el coeficiente de expansión térmica del material del que está hecho, es mayor al del cilindro, por lo que el espacio entre estas piezas puede variar, llegando a presentar contacto directo o una holgura lo suficientemente amplia para que el mercurio salga de su alojamiento, o exista en bloqueo en su desplazamiento.

El banco para el patrón tipo pistón con el que cuenta el CDT posee un sistema que mide el desplazamiento del pistón empleando un encoder rotativo que se conecta a la polea que sostiene el cable del sistema de contrapeso, y discretiza la posición angular del mismo en 20000 pulsos por cada giro de la polea.

## 4. Metodología Del Proyecto

En concordancia con los objetivos propuestos, se presenta el desarrollo de las siguientes fases metodológicas que fueron planteadas con el fin de dar respuesta a los objetivos trazados para el proyecto.

#### **4.1 Etapa I: Evaluación de la capacidad del sistema de secado de aire.**

El secador pretende ser utilizado al interior del laboratorio de metrología de fluidos, por lo que es importante analizar cuáles de sus parámetros de funcionamiento podrían presentar mayores variaciones en las condiciones previstas para su uso. La temperatura del ambiente es uno de los parámetros más estrictamente controlados al interior del laboratorio debido su incidencia en la precisión de las calibraciones. El control de temperatura mantiene el ambiente del laboratorio en  $20 \pm 2$  °C. A su entrada al laboratorio, el aire comprimido atraviesa un intercambiador de calor cuya principal función es asegurar el equilibrio térmico este fluido y el ambiente. La presión de vapor es tal que el descenso en la temperatura permite el alcance del estado de saturación, razón por la que es producida una considerable cantidad de condensado que es posteriormente expulsado por un separador de agua. Dadas estas condiciones se asume que la humedad relativa del aire que ingresa al laboratorio es del 100%, y las variaciones en la concentración del vapor de agua han de atribuirse a las fluctuaciones en la presión de la línea. Para asegurar la remoción de condensados y aerosoles en el aire comprimido, se cuenta con la efectiva acción del separador de agua y un filtro coalescente a la entrada del secador.

El caudal y la presión pueden variar según la demanda de los procesos y por tal motivo, resulta de interés validar si el secador presenta variaciones en su rendimiento al ser sometido a cambios en estos parámetros.

A partir del intervalo de caudal en el que operan los patrones primarios de la corporación y las presiones disponibles en el punto de suministro de aire comprimido empleado para la validación del secador, se define el intervalo de 0,5 a 200 dm<sup>3</sup>/min y 3 a 6 barg, como el intervalo de caudal y presión a los que será sometido el secador para la evaluación de su desempeño. Para los ensayos son empleados equipos para la medición de presión, temperatura, humedad, caudal y componentes como válvulas, conexiones y filtros que serán descritos en detalle a continuación.

### 4.1.1 Equipo de secado

El análisis se centra en el secador de mejores características con el que cuenta la corporación. Este es del tipo desecante regenerativo sin aplicación de calor, modelo DA25IM -40°C de la marca Ingersoll Rand. La Tabla 2, presenta algunas de sus especificaciones.

**Tabla 2**

*Especificaciones técnicas del secador modelo DA25IM -40 Ingersoll Rand.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Caudal Q	25 m <sup>3</sup> /h (15 SCFM)
MOP (máx. presión de operación)	14 barg (203 psig)
Punto de rocío T <sub>d</sub>	-40°C
Calidad del aire	ISO Clase 2

*Nota.* Tomado de [ingersollrand.com](http://ingersollrand.com) [16].

El secador incorpora un control electrónico que conmuta las funciones de sus dos lechos desecantes a la orden de un temporizador que puede ser ajustado entre 100 y 300 segundos. Esta acción es realizada por una válvula direccional de 5 vías y 2 posiciones que accionada por un solenoide para redireccionar el flujo hacia la torre que operará en la función de secado y permitir el escape del aire de purga de la torre opuesta.

Los secadores Ingersoll Rand de este tipo pueden aportar aire ISO clase 2 (-40°C Td) y 1 (-70°C Td) de acuerdo con el modelo [16]. Entendiendo la clase como un estándar que define el límite superior de la concentración de impurezas en el aire, se puede asumir que la humedad permanecerá inferior a -40°C Td independientemente de la presión del aire tratado (sin superar la presión máxima de 14 barg indicada por el fabricante). Por lo anterior se espera que la cantidad de vapor de agua en términos de concentración sea menor cuando la presión aumente,

y que no se presenten variaciones considerables en la medida de Td a pesar de las variaciones en la presión y caudal de la corriente.

El fabricante proporciona filtros coalescentes para la retención de partículas y aerosoles de hasta cierto tamaño. Para este secador, el fabricante sugiere el uso de un filtro de referencia FA30IH, que retiene partículas de hasta 0,01  $\mu\text{m}$ , y cuya principal función es proteger el material desecante de entrar en contacto con condensado o aerosoles de agua y aceite provenientes de la etapa de compresión. Este filtro también asegura una concentración de aceite inferior a 0,01 ppm [17].

#### ***4.1.2 Recuperación del secador***

Inicialmente se encuentra que el secador proporciona aire con un punto de rocío superior a 5 °C y una concentración de vapor de agua superior a 2000 ppmv. Al examinar de forma más detallada su comportamiento se identificó que al ocurrir la conmutación de las funciones desecado y regeneración de las torres, uno de estos ciclos presentaba una pérdida de presión en el tramo de línea posterior al secador y un aumento en la presión de entrada del secador. También se evidenció que durante este ciclo no se presentaba flujo de aire.

Al haber determinado que el nivel de humedad del aire proporcionado por el secador es considerablemente superior al requerido, se procedió a realizar pruebas sobre el secador tipo membrana y la trampa de humedad a base de tamiz molecular. Los resultados de las pruebas en estos secadores han permitido concluir que el secador tipo membrana alcanza un mínimo nivel de secado de 200 ppmv y la trampa de secado genera una fuerte caída de presión lo cual hace que el flujo de aire sea mínimo con una concentración de vapor de agua de 500 ppmv.

Una vez se obtuvo una mayor comprensión sobre los mecanismos de operación del secador DA25IM se retoma la examinación de sus componentes y la ejecución de un diagnóstico. Como resultado de este proceso se encuentra que, aunque se presenta la expulsión de una mínima cantidad de aire de purga en el ciclo de comportamiento irregular, en esta la

presión no penetra en la torre en la función de secado. Por tal motivo se decide desensamblar la válvula direccional y verificar su correcto funcionamiento. La válvula equipada con el secador es de 5 vías y 2 posiciones, activada por solenoide con retorno por resorte. Una vez el secador es energizado, el controlador activa el solenoide que permite el desplazamiento del carrete de la válvula hacia la posición en la que se presenta flujo de aire con normalidad. Una vez se completa esta etapa el controlador desenergiza el solenoide para permitir el retorno del carrete por la acción del resorte. En este movimiento ocurre un desplazamiento parcial y no es posible completarlo mediante la aplicación de fuerza manual, por lo que existe alguna obstrucción o deformación que genera un obstáculo en el movimiento del carrete y que no resulta ser fácilmente solucionable. Habiendo determinado que en el error del funcionamiento del secador radica en el desplazamiento del carrete, el CDT de gas adquiere una válvula con las especificaciones de la anterior.

### **Figura 11**

*Válvula direccional del secador bloqueada.*

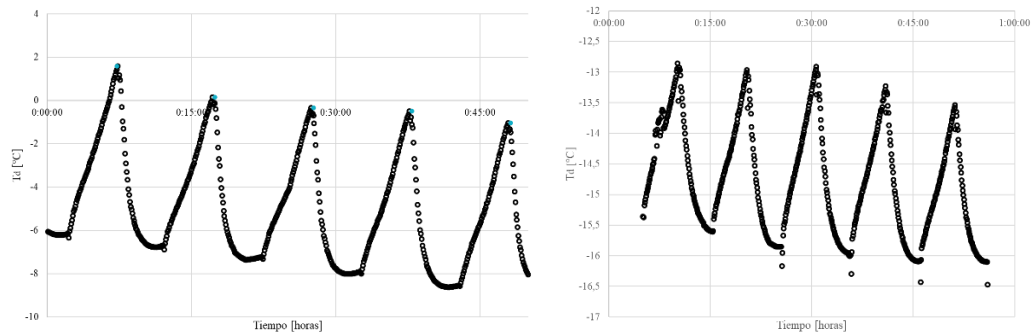


Una vez la válvula es reemplazada se inician las pruebas para caracterizar el comportamiento del secador; en las que, aunque la humedad posterior al secado disminuye, un flujo continuo de aire, la temperatura de rocío sigue siendo superior a 0°C. A pesar de ello se nota una tendencia a la disminución de la temperatura de rocío a media que continúan las pruebas de secado y el tiempo en que el secador se encuentra en operación. Información

relevante sobre lo que ocurre en el interior del secador, es revelada por los patrones característicos observados en la Figura 12.

## Figura 12

*Comportamiento del nivel de secado tras el reemplazo de la válvula direccional.*



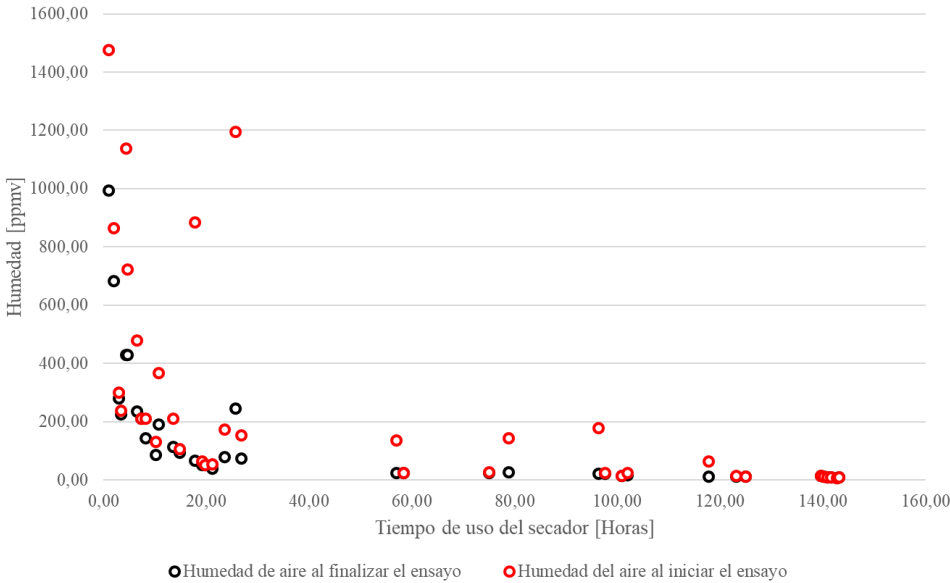
El patrón evidenciado en la Figura 12 demuestra que existe una fuerte disminución de la temperatura de rocío en el intervalo de 5 min en que el que opera la torre desecante cuyo puerto de entrada se encontraba bloqueado y que una vez la torre que ha venido trabajando entra a secar el aire, la humedad del flujo aumenta. La evidente explicación a este comportamiento es que la regeneración del material desecante depende de la eficacia con que su gemela proporcione aire seco de purga, lo cual no se cumplió para la torre que siempre estuvo operando debido a que su par se encontraba bloqueado, con lo que la regeneración fue omitida por completo. Siendo así, la torre no bloqueada continua captando la humedad del aire al que es expuesto, acumulando grandes cantidades de agua con lo que disminuye su capacidad de adsorción habiendo alcanzado la saturación. La torre que estuvo bloqueada solo recibía aire durante su etapa de regeneración, en la que fue expuesto a aire relativamente húmedo proporcionado por la torre no bloqueada, el cual contenía bajas presiones de vapor debido a la expansión del aire de purga. Esto hace que la torre bloqueada cuente con un lecho desecante lejos con mayor capacidad de adsorción, aunque no pueda proporcionar aire a las condiciones de diseño. Es por esto que en cada ciclo el segmento de curva descendente en la Figura 12, representa la etapa de 5 min en la que la torre anteriormente bloqueada se encuentra en

operación, y los 5 min de curva ascendente corresponden a la etapa en la que la torre que siempre ha estado trabajando se encuentra en operación. La tendencia a la disminución de la humedad es producto de la mejora en el proceso de regeneración a media que las torres comienzan a proporcionarse mutuamente aire cada vez más seco, acercándose al mínimo contenido de agua para el cual fueron diseñados.

Para intensificar y acelerar el proceso, el secador fue operado a diario durante 4 a 5 horas, además de que el sistema se dispuso ocasionalmente para operar con flujos mínimos durante la noche y fines de semana. Como indicadores del progreso en el proceso de recuperación fue notable la disminución de la diferencia entre los picos de humedad de cada ciclo, la disminución en el tiempo de estabilización y el alcance de temperaturas de rocío cada vez menores. La Figura 19 muestra la disminución del contenido de vapor de agua al iniciar y finalizar ensayos que iniciaron en el momento indicado por el valor de tiempo en el eje horizontal.

**Figura 13**

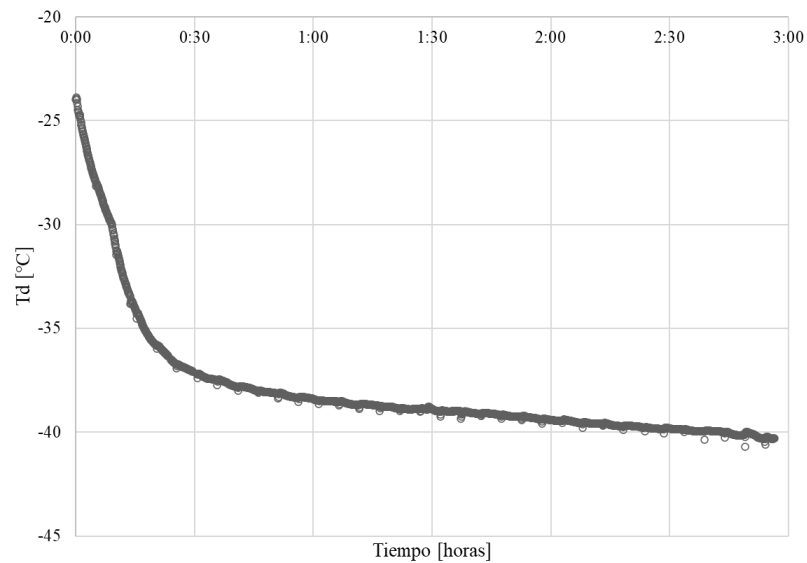
*Disminución del nivel de humedad del aire proporcionado por el secador, en el tiempo.*



Cerca de las 140 horas de operación, el secador obtuvo el comportamiento representado por la Figura 14.

## Figura 14

*Comportamiento de nivel de secado tras 4 semanas de operación diaria del secador.*



Aunque el comportamiento de la Figura 14 fue menos eficiente que el que demostró el secador posteriormente, en este punto se alcanzó la temperatura de rocío indicada por el fabricante. La Figura 14 demuestra que para este momento el secador requería de 2 horas para obtener una humedad de  $-40^{\circ}\text{C Td}$  sin embargo este tiempo disminuyó a menos de 30 minutos en las experiencias finales.

### 4.1.3 Equipo de medición de humedad

La humedad es tomada con el higrómetro modelo PM880 de la marca GE Panametrics y la sonda modelo TF-2R-T30 del mismo fabricante. La sonda TF incorpora sensores para la medición de presión total, la presión de vapor y la temperatura, que son necesarias para determinar la humedad del aire en sus distintas expresiones. Las características de cada sensor se presentan a continuación [18]:

- Presión de vapor ( $P_w$ ): medida con electrodo de óxido de aluminio, para un rango de 20 a  $-80^{\circ}\text{C Td}$ , con una incertidumbre de  $2^{\circ}\text{C Td}$ .

- Presión total (P): sensor piezoresistivo que mide una presión mínima de 70 psig (de acuerdo con la experiencia) y una presión máxima de 1000 psig, con una incertidumbre de 3 Psig según su certificado de calibración.
- Temperatura (T): tomada con un termistor NTC, para un rango de medición de -30 a 70°C e incertidumbre de 0,5 °C.

#### 4.1.4 Medidor de caudal y presión

El caudal es tomado con el medidor de volumen de gas tipo diafragma, modelo Elster AL-1000. Este posee una máxima presión de operación de 7 barg y caudal máximo de 32 m<sup>3</sup>/h. Para el análisis se utiliza el valor del caudal promedio para un intervalo de 10 minutos, puesto que la presión máxima y mínima del tanque de almacenamiento de aire comprimido ocurren dentro de este periodo.

#### Figura 15

*Medidor de volumen de gas AL-1000 marca Elster.*



El flujo masico de aire que atraviesa el secador es distinto según la densidad del aire, la cual varía de acuerdo con la presión de la línea. Una forma en que convencionalmente es expresada la capacidad de flujo es indicando el caudal volumétrico a condiciones estándar. Estas condiciones se encuentran definidas por el Instituto de Gas y Aire Comprimido (CAGI) y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) como 20 °C y 1 atm. Por lo anterior, se

ha decidido representar el flujo de aire en el secador en términos de metros cúbicos por hora a condiciones estándar, para lo que se emplea el acrónimo SCMH.

La presión en cualquier punto de la línea es tomada con manómetros analógicos de marca SALMOIRAGHI, con rango de medición de 0 a 10 barg y una resolución de 0,05 barg.

### **Figura 16**

*Medidores de presión a la entrada y salida del secador.*



#### **4.1.5 Sistema de aire comprimido**

La generación de aire comprimido ocurre por un compresor recíprocante de dos etapas, modelo 2340 L5-V de la marca Ingersoll Rand. El compresor está equipado con un *intercooler* entre cada etapa de compresión, y su función es hacer que el proceso termodinámico de compresión se acerque lo más posible a un proceso isotérmico para disminuir el consumo de energía. De igual forma incorpora un post enfriador equipado con un sistema de descarga de condensados. El compresor provee 14,7 CFM a condiciones de 90 psig [19], y una presión máxima de 175 psig. El aire comprimido es recibido por un tanque de almacenamiento (pulmón) con 60 galones de capacidad, que es llenado hasta 130 psig. Un controlador sensa la presión en el tanque para desactivar el compresor una vez la presión de 130 psig ha sido alcanzada, posteriormente el controlador reactiva el compresor cuando la presión en el tanque alcanza los

80 psig. La duración de las etapas de llenado y descarga está determinada por la demanda de aire en el laboratorio, pero por lo general es de 5 a 7 min. Debido a los niveles de presión requeridos para obtener los caudales esperados, no es posible emplear reguladores de presión en la línea de ensayo, pues aquellos disponibles permiten regular la presión a un máximo de 20 psig de salida, lo cual resulta insuficiente para los valores de caudal requeridos. Estas fluctuaciones en la presión del aire que proporciona el compresor provocan cambios en el caudal que atraviesa el secador, por lo que es conveniente tomar el caudal promedio en un intervalo mayor a 10 min, abarcando más de lo que toma en completarse un ciclo llenado y descarga.

### **Figura 17**

*Controlador de presión en almacenamiento de aire comprimido.*



#### **4.1.6 Ajuste de la presión y caudal**

La teoría de pérdida de presión por flujo en tuberías y accesorios, indica que la caída de presión es función del coeficiente de pérdidas (propio del elemento de paso) y del caudal. El comportamiento de las pérdidas es semejante al de la caída de voltaje en un circuito eléctrico. En éste, el conocer la resistencia y la corriente permite obtener la diferencia de potencia en un elemento del circuito. De la misma forma que se utilizan resistencias equivalentes para representar la resistencia de un tramo del circuito y obtener la corriente conociendo la diferencia

de potencial entre sus extremos, es posible calcular el flujo que atraviesa un tramo de la línea de aire comprimido al conocer la diferencia de presión entre el tanque de almacenamiento y el escape, y el coeficiente global de pérdidas de los elementos instalados en la línea.

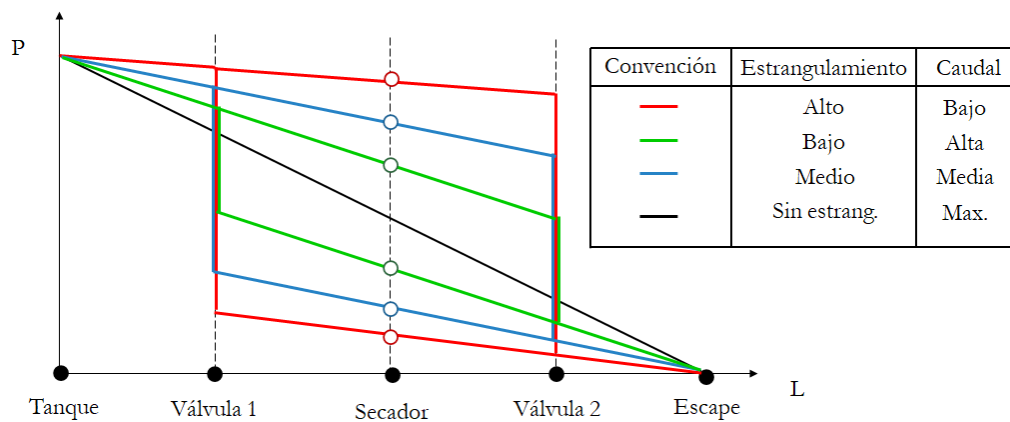
El método de ajuste de la presión y caudal consiste en el estrangulamiento de válvulas a la entrada y salida del secador. Para analizar este método, se propone considerar que la diferencia de presión entre el compresor y el escape es constante, así como el coeficiente global de pérdidas por unidad de longitud. Al accionar una válvula, el coeficiente global de pérdidas aumenta, influyendo directamente sobre el caudal del sistema y creando una caída que disminuye la presión en los puntos posteriores a la válvula. Para mantener este caudal y modificar la presión, se mantiene constante la suma de los coeficientes globales de pérdidas al ajustar el estrangulamiento del par de válvulas, y mover así el punto en el que se produce la mayor caída de presión hacia antes o después del secador.

La Figura 18 es un diagrama de cabeza de presión por longitud, en el que se representa el comportamiento del valor de la presión en el secador, cuando para distintos niveles de caudal (representados por una convención de colores), se concentra el estrangulamiento en una válvula u otra. Por tal motivo, el gráfico contiene un par de curvas de cada color, que pueden diferenciarse únicamente en la sección entre las válvulas, pues cuando el estrangulamiento se concentra en la válvula de entrada, la presión en el secador es mínima, y al concentrarse en la válvula de salida, la presión en el secador es máxima.

El área encerrada por las curvas de un mismo color representa el rango de presiones que pueden obtenerse en un caudal dado. Cómo se aprecia a medida que el caudal aumenta, el rango de presiones disminuye hasta reducirse a una sola presión (línea de color negro).

**Figura 18**

*Presión y caudal en línea de aire al ajustar estos parámetros con doble estrangulamiento.*

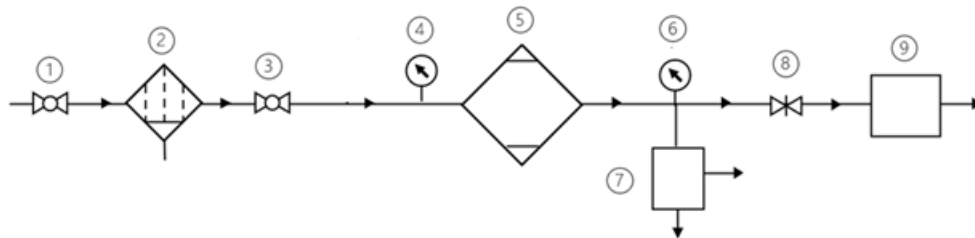


#### 4.1.7 Montaje

Con los instrumentos y equipos identificados anteriormente, la Figura 19 representa la disposición de los elementos en el montaje.

**Figura 19**

*Esquema de montaje experimental para la validación del comportamiento del secador.*



1. Válvula de corte en punto suministro
2. Prefiltro coalescente a la entrada del secador
3. Válvula de regulación antes del secador
4. Manómetro a la entrada del secador
5. Secador
6. Manómetro a la salida del secador
7. Bloque de muestreo de humedad
8. Válvula de regulación después del secador
9. Medidor de volumen de gas

Las conexiones se realizan mediante tubería de poliuretano de 6 mm de diámetro, unido con conexiones neumáticas rápidas, y tubería capilar rígida de acero inoxidable con racores sellantes de junta tórica. A continuación, se explica la función de cada elemento del esquema:

1. Válvula de corte de suministro: separa la línea de aire comprimido que forma parte del ensayo, de la línea del sistema de suministro. Esto permite realizar con seguridad cualquier ajuste o desconexión en la línea de ensayo.
2. Prefiltro coalescente: se ubica antes del secador para asegurar la retención de condensados y aerosoles de agua o aceite que puedan afectar el desempeño e integridad del material desecante.
3. Válvula de regulación previa al secador: su estrangulamiento permite reducir el caudal y la presión del aire que ingresa en el secador.
4. Manómetro en la entrada: brinda una lectura de la presión del aire que entra al secador ( $P_{in}$ ).
5. Secador: retiene la humedad del aire comprimido.
6. Manómetro a la salida: brinda la lectura de presión total a la salida del secador ( $P_o$ ), con la cual es posible calcular la concentración de la humedad en el aire para aquellos casos en los que la presión es inferior a 70 psig y no puede ser registrada por el transductor de presión del higrómetro.
7. Bloque de muestreo de humedad: este bloque tiene la función de albergar la sonda de humedad y permitir el venteo de una pequeña cantidad de aire que es introducida en él por derivación de la línea principal. En este punto son obtenidas las medidas de temperatura de rocío ( $T_d$ ), de temperatura ( $T_o$ ) y de presión ( $P_o$ ) a la salida del secador.
8. Válvula de regulación posterior al secador: su estrangulamiento reduce el caudal y aumenta la presión del aire que entra al secador.
9. Medidor de volumen de gas: realiza el conteo de la cantidad de volumen de gas ( $V$ ) que atraviesa la línea a una presión cercana a la ambiente.

El medidor de volumen de gas se ubica al final de la línea de aire comprimido, de manera que el aire en su puerto de salida se encuentra a presión atmosférica y en su entrada tiene una presión un tanto mayor a razón de la caída de presión que sufre para atravesar el equipo. La ficha técnica del medidor señala que para una presión de 0,25 mbarg y un caudal de 1 000 pies<sup>3</sup>/h (28,3 m<sup>3</sup>/h) a condiciones estándar, se producirá una caída de presión de 0,5 pulgadas de columna de agua (124,42 Pa), lo cual representa un incremento del 0.14 % en la presión del puerto de entrada respecto a la presión del aire en el puerto de salida. Por tales motivos se considera razonable aceptar la suposición de que la presión del aire en el medidor es igual a la presión atmosférica en el laboratorio (902,20 hPa). Finalmente, el caudal tomado a estas condiciones será convertido a las condiciones estándar planteadas anteriormente.

#### ***4.1.8 Puesta en marcha y conexión de equipos***

Con los equipos dispuestos de la forma presentada, se toman los siguientes pasos o precauciones:

- Encender el controlador del secador.
- Inspeccionar el sistema en busca de fugas.
- Insertar la sonda de humedad en el bloque de muestreo y permitir que el sistema opere durante 1 a 2 horas con el fin de acercarse a la temperatura de rocío -40 °C.

#### ***4.1.9 Ajuste de parámetros***

Para simplificar el análisis, se establecen  $5,5 \pm 0,4$  barg (alta),  $4,5 \pm 0,4$  barg (media) y  $3,5 \pm 0,4$  barg (baja), como 3 niveles en los cuales se ubica la presión para cada valor de caudal.

En el procedimiento de ajuste, se siguen los pasos indicados a continuación:

1. El caudal ( $Q_i$ ) es ajustado en el valor deseado mediante el estrangulamiento de la válvula en la entrada del secador. Posterior a esto, se realiza una verificación con el caudal promedio ( $Q_{prm}$ ) por un lapso de 10 min.

2. Se identifica el valor máximo ( $P_{in,max}$ ) y mínimo ( $P_{in,min}$ ) de la presión en la entrada del secador, lo cual es producto del ciclo de llenado y vaciado del tanque de almacenamiento del compresor. Con estos, se obtiene la presión promedio en la entrada del secador ( $P_{in;prm}$ ), que para los análisis posteriores es considerada como la presión en la entrada del secador durante el ensayo.
3. Una vez establecido el valor de  $Q_{prm}$  y  $P_{in;prm}$ , se procede a realizar la toma de datos de acuerdo con lo expuesto en la sección 4.1.10 de este trabajo.
4. Se procede a modificar el valor de la presión en la entrada del secador, buscando mantener relativamente constante el valor del caudal promedio. Este objetivo es abordado al realizar de manera simultánea y proporcional, la liberación de la válvula ubicada en la entrada del secador y el estrangulamiento de la válvula en la salida. Una vez ajustada la presión en un valor cercano al que corresponde al nivel de presión media, se procede a repetir los pasos del 1 al 3 para este nuevo ensayo.
5. Se realiza una vez más el proceso descrito en el paso 4, con la salvedad de que en esta ocasión se ajusta la presión a la entrada del secador en el nivel de presión alto, liberando por completo la válvula en la entrada del secador y concentrando el estrangulamiento en la válvula de salida.
6. Finalmente se repiten los pasos del 1 al 5 para un nuevo valor de  $Q_i$ .

#### **4.1.10 Toma de datos**

Los datos a registrar al haber ajustado las condiciones de operación de cada ensayo son:

- Los valores de volumen de gas al inicio ( $V_1$ ) y final ( $V_2$ ) del periodo de 10 min para el cálculo del caudal promedio ( $Q_{prm}$ ).
- $P_{in,max}$  y  $P_{in,min}$  para el cálculo de la presión media a la entrada del secador ( $P_{in;prm}$ ).

- Se crea un archivo de registro automático de datos de  $T_o, P_o$  y  $T_d$ , durante un tiempo mínimo de 1 hora, utilizando el higrómetro PM880.

Si la presión a la salida del secador es inferior a 70 psig, es necesario registrar manualmente el valor de  $P_{o;min}$  y  $P_{o;max}$  para así encontrar el valor promedio entre estas presiones.

#### 4.1.11 Cálculos

Con el fin de obtener los valores de presión, temperatura y humedad necesarios para analizar el rendimiento del secador, han de efectuarse los siguientes cálculos sobre los datos obtenidos:

- Obtener  $P_{in;prm}$  y  $P_{o;prm}$  al promediar el valor máximo y mínimo de las presiones a la entrada y salida del secador, respectivamente.
- Obtener el valor de  $Q_{prm}$  a partir de la indicación de volumen proporcionada por el medidor de volumen de gas en el intervalo de tiempo considerado. Para utilizar un valor representativo del caudal de ensayo, se toma el promedio entre los valores de  $Q_{prm}$  que fueron tomados en distintos momentos del ensayo. Finalmente se obtiene el valor de caudal a condiciones estándar (SCMH) a partir de los valores de caudal en  $m^3/h$  para la presión del medidor, utilizando la Ecuación 7.

$$Q_{prm[SCMH]} = \frac{P_{atm}}{P_{estandar}} * Q_{prm} = \frac{902\ 220 [Pa]}{101\ 325 [Pa]} * Q_{prm} = 0.89 * Q_{prm} \quad (7)$$

- Promediar los valores de  $T_d$  que fueron relativamente estables durante la mayor parte del tiempo para obtener así el valor de  $T_{d;prm}$  que será representativo de la humedad del aire en el ensayo.

- Para obtener el valor de  $ppm_v$  representativo del ensayo y en caso de no contar con el valor de  $P_o$  mediante el registro automático del higrómetro ( $P_o < 70$  psig), se realiza el proceso descrito a continuación:
  - Obtener  $P_w$  al introducir  $T_{d:prm}$  en la Ecuación 5.
  - Obtener  $x_w$  al introducir  $P_w$  y  $P_{o:prm}$  en la Ecuación 1.
  - Obtener  $ppm_v$ , al introducir  $x_w$  en la Ecuación 2.

En caso de que la presión  $P_o$  se mantenga por encima de 70 psig, promediar los valores de  $ppm_v$  (según reportados por el higrómetro) que se mantienen durante un periodo de tiempo más prolongado.

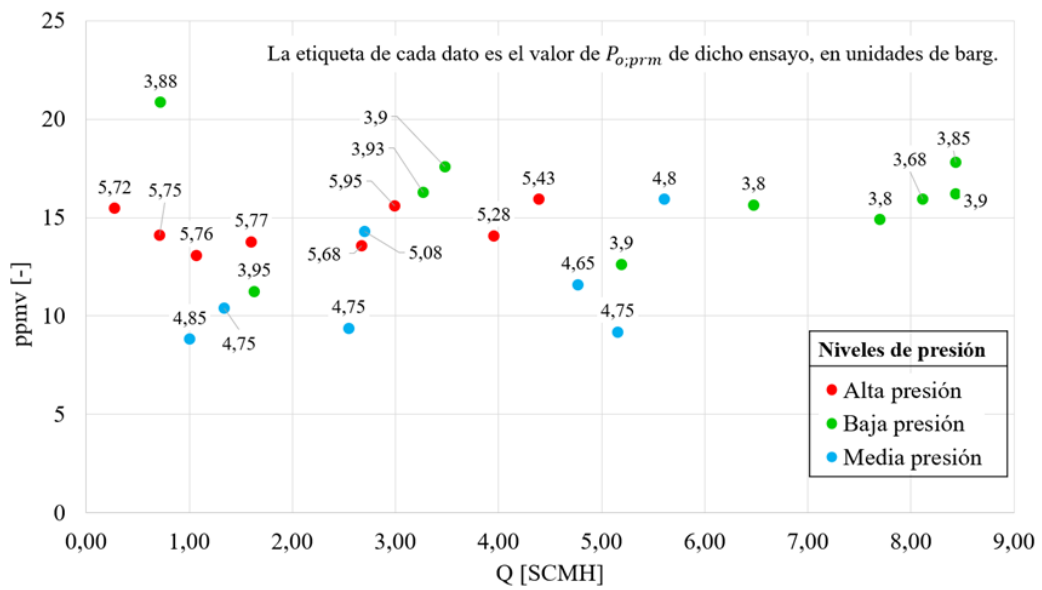
- Obtener el valor de HR representativo en cada ensayo al promediar los valores de HR que se mantuvieron relativamente estables durante la mayor parte de la prueba. Al no contar con el valor de  $P_o$  en el registro del higrómetro, se debe realizar el siguiente procedimiento:
  - Obtener  $P_w$  al introducir  $T_{d:prm}$  en la Ecuación 5.
  - Obtener la presión de saturación ( $P_s(T)$ ) a la temperatura promedio en la salida del secador ( $T_{o:prm}$ ), introduciendo esta última en la Ecuación 5.
  - Obtener HR al introducir  $P_w$  y  $P_s$  en la Ecuación 3.

#### **4.1.12 Resultados**

Mediante los gráficos de dispersión de las Figura 20 a Figura 22, se presentan los valores de humedad del aire proporcionado por el secador en términos de  $ppm_v$ , HR y  $T_d$ , los cuales se ordenan en el eje vertical, con el caudal promedio en el eje de las abscisas y una convención de colores para indicar el nivel de presión de cada ensayo, así como etiquetas para indicar el valor de la presión promedio.

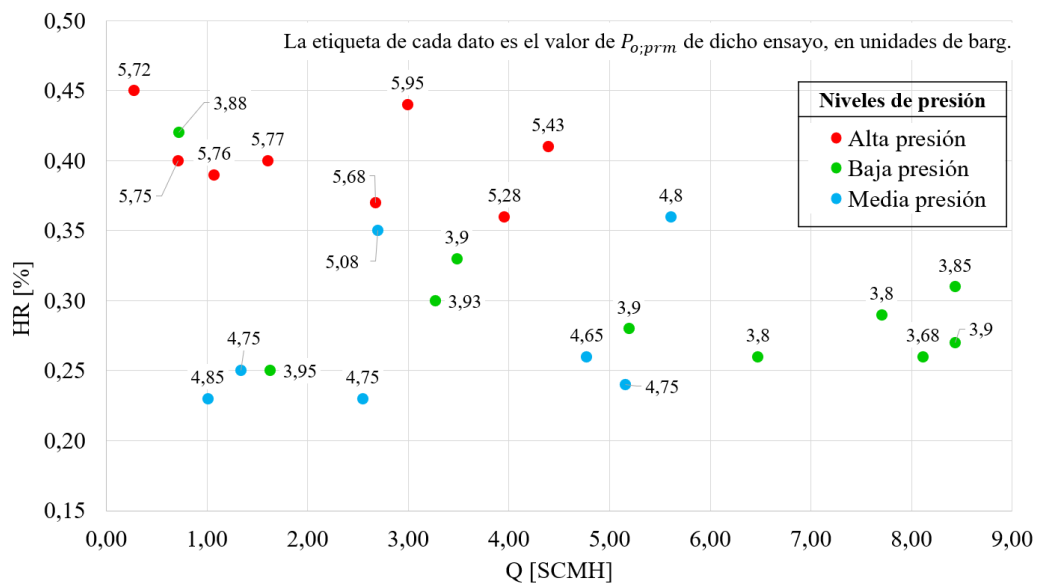
**Figura 20**

*Humedad del aire secado a distintas presiones y caudales, expresada en ppmv.*



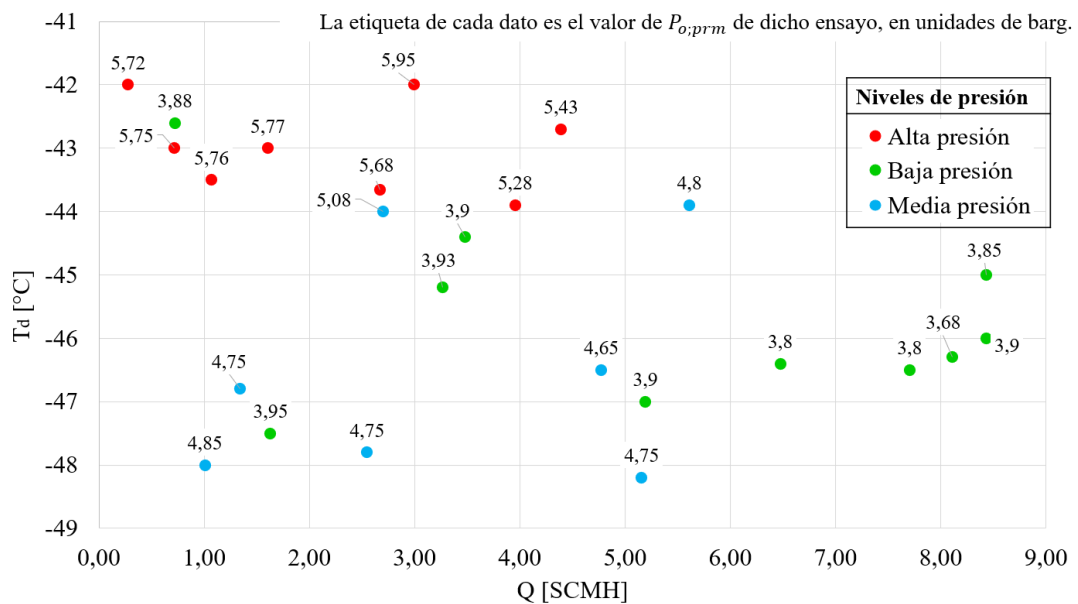
**Figura 21**

*Humedad del aire secado a distintas presiones y caudales (expresada en HR)*



**Figura 22**

*Humedad del aire secado a distintas presiones y caudales (expresada en  $T_d$ ).*



Como era esperado, en la Figura 22 se muestra que la temperatura de rocío del aire en la salida del secador se ha mantenido inferior a  $-40$  °C ante todos los valores de presión y caudal empleados. Esto permite afirmar que la humedad del aire proporcionado por el secador cumple con lo establecido para la calidad del aire ISO clase 2, aun cuando las condiciones de presión y caudal puedan variar en el intervalo de 3 a 6 barg y 0 a 9 SCMH. En la Figura 22 también puede apreciarse que, a mayores presiones, la temperatura de rocío tiende a acercarse al límite de  $-40$  °C, lo cual tiene relación con el aumento de  $P_w$  como producto del aumento de la presión total.

A partir de la Figura 20 se encuentra que el contenido de humedad del aire se mantiene en  $15 \pm 6$  ppmv, sin alguna aparente dependencia entre la humedad y la presión o temperatura. Sin embargo, se puede evidenciar el comportamiento previsto en la sección 4.1.6, en cuanto a la reducción del rango de presiones posibles para ajustar a media que aumenta el caudal del sistema.

La Figura 21 muestra que el valor de HR en todos los ensayos se mantiene inferior al 1%. Al comparar los valores de capacidad de adsorción de la alúmina activada para estos valores

de HR (según se indican en la Figura 4), con su capacidad de adsorción para 100% HR, es posible afirmar que parte del lecho de desecante a la salida de la torre en la función de secado se encuentra libre de adsorción y con el potencial de captar alrededor de 40 veces la masa de agua que tendría en ese instante.

## 4.2 Etapa II: Evaluación del efecto de la composición sobre las propiedades y caudal del fluido de calibración.

### 4.2.1 Identificación de propiedades empleadas en los procesos de calibración.

En este paso se busca determinar que propiedades son empleadas en los procesos de calibración de la campana gasométrica, el patrón tipo pistón y el banco de patrones laminares. También se identifica en que parte del proceso intervienen.

**4.2.1.1 Propiedades calculadas en banco de LFE** Los elementos de flujo laminar (LFE) determinan el caudal a partir del modelo matemático utilizado por el fabricante (Tetratec). Este modelo es denominado Uniflow [20] y requiere introducir el valor de la presión diferencial del medidor y los valores de la densidad y viscosidad del fluido de trabajo. Estas últimas dos propiedades se obtienen de forma indirecta a partir de las mediciones de presión y temperatura del fluido, y su valor incide directamente sobre la determinación del caudal, como se muestra en la Ecuación 8.

$$Q_{MM} = \left( \sum_1^n P_n \cdot \left( \frac{\rho \cdot PD_{MM} \cdot 100 \cdot PX}{\mu^2} \right)^n \right) \cdot \frac{\mu \cdot 6 \cdot 10^7}{PY \cdot \rho} \quad (8)$$

**4.2.1.2 Propiedades calculadas en patrones tipo pistón y campana gasométrica.** Los patrones primarios tipo pistón y campana gasométrica operan mediante principios volumétricos, por lo que la determinación del caudal resulta de la medición del desplazamiento de uno de los elementos que encierra el volumen de gas. En este caso, la exactitud de la medición del caudal es producto de una baja incertidumbre en las dimensiones de la campana (o cilindro) y en el registro del desplazamiento (valores de longitud en el tiempo) de esta (o del

embolo) mediante un enconder. Estos patrones brindan una medida de caudal promedio mediante la identificación de la diferencia de volumen que ha sido expulsado de su interior y el tiempo en que se llevó a cabo. Por tal motivo, en estos patrones la determinación del caudal no involucra el cálculo de propiedades del fluido de trabajo.

#### **4.2.1.3 Propiedades calculadas en medidores bajo prueba asociados al proyecto**

Un tipo de medidor de bajo caudal es el medidor térmico másico, en el que la medición del cambio de temperatura de un gas y del elemento que cede el calor, permite inferir el flujo másico de aire para un calor específico de referencia. El flujo es dado en unidades volumétricas al convertir el caudal másico a las condiciones de presión y temperatura de referencia (0°C y 1 atm).

Los medidores del tipo tobera sónica generan un flujo constante una vez se alcanza una relación entre la presión de entrada y salida conocida como relación de bloqueo. El valor de este caudal depende de la forma del taladrado y por tanto de la temperatura del elemento, para lo cual se aplica un factor de corrección como función de la temperatura. A pesar de ello, no es empleada alguna propiedad indirecta para determinar el caudal que produce este elemento.

Otros medidores de volumen de gas empleados en este proyecto son del tipo pistón reciprocante, cámara húmeda y diafragma, que al operar bajo principios volumétricos no requieren la obtención de propiedades para determinar el volumen de gas que los atraviesa.

Los medidores de flujo de gas tipo turbina se ven influenciados por el número de Reynolds, el cual involucra la viscosidad y densidad del fluido de calibración, sin embargo, estos medidores no son empleados en este trabajo.

**4.2.1.4 Cálculo de la densidad en conversión de condiciones del caudal.** En general, los procesos de calibración del CDT se basan en la comparación de los caudales indicados por el MM y el MUT al ubicarse en una misma línea de flujo. Sin embargo, debe tomarse en cuenta la compresibilidad del fluido de trabajo y la consecuente susceptibilidad del flujo volumétrico

frente a cambios en la presión y temperatura a lo largo de la línea aun cuando el flujo masico sea el mismo. Por tal motivo la comparación se realiza entre el caudal volumétrico indicado por el MUT y el caudal del patrón convertido a las condiciones de presión y temperatura del MUT. Esta transformación se logra al considerar la relación entre las densidades en ambas condiciones como factor de conversión.

En conclusión, la densidad y viscosidad son las únicas propiedades del fluido de calibración que al obtenerse de forma indirecta intervienen en el procedimiento de cálculo para la calibración mediante patrones de flujo de gas de la corporación CDT de gas; más particularmente solo en el patrón tipo elemento de flujo laminar. Sin embargo, la densidad resulta de interés en la conversión del caudal del patrón a las condiciones del MUT, debido a la compresibilidad del fluido de trabajo.

#### ***4.2.2 Composición de los gases involucrados en la calibración:***

La composición del aire empleado en el análisis se realizará de acuerdo a las proporciones de sus constituyentes en el aire atmosférico seco, aire sintético (aire seco comercial) y aire húmedo, según las consideraciones expuestas a continuación.

**4.2.2.1 Aire atmosférico estándar** La composición del aire estándar ha sido más recientemente publicada por el CIPM en su artículo “Formula revisada para la densidad del aire húmedo (CIPM 2007)” [21], en el que se adopta una modificación en la proporción de Ar pasando a formar el 0,9332% del aire estándar. El nitrógeno y el oxígeno diatómicos constituyen el 78,085% y 20,939% del aire respectivamente, mientras que un 0.0427% es atribuido a otros gases de traza que están plenamente identificados. La Tabla 3 presenta la proporción de cada constituyente y sus masas molares.

**Tabla 3**

*Composición de aire atmosférico seco reportada por el CIPM 2007.*

Especie	Mi [g/mol]	xi
N2	28,0134	0,7808503
O2	31,9988	0,2093906
Ar	39,9480	0,0093320
CO2	44,0100	0,0004000
Ne	20,1800	0,0000182
He	4	0,0000052
CH4	16	0,0000015
Kr	84	0,0000011
H2	2	0,0000005
N2O	44	0,0000003
CO	28	0,0000002
Xe	131	0,0000001
H2O	18,01528	0,0000000
M mezcla [g/mol]		28,96537199

*Nota.* Adaptación de tabla de composición de formula CIPM-2007.

**4.2.2.2 Composiciones simplificadas para el aire seco.** Otras composiciones del aire atmosférico han sido adoptadas en el desarrollo de modelos de cálculo de sus propiedades, ejemplo de lo cual son los modelos para el cálculo de la energía de Helmholtz del aire publicadas por Lemmon et al. (2000) [22]. En esta se asume que el aire está compuesto solo por N2, O2 y Ar, cuya proporción es tomada del reporte de Jones (1978). Lemmon (2000) aclara que el error inducido al no considerar los gases diferentes a estos es inferior al error experimental en los datos de referencia. De la misma forma, el software REFPROP incorpora

una mezcla predefinida para el aire seco en la que solo se consideran estos tres principales constituyentes.

**Tabla 4**

*Composiciones simplificadas de aire atmosférico.*

Especie	N2-O2-Ar _CIPM	N2-O2-Ar _REFPROP	N2-O2-Ar _Lemmon
[-]	xi	xi	xi
N2	0,7812	0,755704	0,7812
O2	0,2095	0,231605	0,2096
Ar	0,0093	0,012691	0,0092
Otros	-	-	-
H2O	-	-	-
M <sub>mix</sub> [g/mol]	28,9597	29,087903	28,958538

*Nota.* Valores tomados de formula CIPM 2007 [21], Lemmon et al. (2000) [22] y REFPROP versión 10.0.

**4.2.2.3 Aire sintético.** El CDT de Gas emplea aire sintético para la ejecución de ciertas calibraciones. En su elaboración, el fabricante indica que realiza mediciones para asegurarse de que la composición de nitrógeno y oxígeno se mantenga dentro del rango de  $78.5 \pm 2\%$  y  $21.5 \pm 2\%$ , respectivamente. En conversación con el departamento de producción de la empresa proveedora de este insumo, se ha obtenido información de que su aire seco comercial es obtenido por la separación criogénica de los constituyentes de interés a partir del aire atmosférico estándar. Una vez el nitrógeno y oxígeno se encuentran separados, son almacenados en recipientes desde los que se distribuyen a cámaras de mezclado para obtener las mezclas que demandan sus clientes, proveyendo así aire con distintas denominaciones. Una de estas

denominaciones es el aire seco comercial, del cual el CDT se abastece a parte de otros tipos de aire que se utilizan para el airea de cromatografía.

Se ha realizado un análisis de composición por cromatografía, para validar que la composición del aire sintético cumple con el intervalo afirmado por el fabricante ( $78.5 \pm 2\%$  N<sub>2</sub> y  $21.5 \pm 2\%$  O<sub>2</sub>). Estas pruebas se efectuaron sobre uno de los cilindros, el cual fue empleado en la realización de las calibraciones que hacen parte de este proyecto. Los resultados de esta prueba se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Resultados de prueba de cromatografía sobre aire seco comercial (sintético).*

RetTime [min]	Sig	Type	Area	Amt/Area	Norm %	Grp	Name
1.800	2		-	-	-		Dióxido de Carbono
4.486	1		-	-	-		Propano
4.616	1		-	-	-		i-Butano
4.767	1		-	-	-		n-Butano
4.828	2		-	-	-		Etano
5.261	1		-	-	-		i-Pentano
5.540	1		-	-	-		n-Pentano
6.347	2	BV	4.56382e4	5.70185e-4	22.642061		Oxígeno
7.067	2	VB S	1.66781e5	5.33072e-4	77.357939		Nitrógeno
7.281	1		-	-	-		Hexano
8.800	2		-	-	-		Metano
11.063	1		-	-	-		n-Heptano
14.719	1		-	-	-		n-Octano
17.443	1		-	-	-		n-Nonano
19.515	1		-	-	-		n-Decano
Totals :					100.000000		

*Nota.* Obtenido mediante servicio de acreditado de cromatografía de CDT de Gas.

Con estos resultados se comprueba que la composición del aire se mantiene dentro de los límites indicados por el fabricante, aunque no se detecta algún otro componente debido a que la sensibilidad del cromatógrafo no permite la detección de gases de traza, Argón o H<sub>2</sub>O dadas sus bajas concentraciones o que no existen en la muestra utilizada (tal como lo manifiesta

el fabricante). Cabe resaltar que la incertidumbre expandida asociada a la medición de Nitrógeno y Oxígeno diatómico es de 0,8% y 0,6%, respectivamente.

**4.2.2.4 Aire húmedo** La composición del aire húmedo a emplear en el análisis se establece como límite superior de la humedad que el aire puede contener a partir de la presión del sistema de aire comprimido y el punto de rocío que brinda el secador. La humedad máxima ocurre cuando la presión del aire es mínima, por lo que su límite podría asumirse para la presión atmosférica del laboratorio ( $\approx 902$  hPa). En conjunto con esta condición, el secador brinda un punto de rocío relativamente variable, sin embargo, permanece por debajo del límite de  $-40$  °C que corresponde al aire ISO Clase 2. Para esta condición límite la humedad alcanzaría un máximo de 143 ppmv, por lo que el aire húmedo es analizado a 25, 125 y 200 ppmv.

#### ***4.2.3 Comparación de composiciones de aire consideradas .***

Para resumir el análisis anterior, es presentada la Tabla 6 en la que se describe las composiciones de cada uno de los principales constituyentes del aire y el cálculo de sus masas molares. Los nombres asignados a cada tipo de aire en el encabezado de esta tabla serán empleados en adelante para referirse a estas composiciones.

Por otra parte, la Tabla 7 presenta el error relativo porcentual de la masa molar de cada mezcla, respecto a la masa molar del aire atmosférico seco estándar (CIPM-2007). Esta tabla indica que el error se encuentra entre  $-0,6\%$  y  $0,5\%$ . Las masas molares de todas las composiciones son inferiores a la del aire estándar, exceptuando la composición de aire seco de REFPROP. Esto se debe a que su composición tiene un  $0.03\%$  más de Ar. La mayor desviación se presenta cuando el contenido de nitrógeno es máximo, ya que es una de las moléculas más ligeras. Por otra parte, el Ar está entre las moléculas más pesadas de la mezcla, teniendo un efecto considerable sobre la masa molar total. Al desprestigiar los gases de traza, se genera un  $0.02\%$  en el error relativo porcentual. La humedad genera un error relativo de milésimas de

porcentaje, lo cual es de 10 a 100 veces menor que los errores provocados por otras composiciones.

**Tabla 6**

*Composiciones consideradas en el análisis.*

Especie	N2-O2-Ar-Otros_CIPM	O2-N2_min	N2-O2_CIPM	O2-N2_max	Air-H2O (25ppmv)	Air-H2O (200ppmv)
[-]	xi	xi	xi	xi	xi	xi
N2	0,7809	0,7650	0,7885	0,8050	0,780831	0,780694
O2	0,2094	0,2350	0,2115	0,1950	0,209385	0,209349
Ar	0,0093	-	-	-	0,009332	0,009330
Otros	0,0004	-	-	-	0,000427	0,000427
H2O	-	-	-	-	0,000025	0,000200
$M_{mezcla}$ [g/mol]	28,9655	28,9500	28,8561	28,7906	28,9652	28,9633

**Tabla 7**

*Comparación de masa molar de las distintas composiciones de aire.*

Composición	Mi [g/mol]	Dif rel [%]
N2-O2-Ar-Otros_CIPM	28,9655	-
O2-N2_min	28,9500	-0,0535
O2-N2_CIPM	28,8561	-0,3774
O2-N2_max	28,7906	-0,6038
Air-H2O (25ppmv)	28,9652	-0,0009
Air-H2O (200ppmv)	28,9633	-0,0076
N2-O2-Ar_CIPM	28,9597	-0,0199
N2-O2-Ar_REFPROP	29,0879	0,4227
N2-O2-Ar_Lemmon	28,9585	-0,0239

En adelante se asumirá que la composición de N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar-Otros reportada por el CIPM 2007 es la composición de aire atmosférico estándar.

#### 4.2.4 *Comparación de la densidad para distintas composiciones de aire.*

Para realizar la comparación de los valores de densidad y viscosidad de las mezclas de aire señaladas en la sección anterior, es necesario obtener sus valores a distintas presiones y temperaturas en el intervalo en que pueden presentarse en los patrones. Para ello se emplea el software REFPROP del NIST (Instituto Nacional de Estandarización y Tecnología) al cual el CDT de Gas tiene acceso y cuyo principal objetivo es proveer valores de referencia de una gran cantidad de sustancias y mezclas de ellas. Este programa no incorpora una base de datos de las propiedades de cada sustancia en un rango de condiciones, sino que se vale de modelos en el estado del arte que permiten hallar con cierto grado de certeza el valor de las propiedades en amplios intervalos de condiciones. La principal función a emplear es la creación de mezclas de sustancias, según las composiciones reportadas en la sección anterior (N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar-Otros del CIPM, y O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>\_max y O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>\_min, etc.). Los modelos empleados por REFPROP para cada sustancia pura o (pseudo pura) se listan en la Tabla 8, junto con el valor de su incertidumbre aplicable.

#### **Tabla 8**

*Ecuaciones empleadas por REFPROP versión 10.0 para cálculo de la densidad y su incertidumbre*

Sustancias puras	Ecuaciones de referencia empleada por REFPROP	Incertidumbre aplicable
Nitrógeno	Span, Lemmon et al. (2000) "A Reference Equation of State for the Thermodynamic Properties of Nitrogen for Temperatures from 63.151 to 1000 K and Pressures to 2200 MPa," J. Phys. Chem. Ref. Data, 29(6):1361-1433, 2000.	0,02%

Oxígeno	Schmidt y Wagner (1985) "A New Form of the Equation of State for Pure Substances and its Application to Oxygen," Fluid Phase Equilib., 19:175-200, 1985.	0,10%
Argón	Tegeler, Ch., Span, R., and Wagner, W., "A New Equation of State for Argon Covering the Fluid Region for Temperatures from the Melting Line to 700 K at Pressures up to 1000 MPa," J. Phys. Chem. Ref. Data, 28(3):779-850, 1999.	0,02%
Aire	Lemmon, E.W., Jacobsen, R.T, Penoncello, S.G., and Friend, D.G., "Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen from 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa," J. Phys. Chem. Ref. Data, 29(3):331-385, 2000. doi: 10.1063/1.1285884	0,10%
Agua	Wagner, W. and Pruss, A., "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use," J. Phys. Chem. Ref. Data, 31(2):387-535, 2002. doi: 10.1063/1.1461829	0.05%

---

*Nota.* Tomado de REFPROP versión 10.0.

Se realizará una comparación de la densidad molar de las mezclas de aire puesto que su densidad molar es el factor a considerar en la conversión del caudal a distintas condiciones. La comparación de la densidad másica será dada más adelante mediante manipulación matemática del error de la densidad molar y el error de la masa molar. En adelante se realizarán las comparaciones empleando la fórmula de error relativo porcentual como se indica en la Ecuación 9. En esta ecuación  $x$  representa la propiedad que se comparará,  $i$  representa una de las composiciones consideradas y el subíndice  $ref$  representa la composición tomada como referencia que será la composición de aire seco estándar.

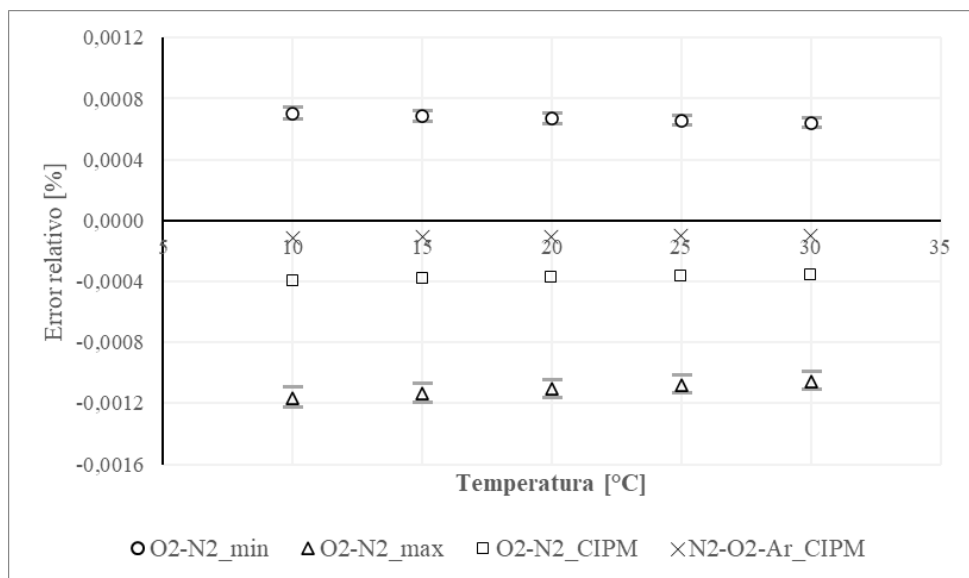
$$Err\ rel\ x = \frac{x_i - x_{ref}}{x_{ref}} \cdot 100\% \quad (9)$$

Las condiciones en las que se ha evidenciado que pueden operar los patrones de los bancos de calibración van de 890 a 933 hPa, y 18 a 22 °C, aunque para evidenciar el comportamiento del error frente a estas variables se ha considerado emplear el intervalo de  $90 \pm 5$  kPa y  $20 \pm 10$  °C. En la Figura 23 y Figura 24 se presentan los valores a condiciones de 95 y 85 kPa como barras horizontales junto a los valores a 90 kPa representados por las respectivas viñetas.

**4.2.4.1 Comparación de densidad del aire sintético.** La Figura 23 muestra la comparación de la densidad del aire sintético y el aire atmosférico estándar sin gases de traza (N2-O2-Ar\_CIPM) respecto al aire atmosférico estándar, incluyendo para el aire sintético la composición con proporción de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> que reporta el CIPM (O2-N2\_CIPM).

**Figura 23**

*Error relativo en la densidad molar de composiciones de aire sintético respecto al aire estándar.*



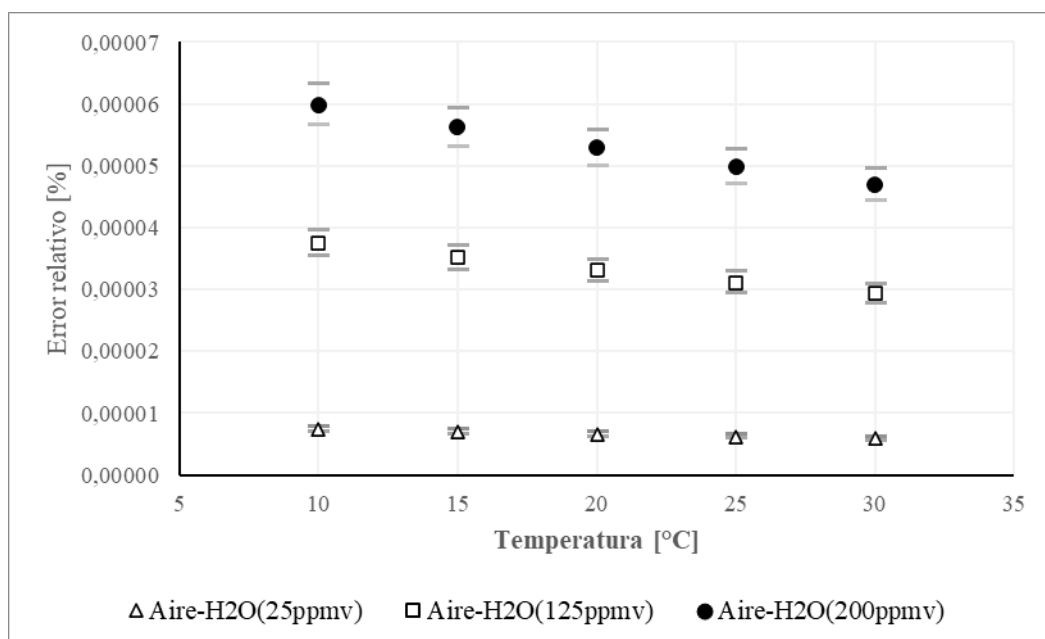
En la Figura 23 muestra que el error de la densidad disminuye con el aumento de la temperatura y disminución de la presión, lo cual concuerda con el hecho de que estas son condiciones que favorecen un comportamiento de gas ideal, ante el cual composición pierde efecto. El error de la densidad del aire sintético es negativo para las composiciones O2-

N<sub>2</sub>\_CIPM (-0,000 4 %) y O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>\_max ( $\approx$  -0,0011 %), y es positivo para O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>\_min (0,000 7 %), por lo que a medida que aumenta el contenido de nitrógeno, la densidad disminuye. El aire sintético O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>\_max presenta una mayor desviación que el aire O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>\_min, con una diferencia de 0,0003 %. La variación del error en este intervalo de condiciones es inferior a 0,0002% respecto a los valores extremos de temperatura y de 0,00015% respecto a los valores extremos de presión. La desviación de la densidad ocasionada por no considerar elementos de traza en el aire atmosférico estándar (N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Ar\_CIPM) es de 0,0001%. Estos errores son inferiores a la incertidumbre aplicable a los valores obtenidos por las ecuaciones que utiliza REFPROP (0,1%), sin embargo la desviación de estos valores respecto a los obtenidos por la ecuación del CIPM es aún menor, según se presenta mas adelante.

**4.2.4.2 Comparación de la densidad del aire húmedo.** Al repetir el análisis utilizado en el aire sintético, para el aire húmedo estándar,  $x_i$  (Ecuación 9) toma el valor de la densidad del aire húmedo y se obtienen los resultados de la Figura 24.

**Figura 24**

*Error relativo en la densidad molar de aire húmedo respecto al aire estándar.*



La Figura 24 demuestra que la desviación de la densidad aumenta con la humedad, y con ella la sensibilidad del error respecto a la presión. El error relativo es inferior a 0,000 07 % y por tanto es de 10 a 100 veces menor que en el caso de las demás composiciones.

#### ***4.2.5 Comparación de la viscosidad para distintas composiciones de aire.***

Continuando con el procedimiento indicado anteriormente, se compara el error en la viscosidad de las distintas composiciones de aire respecto a la viscosidad del aire atmosférico estándar a condiciones de  $90 \pm 5$  kPa y  $20 \pm 10$  °C. Los valores de viscosidad para cada composición y condiciones son proporcionados por REFPROP versión 10.0 mediante las ecuaciones de referencia que se listan en la Tabla 9.

REFPROP indica que la incertidumbre de la viscosidad de los constituyentes del aire (Tabla 9) es del 1% al 2%, lo cual está asociado a los muy pequeños valores que tiene la viscosidad de gases como el aire, para el cual es del orden de  $20 \mu Pa$  a condiciones atmosféricas.

**Tabla 9**

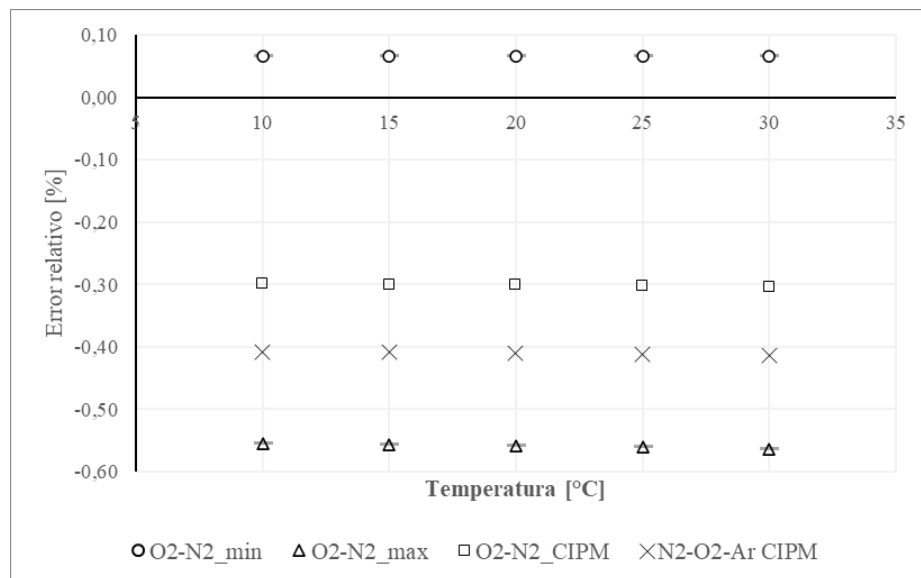
*Ecuaciones empleadas por REFPROP versión 10.0 para cálculo de la viscosidad.*

Sustancias puras	Ecuación de referencia empleada por REFPROP	Incertidumbre aplicable
Nitrógeno		1%
Oxígeno	Lemmon, E.W. and Jacobsen, R.T, "Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon, and Air," Int. J. Thermophys., 25:21-69, 2004.	2%
Argón		1%
Aire		2%
Agua	Huber, M.L et al. "New International Formulation for the Viscosity of Water," J. Phys. Chem. Ref. Data, 38(2):101-125, 2009. doi: 10.1063/1.3088050	2%

**4.2.5.1 Comparación de la viscosidad del aire sintético.** El error relativo en la viscosidad del aire sintético es representado en la Figura 25. Tal como sucede en el caso de la densidad, el error en la viscosidad del aire sintético es positivo para O2-N2\_min (0,07%) y negativo para O2-N2\_max (-0,55%). Esto indica que la viscosidad disminuye con el contenido de nitrógeno. Sin embargo, el efecto de despreciar los gases de traza (-0.4%) o el argón (-0.3%) del aire atmosférico estándar es relativamente mayor en el caso de la viscosidad que con la densidad. Tal como en la densidad molar, el aire O2-N2-\_max presenta la mayor desviación de la viscosidad de respecto al aire atmosférico estándar. Por otra parte, el error en la viscosidad no demuestra tener dependencia respecto a la presión o la temperatura.

**Figura 25**

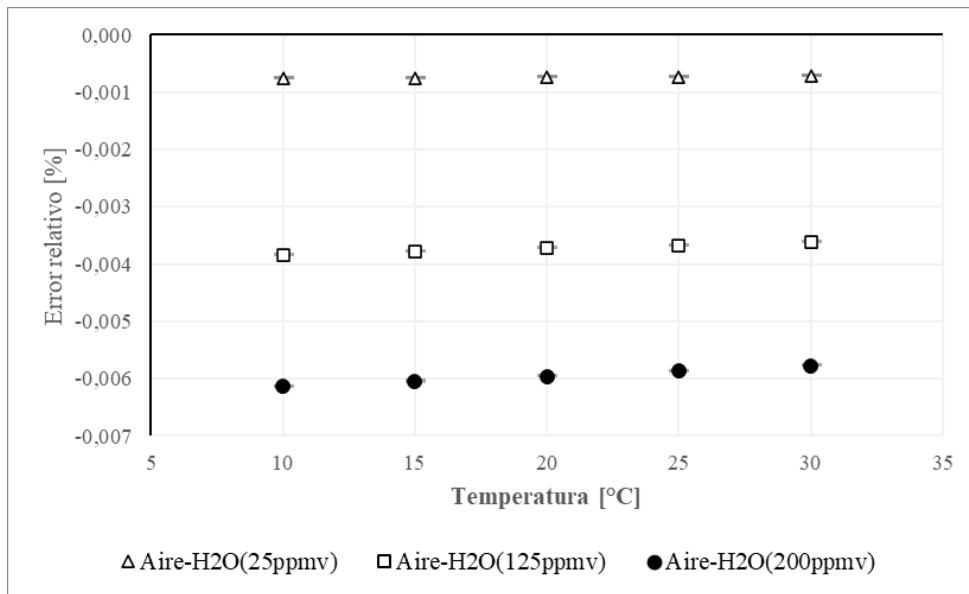
*Error relativo en la viscosidad del aire sintético respecto a aire atmosférico estándar.*



**4.2.5.2 Comparación de la viscosidad del aire húmedo.** Al repetir el análisis anterior, para aire atmosférico húmedo se obtienen los resultados de la Figura 26. Al igual que con la densidad, el error aumenta con el contenido de humedad, pero es al menos 100 veces menor que en las demás composiciones. El error tiende a disminuir levemente con el aumento de la temperatura, aunque solo produce una variación del 0,005%. Al igual que con el aire sintético, la presión tiene un efecto despreciable sobre la viscosidad en este intervalo de condiciones.

**Figura 26**

*Error relativo en la viscosidad del aire húmedo respecto a aire atmosférico estándar.*



#### **4.2.6 Evaluación del efecto de la composición sobre las propiedades.**

Para resumir los resultados presentados por las Figura 23 a Figura 26, la Tabla 10 presenta los errores relativos en cada propiedad y para cada composición respecto a aire atmosférico estándar. El valor del error utilizado en la comparación es el que corresponde a 20 °C y 90 kPa.

**Tabla 10**

*Error relativo en las propiedades de distintas composiciones de aire respecto a aire atmosférico estándar.*

Composiciones	Error relativo [%]		
	Densidad molar	Densidad másica	Viscosidad
O2-N_min	0,0006685	0,0001496	0,06715
O2-N2_CIPM	-0,0003738	-0,004157	-0,3009
O2-N2_max	-0,0011052	-0,007165	-0,5593
Aire-H2O (25ppmv)	0,0000066	-0,000002451	-0,0007448
Aire-H2O (200ppmv)	0,0000529	-0,00001941	-0,005959

Los errores en la densidad másica, presentados en la Tabla 10 han sido calculados a partir de los errores en la densidad molar de cada composición y su error en la masa molar según fue presentado en la Tabla 7. La diferencia entre el error en la densidad molar y el error en la densidad másica es menor al 0,003% para el aire sintético y de 0,00003% para el aire húmedo. El aire O2-N2\_min tiene un error positivo en todas sus propiedades, mientras que para otras composiciones de aire sintético su valor es negativo. En el caso de la viscosidad los errores son siempre negativos exceptuando el aire O2-N2\_min. Aunque los errores se mantienen dentro de la incertidumbre que indica REFPROP que pueden poseer los valores de las propiedades obtenidos con las ecuaciones empleadas, se vera mas adelante que la incertidumbre en el intervalo de condiciones evaluado es en realidad menor que el error relativo indicado en la Tabla 10.

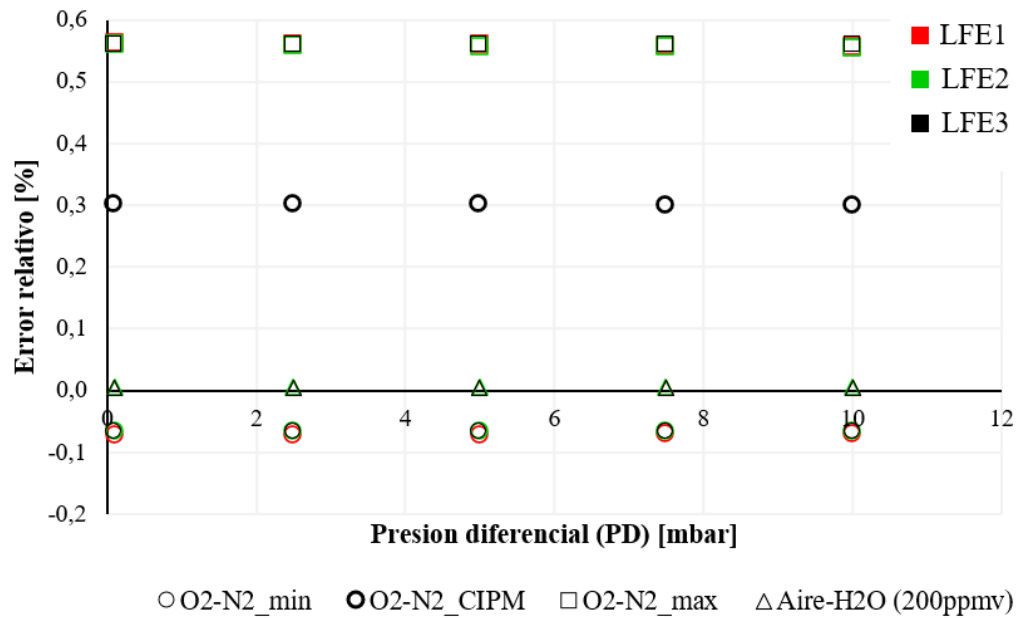
#### **4.2.7 Efecto de la composición sobre la determinación del caudal.**

Al analizar el efecto de la composición sobre la determinación del caudal, se tiene en cuenta como la diferencia en el valor de las propiedades de distintas composiciones genera una desviación del valor de caudal calculado en el patrón de flujo laminar. En esta evaluación del error se emplea la forma de la Ecuación 9, con  $x_i$  como el caudal calculado para la densidad y viscosidad que corresponde a una composición de aire dada, y  $x_{ref}$  como el caudal calculado para la densidad y viscosidad del aire atmosférico estándar. Este error es evaluado a condiciones de  $20 \pm 2$  °C y presión absoluta de 901 hPa a 920 hPa para diferenciales de presión de 0,1 a 10 hPa como el rango de operación de los patrones. El valor del caudal es calculado mediante el modelo “Uniflow” presentado en la Ecuación 8, empleando el valor de los coeficientes reportados en el certificado de calibración de cada medidor.

Para considerar el efecto que la diferencia en las condiciones de presión y temperatura pueden tener sobre el error en el caudal, este error ha sido evaluado en las condiciones que combinan las condiciones de extremas de máxima y mínima presión y temperatura. La diferencia entre el error máximo y mínimo en el caudal para cada composición de aire en este intervalo de condiciones es inferior a 0,0058%. Por lo anterior, el error es evaluado a condiciones medias y representado en la Figura 27 para distintas composiciones, elemento y patrón y caída de presión.

**Figura 27**

*Error relativo de caudal de patrones LFE al emplear distintas composiciones de aire respecto a aire estándar.*



La Figura 27 permite apreciar que el punto de caudal y el patrón a emplear no tienen un efecto significativo sobre el error en el caudal. El aire sintético O2-N2\_max presenta la mayor desviación en el valor de caudal (0,56 %). En el aire O2-N2\_CIPM, este alcanza el 0,3%, lo cual continúa siendo una desviación considerable dado el valor de la incertidumbre que manejan los patrones (Tabla 11). En el aire O2-N2\_min y Aire con humedad de 200 ppmv, la desviación en el valor del caudal es de -0,065 y 0,0055 %.

**Tabla 11**

*Capacidad e incertidumbre en el caudal de patrones LFE, según su certificado.*

Código de Patrón	Intervalo de operación [cm <sup>3</sup> /min]	Certificado de calibración	
		Err rel calib [%]	U_k=2 [%]
LFE 1	1-11	-0,11	0,45
LFE 2	11-100	-0,07	0,46

LFE 3	100-11000	-0,17	0,26
-------	-----------	-------	------

*Nota.* Tomado de los certificados de calibración de cada patrón LFE.

Considerando la incertidumbre asociada a los modelos de REFPROP, se realiza el análisis de la desviación del valor del caudal en los valores extremos de la incertidumbre de viscosidad y densidad, para así obtener los resultados de la Tabla 12. En el cálculo del error relativo, se utiliza  $x_i$  de la Ecuación 9 como el caudal obtenido para el valor extremo de una propiedad (viscosidad o densidad respectivamente) según la incertidumbre de su modelo matemático a condiciones medias, manteniendo el valor normal de la otra propiedad. Al mismo tiempo  $x_{ref}$  representaría el caudal calculado a estas mismas condiciones sin modificar el valor de alguna propiedad según su incertidumbre.

**Tabla 12**

*Error relativo en el caudal debido a la incertidumbre en las propiedades de acuerdo con el modelo de REFPROP.*

Composición	Err rel de caudal al considerar el valor máximo de las propiedades según la incertidumbre de su método de cálculo en REFPROP[%]			
	PDP = 10 [hPa]		PDP = 0,1 [hPa]	
	Viscosidad	Densidad	Viscosidad	Densidad
N2-O2-Ar-Otros _CIPM	2,004331	0,000871	2,040369	1,06E-05
O2-N2_min	2,004346	0,000871	2,040370	1,06E-05
O2-N2_CIPM	2,004475	0,000868	2,040372	1,06E-05
O2-N2_max	2,004332	0,000871	2,040369	1,06E-05
Air-H2O (25ppmv)	2,004015	0,000879	2,040364	1,07E-05
Air-H2O (200ppmv)	2,004333	0,000871	2,040369	1,06E-05

*Nota.* Estos errores son calculados para el caudal en el patrón LFE 2, mientras que el cálculo de este error en otros patrones no es presentado debido a que la mayor diferencia se da en 10 hPa y es de máximo 0,04% para la viscosidad y de 0,0008% para la densidad.

Se puede evidenciar que la incertidumbre de la viscosidad hace que el caudal pueda variar en el mismo orden, por lo que la exactitud en el valor de la viscosidad resulta ser un factor crítico en la determinación del caudal con exactitud.

**4.2.7.1 Efecto de la composición sobre la conversión del caudal.** Para evaluar el efecto de la composición sobre el factor de conversión de caudal ( $F_Q$ ) se calcula el factor de conversión de caudal mediante la Ecuación 10.

$$F_Q = \rho_{MM} / \rho_{MUT} \quad (10)$$

**Tabla 13**

*Error relativo en factor de conversión de caudal frente a caída de presión para distintas composiciones de aire.*

T[°C]	Err rel de $F_Q$ [%] (conversión de 95 a 85 kPa).				
	O2-N2 _min	O2-N2 _CIPM	O2-N2 _max	Aire-H2O 25ppmv	Aire H2O 200 ppmv
15	7,05E-05	-4,32E-05	-1,23E-04	7,82E-07	6,26E-06
25	6,70E-05	-4,10E-05	-1,17E-04	6,92E-07	5,54E-06

Para el cálculo del error en el caudal debido a la desviación en el factor  $F_Q$  por considerar distintas composiciones del aire,  $x_i$  de la Ecuación 9 toma el valor de  $F_Q$  para una composición dada y  $x_{ref}$  el valor de  $F_Q$  para el aire atmosférico estándar. Las condiciones de presión y temperatura en MM y MUT para las cuales se calcula el factor  $F_Q$  son 95 kPa o 85 kPa y 15 °C o 25 °C.  $F_Q$  se calcula para una caída de presión y un aumento de temperatura manteniendo la

otra propiedad constante entre ambos puntos. Los resultados del error relativo de  $F_Q$  para cada composición se encuentran en la Tabla 13.

**Tabla 14**

*Error relativo en factor de conversión de caudal frente a aumento de temperatura para distintas composiciones de aire.*

P [kPa]	Err rel de $F_Q$ [%] (conversión de 15 a 25 °C).				
	O2-N2 _min	O2-N2 _CIPM	O2-N2 _max	Aire-H2O 25ppmv	Aire H2O 200 ppmv
95	-3,31E-05	2,04E-05	5,79E-05	-8,51E-07	-6,82E-06
85	-2,96E-05	1,82E-05	5,18E-05	-7,61E-07	-6,10E-06

La composición puede provocar un error máximo de tan solo  $7 \times 10^{-5}$  % para el factor de conversión de caudal a las condiciones consideradas. Esto puede atribuirse a que para las condiciones evaluadas se favorece un comportamiento ideal, en el cual la composición pierde efecto.

### **4.3 Etapa III: Evaluación de modelos para la determinación de las propiedades y su incidencia sobre el caudal de calibración.**

#### **4.3.1 Modelos empleados para la determinación de las propiedades.**

En los patrones LFE, los modelos actualmente empleados para determinar la densidad y viscosidad del fluido de trabajo son los aquellos sugeridos por el fabricante en su plantilla de cálculo. Estos son modelos simplificados que por tanto tienen una incertidumbre mayor a otros modelos disponibles en la actualidad. La decisión de utilizar estos modelos y no ahondar en la búsqueda de modelos más precisos surge de buscar reproducir los resultados reportados por el fabricante en sus certificados de calibración.

**4.3.1.1 Modelos empleados para la densidad del aire.** Para la densidad, Tetrattec sugiere el uso de un modelo desarrollado a partir del método de coeficientes virales (Ecuación

11). La referencia de esta ecuación no es proporcionada por el fabricante y podría ser de elaboración propia. Es de notar que las ecuaciones de Tetratex [24] están ajustadas para ser utilizadas en unidades de grados Celsius y hPa.

$$Z_{aire} = 1 + \left[ -0,58 + \left( \frac{-0,27 + 0,58}{30} \right) \cdot T \right] \cdot \frac{P}{1 \cdot 10^6} \quad (11)$$

En la conversión del caudal de aire del patrón a las condiciones del MUT, el cálculo del factor de conversión emplea la formula del CIPM-2007. El factor de compresibilidad de la formula del CIPM-2007 se presenta en la Ecuación 12.

$$Z = 1 - \frac{P}{T} [a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (b_0 + b_1 t) x_v + (c_0 + c_1 t) x_v^2] + \frac{P^2}{T^2 (d + e x_v^2)} \quad (12)$$

Los coeficientes de la Ecuación 12 se presentan en la Tabla 15.

**Tabla 15**

*Coefficientes para el cálculo del factor de compresibilidad de la formula del CIPM-2007.*

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
a <sub>0</sub>	1,58123E-06	b <sub>1</sub>	-2,05100E-08
a <sub>1</sub>	-2,93310E-08	c <sub>0</sub>	1,98980E-04
a <sub>2</sub>	1,10430E-10	c <sub>1</sub>	-2,37600E-06
b <sub>0</sub>	5,70700E-06	d	1,83000E-11
		e	-7,65000E-09

*Nota.* Adaptado de la publicación del CIPM-2007 [21].

**4.3.1.1.1 Modelo empleado para la densidad del aire húmedo.** La plantilla de cálculo de Tetratéc también incluye una ecuación para el cálculo del factor de compresibilidad de aire húmedo para el cual no se indica una referencia clara [24].

$$\begin{aligned}
 Z_{rh} = 1 - & \left[ P_{MM} \cdot \left( \frac{100}{273,15 + T_{MM}} \right) \right. \\
 & \cdot (z_1 + z_2 \cdot T_{MM} + z_3 \cdot T_{MM}^2 + [z_4 + z_5 \cdot T_{MM}] \cdot x_v \\
 & \left. + [z_6 + z_7 \cdot T_{MM}] \cdot x_v^2) \right] + \left[ P_{MM} \cdot \left( \frac{100}{273,15 + T_{MM}} \right) \right]^2 \\
 & \cdot [z_8 + z_9 \cdot x_v^2]
 \end{aligned} \tag{13}$$

Los coeficientes de la Ecuación 13 son presentados en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Coeficientes para el cálculo del factor de compresibilidad del aire húmedo según la ecuación de Tetratéc.*

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
Z <sub>1</sub>	1,62419E-06	Z <sub>6</sub>	1,92970E-04
Z <sub>2</sub>	-2,89690E-08	Z <sub>7</sub>	-2,28500E-06
Z <sub>3</sub>	1,08800E-10	Z <sub>8</sub>	1,73000E-11
Z <sub>4</sub>	5,75700E-06	Z <sub>9</sub>	-1,03400E-08
Z <sub>5</sub>	-2,589E-08		

*Nota.* Tomado de plantilla de cálculo de Tetratéc [24].

En la conversión del caudal de aire húmedo a las condiciones del MUT, se emplea igualmente la fórmula del CIPM-2007.

#### **4.3.1.2 Modelos empleados para la viscosidad del aire.**

Para el cálculo de la viscosidad de aire seco, utilizada en el cálculo del caudal en patrones laminares, se emplea la ecuación sugerida por Tetratéc para la cual se indican 3 autores

como referencia (Sutherland, Daubert y Danner) mas no fue posible encontrar una publicación de los mismos o determinar si se trata de un desarrollo matemático de a partir de aportes de estos autores [24]. Esta ecuación simplificada permite obtener el valor de la viscosidad como función de la temperatura y no de la presión. El valor de la viscosidad obtenida por estos modelos está en unidades de Pa·s.

$$\mu_{aire} = \frac{1,458 \cdot \left[ \frac{(273,15 + T_{MM})^{1,5}}{110,4 + 273,15 + T_{MM}} \right]}{1 \cdot 10^6} \quad (14)$$

#### **4.3.1.2.1 Modelos empleados para la viscosidad del aire húmedo.**

Para el cálculo de la viscosidad del aire húmedo se emplea una fórmula basada en el modelo de Kestin & Whitelaw (1964) [25]. Este modelo está basado en el conjunto de valores experimentales de la densidad, tomado por los mismos autores. Este conjunto de datos es utilizado como referencia en el trabajo de Koeroghlian (2018) [2] al evaluar la precisión de distintas ecuaciones. Este modelo es presentado en la Ecuación 15 según se expone en el Anexo 1 del documento del CDT de Gas de código interno PTC 047 [26].

$$\begin{aligned}
& \mu_{rh} \\
& = \frac{1,458 \cdot \left[ \frac{(273,15 + T_{MM})^{1,5}}{110,4 + 273,15 + T_{MM}} \right]}{1000000} \\
& \cdot \left[ \left( \left[ \frac{rh}{100} \cdot (1,00062 + 0,00000314 \cdot P_{MM} + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot T_{MM}^2) \right. \right. \right. \\
& \cdot \left. \left. \left. \frac{e^{0,000012811805 \cdot [273,15 + T_{MM}]^2 - 0,019509874 \cdot [273,15 + T_{MM}] + 34,05 - \left[ \frac{6353,6311}{273,15 + T_{MM}} \right]}}{100 \cdot P_{MM}} \right] \right. \right. \\
& \cdot [(0,001669 \cdot [273,15 + T_{MM}] - 1,117) \cdot (273,15 + T_{MM}) + 186,1] \\
& + [-0,00004052 \cdot (273,15 + T_{MM}) + 0,02732] \cdot [273,15 + T_{MM}] \\
& \left. \left. \left. - 4,707 \right) \right. \right. \tag{15} \\
& \cdot \left( \frac{rh}{100} \cdot (1,00062 + 0,00000314 \cdot P_{MM} + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot T_{MM}^2) \right) \\
& \cdot \left( \frac{e^{0,000012811805 \cdot [273,15 + T_{MM}]^2 - 0,019509874 \cdot [273,15 + T_{MM}] + 34,05 - \left[ \frac{6353,6311}{273,15 + T_{MM}} \right]}}{100 \cdot P_{MM}} \right) \\
& + (3,170 \cdot 10^{-7} \cdot [273,15 + T_{MM}] - 0,0002083) \cdot (273,15 + T_{MM}) \\
& \left. \left. \left. + 1,034 \right) \right. \right.
\end{aligned}$$

#### 4.3.1.3 Modelos actuales para cálculo de propiedades de aire sintético

El CDT no tiene en cuenta una ecuación para el cálculo de la densidad y viscosidad del aire sintético en la cual se considere la variación en la proporción de nitrógeno y oxígeno. Por tal motivo se emplean los modelos para las propiedades del aire atmosférico seco, pues la

proporción de nitrógeno y oxígeno en aire el aire sintético debería asemejarse idealmente a la que presenta el aire atmosférico seco.

#### **4.3.2 Modelos nuevos para el cálculo de las propiedades.**

Para la determinación de la mejor fórmula para el cálculo de la densidad de aire atmosférico seco y aire húmedo, se destaca el estudio de Hellmuth et al. (2021) [3] en el que son comparadas ecuaciones con las mejores características metrológicas, las cuales comprenden la WMO-2014, TEOS-10 y CIPM 2007. Entre ellas, la ecuación del CIPM tiene un menor intervalo de aplicación al recomendarse utilizarla entre 600 y 1100 hPa, y de 15 a 27 °C. Para este rango de condiciones la publicación del CIPM indica que la incertidumbre en la densidad debida al método de cálculo de es tan solo de  $22 \times 10^{-6} \%$ .

**4.3.2.1 Modelos nuevos para el cálculo de la densidad.** Existen diversos métodos para la expresión de la densidad en función de otras propiedades de estado. La ecuación de estado de gas ideal permite relacionar la presión y tempera de cualquier cuerpo gaseoso cuando la interacción entre las moléculas es depreciable, lo cual ocurre a bajas presiones y altas temperaturas. Para convertir el valor de la densidad obtenido por la ecuación de gas ideal a su valor real, se emplea el factor conocido como factor de compresibilidad. Este factor se define como el cociente entre la densidad de gas real respecto a la densidad de gas ideal. El valor del factor de compresibilidad es determinado experimentalmente y se publican como en función de la presión y temperatura del sistema. Por el principio de los estados correspondientes es posible asumir que distintas composiciones de aire tienen un mismo valor del factor de compresibilidad para una misma presión y temperatura reducida.

**4.3.2.1.1 Modelo de densidad a partir de la energía de Helmholtz.** Una de las formas de genera una ecuación de estado que relacione una gran cantidad de propiedades termodinámicas es mediante el uso de la energía de Helmholtz. Propiedades como la entalpia, entropía y calor específico pueden ser obtenidas como derivadas de la energía de Helmholtz

respecto a otras propiedades, aunque en general el modelo para la energía de Helmholtz se presenta como función de la temperatura ( $\tau$ ) y densidad reducida ( $\delta$ ). La Ecuación 17 muestra la forma general de la energía reducida de Helmholtz ( $\alpha$ ), que es la suma de la energía de Helmholtz ideal ( $\alpha^0$ ) y residual ( $\alpha^r$ ) (Lemmon et al, 2000) [22].

$$\alpha(\delta, \tau) = \frac{\alpha(\rho, T)}{RT} = \alpha^0(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau) \quad (16)$$

El desarrollo de la fórmula para el cálculo de la densidad a partir de modelo presenta dificultades para expresar de forma explícita la densidad como función de la presión y temperatura del sistema, pues la densidad es de los principales valores de entrada para el cálculo de la energía de Helmholtz. La Ecuación 18 presenta el factor de compresibilidad como derivada parcial de la energía de Helmholtz [22].

$$Z = \frac{P}{\rho RT} = 1 + \delta \left( \frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_{\tau} \quad (17)$$

Dado que la expresión del factor de compresibilidad a partir de la energía de Helmholtz solo incluye la parte residual de esta energía, solo se hará énfasis en ella en adelante.

**4.3.2.1.2 Nuevo modelo para densidad del aire atmosférico seco.** La expresión para  $\alpha^r$  en aire seco de la composición indicada en la sección 4.2.1.1, tiene la forma presentada en la Ecuación 18 según es propuesto por Lemmon et al (2000) [22].

$$\alpha^r(\delta, \tau) = \sum_{k=1}^{10} N_k \delta_k^i \tau_k^j + \sum_{k=11}^{19} N_k \delta_k^i \tau_k^j \exp(-\delta_k^l) \quad (18)$$

En la Ecuación 18 el subíndice  $k$  trabaja como un contador para numerar los coeficientes y exponentes  $N$ ,  $i$  y  $j$  que hacen parte de la sumatoria. Los valores de estos exponentes se presentan en la Tabla 17.

**Tabla 17**

*Coefficientes y exponentes para calcular la energía residual de Helmholtz en aire seco.*

$k$	$N_k$	$i_k$	$j_k$	$l_k$
1	0.118 160 747 229	1	0	0
2	0.713 116 392 079	1	0.33	0
3	$-0.161 824 192 067 \times 10^1$	1	1.01	0
4	$0.714 140 178 971 \times 10^{-1}$	2	0	0
5	$-0.865 421 396 646 \times 10^{-1}$	3	0	0
6	0.134 211 176 704	3	0.15	0
7	$0.112 626 704 218 \times 10^{-1}$	4	0	0
8	$-0.420 533 228 842 \times 10^{-1}$	4	0.2	0
9	$0.349 008 431 982 \times 10^{-1}$	4	0.35	0
10	$0.164 957 183 186 \times 10^{-3}$	6	1.35	0
11	-0.101 365 037 912	1	1.6	1
12	-0.173 813 690 970	3	0.8	1
13	$-0.472 103 183 731 \times 10^{-1}$	5	0.95	1
14	$-0.122 523 554 253 \times 10^{-1}$	6	1.25	1
15	-0.146 629 609 713	1	3.6	2
16	$-0.316 055 879 821 \times 10^{-1}$	3	6	2
17	$0.233 594 806 142 \times 10^{-3}$	11	3.25	2
18	$0.148 287 891 978 \times 10^{-1}$	1	3.5	3
19	$-0.938 782 884 667 \times 10^{-2}$	3	15	3

*Nota.* Tomado de Lemmon et al. (2000) [22].

Para hallar el factor de compresibilidad del aire, es necesario aplicar la derivación parcial indicada en la Ecuación 17 a  $\alpha^r$  presentado en la Ecuación 18. Luego de realizarlo se utiliza un solucionador de ecuaciones que por métodos numéricos permita obtener el valor de la densidad de forma implícita para una presión y temperatura dadas. Adicionalmente se requiere emplear los valores de temperatura y densidad crítica de cada fluido, según se presentan en la Tabla 18.

**Tabla 18**

*Propiedades críticas para el cálculo de la viscosidad de sustancias según Lemmon et al (2004).*

Fluido	$T_c$ [K]	$P_c$ [mol/dm <sup>3</sup> ]
N <sub>2</sub>	126,192	111,839
O <sub>2</sub>	154,581	13,63
Aire	132,6312	10,4477

Nota. Tomado de Lemmon et al. (2000) [22].

**4.3.2.1.3 Nuevo modelo para densidad del nitrógeno.** De la misma que fue presenta la expresión para el cálculo de la energía residual de Helmholtz para una composición dada de aire (Ecuación 18); Span et al. (2000) [23] presenta la Ecuación 19 para el cálculo de  $\alpha^r$  en el nitrógeno como sustancia pura. El valor de los coeficientes y exponentes para la Ecuación 19, se indican en la Tabla 19.

$$\alpha^r(\delta, \tau) = \sum_{k=1}^6 N_k \delta_k^i \tau_k^j + \sum_{k=7}^{32} N_k \delta_k^i \tau_k^j \exp(-\delta_k^l) + \sum_{k=33}^{36} N_k \delta_k^i \tau_k^j \exp(-\varphi_k(\delta - 1)^2 - \beta_k(\tau - y_k)^2) \quad (19)$$

**Tabla 19**

*Coefficientes y exponentes para el cálculo de la energía residual de Helmholtz para nitrógeno*

$k$	$N_k$	$i_k$	$j_k$	$l_k$	$k$	$N_k$	$i_k$	$j_k$	$l_k$
1	0.924 803 575 275	1.0	0.25	0	19	$-0.435\ 762\ 336\ 045 \times 10^{-1}$	1.0	4.0	2
2	$-0.492\ 448\ 489\ 428$	1.0	0.875	0	20	$-0.723\ 174\ 889\ 316 \times 10^{-1}$	2.0	6.0	2
3	0.661 883 336 938	2.0	0.5	0	21	$0.389\ 644\ 315\ 272 \times 10^{-1}$	3.0	6.0	2
4	$-0.192\ 902\ 649\ 201 \times 10^1$	2.0	0.875	0	22	$-0.212\ 201\ 363\ 910 \times 10^{-1}$	4.0	3.0	2
5	$-0.622\ 469\ 309\ 629 \times 10^{-1}$	3.0	0.375	0	23	$0.408\ 822\ 981\ 509 \times 10^{-2}$	5.0	3.0	2
6	0.349 943 957 581	3.0	0.75	0	24	$-0.551\ 990\ 017\ 984 \times 10^{-4}$	8.0	6.0	2
7	0.564 857 472 498	1.0	0.5	1	25	$-0.462\ 016\ 716\ 479 \times 10^{-1}$	4.0	16.0	3
8	$-0.161\ 720\ 005\ 987 \times 10^1$	1.0	0.75	1	26	$-0.300\ 311\ 716\ 011 \times 10^{-2}$	5.0	11.0	3
9	$-0.481\ 395\ 031\ 883$	1.0	2.0	1	27	$0.368\ 825\ 891\ 208 \times 10^{-1}$	5.0	15.0	3
10	0.421 150 636 384	3.0	1.25	1	28	$-0.255\ 856\ 846\ 220 \times 10^{-2}$	8.0	12.0	3
11	$-0.161\ 962\ 230\ 825 \times 10^{-1}$	3.0	3.5	1	29	$0.896\ 915\ 264\ 558 \times 10^{-2}$	3.0	12.0	4
12	0.172 100 994 165	4.0	1.0	1	30	$-0.441\ 513\ 370\ 350 \times 10^{-2}$	5.0	7.0	4
13	$0.735\ 448\ 924\ 933 \times 10^{-2}$	6.0	0.5	1	31	$0.133\ 722\ 924\ 858 \times 10^{-2}$	6.0	4.0	4
14	$0.168\ 077\ 305\ 479 \times 10^{-1}$	6.0	3.0	1	32	$0.264\ 832\ 491\ 957 \times 10^{-3}$	9.0	16.0	4
15	$-0.107\ 626\ 664\ 179 \times 10^{-2}$	7.0	0.0	1	33	$0.196\ 688\ 194\ 015 \times 10^2$	1.0	0.0	2
16	$-0.137\ 318\ 088\ 513 \times 10^{-1}$	7.0	2.75	1	34	$-0.209\ 115\ 600\ 730 \times 10^2$	1.0	1.0	2
17	$0.635\ 466\ 899\ 859 \times 10^{-3}$	8.0	0.75	1	35	$0.167\ 788\ 306\ 989 \times 10^{-1}$	3.0	2.0	2
18	$0.304\ 432\ 279\ 419 \times 10^{-2}$	8.0	2.5	1	36	$0.262\ 767\ 566\ 274 \times 10^4$	2.0	3.0	2

Nota. Tomado de Span et al. (2000) [23].

**4.3.2.1.4 Nuevo modelo para densidad del oxígeno.** A semejanza de la Ecuación 18 y 19, Schmidt & Wagner (1985) proponen la Ecuación 20 para el cálculo de  $\alpha^r$  en el oxígeno como sustancia pura.

$$\alpha^r = \sum_{i=1}^{13} N_i \delta_i^{r_i} \tau_i^{s_i} + e^{-\delta^2} \sum_{i=14}^{24} N_i \delta_i^{r_i} \tau_i^{s_i} + e^{-\delta^4} \sum_{i=25}^{32} N_i \delta_i^{r_i} \tau_i^{s_i} \quad (20)$$

En la publicación de Schmidt se tienen los coeficientes y exponentes  $n, r$  y  $s$  de forma análoga a  $N, i$  y  $j$  de las ecuaciones de  $\alpha^r$  anteriores. Los valores de estos parámetros se encuentran en la Tabla 20.

**Tabla 20**

*Coefficientes para cálculo de energía residual de Helmholtz para oxígeno, según modelo de Schmidt & Wagner (1985).*

$i$	$r_i$	$s_i$	$i$	$r_i$	$s_i$	$i$	$r_i$	$s_i$
1	1	0	14	1	5	25	2	22
2	1	1.5	15	1	6	26	3	11
3	1	2.5	16	2	3.5	27	3	18
4	2	-0.5	17	2	5.5	28	4	11
5	2	1.5	18	3	3	29	4	23
6	2	2	19	3	7	30	5	17
7	3	0	20	5	6	31	5	18
8	3	1	21	6	8.5	32	5	23
9	3	2.5	22	7	4			
10	6	0	23	8	6.5			
11	7	2	24	10	5.5			
12	7	5						
13	8	2						

*Nota.* Tomado de Schmidt & Wagner (1985).

**4.3.2.1.5 Modelo para densidad de mezclas de nitrógeno y oxígeno.** En el caso de mezclas de nitrógeno y Oxígeno Lemmon et al (2000) desarrolla el modelo presentado en la Ecuación 21 para el cálculo de  $\alpha^r$  de una mezcla.

$$\alpha^r = \sum_{i=1}^2 x_i \alpha_i^r(\delta, \tau) + \alpha^E(\delta, \tau, x) \quad (21)$$

La Ecuación 21 muestra que  $\alpha^r$  de una mezcla gaseosa es igual al promedio ponderado de  $\alpha^r$  de sus componentes, más un término denominado exceso en la energía de Helmholtz ( $\alpha^E$ ) el cual tiene en cuenta el efecto del mezclado (Ecuación 22).

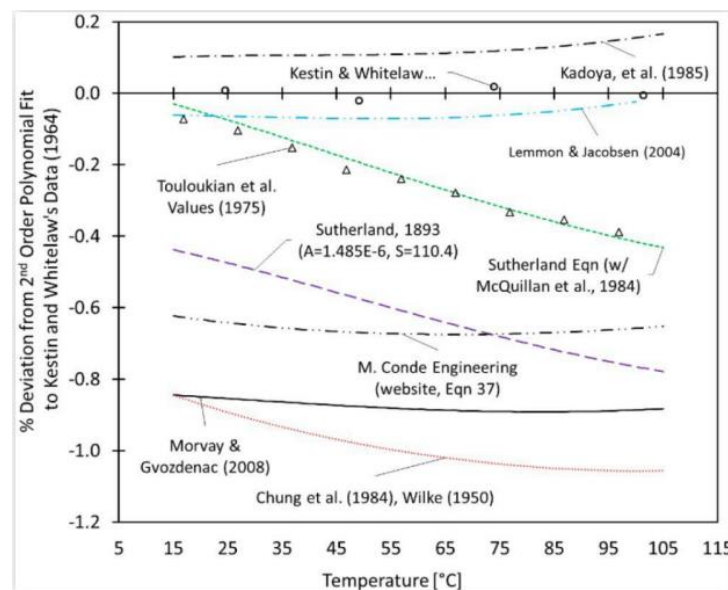
$$\alpha^E(\delta, \tau, x) = -0.00195245 \delta^2 \tau^{-1.4} + 0.00873334 \delta^2 \tau^{1.5} \quad (22)$$

Finalmente se aplica la derivación parcial indicada en la Ecuación 17 sobre la Ecuación 21, para obtener la densidad de forma implícita.

**4.3.2.2 Modelos para el cálculo de la viscosidad.** En el estudio de Koeroghlian et al. (2018) [2] se realiza una extensa revisión de las ecuaciones propuestas para la determinación de la viscosidad del aire seco. Al comparar estos modelos con el conjunto de datos de viscosidad obtenido por Kestin y Whitelaw (1964) [25] se obtienen las desviaciones presentadas en la Figura 28.

### Figura 28

*Desviación de viscosidad del aire calculada con distintos modelos respecto a valores de referencia de Kestin y Whitelaw (1964).*



*Nota.* Tomado de Koeroghlian (2018) [2].

Como puede observarse en la Figura 28, el modelo de Lemmon y Jacobsen (2004) [ ] tiene la menor desviación respecto al conjunto de datos experimentales de Kestin y Whitelaw (1964) y por lo tanto es empleada para determinar la viscosidad del aire seco, como un constituyente de la mezcla de aire húmedo.

#### 4.3.2.2.1 Modelo para viscosidad de aire seco, nitrógeno y oxígeno.

La publicación de Lemmon et al (2004) [27] presenta un modelo para el cálculo de la viscosidad del nitrógeno, oxígeno y argón como sustancias puras, además de la composición mencionada en la Tabla 4 como N2-O2-Ar\_Lemmon para el aire seco. Los parámetros requeridos en el cálculo de la viscosidad son presentados en la Tabla 21 según corresponde a cada sustancia.

**Tabla 21**

*Parámetros de cada fluido para el cálculo de la viscosidad en el modelo de Lemmon et al (2004).*

Parameter	Nitrogen	Argon	Oxygen	Air
$T_c$ (K)	126.192	150.687	154.581	132.6312 <sup>a</sup>
$\rho_c$ (mol·dm <sup>-3</sup> )	11.1839	13.40743	13.63	10.4477 <sup>a</sup>
$p_c$ (MPa)	3.3958	4.863	5.043	3.78502 <sup>a</sup>
$M$ (g·mol <sup>-1</sup> )	28.01348	39.948	31.9988	28.9586
$\varepsilon/k$ (K)	98.94	143.2 <sup>b</sup>	118.5	103.3
$\sigma$ (nm)	0.3656	0.335 <sup>b</sup>	0.3428	0.360

*Nota.* Tomado de Lemmon et al. (2004) [27].

La viscosidad de cada fluido ( $\eta$ ) es obtenida como la suma de la viscosidad de gas diluido ( $\eta^0$ ), más la viscosidad residual ( $\eta^r$ ) (Ecuación 23).

$$\eta = \eta^0(T) + \eta^r(\tau, \delta) \quad (23)$$

En la Ecuación 23,  $\eta$  es la viscosidad del fluido en  $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\eta^0$  la viscosidad de gas diluido y  $\eta^r$  la viscosidad residual del fluido. El valor de  $\eta^0$  es obtenido mediante la Ecuación 24.

$$\eta^0(T) = \frac{0.0266958\sqrt{MT}}{\sigma^2\Omega(T^*)} \quad (24)$$

Para la Ecuación 24,  $\sigma$  es el parámetro de tamaño de Lennard-Jones correspondiente a la sustancia evaluada,  $M$  es su masa molar y  $\Omega$  es la integral de colisión que puede calcularse mediante la Ecuación 25.

$$\Omega(T^*) = \exp\left(\sum_{i=0}^4 b_i [\ln(T^*)]^i\right) \quad (25)$$

La Ecuación 25 involucra el cálculo de  $T^*$ , que es igual a  $T/(\varepsilon/k)$ , y emplea los valores de  $b_i$  e  $i$  que se muestran la Tabla 22. Además de ello es necesario utilizar el valor de  $\varepsilon/k$  (parámetro de energía de Lennard-Jones) que corresponda al fluido.

**Tabla 22**

*Coefficientes para cálculo de la integral de colisión en el modelo de Lemmon et al. (2004).*

$i$	$b_i$
0	0.431
1	-0.4623
2	0.08406
3	0.005341
4	-0.00331

*Nota.* Tomado de Lemmon et al. (2004) [27].

Para el cálculo de la viscosidad residual ( $\eta^r$ ) se emplea la Ecuación 26, que involucra a  $\tau = T_c/T$  y  $\delta = \rho/\rho_c$  y corresponden a la temperatura y densidad reducida del fluido.

$$\eta^r(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^n N_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^{l_i}) \quad (26)$$

Los coeficientes de la Ecuación 26 son presentados en la Tabla 23 para cada fluido.

**Tabla 23**

*Coefficientes para cálculo de viscosidad residual por el modelo de Lemmon et al. (2004).*

<i>i</i>	<i>N<sub>i</sub></i>	<i>t<sub>i</sub></i>	<i>d<sub>i</sub></i>	<i>l<sub>i</sub></i>
Nitrogen				
1	10.72	0.1	2	0
2	0.03989	0.25	10	1
3	0.001208	3.2	12	1
4	-7.402	0.9	2	2
5	4.620	0.3	1	3
Argon				
1	12.19	0.42	1	0
2	13.99	0.0	2	0
3	0.005027	0.95	10	0
4	-18.93	0.5	5	2
5	-6.698	0.9	1	4
6	-3.827	0.8	2	4
Oxygen				
1	17.67	0.05	1	0
2	0.4042	0.0	5	0
3	0.0001077	2.10	12	0
4	0.3510	0.0	8	1
5	-13.67	0.5	1	2
Air				
1	10.72	0.2	1	0
2	1.122	0.05	4	0
3	0.002019	2.4	9	0
4	-8.876	0.6	1	1
5	-0.02916	3.6	8	1

*Nota.* Tomado de Lemmon et al (2004) [27].

#### 4.3.2.2.2 *Modelo para viscosidad de mezclas de nitrógeno y Oxígeno*

Lemmon et al (2004)[27] no incluye una ecuación para obtener la viscosidad de mezclas en diferentes proporciones de los gases mencionados. Sin embargo, Koeroghlian et al. (2018)[2] menciona que el método de Wilke (1950) es extensamente utilizado en gran parte de los estudios de la viscosidad de mezclas de gases encontrados en la literatura, manteniendo la limitante de no poder ser aplicado en mezclas que incluyen gases polares (Ecuación 27).

$$\mu_{mix} = \frac{\mu_i}{1 + (x_j/x_i)\phi_{ij}} + \frac{\mu_j}{1 + (x_i/x_j)\phi_{ji}} \quad (27)$$

La Ecuación 27 es el modelo de Wilke (1950) para la viscosidad de una mezcla binaria de gases, en el cual los subíndices *i* y *j* indican que la propiedad corresponde a uno u otro constituyente. En esta Ecuación  $\mu_{mix}$  es la viscosidad de la mezcla,  $\mu$  es la viscosidad de cada componente a condiciones de presión parcial y temperatura del sistema, *x* es la fracción molar

de cada componente y  $\varphi$  es un factor calculado mediante la Ecuación 28. El factor  $\varphi_{ji}$  se obtiene al intercambiar los subíndices  $i$  y  $j$  en esta ecuación.

$$\varphi_{ij} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_j)^{1/2} (M_j/M_i)^{1/4}\right]^2}{\sqrt{8(1 + M_i/M_j)}} \quad (28)$$

**4.3.2.3 Nuevo modelo para viscosidad de aire húmedo.** Kestin y Richardson (1963) [28] han publicado un conjunto de datos experimentales de la viscosidad del vapor de agua, adicional a lo cual han propuesto un método de cálculo para reproducir estos resultados.

**4.3.2.3.1 Modelo para viscosidad del vapor de agua.** El método de cálculo para la viscosidad del vapor de agua, propuesto por Kestin y Richardson (1963) [28] está presentado en la Ecuación 29.

$$\mu_\gamma = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 - \rho(C_4 - C_5 t) \quad (29)$$

Los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  y  $C_5$  de la Ecuación 29 son 88,02, 0,32827, 0,0002135, 1858 y 5,90, respectivamente. Teniendo en cuenta que la viscosidad se presenta como función de la densidad, Koeroghlian et al. (2018) señala que para temperaturas y presiones cercanas a las condiciones ambientales (0 a 50°C y 1 atm), la humedad del aire puede ser tratada como gas ideal pues su factor de compresibilidad es superior a 0.996.

**4.3.2.3.2 Modelo para viscosidad de mezclas de aire seco y vapor de agua.** Como método para la obtención de la viscosidad en mezclas de aire seco y vapor de agua, Koeroghlian et al. (2018) [2] sugiere emplear el método de Studnikov (1970), con el que es posible obtener esta propiedad para mezclas de sustancias polares y no polares (Ecuación 30).

$$\mu_{mix} = (x_a \mu_a + x_v \mu_v) + \left(1 + \frac{x_v - x_v^2}{2.75}\right) \quad (30)$$

### ***4.3.3 Evaluación de modelos para la determinación de propiedades de las distintas composiciones del aire.***

En la evaluación de los modelos de cálculo de las propiedades en cada composición, se obtiene el error relativo del valor de la propiedad obtenido por cada modelo, respecto al valor de esta propiedad obtenido al utilizar el *software* REFPROP para una composición dada.

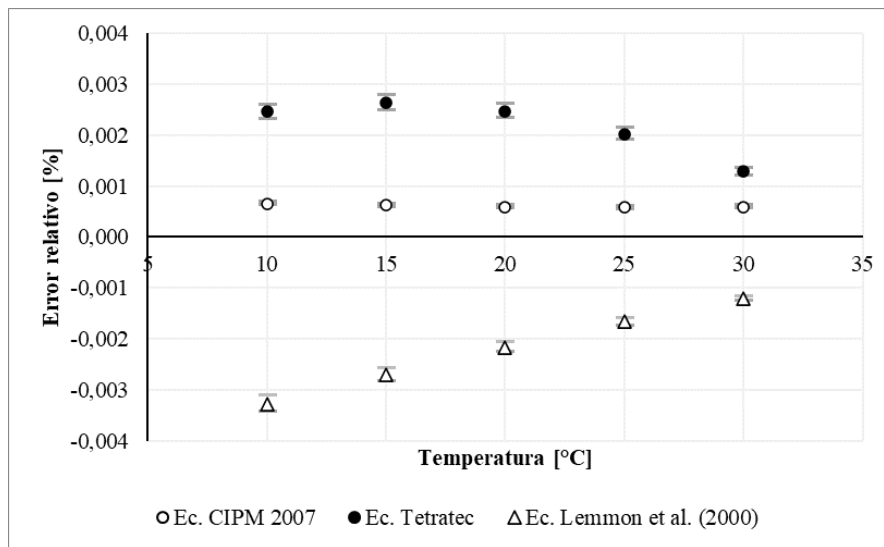
#### **4.3.3.1 Evaluación de ecuaciones para cálculo de densidad**

Para el cálculo de la densidad, el CDT emplea actualmente la ecuación del CIPM-2007 y las ecuaciones sugeridas por Tetratéc para aire seco y húmedo. En este trabajo se propone la ecuación de Lemmon et al. (2000) [22] para aire seco, la ecuación de Span et al. (2000) [23] para nitrógeno y Schmidt & Wagner (1985) para oxígeno. Las propiedades del aire atmosférico seco, aire sintético y aire húmedo obtenidas por REFPROP serán comparadas con los valores obtenidos de cada ecuación asociada con la composición indicada.

**4.3.3.1.1 Evaluación de ecuaciones para la densidad del aire seco.** Para la evaluación del comportamiento de los modelos de densidad respecto a su valor de referencia para aire atmosférico seco, son consideradas las ecuaciones del CIPM (2007), Lemmon et al. (2000) [22] para aire seco y la sugerida por Tetratéc. Para el error calculado en esta instancia,  $x_i$  de la Ecuación 9 representa el valor de la densidad molar obtenida por los modelos mencionados y  $x_{ref}$  toma el valor de densidad molar del aire estándar a las condiciones de presión y temperaturas antes señaladas (Figura 29).

**Figura 29**

*Error relativo en la densidad de aire seco obtenida por distintas ecuaciones.*



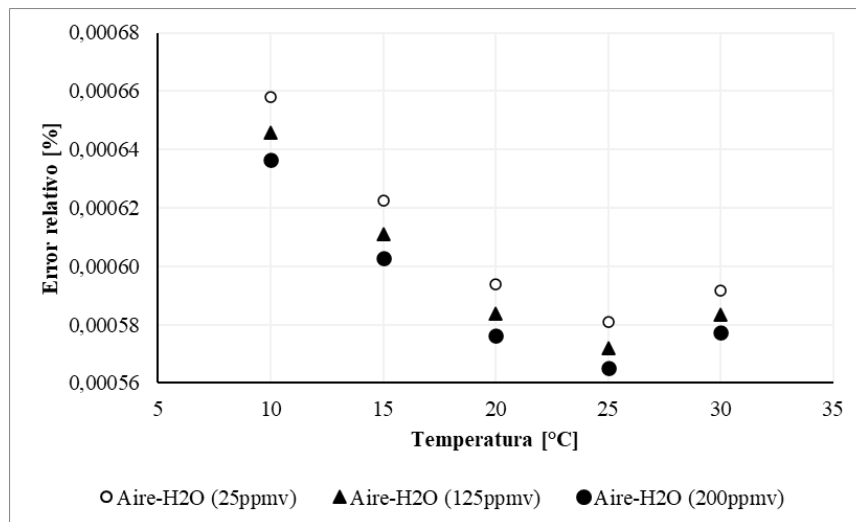
La Figura 29 demuestra que el valor de la densidad calculada con la ecuación de Lemmon et al. (2000) para aire seco, difiere un tanto de la densidad obtenida por REFPROP al incluir todos los constituyentes del aire estándar. Por otra parte la ecuación del CIPM-2007 tiene un error constante respecto a los valores de REFPROP para aire atmosférico estándar, el cual es de 0,008% y es mayor a la incertidumbre de la ecuación del CIPM-2007. Por último, la ecuación sugerida por Tetratéc no tiene una gran diferencia respecto a la ecuación de Lemmon et al. (2000) para el aire seco aparte de que los signos en sus errores relativos son opuestos. En todos los casos el error es menor a 0,003 2 % del valor de densidad de referencia. El error de la fórmula sugerida por Tetratéc disminuye en la medida que la temperatura aumenta, tal como ocurre con el modelo de Lemmon, mientras que la ecuación del CIPM-2007 se acerca más al valor de referencia con un error relativo inferior a 0,001 % para el rango de presión y temperatura indicada.

**4.3.3.1.2 Evaluación de ecuaciones para densidad de aire húmedo.** En la evaluación de las ecuaciones disponibles para el cálculo de la densidad del aire húmedo, se

consideran la ecuación sugerida por Tetrattec (Figura 31) y la ecuación del CIPM-2007 (Figura 32).

### Figura 30

*Diferencia relativa de la densidad de aire húmedo obtenida por la formula del CIPM 2007 respecto a valores de REFPROP.*

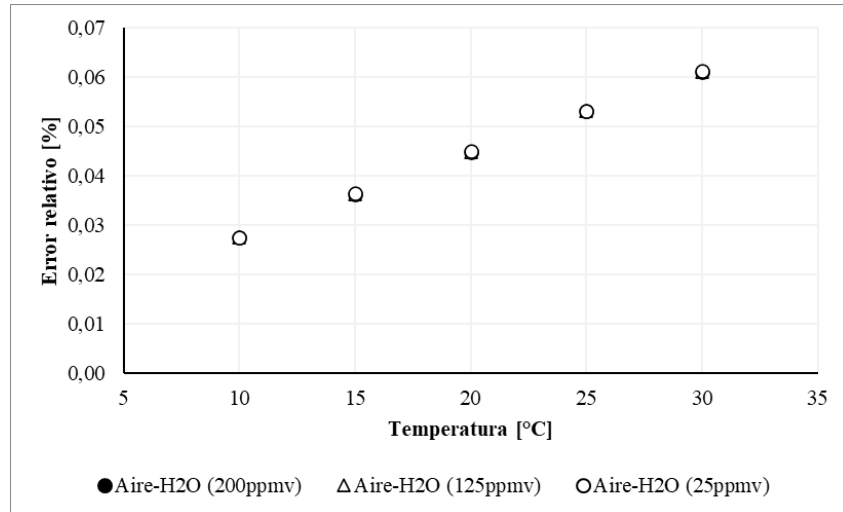


En la Figura 30 se evidencia que el error relativo a estos niveles de humedad es superior a la incertidumbre de la ecuación del CIPM-2007 tal como en el caso anterior, presentando una mayor desviación a menores temperaturas y un mínimo a 25 °C. El valor del error se mantiene inferior a 0,00066 % en el intervalo de condiciones consideradas. La humedad considerada no tiene un efecto significativo sobre el error.

La Figura 31 permite evidenciar que el error relativo de la densidad calculada con la ecuación de Tetrattec tiene un comportamiento lineal y aumenta con la temperatura. La humedad tiene un efecto casi nulo sobre el valor del error relativo y el valor de la densidad obtenida por esta ecuación es alrededor de 100 veces mayor que el de la ecuación del CIPM (2007).

### Figura 31

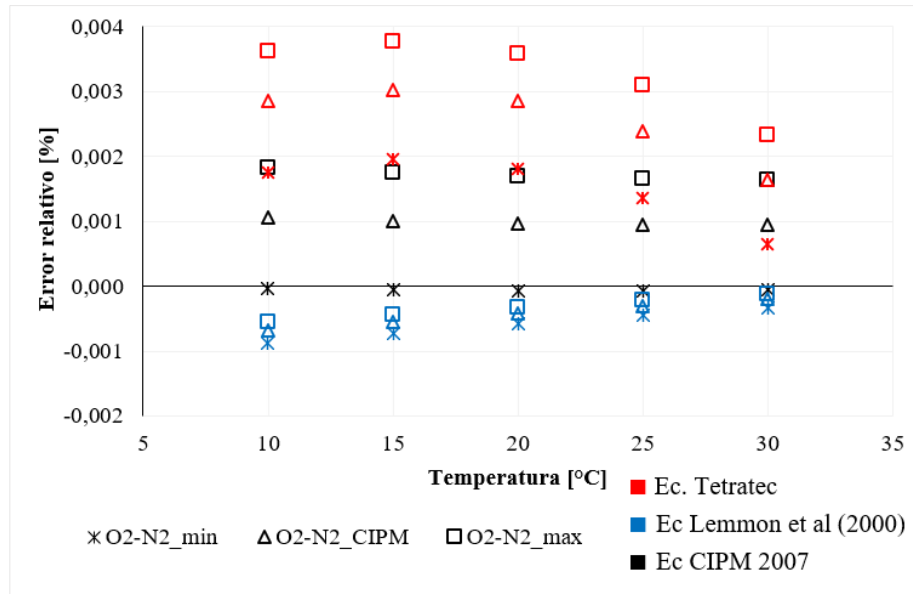
Diferencia relativa de densidad de aire húmedo obtenido por la ecuación de Tetratéc a densidad de aire estándar.



**4.3.3.1.3 Evaluación de ecuaciones para densidad de aire sintético.** Como ecuaciones para evaluar el cálculo de la densidad del aire sintético, se emplea el modelo de Lemmon et al. (2000) para mezclas de nitrógeno y oxígeno, así como los modelos del CIPM (2007) y Tetratéc para aire seco. El cálculo del error se realiza con respecto a aire sintético con la máxima y mínima proporción de nitrógeno y su proporción normalizada de la composición del CIPM 2007 (Figura 32).

**Figura 32**

*Diferencia relativa en densidad del aire sintético obtenida por distintas ecuaciones respecto a valores de REFPROP.*



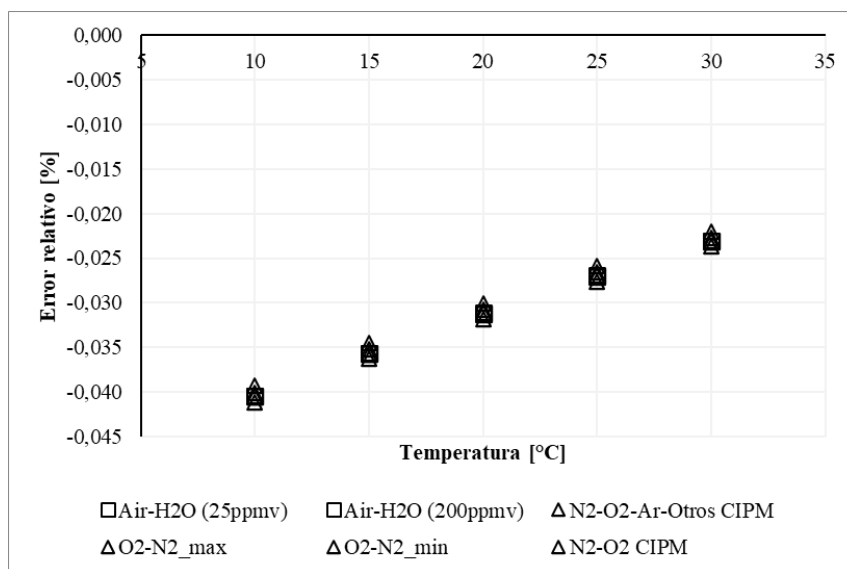
Al comparar la Figura 32 con la Figura 29, es posible apreciar que el comportamiento del error relativo de cada ecuación respecto a la temperatura es muy similar entre aire atmosférico seco y aire sintético. El error relativo de la densidad calculada por el método de Lemmon et al. (2000) para mezclas de nitrógeno y oxígeno se destaca principalmente porque el efecto de la composición del aire sintético es mínimo y se mantiene inferior a 0,001 % de desviación del valor de referencia. La ecuación del CIPM también hace una buena aproximación, aunque la composición del aire sintético tiene un efecto más pronunciado sobre el error relativo de su densidad y produce una desviación superior a 0,001 % cuando el contenido de nitrógeno en el aire sintético es mayor al contenido medio. La ecuación de Tetratéc por otra parte posee el mayor error relativo para la densidad del aire sintético siendo aun así inferior a 0,004% de la desviación.

**4.3.3.1.4 Evaluación de ecuación de gas ideal para densidad de distintas composiciones de aire.** Adicionalmente se ha querido evaluar la eficacia de la ecuación de gas

ideal para la determinación de la densidad de las distintas composiciones de aire consideradas. Para esto se evalúa el error relativo de la densidad calculada con este modelo respecto a las distintas composiciones y se obtienen los resultados representados por la Figura 33.

### Figura 33

*Error relativo de la densidad calculada con la ecuación de gas ideal respecto a densidad de distintas composiciones de aire con REFPROP.*



La Figura 33 permite evidenciar que el error relativo de la densidad calculada con la ecuación de gas ideal tiene un comportamiento lineal con respecto a la temperatura. Esta desviación disminuye a medida que la temperatura aumenta, lo cual era de esperarse debido a que con el aumento de la temperatura los gases se acercan al comportamiento ideal. La magnitud del error relativo es de 0,03 % para 20 °C por lo que el error es alrededor de 10 veces superior a el error relativo obtenido por el uso de los modelos de Tetrattec. Adicionalmente es posible afirmar que la composición del aire no tiene un efecto significativo sobre la magnitud del error relativo.

**4.3.3.1.5 Comparación del error de los modelos para densidad.** Para resumir los resultados de la comparación de los errores de cada tipo de aire, se presenta la Tabla 24. En la última columna de la Tabla 24, se puede identificar el modelo que ha tenido el menor error

respecto a los valores de REFPROP para cada tipo de aire. Estos modelos, son posteriormente empleados como parte del conjunto de ecuaciones que se sugiere que el CDT utilice en sus procesos de calibración.

**Tabla 24**

*Error relativo en modelos para el cálculo de densidad del aire de distintas composiciones.*

Composición	Err rel $\pm \Delta$ [%]				Ecuación con mínimo error
	CIPM-2007	Tetrathec Aseco/hum	Lemmon et al (2000)	Gas ideal	
N2-O2-Ar-Otros _CIPM	0,000605 $\pm$ 0,000053	0,002344 $\pm$ 0,000443	-0,002214 $\pm$ 0,000616	-0,031515 $\pm$ 0,006074	CIPM-2007
O2-N2 _min	-0,000066 $\pm$ 0,000006	0,001658 $\pm$ 0,00029	-0,000583 $\pm$ 0,000136	-0,031943 $\pm$ 0,00436	CIPM-2007
O2-N2 _CIPM	0,000978 $\pm$ 0,000031	0,002701 $\pm$ 0,000316	-0,000425 $\pm$ 0,00012	-0,0309 $\pm$ 0,004335	Lemmon et al (2000)
O2-N2 _max	0,00171 $\pm$ 0,000048	0,003432 $\pm$ 0,000333	-0,000321 $\pm$ 0,00011	-0,030169 $\pm$ 0,004317	Lemmon et al (2000)
Air-H2O (25ppmv)	0,000602 $\pm$ 0,000021	0,044799 $\pm$ 0,008404	-	-0,031281 $\pm$ 0,004345	CIPM-2007
Air-H2O (200ppmv)	0,000584 $\pm$ 0,000019	0,044742 $\pm$ 0,008406	-	-0,031327 $\pm$ 0,004348	CIPM-2007

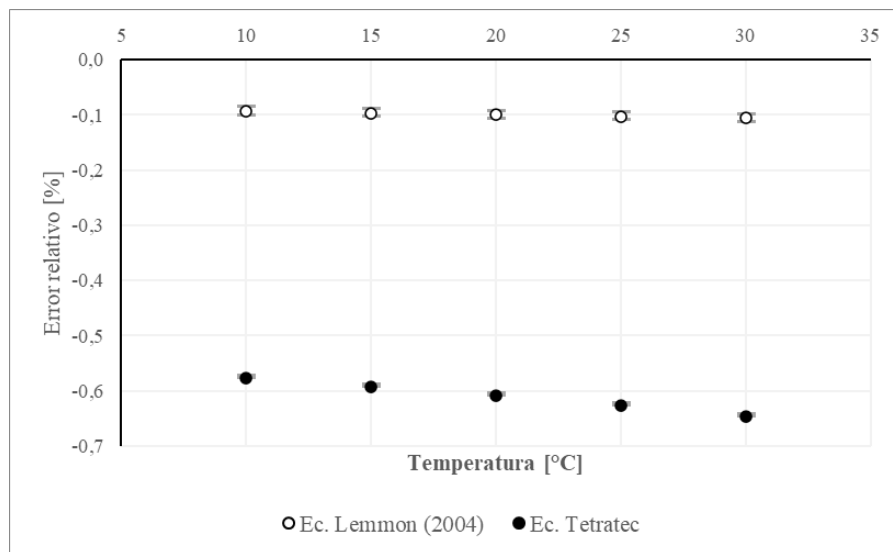
#### 4.3.3.2 Evaluación de ecuaciones para cálculo de viscosidad

Para las ecuaciones de viscosidad se cuenta con los modelos recomendados por Tetrathec para aire seco y sintético, tal como la ecuación de Lemmon et al. (2004) para el cálculo de la viscosidad del aire, nitrógeno y oxígeno. Adicionalmente se utilizan las ecuaciones sugeridas por Koeroghlian et al. (2018) para el cálculo de la viscosidad del vapor de agua y el modelo de mezclado.

**4.3.3.2.1 Evaluación de ecuaciones para viscosidad de aire seco.** En este caso se calcula el error relativo de la ecuación de Tetratrec y Lemmon et al (2004) para el cálculo de la densidad aire seco estándar (Figura 34).

**Figura 34**

*Error relativo en la viscosidad del aire sintético calculada con distintas ecuaciones respecto al valor de REFPROP.*



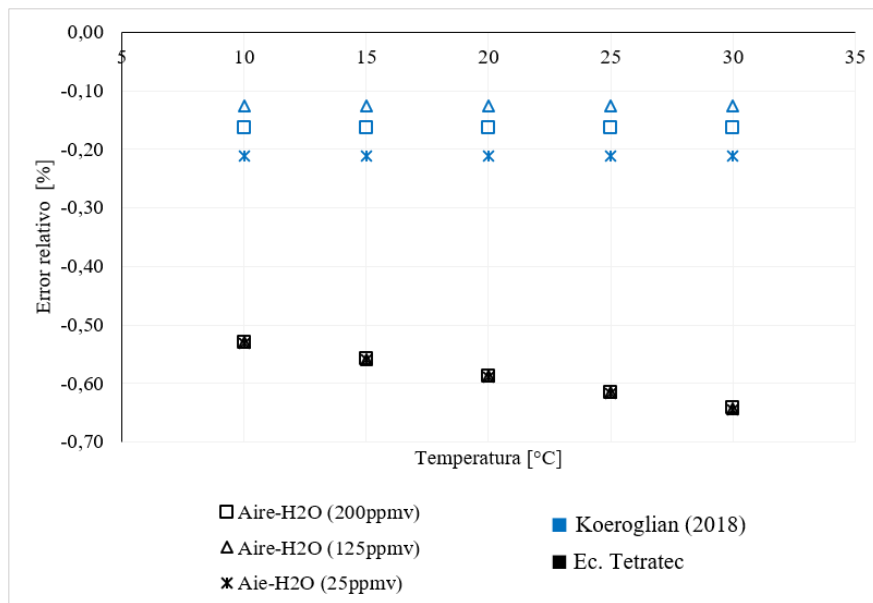
La Figura 34 muestra que existe una pequeña discrepancia (-0,01%) entre los valores de viscosidad de REFPROP y los valores de viscosidad de la ecuación de Lemmon et al. (2004) para el aire seco. Esta diferencia puede atribuirse a que REFPROP involucra el Ar y gases de traza en su cálculo, así como que el método de mezclado puede ser diferente. Esta diferencia es alrededor de -0,01 % y es 6 veces menor que la desviación de la viscosidad calculada por el método de Tetratrec. La temperatura hace que el error aumente, y la presión tiene un efecto casi nulo sobre el mismo.

**4.3.3.2.2 Evaluación de ecuaciones para viscosidad de aire húmedo.** En la evaluación de las ecuaciones de viscosidad para aire húmedo se calcula el error relativo de la viscosidad obtenida por el método de Koeroghlian (2018) y la ecuación de Tetratrec con respecto

a la viscosidad de referencia para aire húmedo. Los resultados del error se presentan en la Figura 35.

### Figura 35.

*Error relativo en la viscosidad del aire húmedo calculada con distintas ecuaciones respecto a valores de REFPROP.*



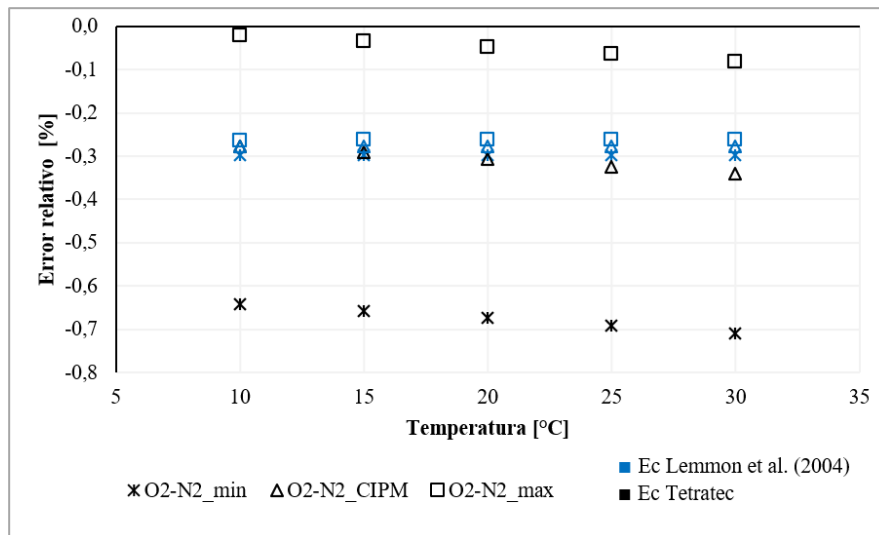
La Figura 35 permite apreciar que el error del método sugerido por Koeroghlian (2018) se mantiene aproximadamente igual para el intervalo de temperaturas considerado. Este error es inferior al 0,25 % y es mayor para la mínima cantidad de vapor de agua. Por otra parte, el error relativo del modelo de Tetratéc tiene un comportamiento lineal cuya desviación aumenta en sentido negativo con la temperatura, llegando a 0,6% para 20°C. Este error es aparentemente independiente de la humedad en el intervalo considerado.

**4.3.3.2.3 Evaluación de ecuaciones para viscosidad de aire sintético.** En la evaluación de las ecuaciones de viscosidad para aire sintético se calcula el error relativo de la viscosidad obtenida por la ecuación de Tetratéc y la ecuación de Lemmon et al (2004) en combinación con el método de Wilke (1950) para el mezclado, con respecto a la viscosidad de referencia para aire sintético en sus composiciones de medio, bajo y alto contenido de nitrógeno.

El método de Lemmon et al (2004) es el único que considera la proporción de nitrógeno y oxígeno en el aire, mientras que el modelo de Tetrattec está diseñado para aire seco (Figura 36).

**Figura 36**

*Error relativo de la viscosidad del aire sintético obtenida por distintas ecuaciones respecto al valor dado por REFPROP.*



La Figura 36, muestra que la ecuación de Tetrattec posee un mayor error cuando la proporción de nitrógeno en el aire seco es mínima y tiene un error mínimo cuando la proporción de nitrógeno es máxima. Aunque el error del método de Lemmon es aproximadamente constante e independiente de la temperatura, su desviación es menor cuando el contenido de nitrógeno es inferior a su proporción media en aire sintético.

**4.3.3.2.4 Comparación del error de los modelos para viscosidad.** Para resumir los resultados de la comparación de los errores en los modelos de viscosidad de cada tipo de aire, se presenta la Tabla 25. En la última columna de la Tabla 25, al igual en el apartado de la densidad, se puede identificar el modelo que ha tenido el menor error respecto a los valores de REFPROP según el tipo de aire. Estos modelos, son posteriormente empleados como parte del conjunto de ecuaciones que se sugiere que el CDT utilice en sus procesos de calibración.

**Tabla 25**

*Error relativo en modelos para el cálculo de densidad del aire de distintas composiciones.*

Composición	Err rel $\pm \Delta$ [%]		Ecuación con mínimo error
	Tetratéc Aire seco/húmedo	Lemmon et al (2004)/Koeroghlian et al (2018)	
N2-O2-Ar-Otros _CIPM	-0,609807 $\pm$ 0,021118	-0,214086 $\pm$ 0,000278	Lemmon et al (2004)
O2-N2 _min	-0,674182 $\pm$ 0,017169	-0,297188 $\pm$ 0,000375	Lemmon et al (2004)
O2-N2 _CIPM	-0,307472 $\pm$ 0,016005	-0,277225 $\pm$ 0,000347	Lemmon et al (2004)
O2-N2 _max	-0,048499 $\pm$ 0,015183	-0,263564 $\pm$ 0,001172	Ec. Tetratéc
Air-H2O (25ppmv)	-0,588629 $\pm$ 0,028307	-0,199533 $\pm$ 0,000237	Koeroghlian et al (2018)
Air-H2O (200ppmv)	-0,586607 $\pm$ 0,028078	-0,118589 $\pm$ 0,000181	Koeroghlian et al (2018)

#### ***4.3.4 Comparación de los modelos nuevos y anteriores para la determinación de las propiedades.***

Según ha sido expuesto anteriormente, los modelos de mejor desempeño para la determinación de las propiedades del aire respecto a los valores de REFPROP, así como los modelos que actualmente emplea el CDT se resumen en la Tabla 26.

**Tabla 26.***Modelos nuevos y anteriores para el cálculo de las propiedades.*

Tipo de aire	Modelos nuevos		Modelos anteriores	
	Densidad	Viscosidad	Densidad	Viscosidad
Aire seco	CIPM (2007): Formula revisada para el cálculo de la densidad de aire húmedo	Lemmon et al (2004): Ec. de viscosidad para aire seco	Tetratrec: Factor de compresibilidad por método de coeficientes viriales para aire seco	Tetratrec: Modelo de viscosidad para aire seco
Aire sintético	Lemmon et al (2000): Ec. de estado nitrógeno y Oxígeno, y Ec. de mezcla.	Lemmon et al (2004): Ec. de viscosidad de nitrógeno y oxígeno. Wilkie (1950): Ec. de viscosidad de mezcla de gases.	Tetratrec: Factor de compresibilidad por método de coeficientes viriales para aire seco	Tetratrec: Modelo de viscosidad para aire seco
Aire húmedo	CIPM (2007): Formula revisada para el cálculo de la densidad de aire húmedo	Koeroghlian et al (2018): Método para hallar la viscosidad de aire húmedo.	Tetratrec: Factor de compresibilidad por coeficientes método de viriales para aire húmedo	Tetratrec: Modelo de viscosidad para aire húmedo

Para comparar el desempeño de las ecuaciones nuevas y anteriores, respecto a los valores de REFPROP, se presenta la Tabla 27 y Tabla 28. Estas tablas presentan el error relativo calculado a la condición de presión y temperatura promedio.

En el cálculo de la densidad, el modelo propuesto genera una reducción de 0,00031 % en el error para aire seco, 0,00326 % para aire sintético y 0,0443 % para aire húmedo. El modelo propuesto representa una mejora en el error de cálculo de la densidad para todas las composiciones, sin embargo, podría considerarse no significativo en el caso del aire sintético.

**Tabla 27**

*Comparación de error relativo en cálculo de densidad empleando los modelos nuevos y anteriores para distintas composiciones de aire.*

Composiciones	Err rel [%]	
	Modelo nuevo	Modelo anterior
O2-N2-Ar-Otros CIPM	-0,00217	0,00248
O2-N2_min	-0,00058	0,00181
O2-N2_CIPM	-0,00042	0,00285
O2-N2_max	-0,00032	0,00358
Aire-H2O (25ppmv)	0,00059	0,04494
Aire-H2O (200ppmv)	0,00058	0,04488

**Tabla 28**

*Comparación de error relativo en cálculo de viscosidad empleando los modelos nuevos y anteriores para distintas composiciones de aire*

Composiciones	Err rel [%]	
	Modelo nuevo	Modelo anterior
O2-N2-Ar-Otros CIPM	-0,09951	-0,60945
O2-N2_min	-0,29716	-0,67369
O2-N2_CIPM	-0,27720	-0,30696
O2-N2_max	-0,26201	-0,04798
Aire-H2O (25ppmv)	-0,21129	-0,58892
Aire-H2O (200ppmv)	-0,12640	-0,58688

La Tabla 28 permite identificar que el modelo propuesto representa una mejora en el error de cálculo de la viscosidad para todas las composiciones de aire consideradas, a excepción del aire sintético de composición O2-N2\_max para el cual el modelo anterior se acerca más a su valor de viscosidad real.

#### ***4.3.5 Evaluación del efecto de la actualización de los modelos sobre la determinación del caudal.***

Para comparar que tan bien se aproximan los modelos a la determinación del caudal para aire atmosférico seco, aire sintético y aire húmedo, se calcula el error relativo entre los caudales calculados al emplear los modelos del fabricante y los nuevos modelos propuestos.

Considerando los resultados del análisis de la sección anterior, para este caso se asume que la presión absoluta, temperatura y presión diferencial no tienen un efecto significativo sobre el error relativo del caudal, de manera que los caudales son evaluados a los valores medios de estos parámetros. Los resultados de estos cálculos son ordenados en la Tabla 29.

Como puede observarse en todos los casos a excepción de aire O2-N2\_max, el error relativo de las nuevas ecuaciones es inferior al error relativo de las ecuaciones anteriores. Una de las mayores diferencias se encuentra en aire húmedo con alrededor de 0,40 %. La diferencia máxima ocurre para O2-N2-Ar-Otros CIPM con 0,5135 %. Entre las menores diferencias se encuentra el O2-N2\_min y O2-N2\_CIPM con un 0,38 % y 0,03 %.

**Tabla 29**

*Comparación de error relativo de caudal por la obtención de propiedades con modelos nuevos y antiguos para distintas composiciones de aire.*

Composiciones	Err rel prom Q [%]	
	Modelo Nuevo	Modelo Anterior
N2-O2-Ar-Otros _CIPM	0,2101 ± 0,0024	0,6056 ± 0,027
O2-N2 _min	0,2958 ± 0,0044	0,6723 ± 0,0279
O2-N2 _CIPM	0,2759 ± 0,0041	0,3039 ± 0,0247
O2-N2 _max	0,2608 ± 0,0039	0,0453 ± 0,0224
Air-H2O (25ppmv)	0,198 ± 0,0022	0,5867 ± 0,0381
Air-H2O (200ppmv)	0,1138 ± 0,0013	0,5846 ± 0,0379

#### **4.4 Etapa IV: Evaluación experimental del efecto del tipo de aire sobre la calibración de medidores de flujo.**

Para determinar de forma experimental si existe un efecto significativo del tipo de aire empleado en las calibraciones, sobre la indicación de los patrones calibración del CDT de Gas, se ha planteado la realización de calibraciones con aire comprimido seco (mediante el secador recuperado en la etapa I y el aire que se utiliza actualmente en las calibraciones de cada banco. Para el banco de patrón LFE se utiliza actualmente aire sintético, tal como en el banco de patrón tipo pistón. En el caso del patrón tipo campana gasométrica se emplea aire atmosférico húmedo debido a que el líquido de la campana se encuentra en contacto con el ambiente del laboratorio y su contenido de humedad está en equilibrio con el mismo.

Para las calibraciones se ha decidido utilizar medidores bajo prueba de principio volumétrico, térmico masico y flujo crítico. Las características de los equipos disponibles son descritas a continuación.

#### ***4.4.1 Calibraciones en banco de patrón LFE***

Para las calibraciones en este banco se han seleccionado medidores con capacidad de flujo inferior a 11000 cm<sup>3</sup>/min. Entre los medidores de prueba se selecciona el medidor térmico masico de código interno QL-008 marca MKS Instruments, con un intervalo de medición de 0 a 200 cm<sup>3</sup>/min. Este medidor no cuenta con el equipo indicador de caudal, por lo cual hay que conectar un cable de transmisión de datos a un indicador digital y energizarlo con una fuente regulada de 5 Voltios. El indicador presenta un valor de voltaje de 0 a 5 el cual es proporcional a su caudal.

También se dispuso de un medidor de caudal del tipo pistón recíprocante de referencia “Reciflow”, marca EP Ehrler. Este medidor posee el sistema de indicación de caudal integrado mediante pantalla táctil y brinda un valor de caudal promedio para cada carrera del pistón, sin embargo, también ofrece un valor de caudal instantáneo que puede ser utilizado como referencia en el ajuste del caudal deseado.

Las calibraciones se repitieron en cada medidor utilizando aire atmosférico seco y aire sintético, para 20 cm<sup>3</sup>/min, 100 cm<sup>3</sup>/min y 200 cm<sup>3</sup>/min como puntos de caudal objetivo.

##### **4.4.1.1 Características del montaje**

El secador fue posicionado en el interior del laboratorio permitiendo un periodo de atemperamiento mayor a 12 horas antes de iniciar las calibraciones. El suministro de aire comprimido surge de una derivación en la línea de aire comprimido que activa las válvulas neumáticas del laboratorio.

Los elementos que formaron parte del montaje de la calibración se presentan a continuación en el orden en que fueron ubicados según el sentido del flujo:

1. Secador de aire comprimido DA25IM seguido de válvula de regulación para controlar la presión y cortar el flujo en cuanto hubiera cambio del fluido de trabajo. En caso de utilizar aire sintético, se conecta el cilindro de aire seco comercial que cuenta con una válvula de regulación de presión de dos etapas y permite un buen control sobre el caudal de operación.
2. Cubo de muestreo de humedad del higrómetro PM880 junto con medidor de presión analógico en caso de que la presión cayera por debajo del límite inferior del sensor de presión del higrómetro. Este solo es utilizado en el caso del aire comprimido seco y no en aire sintético ya que este último posee una muy baja humedad según su certificado de composición.
3. Filtro de partículas que hace parte del banco de calibración.
4. Regulador de presión de hasta 2 barg, con el cual se ajusta el caudal de cada punto de calibración.
5. Medidor patrón LFE según el valor del caudal de cada calibración. Este medidor está acompañado de un medidor de presión diferencial y presión absoluta en la entrada del medidor, y un sensor de temperatura RTD a la salida.
6. Medidor bajo prueba, en cuya conexión incorpora un tramo de tubería recta de acero inoxidable del mismo del diámetro del puerto de entrada del medidor. Adicionalmente se conectan una toma de presión a la entrada y toma de temperatura a la salida del medidor.

### Figura 37

*Suministro de aire atmosférico seco y aire sintético calibraciones en banco de patrones laminares.*



En el caso de medidor bajo prueba tipo térmico masico no se empleó medición de presión y temperatura a su salida dado que este permite inferir principalmente el flujo masico y presenta un valor de caudal para las condiciones de presión y temperatura de referencia.

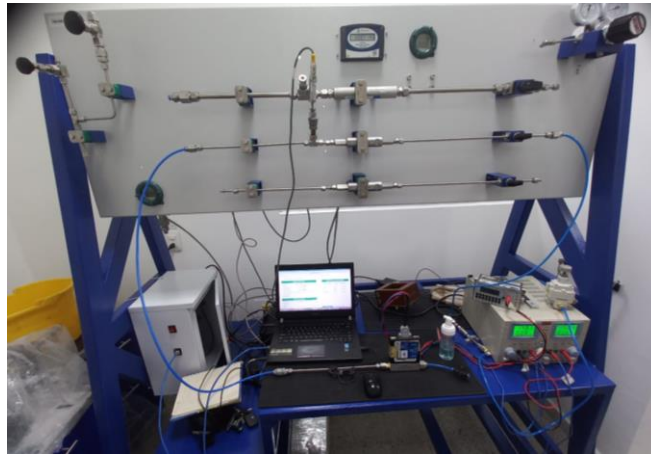
Los puntos de calibración han requerido el uso del patrón LFE2 para los caudales de 20 cm<sup>3</sup>/min y 100 cm<sup>3</sup>/min, y el patrón LFE3 para el caudal de 200 cm<sup>3</sup>/min debido a los intervalos de medición de cada patrón.

Ante de iniciar la calibración se comprobó que la humedad del aire proporcionado por el secador se mantuvo entre -43,0 °C y -52°C de temperatura de rocío para una presión de entre 2,2 y 3,4 barg, con una temperatura de 18,8 a 19,5 °C medidos a la salida del secador. En términos de concentración, la humedad se mantuvo entre 11 y 46 ppmv.

Cada calibración tiene 3 repeticiones y estas se realizan alternando aire seco y aire sintético para cada valor de caudal. El procedimiento de calibración del banco de LFE toma 15 mediciones con un espacio de 12 segundos entre cada una, por lo que la cantidad de datos en base a la cual se realiza cada calibración permite obtener un alto grado de confiabilidad en los resultados de la calibración.

**Figura 38**

*Montaje para la calibración de medidor térmico masico en banco de patrones laminares.*



**Figura 39**

*Montaje para la calibración de medidor Reciflow en banco de patrones laminares.*



#### **4.4.1.2 Resultados de calibración de medidor térmico masico en banco de patrones**

**LFE.** Una vez realizadas las calibraciones se han calculado los errores relativos de la medición de caudal promedio del MUT con respecto al caudal promedio indicado por el medidor patrón. Los resultados del error relativo y la incertidumbre de cada calibración del medidor QL-008 en el banco de patrones laminares, es presentado en la Tabla 30.

**Tabla 30**

*Errores relativos de calibración utilizando LFE con medidor térmico masico.*

Q [cm <sup>3</sup> /min]	Aire seco		Aire sintético	
	Err rel [%]	U <sub>k=2</sub> [%]	Err rel [%]	U <sub>k=2</sub> [%]
20	11,34	0,523	13,44	0,59
	8,98	0,536	9,57	0,54
	8,86	0,542	9,78	0,55
100	4,88	0,440	5,46	0,44
	4,42	0,482	4,62	0,44
	4,47	0,537	4,69	0,68
200	4,02	0,909	4,13	0,93
	3,90	1,308	4,18	0,94
	3,59	0,998	3,90	0,91

En la Tabla 30 se observa que los valores del error son muy semejantes entre el aire atmosférico seco y aire sintético, sin embargo, son relativamente mayores en el caso del aire sintético, lo cual puede tener relación con el hecho de que las ecuaciones empleadas para el cálculo de las propiedades funcionan mejor para el aire atmosférico tratado por el secador que para el aire sintético.

Para determinar si existe o no incidencia en la calibración por parte del tipo de fluido empleado se utiliza el puntaje  $E_n$ , que según la norma ISO 17043, permite afirmar si dos mediciones son comparables entre sí. Este criterio estadístico toma en cuenta la incertidumbre de medición y la diferencia entre las mediciones obtenidas en los dos ensayos comparados.

$$E_n = \frac{x_a - x_b}{\sqrt{U_a^2 + U_b^2}} \quad (31)$$

En este caso  $x$  es el promedio del error relativo de las calibraciones para un caudal determinado, con los subíndices  $a$  y  $b$  para referirse al promedio de las calibraciones en aire atmosférico seco o aire sintético respectivamente. Por otra parte,  $U$  representa la incertidumbre expandida en términos de porcentaje con un factor de cobertura  $k=2$ , el cual es un valor típico utilizado en metrología. Cuando  $k=2$ , el puntaje  $E_n$  alerta que los valores no son comparables una vez que su valor absoluto es mayor a 1. El valor del puntaje  $E_n$  para las calibraciones del medidor térmico masico en el banco de patrón laminar son presentadas en la Tabla 31.

**Tabla 31**

*Puntaje  $E_n$  de valores de promedio de error relativo de calibraciones de medidor térmico masico en banco de patrones LFE.*

Q [cm <sup>3</sup> /min]	Aire seco		Aire sintético		$E_n$ [-]
	Err_prom [%]	U_prom; k=2 [%]	Err_prom [%]	U_prom; k=2 [%]	
20	9,7268	0,5337	10,9311	0,5598	<b>-1,56</b>
100	4,5862	0,4863	4,9252	0,5220	-0,48
200	3,8370	1,0714	4,0695	0,9246	-0,16

La Tabla 31 indica que las calibraciones de medidor térmico masico a través de aire atmosférico seco o aire sintético genera resultados de calibración que son comparables, exceptuando el caso del caudal mínimo. El puntaje  $E_n$  para este caso es cercano a 1 y es probable que las calibraciones sean comparables en este punto de caudal si el factor de cobertura aumenta a un 99%.

**4.4.1.3 Resultados de calibración de medidor volumétrico en banco de patrones LFE.** Para las calibraciones del medidor Reciflow los resultados del error relativo y la incertidumbre de calibración son expuestos en la Tabla 32. Para estas calibraciones se aplica el procedimiento expuesto en el caso anterior, considerando el puntaje de  $E_n$  como criterio de

aceptación de la comparabilidad de las calibraciones realizadas con aire sintético y aire atmosférico seco.

**Tabla 32.**

*Errores relativos de calibración de medidor de principio volumétrico con banco de patrones laminares.*

Q [cm <sup>3</sup> /min]	Aire seco		Aire sintético	
	Err rel [%]	U_k=2 [%]	Err rel [%]	U_k=2 [%]
20	1,759	0,747	2,291	0,766
	2,013	0,791	1,370	0,796
	2,036	0,885	1,934	0,958
100	1,599	0,452	1,047	0,469
	0,734	0,472	1,238	0,499
	0,858	0,458	1,109	0,472
200	-0,932	1,562	-0,765	1,983
	-0,515	1,728	-1,088	1,723
	-0,772	1,709	-0,019	1,428

En la Tabla 32 es posible ver que el error de las calibraciones es relativamente menor a las calibraciones con medidor térmico masico. Sin embargo, la variabilidad del error es mayor que la del medidor térmico masico. La Tabla 33 presenta los valores promedio del error relativo y la incertidumbre expandida de las calibraciones para cada punto de caudal y tipo de fluido.

**Tabla 33**

*Promedios de error relativo e incertidumbre de calibración de medidor Reciflow en banco de patrones LFE.*

Q	Aire seco	Aire sintético	E <sub>n</sub>
---	-----------	----------------	----------------

[cm <sup>3</sup> /min]	Err_prom [%]	U_prom; k=2 [%]	Err_prom [%]	U_prom; k=2 [%]	[-]
20	1,936	0,808	1,865	0,840	0,061
100	1,064	0,461	1,132	0,480	-0,102
200	-0,740	1,666	-0,624	1,711	-0,049

La Tabla 33 muestra que las calibraciones con cada fluido resultan comparables para cada punto de caudal evaluado, puesto que el valor absoluto del puntaje  $E_n$  es inferior a 1 en todos los casos.

#### **4.4.2 Calibraciones en banco de patrón tipo pistón.**

Para el patrón tipo pistón se ha empleado un medidor bajo prueba del tipo cámara húmeda. Este medidor indica el volumen de gas que le ha atravesado, como producto de la rotación de un tambor giratorio dividido en cámaras y sumergido en agua. El nivel de agua de este tipo de medidor es uno de los parámetros que debe mantenerse bajo control para que no sea modificada la cantidad de aire que puede ocupar las cámaras. Cada cierto tiempo debe inspeccionarse el nivel y ser rellenado para evitar variaciones en la indicación de volumen. Este medidor cuenta con un indicador analógico que trabaja por la rotación de una aguja y un marcador que cuenta las veces se ha completado una vuelta en términos de volumen. La toma de datos de la calibración se realiza mediante un sensor óptico ubicado en un punto fijo de la carrera de giro de la aguja indicadora, el cual permite el registro de los momentos en que se completa una vuelta y por tanto calcular el caudal promedio.

## Figura 40

*Montaje de calibración de medidor tipo cámara húmeda en patrón tipo pistón.*



El aire utilizado en esta prueba será aire sintético y aire atmosférico tratado por el secador DA25IM. Para estas calibraciones fueron utilizados 5 caudales entre 300 y 3400 cm<sup>3</sup>/min. Los errores e incertidumbres de calibración en cada caudal y fluido de trabajo son presentados en la Tabla 34.

**Tabla 34**

*Errores relativos e incertidumbre de calibración de medidor tipo cámara húmeda en banco de patrón tipo pistón.*

Q patrón [dm <sup>3</sup> /min]	Aire sintético		Aire seco		E <sub>n</sub> [-]
	Err [%]	U <sub>k=2</sub> [%]	Err [%]	U <sub>k=2</sub> [%]	
0,3	0,6622	0,1741	0,3790	0,1969	<b>1,0774</b>
0,6	0,2555	0,1633	0,0959	0,1703	0,6765
1,6	0,0841	0,1599	-0,1847	0,1713	<b>1,1470</b>
2,5	-0,3517	0,1876	-0,4849	0,1621	0,5374
3,4	-0,4794	0,1709	-0,5579	0,1526	0,3424

La Tabla 34 indica que los resultados de calibración en cada tipo de fluido son comparables entre sí para todos los puntos de caudal exceptuando 0,3 y 1,6 dm<sup>3</sup>/min. Sin embargo, los valores de  $E_n$  en estos puntos son muy próximos a 1.

#### ***4.4.3 Calibraciones en campana gasométrica***

Para las calibraciones en campana gasométrica se utiliza una boquilla sónica como medidor bajo prueba. La boquilla es instalada aguas abajo de este patrón, con una bomba de vacío que genera la succión para asegura el bloqueo y que el aire en el interior de la campana se mantenga a una presión cercana a la atmosférica. Dado que la boquilla opera en un caudal fijo, el objetivo es comparar calibraciones realizadas con aire atmosférico seco y aire atmosférico húmedo para evidenciar si se presenta una desviación significativa de caudal registrado por la campana. Los resultados de los errores relativos y la incertidumbre de calibración se presentan en la Tabla 35.

#### **Figura 41**

*Montaje para la calibración de boquilla sónica en patrón tipo campana gasométrica.*



**Tabla 35**

*Errores relativos e incertidumbre de calibración de boquilla sónica en patrón tipo campana gasométrica.*

Tipo de aire	Q patrón [dm <sup>3</sup> /min]	Qref;MUT [dm <sup>3</sup> /min]	Err rel [%]	U_k=2 [dm <sup>3</sup> /min]	E <sub>n</sub> [-]
Aire atmosférico	4,1388	4,1303	0,2065	0,2084	-0,0392
Aire seco	4,1238	4,1158	0,1947	0,2195	

La Tabla 35 indica que las calibraciones con cada tipo de fluido resultan comparables, debido a que su puntaje E<sub>n</sub> es inferior a 1. Esto también puede evidenciarse al notar que el error relativo de las calibraciones es inferior a la incertidumbre expandida de cada una.

**Figura 42**

*Boquilla sónica empleada en calibración con patrón tipo campana.*



## 5. Conclusiones

A continuación, se resumen las conclusiones del análisis de resultados de cada etapa metodológica.

### 5.1 Conclusiones de la etapa I

A partir de los resultados representados en la Figura 20 a Figura 22, es posible concluir lo siguiente.

- Se valida que el secador DA25IM -40°C de Ingersoll Rand, propiedad del CDT de Gas, cumple con las especificaciones del fabricante en cuanto a proveer aire con un nivel de humedad que cumple el estándar ISO clase 2, manteniendo la presión de vapor inferior a -40°C Td ante distintos valores de presión y caudal en el intervalo de 3,5 a 6 barg y 0 a 9 SCMH.
- El aire a la salida del secador posee una presión de vapor que es de 2 a 10 °C Td inferior a su límite para el aire ISO Clase 2.
- El contenido de humedad en el aire se mantiene relativamente estable, con un valor  $15 \pm 6$  ppmv, en el rango de 3,5 a 6 barg y 0 a 9 SCMH.
- La presión y caudal no tienen un efecto aparente sobre el nivel de humedad del aire a la salida del secador.

## **5.2 Conclusiones de la etapa II**

A partir de los resultados en la Tabla 9 y Figura 30, se puede obtener las siguientes conclusiones:

- En general el error relativo de la densidad al asumir aire atmosférico seco y trabajar con aire sintético o húmedo para las condiciones de humedad posibles mediante el secador, es inferior a la incertidumbre de los valores de referencia proporcionados por el REFPROP versión 10.
- La desviación en el cálculo de la viscosidad para las composiciones de aire sintético y húmedo con respecto al aire atmosférico seco son mayores que las presentadas en el caso de la densidad. La mayor desviación se da en el contenido máximo de nitrógeno con un -0.55% respecto al aire atmosférico seco.

- La diferencia en el valor de la viscosidad es significativa para aire sintético respecto al aire atmosférico aun cuando la proporción de nitrógeno se encuentre en la media reportada por el proveedor de aire sintético. Esta desviación por concepto de la composición genera un error en el caudal de 0,3% o 0,6% (ante un contenido máximo de nitrógeno).
- La incertidumbre en el caudal por efectos de la incertidumbre en el valor de la densidad y viscosidad es de la misma magnitud que esta última considerando que su distribución es rectangular.

### **5.3 Conclusiones de la etapa III**

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 19 a Tabla 21, es posible concluir lo siguiente:

- El modelo propuesto para el cálculo de la densidad del aire seco y sintético se aproxima mejor al valor real de la densidad para cada composición, que el modelo de cálculo de densidad anterior, según los datos de referencia proporcionados por REFPROP. La desviación del cálculo de densidad de aire atmosférico seco con el modelo anterior es menor a 0,0024%, mientras que con el nuevo modelo es menor a 0,0006%, para el intervalo  $20 \pm 5$  °C y  $90 \pm 5$  kPa.
- En el caso de la viscosidad los errores relativos de la viscosidad obtenida por los modelos propuestos son alrededor de la mitad de los errores obtenidos por las ecuaciones utilizadas actualmente. Con los modelos anteriores se obtiene una desviación menor a 0.61% y a 0.21% para el modelo nuevo.
- El uso de los nuevos modelos para el cálculo de la densidad y viscosidad ha permitido obtener el valor de caudal cuya desviación es inferior a la mitad de la desviación obtenida al utilizar las ecuaciones anteriores. Por tal motivo se puede

afirmar que la viscosidad tiene un mayor impacto sobre la exactitud de la medida de que una proporcionada por los medidores LFE.

- La desviación del cálculo de densidad de aire húmedo con el modelo anterior es menor a 0,045%, mientras que con el nuevo modelo es menor a 0,0006%, para el intervalo  $20 \pm 5$  °C y  $90 \pm 5$  kPa. En el caso de la viscosidad esta desviación es menor a 0.59% para el modelo anterior y menor a 0.2% para el modelo nuevo.
- La desviación del cálculo de densidad de aire sintético con el modelo anterior es menor a 0,035%, mientras que con el nuevo modelo es menor a 0,00059%, para el intervalo  $20 \pm 5$  °C y  $90 \pm 5$  kPa. En el caso de la viscosidad esta desviación es menor a 0.67% para el modelo anterior y menor a 0.3% para el modelo nuevo.
- La desviación del valor de densidad y viscosidad calculado con los modelos es máxima para aire sintético con el mínimo contenido de nitrógeno.
- La máxima desviación del caudal calculado para aire seco, sintético y húmedo con los nuevos modelos es de 0,21%, 0,3% y 0,2%, respectivamente. En el caso de emplear los modelos anteriores, la desviación es menor a 0,6%, 0,7% y 0,6%, para aire seco, sintético y húmedo respectivamente.
- En el cálculo del factor de conversión de caudal para aire seco y húmedo, la ecuación del CIPM-2007 genera una desviación relativa máxima de tan solo 0,00006%. En el caso del aire sintético el modelo propuesto permite una desviación máxima de 0,00014%, mientras que la ecuación del CIPM-2007 produce una desviación máxima 0,00017%.

#### **5.4 Conclusiones de la etapa IV**

De acuerdo con los resultados obtenidos de la Tabla 23 a la Tabla 27, se concluye que:

- Las calibraciones con aire sintético u aire seco en el patrón tipo laminar resultan comparables debido a que las diferencias de los errores se encuentran dentro de las incertidumbres de calibración.
- El uso de aire sintético o aire seco comprimido no tiene un efecto considerable sobre la calibración de miércoles tipo cámara húmeda.
- El uso de aire atmosférico húmedo o aire seco comprimido no genera cambios significativos en el valor de caudal que atraviesan una tobera sónica.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Wright, J. D. (2003). What is the “best” transfer standard for gas flow. Proceedings of the FLOMEKO, Groningen, The Netherlands, 12-14.
- [2] Koeroghlian, M., Hall, M. J., & Matthews, R. (2018). Calculating a Viscosity Correction for Humid Air in a Laminar Flow Element (No. 2018-01-0206). SAE Technical Paper.
- [3] Hellmuth, O., Feistel, R., & Foken, T. (2021). Intercomparison of different state-of-the-art formulations of the mass density of humid air. Bulletin of Atmospheric Science and Technology, 2(1-4), 13.
- [4] Centro español de metrología (CEM). (2008). ME-009 Procedimiento para la calibración de caudalímetros de gases. [https://www.cem.es/sites/default/files/me-009\\_digital\\_0.pdf](https://www.cem.es/sites/default/files/me-009_digital_0.pdf)
- [5] ISO. (2010). Compressed air — Part 1: Contaminants and purity classes. ISO.
- [6] Parker Hannifin Ltd. 2010. Introduction to ISO Air Quality Standards. Catalogo 174004400\_01\_EN 04/10.
- [7] ASHRAE 2001. Fundamentals Handbook, chapter 6: Psychometrics. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [8] Buck, A. L. (1981). New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 20(12), 1527-1532.
- [9] Lesman Instrument Company [@Lesman]. (2021, diciembre 15). Fundamentals of trace moisture measurement using Aluminum Oxide sensors, a lesman webinar. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=uHAfx49bWfs>
- [10] General Electric Sensing. 2006. Basic GE Sensing Hygrometry principles: 2-7.
- [11] The International Union of Pure, & (iupac), A. C. (2014). adsorption. En The IUPAC Compendium of Chemical Terminology. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).

- [12] IMPAK. (s/f). Desiccant charts - Sorbentsystems.com. Sorbentsystems.com. Recuperado el 14 de junio de 2023, de [https://www.sorbentsystems.com/desiccants\\_charts.html](https://www.sorbentsystems.com/desiccants_charts.html)
- [13] Activated Alumina vs. Silica Gel: All you need to know. (2022, enero 17). Jalon; Jalon Zeolite Manufacturer&Supplier. <https://www.jalonzeolite.com/activated-alumina-vs-silica-gel-all-you-need-to-know>
- [14] Olivier Deuceux, Cyril Lavigne, Christophe Nedez, Axens IFP Group Technologies. 2001. Air and Gas Drying with Activated.
- [15] Fortin, A. (2016, noviembre 7). What are dual tower regenerative desiccant air dryers? Vmacair.com. <https://www.vmacair.com/blog/dual-tower-regenerative-desiccant-air-dryers-work>
- [16] Modular Heatless Desiccant Dryers - 5-300 m<sup>3</sup>/h (3-176 SCFM). (s/f). ingersoll-rand. Recuperado el 14 de junio de 2023, de <https://www.ingersollrand.com/en-us/air-compressor/air-compressor-dryers/modular-heatless-desiccant-dryers-5-300-m3-h>
- [17] F-Series air compressor filters. (s/f). ingersoll-rand. Recuperado el 14 de junio de 2023, de <https://www.ingersollrand.com/en-us/air-compressor/parts-and-accessories/filters/f-series-filters>.
- [18] GE sensing. 2005. TF series Panametric Aluminium Oxide Moisture Probe, Brochure.
- [19] Ingersoll Rand 2340L5-V two stage cast iron air compressor. (s/f). Ingersollrandcompressedair.com. Recuperado el 14 de junio de 2023, de <https://ingersollrandcompressedair.com/2340l5-v-two-stage-cast-iron-air-compressor.html>
- [20] Meriam LFE Laminar Flow Elements. (s/f). Meriam.com. Recuperado el 14 de junio de 2023, de [https://www.meriam.com/assets/LFE-Brochure\\_1\\_15.pdf](https://www.meriam.com/assets/LFE-Brochure_1_15.pdf)
- [21] Picard, A., Davis, R. S., Gläser, M., & Fujii, K. (2008). Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). *Metrologia*, 45(2), 149.

- [22] Lemmon, E. W., Jacobsen, R. T., Penoncello, S. G., & Friend, D. G. (2000). Thermodynamic properties of air and mixtures of nitrogen, argon, and oxygen from 60 to 2000 K at pressures to 2000 MPa. *Journal of physical and chemical reference data*, 29(3), 331-385.
- [23] Span, R., Lemmon, E. W., Jacobsen, R. T., Wagner, W., & Yokozeki, A. (2000). A reference equation of state for the thermodynamic properties of nitrogen for temperatures from 63.151 to 1000 K and pressures to 2200 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 29(6), 1361-1433.
- [24] Ilg, K. (2021, octubre 7). LFE-FlowCal Software for laminar flow elements. Tetrattec.de. <https://www.tetrattec.de/en/services/software/sw-flow-elements/lfe-flowcal-software/>
- [25] Kestin, J. and Whitelaw, J.H., "The Viscosity of Dry and Humid Air," *International Journal of Heat and Mass Transfer* 7:1245-1255, 1964.
- [26] Anexo I de procedimiento de calculo de cadual de CDT de Gas, código interno PTC 047.
- [27] Lemmon, E. W., & Jacobsen, R. T. (2004). Viscosity and thermal conductivity equations for nitrogen, oxygen, argon, and air. *International journal of thermophysics*, 25, 21-69.
- [28] Kestin, J., & Richardson, P. D. (1963). The Viscosity of Superheated Steam up to 275 Deg C: A Refined Determination.