

Validación de la efectividad secado de aire comprimido por torre desecante modelo DA25IM -40°C Ingersoll Rand

Validation of the effectiveness of the Ingersoll Rand DA25IM -40°C desiccant tower compressed air drying system

Luis Miguel Sarmiento Palomino^{1*}

¹ Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 # 9 Bucaramanga, Santander, Colombia.

* Correo electrónico: luismiguelarm@gmail.com

Resumen

En este trabajo, se evaluó la efectividad del secado de aire comprimido a través de la torre desecante sin aplicación de calor modelo DA25IM -40°C de Ingersoll Rand. El trabajo inicia con la exposición de la importancia del aire comprimido, sus usos y la necesidad de garantizar un proceso de secado eficaz. También son expuestas distintas formas de expresar y medir la humedad, técnicas de secado y el comportamiento de la alúmina activada como componente activo del equipo de secado que es objeto de este trabajo. A partir de ello se identifican la presión y el caudal del aire como principales factores que son susceptibles a variaciones durante la operación del secador, siendo estos parte del conjunto de parámetros que pueden incidir sobre la penetración del aire en la alúmina activada. Por ello, se diseña un montaje experimental que permite la validación de la capacidad de secado frente a ajustes en el caudal y presión del aire que atraviesa al secador. Se exponen las características del compresor y otros componentes del sistema de generación y distribución de aire comprimido, y los comportamientos que hacen necesaria la toma de promedios del caudal y presión en cada ensayo. También se incluyen especificaciones técnicas de los equipos empleados para la medición de los parámetros de ajuste y análisis. Se describe el método de ajuste de presión y caudal, el cual consiste en el estrangulamiento de válvulas antes y después del secador, para lograr una cierta variedad de presiones sobre un caudal dado. Se especifica el procedimiento de toma y procesamiento de datos. Los resultados son ordenados en gráficos de dispersión, que indican la humedad del aire secado a distintas condiciones de presión y caudal. Se concluye que al operar el secador en el rango de 0

TECNOLOGÍA

a 9 SCMH y 3,5 a 6 barg (presión a la entrada del secador) la humedad obtenida es de 15 ± 6 ppmv, sin evidenciar una clara dependencia de la humedad respecto a la presión y el caudal de operación del sistema. En tales condiciones, la humedad del aire se mantiene inferior a -40°C de temperatura de rocío (a la presión de salida del secador), lo cual concuerda con el requerimiento del aire clase 2 ISO 8573-1, que declara el fabricante dentro de las especificaciones del equipo.

Palabras Clave: *Secado de aire, humedad, desecante, aire comprimido.*

Abstract

In this work, the effectiveness of compressed air drying through the Ingersoll Rand model DA25IM -40°C heat-free desiccant tower was evaluated. The work begins with the presentation of the importance of compressed air, its uses and the need to ensure an effective drying process. Also exposed are different ways of expressing and measuring humidity, drying techniques and the behavior of activated alumina as an active component of the drying equipment, object of this work. From this, the pressure and air flow are identified as the main factors susceptible to variations during the operation of the dryer, being part of the set of parameters that can affect the penetration of air in the activated alumina. Therefore, an experimental assembly is designed to allow the validation of the drying capacity against adjustments in the flow and pressure of the air that crosses the dryer. The characteristics of the compressor and other components of the compressed air generation and distribution system are exposed, and the behaviors that make it necessary to take averages of the flow and pressure in each test. Technical specifications of the equipment used for the measurement of the adjusted and analyzed parameters are also included. The method of pressure and flow adjustment is described, which consists of throttling valves before and after the dryer, to achieve a certain variety of pressures over a given flow rate. Likewise, the procedure for data collection and processing is specified. Results are sorted into dispersion graphs, that indicate the humidity of the dried air at different pressure and flow conditions. It is concluded that when operating the dryer in the range of 0 to 9 SCMH and 3,5 to 6 barg (pressure at the entrance of the dryer) the humidity obtained is 15 ± 6 ppmv, without evidence of a clear dependence of pressure and flow on the drying level. Under such conditions, the air humidity is kept below -40°C dew temperature (at the outlet pressure of the dryer), which is in accordance with the ISO 8573-1 Class 2 air requirement, which the manufacturer declares within the specifications of the equipment.

Keywords: *Air drying, humidity, desiccant, compressed air.*

1. Introducción

El aire comprimido ha cobrado importancia en la industria por su capacidad como medio de almacenamiento y distribución de energía, empleada en el accionamiento de maquinaria y dispositivos de control neumático. Esta tecnología ha permitido el desarrollo de máquinas de alta confiabilidad y duración, bajo costo y número de piezas y buena resiliencia ante sobrecargas o bloqueos, lo que le permite resaltar en el medio ante sus pares hidráulicos y eléctricos [1]. Trabajos como el corte, roscado y perforación requieren altas velocidades, demandando potencias que pueden ser fácilmente proporcionadas por el aire comprimido debido a sus altas tasas de liberación de energía, producto de su compresibilidad [1]. Tal ha sido la diversifica-

ción de su uso, que se estima que un 10% de la energía eléctrica empleada por la industria estadounidense es consumida por sus sistemas de aire comprimido [2]. Además, estos sistemas destacan por prescindir de costos asociados a la adquisición, regeneración y reposición del fluido transmisor de potencia, siendo el aire un recurso abundante y de fácil acceso. Sin embargo, el aire ambiental es portador de impurezas en forma de particulados y vapores que representan riesgos para la integridad de los sistemas neumáticos, puesto que pueden insertarse entre piezas móviles, cambiar de fase o desencadenar reacciones químicas [3].

El vapor de agua es un componente del aire que resulta determinante para el confort térmico, la proliferación de microorganismos y la conservación de alimentos, fármacos, madera y productos hidrofílicos. En el aire comprimido, su

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

Tabla 1. Máximo nivel de contaminantes del aire permitido por la clasificación ISO 8573.1: 2010. [3]

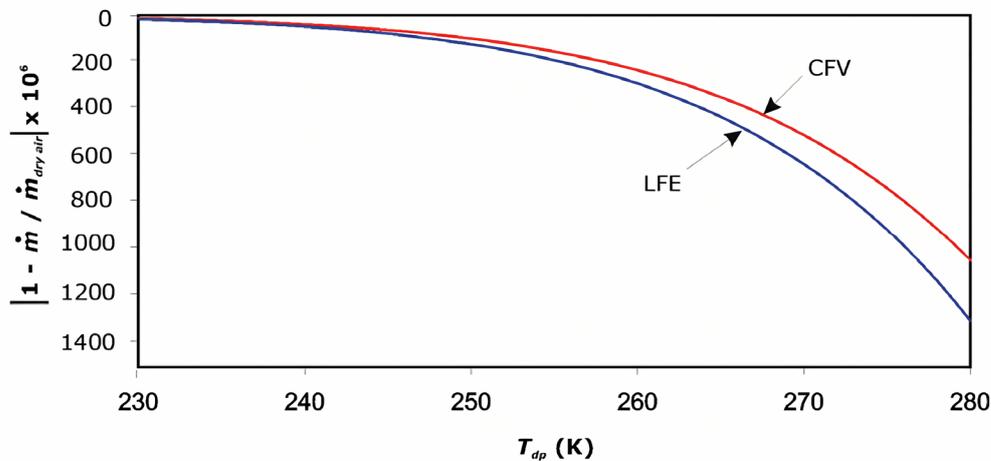


Figura 1. Error en el caudal másico que atraviesa un CFV y LFE, al asumir aire seco empleando aire húmedo con distintas temperaturas de rocío [6].

presencia debe ser controlada con el fin de evitar corrosión en tuberías y piezas de maquinaria, obstrucción de orificios de control, lubricación ineficiente por desplazamiento de aceites, cortos circuitos y formación de hielo a bajas temperaturas [4]. Estos problemas están principalmente asociados a la condensación del agua, a la cual el aire comprimido es especialmente susceptible por la elevación de la temperatura de rocío por encima de la temperatura ambiente, debido al aumento en la presión de vapor (Pw).

En ciertas aplicaciones, el aire debe entrar en contacto con el producto como parte del proceso de fabricación (fluido activo), lo cual exige mayor control sobre el contenido de humedad, dados sus efectos nocivos sobre la calidad del producto. Procesos como el pintado en aerosol, la deposición electrostática, el granallado, el corte por plasma, envasado, el moldeo por soplado, las cortinas de aire y la eliminación de impurezas por aspersión son algunos ejemplos [5]. Sin un adecuado control de humedad, el producto puede presentar discontinuidades, contaminación microbiológica y corrosión.

La Organización Internacional de Normalización (ISO), mediante su norma técnica ISO 8573-1 de 2010, 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 [3]. Los sistemas de tratamiento de aire comprimido suelen indicar la calidad del aire que proveen al especificar la clase ISO del aire que proporcionan.

En metrología, el aire atmosférico seco es utilizado como principal fluido de trabajo para la calibración de medidores de flujo de gas, gracias a su abundancia y composición globalmente uniforme. Sin embargo, de acuerdo con la concentración de humedad, el nivel de exactitud requerido y el principio operativo del medidor, puede resultar conveniente considerar el valor de la humedad y sus efectos sobre el valor de la viscosidad, densidad, masa molar y otros factores de desempeño. John D. Wright del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), ha estimado analíticamente el efecto de la concentración de vapor de agua sobre el caudal másico

inferido por toberas críticas (CFV) y elementos de flujo laminar (LFE), obteniendo así el resultado que presenta la Figura 1. En este gráfico, la curva de LFE se ha invertido para facilitar la comparación [6].

En la Figura 1 se muestra que al asumir aire seco y utilizar aire húmedo con 6,85 °C (9 785 ppm a 1 bar) de temperatura de rocío (Td), se producen errores de 0,14 % y 0,11 % sobre la determinación del caudal másico del LFE y CFV, respectivamente.

1.1 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 (mw/mas), la humedad específica (mw/ms) y la humedad absoluta (mw/Vas) [7]. Para bajas concentraciones, la cantidad de vapor de agua puede expresarse en partes por millón volumen (ppmv) o partes por millón masa (ppmw) [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.

La relación entre presión y temperatura de saturación se puede modelar a través de varios métodos. Uno de éstos es el uso de la ecuación de Clausius–Clapeyron que de forma teórica define el equilibrio másico entre distintas fases de una sustancia, y en cuyo cálculo involucra propiedades termodinámicas del agua según se encuentran documentadas en la literatura [8]. Una forma más práctica de relacionar estas propiedades, es la compilación de datos experimentales mediante ecuaciones desarrolladas por distintos métodos de ajuste. Entre las ecuaciones propuestas por diversos autores, cabe resaltar que recientemente se cuenta con la ecuación publicada por Huang (2018), la cual resulta del desarrollo de la ecuación de Clausius–Clapeyron con 5 coeficientes de modelado y se ajusta al conjunto de datos de referencia de

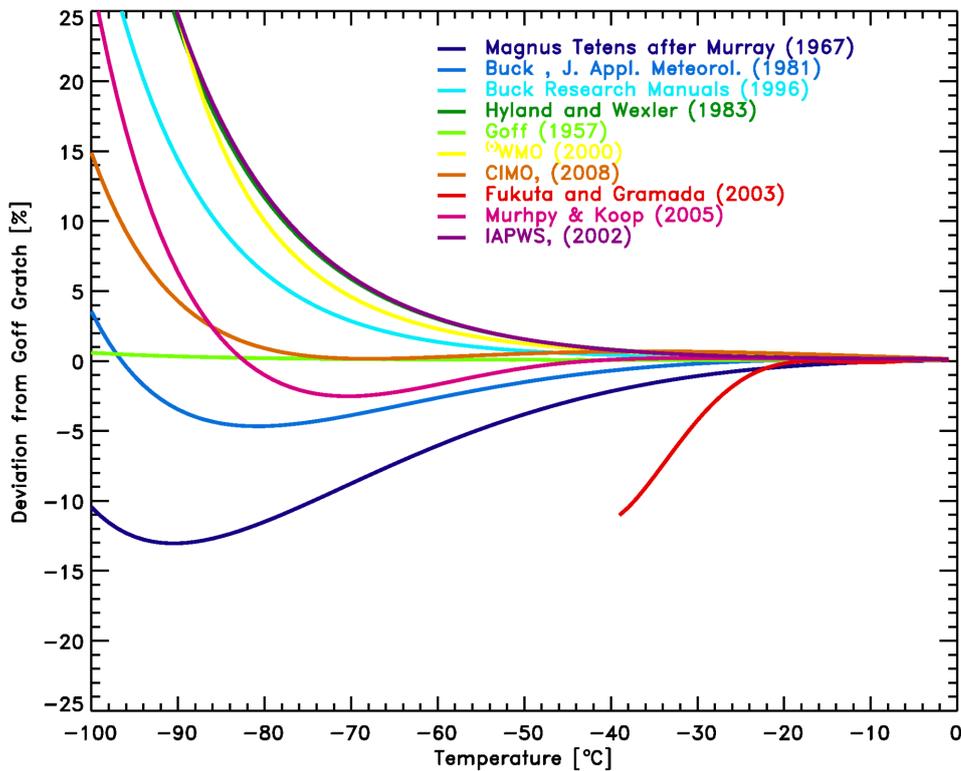


Figura 2. Comparación de ecuaciones para la presión de saturación del agua pura [10].

la Asociación Internacional de Propiedades del Agua y Vapor (IAPWS) con un error medio relativo de 0,006% para el intervalo de -100 a 0 °C [9]. Además de esta propuesta, existe una amplia gama de ecuaciones que se ajustan en mayor o menor medida a los valores experimentales de referencia. Algunas de las fórmulas que han sido aceptadas por parte de entidades reconocidas, son la ecuación de Goff-Gratch (1984), Hyland-Wexler (1983) y Wagner-Pruss (2002) [10]. Algunas fórmulas que han recibido una extensa acogida por su simplicidad y buena aproximación, son la ecuación de Arden Buck (1981) y la fórmula mejorada de Magnus (1996). En la Figura 2 se compara el error relativo de algunas de estas ecuaciones con respecto a la ecuación de Goff-Gratch, que suele ser utilizada como referencia.

Al contar con estas ecuaciones como herramienta para relacionar la presión y temperatura de saturación del agua, resulta práctico expre-

sar 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 [11].

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

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].

1.2 Técnicas de medición de humedad

Los medidores de humedad convencionales operan por principios como psicrometría, condensación, espectroscopía, y magnitudes eléctricas (resistivos, capacitivos) y mecánicas. El psicrómetro trabaja por la obtención de la temperatura de bulbo húmedo, de bulbo seco y la presión total, con las que puede inferir la humedad relativa del aire a partir de tablas de datos. Dada su sencillez, evita problemas relacionados con los efectos de la temperatura, del flujo de aire y de la histéresis, y con la confiabilidad de las mediciones en el tiempo, siendo estos éstos algunos factores a los que son susceptibles otros sensores y materiales [13]. La norma ISO 8573-3 indica a modo de referencia que el rango de medición de los psicrómetros se encuentra en alrededor de -20 a 60 °C T_d , por lo que para menores presiones de vapor es necesario utilizar otros métodos. La condensación, opera en un rango de -80 a 40 °C T_d con una incertidumbre de 1 a 2 °C T_d , de acuerdo a la misma norma. En este mismo rango de medición se encuentran los sensores eléctricos que, aunque más prácticos, compactos y versátiles, tienen incertidumbres de alrededor de 2 a 5 °C T_d [13].

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 3) [14]. 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 [14]. 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 3. Estructura del sensor de óxido de aluminio [14].

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 [15]. En general, este tiempo puede disminuir con altos flujos y temperaturas.

1.3 Técnicas de secado del 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 resul-

ta 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 [17]. 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.

Los secadores de membrana operan por el principio de permeabilidad selectiva, en el que, mediante fibras poliméricas huecas, se consigue el tamaño de poro adecuado para que ocurra la expulsión del vapor de agua por desplazarse hacia el exterior de la membrana. La diferencia de potencial entre la presión de vapor de agua en ambas caras de las fibras induce el desplazamiento del vapor, con lo que se manifiesta una de sus desventajas, que es la variabilidad del nivel de secado en función de la presión y caudal del aire [17].

La absorción es la retención de un soluto por su disolución en la masa del material absorbente, llegando a formar con él una misma fase [18]. Los delicuescentes son materiales higroscópicos que forman soluciones líquidas al disolver la humedad del ambiente. Algunos de estos son cloruro de zinc, carbonato de potasio e hidróxido de potasio [19]. Su rendimiento puede caracterizarse como una reducción en alrededor de 20 °F en la temperatura de rocío.

Por otra parte, 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

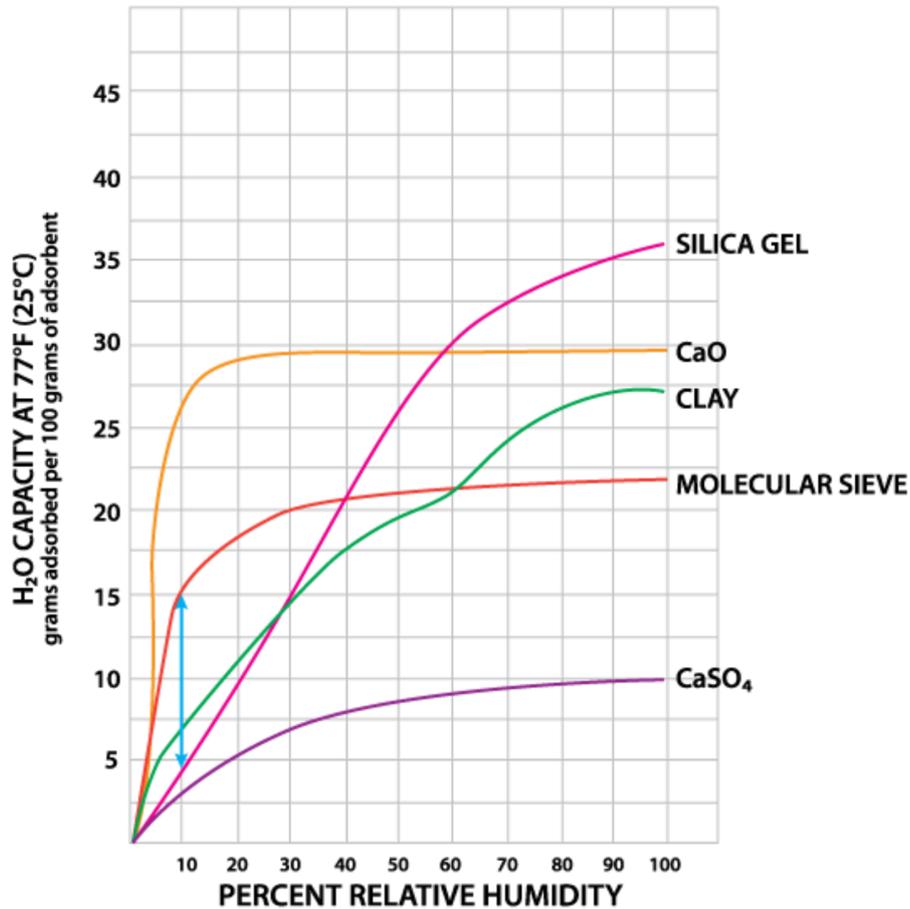


Figura 4. Capacidad de adsorción de vapor de agua para desecantes comunes en contacto con aire a distintas humedades relativas [21].

de fuerzas superficiales [20]. 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 isoterma 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 [21]. En la Figura 4 se compara la capacidad de adsorción de algunos materiales desecantes, al exponerse a distintas

humedades relativas y una temperatura de referencia.

La silica gel, el tamiz molecular y la arcilla son algunos de los desecantes más comunes. La silica 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 [22]. 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.

Aunque de acuerdo con la Figura 4 y 5 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 5).

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 [23]. 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.

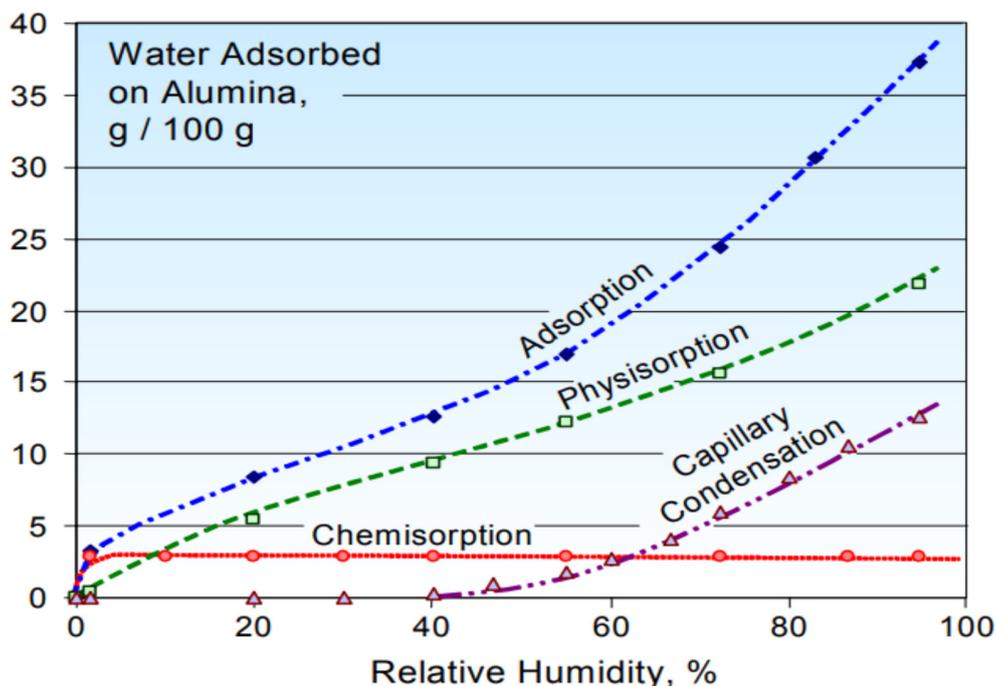


Figura 5. Isoterma de adsorción de alúmina activada [23].

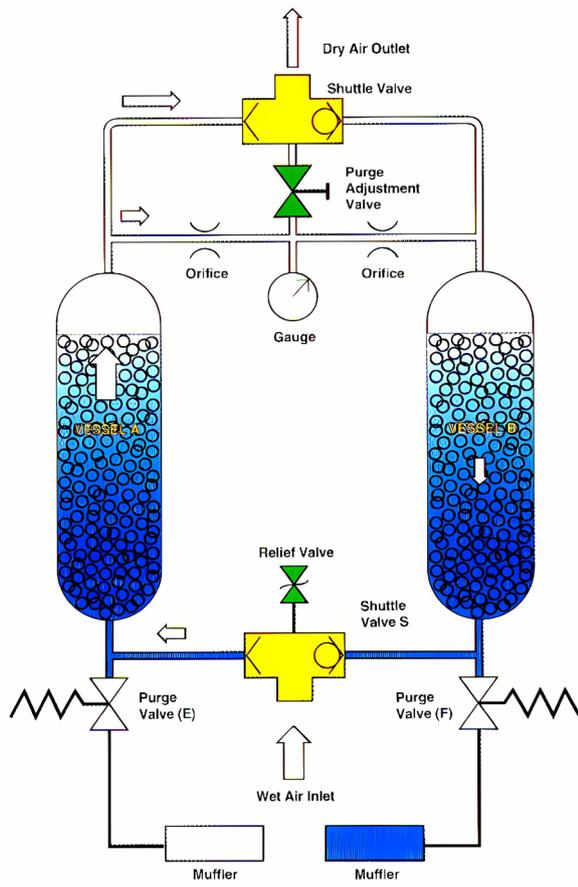


Figura 6. Circuito general para secador desecante de torre dual [24].

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).

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 continua 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 7.

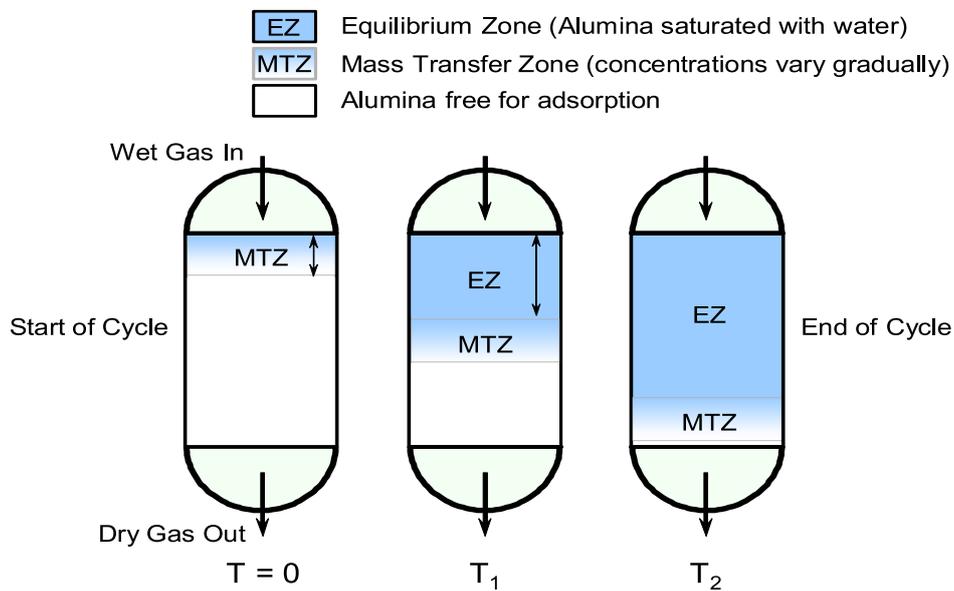


Figura 7. Avance de la zona de transferencia de masa a través del lecho de desecante [23].

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 [23].

El secador objeto de este trabajo es propiedad de la Corporación CDT de Gas y pretende ser utilizado al interior del laboratorio de metrología de fluidos, por lo que es importante analizar cuáles de los anteriores parámetros 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 por su incidencia en la precisión de las calibraciones. El control de temperatura mantiene este parámetro en 20 ± 2 °C. Respecto a la temperatura del aire comprimido que ingresa al laboratorio, la línea de distribución de aire, en su entrada al laboratorio, atraviesa un intercambiador de calor

cuya principal función es asegurar el equilibrio térmico entre el aire y el ambiente del laboratorio. Este descenso en la temperatura da lugar a la formación de condensado, el cual es expulsado al final del intercambiador por la acción de un separador de agua. Considerando estas condiciones es posible asumir que la humedad relativa del aire que ingresa al laboratorio es del 100%, con variaciones en el contenido de vapor de agua según sea la presión en la línea. El separador de agua y el filtro coalescente a la entrada del secador aseguran que el agua condensada y en forma de aerosol sea retenida antes de ingresar al 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 cambios en su rendimiento al ser sometido a variaciones en ellos.

2 Metodología

De acuerdo con las eventuales condiciones de operación del secador y las especificaciones técnicas de los equipos de los que se disponen, se diseña un experimento que permita validar la humedad del aire que provee el secador, variando el caudal en el intervalo de 0,5 a 200 dm³/min, y la presión en el intervalo de 3 a 6 barg, según el rango de caudal que puede suministrarse a los patrones primarios de calibración de flujo de gas y la presión en el punto de suministro. Los ensayos emplean equipos para la medición de presión, temperatura, humedad, caudal y componentes como válvulas, conexiones y filtros que se describirán en detalle a continuación.

2.1 Equipo de secado

El secador utilizado es del tipo desecante regenerativo sin aplicación de calor, modelo DA25IM -40°C de la marca Ingersoll Rand. Este secador incorpora un control electrónico que conmuta la función de los lechos desecantes bajo la orden de un temporizador que puede ser ajustado entre 100 y 300 segundos. Al terminar este tiempo, una válvula direccional de 5 vías y 2 posiciones es accionada para redireccionar el flujo hacia la torre en la función de secado. La Tabla 2, presenta algunas de sus especificaciones.

Los secadores Ingersoll Rand de este tipo pueden aportar aire ISO clase 2 (-40°C T_d) y 1 (-70°C T_d) según el modelo [25]. Entendiendo la clase como el 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 T_d, sea cual fuere la presión a la que trabaje el sistema (sin superar la presión máxima de 14 barg indicada por el fabricante). Por lo anterior se esperaría que 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 T_d 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 μm, 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 [26].

2.2 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. La sonda TF incorpora sensores para la medición de presión total, presión de vapor y temperatura, que son necesarias para determinar la humedad del aire en sus distintas expresiones. Las características de cada sensor se presentan a continuación [27]:

- Presión de vapor (P_w): medida con electrodo de óxido de aluminio, para un rango de 20 a -80°C T_d, con una incertidumbre de 2 °C T_d.
- 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, de acuerdo con su certificado de calibración.

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

Tabla 2. Especificaciones de técnicas del secador modelo DA25IM -40 Ingersoll Rand [25].

- Temperatura (T): tomada con un termistor NTC, para un rango de medición de -30 a 70°C e incertidumbre de 0,5 °C.

2.3 Medidor de caudal y presión

El caudal es tomado con el medidor de volumen de gas tipo diafragma, modelo Elster AL-1000. Su máxima presión admisible es de 7 barg y máximo caudal de 32 m³/h. El caudal considerado en el análisis es el caudal promedio en un intervalo de 10 min, para el cual se utilizan medidas de volumen en el medidor al inicio y final de este periodo.

La cantidad de aire que atraviesa el secador no es apropiadamente representada al utilizar el valor de flujo volumétrico únicamente. Esto se debe a que, como es de esperarse, el secador trabajara a distintas presiones y por tanto, una misma cantidad de aire podría ocupar mayor o menor volumen. Para facilitar la comparación de la cantidad de aire que es secado en los ensayos sería más apropiado utilizar el valor del flujo másico; sin embargo, es más comúnmente empleada la conversión de los caudales a unas mismas condiciones de referencia. Las condiciones estándar del aire están definidas por el Instituto de Gas y Aire Comprimido (CAGI) y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) como 20 °C y 1 atm. Debido a lo anterior, se ha decidido representar el flujo de aire en términos de metros cúbicos por hora a condiciones estándar, para lo cual 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.

2.4 Sistema de aire comprimido

El sistema de aire comprimido se compone de un compresor recíprocante de dos etapas, modelo 2340 L5-V marca Ingersoll Rand. Este

compresor está equipado con un intercooler entre las etapas de compresión, el cual busca acercar la compresión a un proceso isotérmico y así disminuir el consumo de energía. Igualmente, incorpora un post enfriador con un sistema de descarga de condensados. El compresor provee 14,7 CFM a condiciones de 90 psig [28], y una presión máxima de 175 psig, entregando aire comprimido hacia un tanque de almacenamiento (pulmón) con 60 galones de capacidad, que es llenado hasta 130 psig. El compresor trabaja de forma intermitente, activándose cuando la presión en el tanque baja hasta 80 psig y desactivándose cuando alcanza el límite de 130 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. Ante los niveles de presión necesarios para obtener el caudal esperado, no se utiliza un regulador de presión, pues aquellos que se tiene a disposición ofrecen una presión máxima de salida de 20 psig que es insuficiente para los caudales 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.

2.5 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

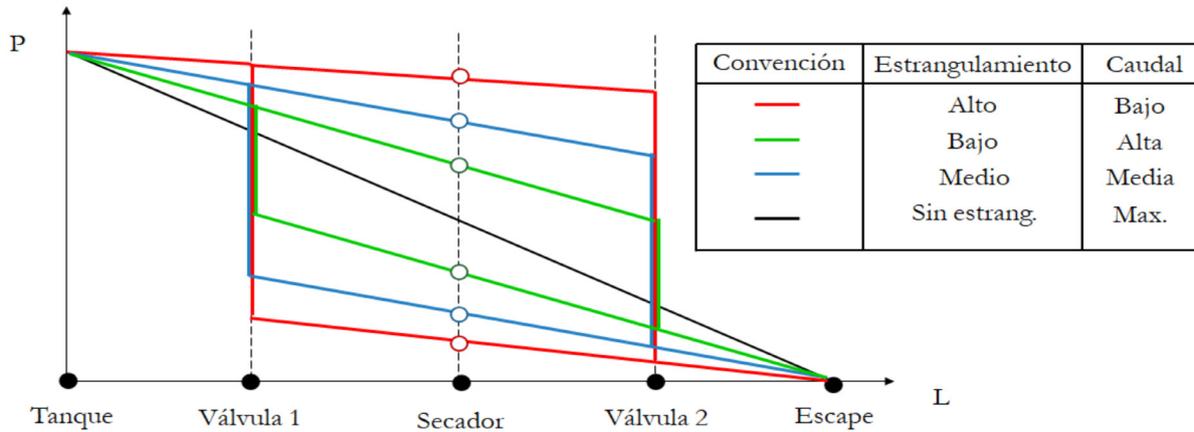


Figura 8. Presión y caudal en el secador, ajustados mediante el estrangulamiento de una válvula antes y después del secador (Autor).

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 8 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.

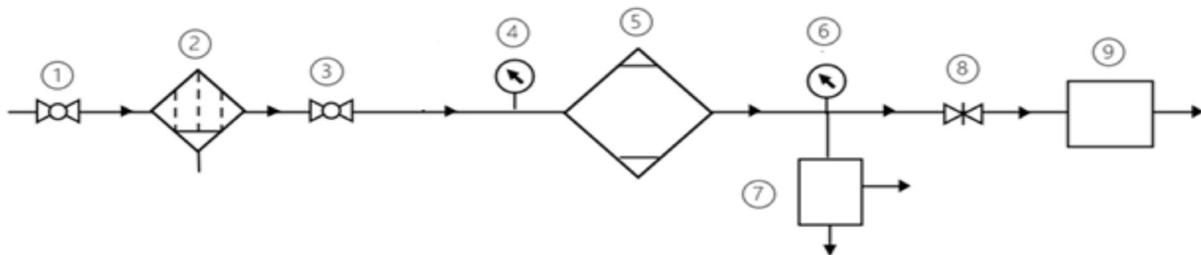
El área encerrada por las curvas de un mismo color representa el rango de presiones que pueden obtenerse en un caudal dado. Como se aprecia a medida que el caudal aumenta, el rango de presiones disminuye hasta reducirse a una sola presión (línea de color negro).

2.6 Montaje

Con los instrumentos y equipos identificados anteriormente, la Figura 9 representa la disposición de los elementos en el montaje.

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*:



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

Figura 9. Esquema de conexión de equipos e instrumentos para la ejecución de pruebas sobre el secador (Autor).

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 a para una presión de 0,25 mbarg y un caudal de 1 000 pies³/h (28,3 m³/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.

2.7 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.

2.8 Ajuste de parámetros

Para simplificar el análisis, se establecen $5,5 \pm 0,4$ bar (alta), $4,5 \pm 0,4$ bar (media) y $3,5 \pm 0,4$ bar (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) 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 ($Q_{pr\bar{m}}$) 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 ($P_{in,pr\bar{m}}$), 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 $Q_{pr\bar{m}}$ y $P_{in,pr\bar{m}}$, se procede a realizar la toma de datos de acuerdo con lo expuesto en la sección 2.9 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 .

2.9 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_{pr}).

$P_{in,max}$ y $P_{in,min}$ para el cálculo de la presión media a la entrada del secador $P_{in,pr}$.

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 su promedio ($P_{o,pr}$).

2.10 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 $P_{in,pr}$ y $P_{o,pr}$ al promediar el valor máximo y mínimo de las presiones a la entrada y salida del secador, respectivamente.
- Obtener el valor de Q_{pr} 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_{pr} 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 6.

$$Q_{pr[SCMH]} = \frac{P_{atm}}{P_{estandar}} * Q_{pr} = \frac{902\,220 [Pa]}{101\,325 [Pa]} * Q_{pr} = 0,89 * Q_{pr} \quad (6)$$

- Promediar los valores de T_d que fueron relativamente estables durante la mayor parte del tiempo para obtener así el valor de $T_{d,pr}$ que será representativo de la humedad del aire en el ensayo.
- Para obtener el valor de ppmv 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 $T_{d,pr}$ en la ecuación 5.
 - Obtener x_w al introducir P_w y $P_{o,pr}$ en la ecuación 1.
 - Obtener ppmv, 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 ppmv (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 $T_{d,pr}$ en la ecuación 5.
 - Obtener la presión de saturación ($P_s(T)$) a la temperatura promedio en la salida del secador ($T_{o,pr}$), introduciendo esta última en la ecuación 5.
 - Obtener HR al introducir P_w y P_s en la ecuación 3.

3. Resultados

Mediante gráficos de dispersión de las figuras 10 a 12, 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.

Como era esperado, en la Figura 12 se muestra que la temperatura de rocío del aire en la salida del secador se ha mantenido inferior a $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 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 12 también puede apreciarse que, a mayores presiones, la temperatura de rocío tiende a acercarse al límite

de $-40\text{ }^\circ\text{C}$, lo cual tiene relación con el aumento de P_w como producto del aumento de la presión total.

A partir de la Figura 10, se encuentra que el contenido de humedad del aire se mantiene en $15 \pm 6\text{ ppm}_v$, sin alguna aparente dependencia entre la humedad y la presión o temperatura. Sin embargo, se puede evidenciar el comportamiento previsto en la sección 2.5, en cuanto a la reducción del rango de presiones posibles para ajustar a media que aumenta el caudal del sistema.

La Figura 11 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 5), 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 ese instante.

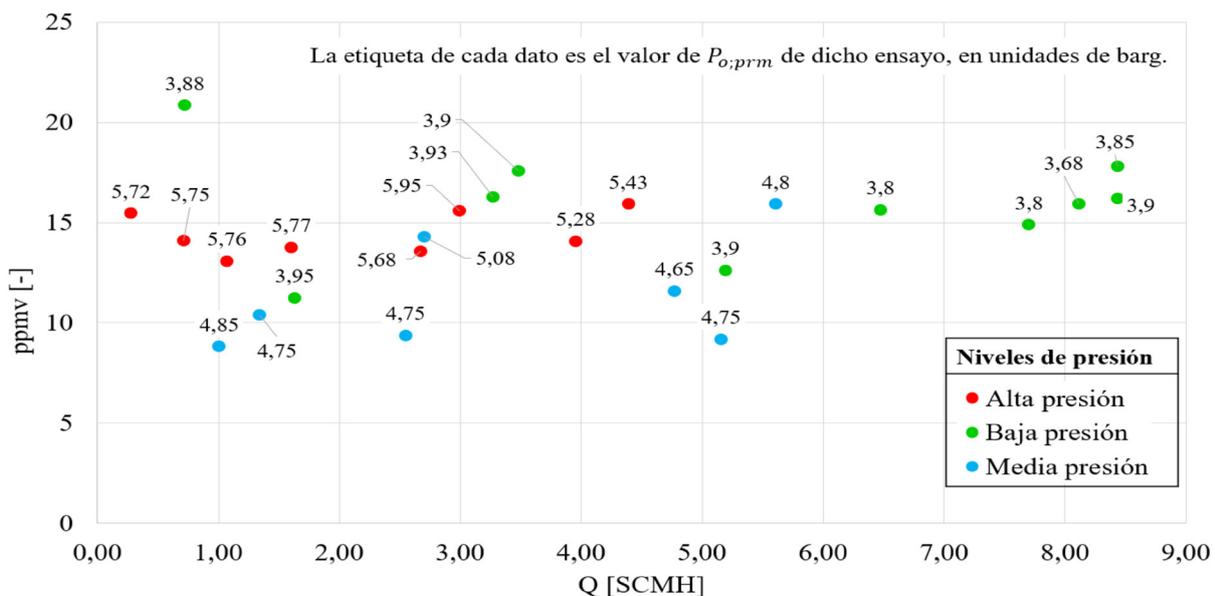


Figura 10. Humedad del aire proporcionado por el secador en términos de ppm_v , para distintos caudales y presiones de aire comprimido.

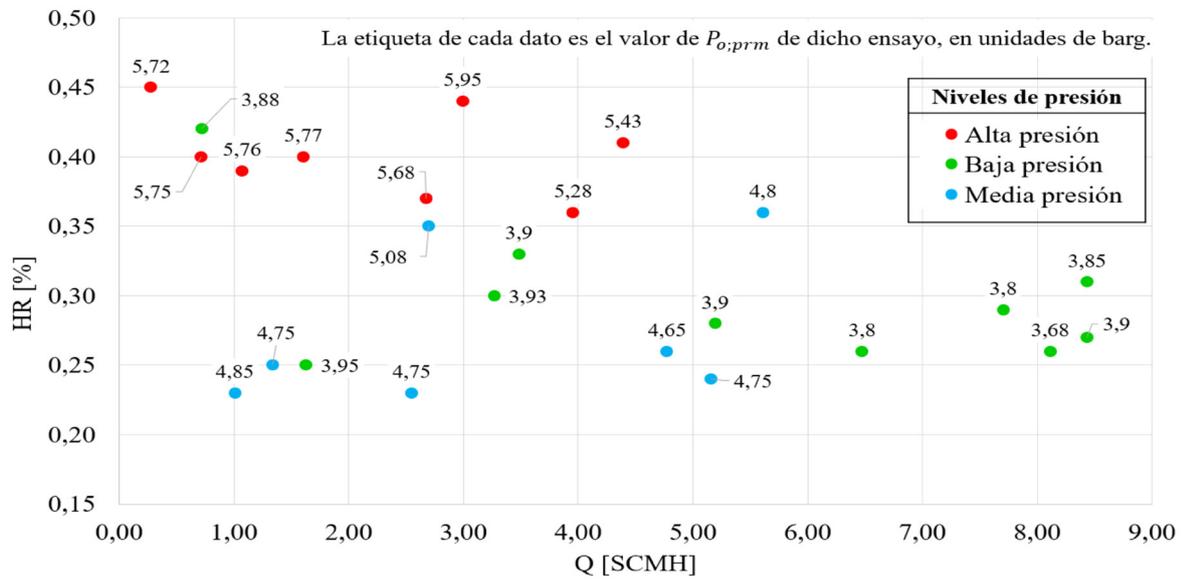


Figura 11. Humedad del aire proporcionado por el secador en términos de humedad relativa, para distintos caudales y presiones de aire comprimido.

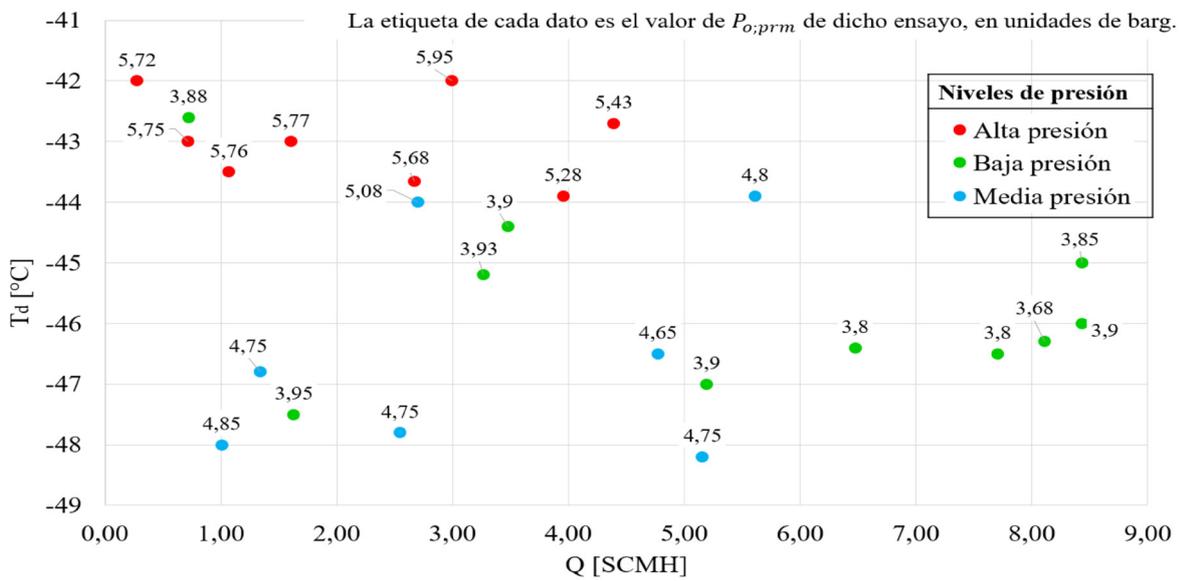


Figura 12. Humedad del aire proporcionado por el secador en términos de temperatura de rocío, para distintos caudales y presiones de aire comprimido.

4. Conclusiones

A partir del análisis de los resultados, son dadas las siguientes conclusiones:

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, al mantener 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 ± 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.

Referencias

- [1] Maester ferreteria. Entrada de Blog: Diferencias entre maquinaria hidráulica, neumática y eléctrica: aprende a distinguirlas , 21-ago-2018. Disponible en: <https://www.masferreteria.com/blog/diferencias-maquinaria-hidraulica-neumatica-electrica-aprende-distinguirlas/>. Accedido enero 10,2023
- [2] U.S. Department of energy. 2001. Assessment of the market for compressed air efficiency services. Pag 1.
- [3] Parker Hannifin Ltd. 2010. Introduction to ISO Air Quality Standards. Catalogo 174004400_01_EN 04/10.
- [4] The Ticsus Company. Publicacion web: A 101 Guide to Air Compressor Condensation and Moisture, 23-oct-2020. Disponible en: <https://www.titusco.com/101-guide-to-air-compressor-condensation-and-moisture/>. Accedido enero 15, 2023.
- [5] CompAir de Gardner Denver. Entrada web: Industrial Manufacturing, 1-nov-2020 Disponible en: [https://www.compair.com/en-is/industries-and-applications/industrial-manufacturing#:~:text=Typical%20uses%20of%20compressed%20air,light%20and%20easy%20to%20handle](https://www.compair.com/en-is/industries-and-applications/industrial-manufacturing#:~:text=Typical%20uses%20of%20compressed%20air,light%20and%20easy%20to%20handle.). Accedido enero 15,2023.
- [6] Wright, J. D. 2003. What is the "best" transfer standard for gas flow. Proceedings of the FLOMEKO, Groningen, The Netherlands, 12-14.
- [7] ASHRAE 2001. Fundamentals Handbook, chapter 6: Psychrometrics. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [8] Mokdad, S., Georgin, E., Mokbel, I., Jose, J., Hermier, Y., & Himbert, M. 2012. On the way to determination of the vapor-pressure curve of pure water. International Journal of Thermophysics, 33, 1374-1389.
- [9] Huang, J. 2018. A simple accurate fórmula for calculating saturation vapor pressure of water and ice. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57(6), 1265-1272.
- [10] National Center for Atmospheric Research, Earth Observing Laboratory. Publicación web: Saturation vapor pressure fórmulations, 7-dic-2016. Disponible en: <https://sciencepolicy.colorado.edu/~voemel/vp.html>. Accedido enero 15, 2023.
- [11] Buck, A. L. 1981. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 20(12), 1527-1532.
- [12] Instrument tools. Entrada web: Moisture calculator, 9-jun-2016. Disponible en: <https://instrumentationtools.com/moisture-calculator/>. Accedido febrero 19, 2023.

- [13] International Organization for Standardization. 1999. Compressed Air – Part 3: Test methods for measurement of humidity. (ISO Standard No. 8573).
- [14] Lesman Instrument Company. Video de webinar: Lesman Fundamentals of Trace Moisture Measurement Using Aluminum Oxide Sensors, a Lesman Webinar, 15-dic-2021. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=uHAfx49bWfs>. Accedido 20 feb, 2023
- [15] General Electric Sensing. 2006. Basic GE Sensing Hygrometry principles: 2-7.
- [16] Air compressor guide. Entrada de blog: Refrigerated compressed air dryer, 25-may-2022. Disponible en: <https://www.air-compressor-guide.com/compressed-air-quality/compressed-air-dryer/refrigerated-compressed-air-dryer>. Accedido Feb 20, 2023.
- [17] Atlas Copco. 2016. White paper Compressed air drying.
- [18] IUPAC. Entrada de diccionario: Absorption, 24-feb-2014. Disponible en: <https://gold-book.iupac.org/terms/view/A00036>. Accedido Feb 21, 2023.
- [19] vadequimica. Entrada web: Higroscopia, ¿qué es y qué compuestos que tienen esta capacidad?, 30-ene-2017. Disponible en: <https://www.vadequimica.com/blog/2017/01/higroscopia-que-es-y-que-compuestos-tienen-esta-capacidad/>. Accedido 21 feb, 2023.
- [20] IUPAC. Entrada de diccionario: Absorption, 24-feb-2014. Disponible en: <https://gold-book.iupac.org/terms/view/A00155>. Accedido Feb 21, 2023.
- [21] Sorbent Systems. Entrada web: Chart compositions, 4-ene-2001. Disponible en: https://www.sorbentsystems.com/desiccants_charts.html. Accedido Feb 21, 2023.
- [22] Jalonzeolite. Entrada web: Activated alumina vs. silica gel: All you need to know, 19-ene-2022. Disponible en: <https://www.jalonzeolite.com/activated-alumina-vs-silica-gel-all-you-need-to-know/>. Accedido Feb 21, 2023.
- [23] Olivier Deuceux, Cyril Lavigne, Christophe Nedez, Axens IFP Group Technologies. 2001. Air and Gas Drying with Activated.
- [24] Vmac. Entrada de blog: What are Dual Tower Regenerative Desiccant Air Dryers (and how do they work?) 7-nov-2016. Disponible en: <https://www.vmacair.com/blog/dual-tower-regenerative-desiccant-air-dryers-work>. Accedido Feb 21, 2023.
- [25] Ingersoll Rand. Entrada de web: Modular Heatless Desiccant Dryers 5-300 m3/h (3-176 SCFM), 11-abr-2021. Disponible en: <https://www.ingersollrand.com/en-us/air-compressor/air-compressor-dryers/modular-heatless-desiccant-dryers-5-300-m3-h>. Accedido Feb 21, 2023.
- [26] Ingersoll Rand. Entrada de web: F-Series Filters - Ingersoll Rand, 22-may-2022. Disponible en: <https://www.ingersollrand.com/en-us/air-compressor/parts-and-accessories/filters/f-series-filters>. Accedido Feb 21, 2023.
- [27] GE sensing. 2005. TF series Panametric Aluminium Oxide Moisture Probe, Brochure.
- [28] Ingersoll Rand. Entrada de web: 2340L5-V Two Stage Cast Iron Air Compressor, 26-feb-2021. Disponible en: <https://ingersollrandcompressedair.com/2340l5-v-two-stage-cast-iron-air-compressor.html>. Accedido Feb 21, 2023.