



Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Química

Diseño y prototipo de porómetro basado en
sensores capacitivos para medida de la
transpiración en plantas

Autor

Pablo Soriano Iniesta

Directores

Eustaquio Gil Pelegrín
Carlos Sagüés Blázquez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014

Agradecimientos

Me gustaría emplear esta página en dar las gracias a todos los que han colaborado conmigo y con este proyecto, que supone el fin de mi vida de estudiante, y el inicio de mi vida profesional como ingeniero. A mis directores, el Dr. Eustaquio Gil, por confiar en mi capacidad para sacar este proyecto adelante y en mis decisiones y mi trabajo, poniendo a mi disposición su tiempo, conocimiento y presupuesto. El Dr. Carlos Sagüés, que me ha ayudado en tantas ocasiones, por orientarme a lo largo de estos últimos meses, por su tiempo, y sobre todo por su consejo.

Quiero agradecer también la ayuda recibida por el resto de investigadores y personal que ha colaborado conmigo en el desarrollo de este proyecto, el Dr. José Javier Peguero, el Dr. Domingo Sancho, y D. Carlos Gracia, atendiéndome siempre que lo he necesitado.

No me olvido de mencionar a otros que han estado conmigo de formas distintas. A la asociación IAESTE, y a todos los que la componen. Gracias por todos los buenos momentos. Quiero agradecer especialmente a los de que han estado siempre, D. Daniel Mandado y D. Mario Herrer, no sólo en los buenos momentos, sino también cuando más falta me han hecho, en los malos. Juntos hemos conseguido mucho, y disfrutado aún más. A los todos los que hoy empiezan con ganas y que son el futuro, espero que disfruten tanto como yo lo he hecho, y que la asociación les abra tantas puertas como lo ha hecho conmigo.

Por último, aunque no menos importante, quiero dar las gracias a mis amigos, compañeros y a mi familia, que han estado siempre ahí, y espero que estén mucho tiempo más.

Sé que mi persona y mi trabajo son como son por todos aquellos que han estado conmigo y por todas las situaciones que he vivido. Gracias a la gente que me ha acompañado en mis aventuras por el mundo, por ellos he aprendido a tener una mente abierta y a apreciar las diferencias. Creo verdaderamente que cuando se trata de buenos amigos no importa la distancia, siempre se podrá encontrar la ocasión de salvarla.

Diseño y prototipo de porómetro basado en sensores capacitivos para medida de la transpiración en plantas

RESUMEN

El presente proyecto se ha realizado en el marco de colaboración del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) y la Universidad de Zaragoza. Se han invertido más de seis meses a tiempo completo en la realización del mismo, tiempo en el que se ha trabajado estrechamente con personal investigador y de servicios del CITA, en el área de la fisiología vegetal de la unidad de recursos forestales, y de la Universidad de Zaragoza, en el departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas.

El objetivo del proyecto es diseñar un prototipo de porómetro basado en sensores capacitivos para la medida de transpiración en plantas. Los investigadores del CITA han identificado la necesidad de disponer de un instrumento de este tipo, lo cual no existe en el mercado actual, y de aquí surge la necesidad de este proyecto. Se pueden encontrar analizadores de gases para medida de transpiración y fotosíntesis, usados para la investigación en campo, muy precisos, pero tienen altas demandas energéticas y de fungibles, son complejos, pesados y caros. Este proyecto propone un diseño innovador de porómetro, para medida exclusiva de fotosíntesis basado en tecnología distinta a la empleada habitualmente, la de sensores capacitivos.

Ya que el objetivo general del proyecto es muy amplio, se han acotado líneas de trabajo en las cuales centrarse, fundamentalmente tres.

La primera se centra en el fundamento teórico, en la descripción de los fenómenos fisiológicos involucrados que se quieren medir. Con objeto de conciliar los intereses de la fisiología y de la ingeniería se recurre a un modelo que describe la fisiología desde el punto de vista de la física, el modelo SPAC (continuo suelo-planta-atmósfera). Una vez entendida la dimensión del problema, se han explorado las distintas formas de abordarlo, analizando de forma razonada sus ventajas y desventajas. Se llega a la conclusión de que un diseño en flujo abierto reúne las características que mejor se ajustan a las deseadas.

La segunda parte se ha centrado en el desarrollo de un modelo matemático en Matlab que permita representar el sistema que se diseña y simular su comportamiento ante diferentes situaciones. Uno de los fundamentos del proyecto, el empleo de sensores capacitivos, presenta ventajas e inconvenientes inherentes a su naturaleza. Entre las ventajas, se encuentran reducido tamaño, peso, coste y robustez, y entre los inconvenientes, destacan la limitada exactitud y precisión de la que disponen. Estas simulaciones han permitido identificar los regímenes de operación del instrumento, estudiar los errores que se generarían por las limitaciones técnicas, así como el diseño de un sistema de autocalibrado necesario para mejorar la fiabilidad del sistema hasta niveles adecuados, todo ello basado en el rendimiento real que proporcionan los sensores disponibles en el mercado.

La tercera parte se centra en el diseño del prototipo. Conocidos los fenómenos involucrados y el modelo de proceso de datos necesario para el correcto funcionamiento del instrumento, se ha explorado exhaustivamente los mercados de sensores, procesamiento de datos, elementos neumáticos, y accesorios necesarios para el diseño de un prototipo y se describen todos los elementos necesarios para el diseño del prototipo, detallándose tamaños, formas de conexión, de tratamiento de datos y toda una serie de aspectos prácticos que resultan en un diseño completo y satisfactorio del porómetro basado en sensores capacitivos que se tenía como objetivo general.

Índice general

Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Estado del arte	2
1.3. Objetivos y Alcance.....	5
Capítulo 2: Fundamento teórico	7
2.1. Introducción a los fenómenos fisiológicos y modelo SPAC.....	7
2.2. La transpiración como un proceso de difusión.....	10
2.2.1. Sistemas cerrados o transitorios	13
2.2.2. Sistemas de balance nulo.	14
2.2.3. Sistemas abiertos o de flujo constante.....	14
2.3. Comparación y elección del sistema a emplear	15
Capítulo 3: Desarrollo del modelo y discusión	17
3.1. Sistema de unidades	17
3.2. Modelo de sistema abierto.....	18
3.3. Implementación del modelo y discusión	21
3.4. Corrección al modelo mediante autocalibración y discusión	25
Capítulo 4: Diseño del prototipo.....	29
4.1. Elección de sensores	29
4.1.1. Medida de humedad y temperatura.....	29
4.1.2. Medida de temperatura de la hoja.....	30
4.1.3. Medida de caudal	31
4.1.4. Medida de presión	32
4.2. Procesamiento de datos	32
4.3. Elementos no sensitivos.....	33
4.3.1. Cámara de medida	33
4.3.2. Materiales	35
4.3.3. Conducciones	35
4.3.4. Filtro de partículas.....	36
4.3.5. Cámara de homogeneización.....	36
4.3.6. Bomba, válvulas y purga	36
4.3.7. Ubicación de sensores de humedad y temperatura	37
4.4. Análisis Económico.....	37
4.5 Implementación del prototipo	39
Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras	41
5.1. Conclusiones	41
5.2. Líneas futuras	42
Bibliografía.....	43
Índice de figuras	45

Índice de tablas	47
Anexos	49
Anexo I – Funciones Matlab de cálculo del porómetro y de presiones de vapor	50
Anexo II – <i>Script 'EnsayosPorometro.m'</i>	52
Anexo III – <i>Script 'ErroresPorometro.m'</i>	53
Anexo IV – <i>Script 'EstadisticaErrores.m'</i>	56
Anexo V – Estudio de los errores generados en el sistema inicial	59
Anexo VI – <i>Script 'EstadisticaErroresAutoZero.m'</i>	63
Anexo VII – Estudio de los errores generados en el sistema autocalibrante	67
Anexo VIII - Sensores de humedad y temperatura	71
Anexo IX – Medida de temperatura de hoja	74
Anexo X - Caudalímetro	77
Anexo XI - Sensores de presión	80
Anexo XII - Volumen de cámara de homogeneización	82
Anexo XIII - Pérdidas de carga en conductos y accesorios	86
Anexo XIV - Bomba y válvulas de regulación	90
Anexo XV – <i>Sketch de Arduino</i>	93

Capítulo 1: Introducción

1.1. Motivación

La fisiología vegetal es la ciencia que estudia las funciones orgánicas de los órganos y tejidos vegetales de las plantas. Explica cómo las plantas realizan sus funciones fisiológicas, como la fotosíntesis, la respiración o la transpiración, fenómenos de transporte, nutrición, crecimiento... Estos son mecanismos complejos que es necesario conocer y aplicar en materias tan diversas como la producción agraria, la economía agroalimentaria o la conservación de la diversidad y el estudio de las masas forestales.

El Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) es un organismo público de investigación perteneciente al departamento de Industria e Innovación del Gobierno de Aragón. Su labor fundamental es conseguir, mediante la investigación, el desarrollo tecnológico, la formación y la transferencia que las explotaciones agrarias y las empresas agroindustriales innoven continuamente. Con ello pretende que la población activa agraria, y el resto de la población rural, obtenga una mayor rentabilidad económica, y como consecuencia, una mejor calidad de vida.

Las líneas estratégicas de I+D+i del centro pueden englobarse en tres:

- Conservación de los recursos genéticos – Mantenimiento y conservación de recursos vegetales y animales.
- Optimización y mejora de la producción agraria.
- Desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles.

Dentro de ésta última línea estratégica está la Unidad de Recursos Forestales. Se desarrolla investigación en el área de la fisiología vegetal entre otras, en la cual tiene su aplicación lo desarrollado en este proyecto.

En la actualidad hay tecnología disponible para medir transpiración (intercambio de vapor de agua con la atmósfera) y fotosíntesis (intercambio de CO₂ con la atmósfera) en plantas. Estos instrumentos se emplean para controlar el estado de una planta, estudiar su respuesta a determinadas condiciones o realizar investigaciones fisiológicas o de otros tipos. Sin embargo, se han detectado por parte de los investigadores deficiencias en cuanto a instrumentos de medida de estos parámetros, y de ahí nace la motivación para la realización de este proyecto, que se centra en el diseño de un prototipo para la medida exclusiva de la transpiración en plantas basada en sensores capacitivos. Las mayores deficiencias encontradas en los analizadores de gases comerciales están relacionadas con el elevado gasto energético para un instrumento que debe ser portátil, la gran complejidad, la necesidad de químicos para el correcto funcionamiento, el peso y el precio. La razón es que miden tanto transpiración como fotosíntesis.

Los analizadores de gases comerciales para transpiración y fotosíntesis son equipos de gran precisión dados los reducidos flujos de CO₂ de fotosíntesis, pero los flujos de agua de transpiración son mucho mayores, no siendo necesaria una tecnología tan compleja para su medida. A pesar de ello, no hay soluciones comerciales satisfactorias para la medida exclusiva de transpiración.

Este proyecto se desarrolla entre el CITA y la Universidad de Zaragoza, en el campo de la medida de transpiración en plantas. Los instrumentos de medida de estos parámetros tienen un mercado limitado para el cual no existe una gran diversidad de soluciones tecnológicas, y están poco adaptadas a las necesidades del investigador. El diseño que se propone en este proyecto permite solucionar los anteriores problemas planteados, siendo de utilidad para la investigación.

1.2. Estado del arte

Entre todos los parámetros empleados por los investigadores para conocer el estado de las plantas y masa vegetales (disponibilidad de nutrientes en el suelo, cantidad de luz y acceso a la misma, estado hídrico...) las más importantes son la fotosíntesis y la transpiración.

La transpiración vegetal es consecuencia de la necesidad de las plantas de capturar CO_2 de la atmósfera para realizar la fotosíntesis. Para esto han de abrir un camino al flujo de gases a través de las hojas y no pueden evitar perder agua durante el proceso. Es por esto que fotosíntesis y transpiración están relacionadas, dándose una cuando se da la otra. Una tasa alta de fotosíntesis se traduce en un elevado flujo de CO_2 , y por tanto una transpiración elevada al estar los estomas abiertos. Al revés ocurre cuando la tasa de fotosíntesis neta es baja, que la transpiración es limitada por la pequeña apertura estomática. En la figura 1 se muestra la relación que se da entre transpiración y fotosíntesis.

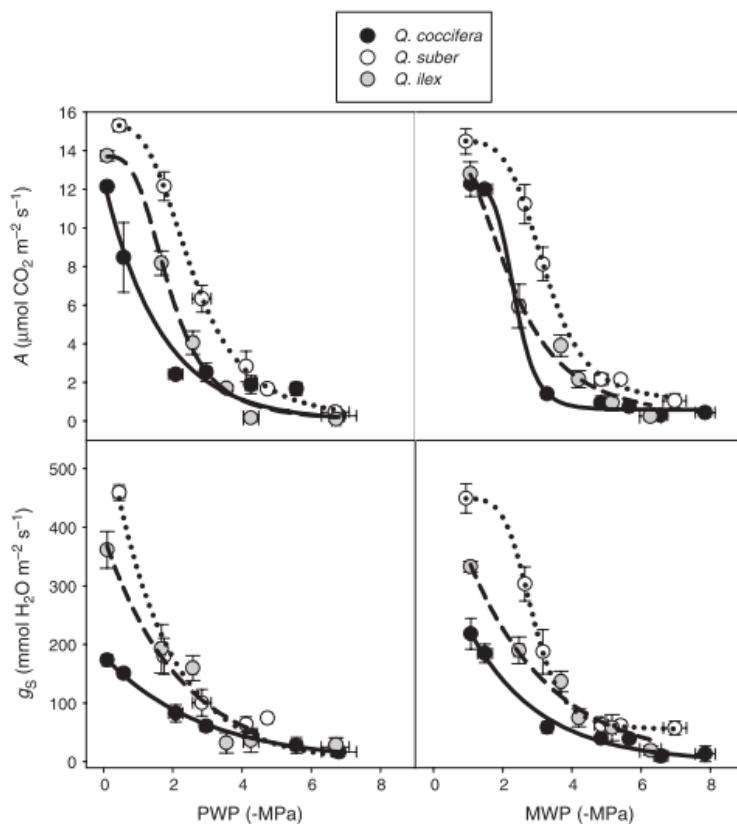


Figura 1 – Valores de fotosíntesis (arriba) de resistencia estomática (abajo) para *Q. Coccífera*, *Q. Suber* y *Q. Ilex* en función del potencial hídrico antes del amanecer (izquierda) y al mediodía (derecha)

Es posible para un fisiólogo experto con conocimiento de la especie en estudio establecer una correlación entre los valores de fotosíntesis y los de transpiración y resistencia estomática [1] y por tanto inferir el estado hídrico de la planta a través del conocimiento de éstos únicamente. Se muestra en la figura 1 la estrecha correlación entre valores de fotosíntesis (arriba) y de transpiración (representada a través de la conductividad estomática, abajo).

Las principales compañías que comercializan estos sistemas son LI-COR y PP-Systems. La tendencia desde los años 70 que se desarrollaron los analizadores de gases basados en infrarrojos (IRGAs)[2] y especialmente desde los años 90 que estos medidores eran capaces de medir en mezclas de gases con gran precisión[3], las compañías han optado por esta tecnología para la

construcción de sus analizadores de gases (instrumentos de medida de transpiración y fotosíntesis en plantas).

En la figura 2 se puede ver el Ciras 3 de PP-Systems, el último modelo de analizador de gases en el mercado. Este modelo de instrumento realiza múltiples funciones. Además de analizador de gas (CO₂ y H₂O), incluye funciones de calibración, control ambiental, control de CO₂, control de H₂O, control de temperatura, control de luz, y opcionalmente incluye un módulo de fluorescencia para la clorofila. El ordenador integrado tiene una interfaz que permite la presentación y recolección de datos, medidas y cálculos de parámetros de fotosíntesis y transpiración y programación de experimentos. Tiene una gran cantidad de accesorios en cuanto a cámaras de medida para distintas hojas y otros módulos auxiliares [4].



Figura 2 – Ciras 3, Medidor de transpiración y fotosíntesis de PP-Systems.

En la figura 3 se representa el modelo de LI-COR, Li-6400XT. Tiene unas características similares al anteriormente mencionado de PP-Systems, es un analizador de gas (CO₂ y H₂O), presenta control ambiental de las características del aire de entrada en cuanto a concentraciones y temperatura, control de luz. Cuenta con funciones de adquisición de datos y conectividad amplios, y un software flexible para multitud de funciones, así como accesorios para diversos tipos de plantas, flujos de suelo, fuentes de luz, fluorescencia y otros [5].



Figura 3 – LI-COR LI-6400XT, medidor de transpiración y fotosíntesis de LI-COR

Hay dos compañías menores que manufacturan porómetros para medida exclusiva de transpiración en plantas, el SC-1 de Decagon y el AP4 de Delta-T. Los investigadores han probado estos instrumentos y han proporcionado resultados insatisfactorios. Los fabricantes indican

imprecisiones de entre ± 10 y $\pm 20\%$, obteniendo los peores resultados a bajas transpiraciones. Estos porómetros no son una opción viable.



Figura 4 – Porómetro AP4 de Delta-T (a) y porómetro SC-1 de Decagon (b)

En cuanto a los analizadores de gases, la gran precisión es una ventaja para la medida de los extraordinariamente bajos cambios en la concentración de CO_2 , del orden de algunas pocas partes por millón, pudiendo obtener medidas de gran calidad, así como curvas de comportamiento y otros parámetros relevantes, pero presentan también una serie de inconvenientes:

- Gran complejidad del sistema: requieren de componentes frágiles y de alto coste, de un ordenador integrado en el mismo y una electrónica muy específica, lo que hace imposible de modificar, adaptar o reparar por el usuario llegado el caso. Requieren también de calibraciones periódicas.
- Precio: estos instrumentos tienen un coste muy alto, en el intervalo de los 40.000 a 70.000 € en adquisición, más los costes de calibraciones y mantenimiento posterior.
- Elevado gasto energético: debido a que la línea base de un IRGA es sensible a las variaciones de temperatura, se hace necesario elevarla en la cámara hasta un valor de 54°C , ya que variaciones de la temperatura ambiente falsearían las medidas. También incluyen múltiples sistemas de procesamiento y control.
- Tiempo de estabilización: se necesitan un mínimo de 10 o 15 minutos de calentamiento y estabilización del instrumento desde que se enciende hasta que se puede medir con él. Además de tiempo, conlleva un gasto energético.
- Falta de portabilidad: estos equipos tienen un peso total entre 6 y 10 kg. Ya que son equipos para la medida en campo y la autonomía de las baterías es muy limitada, necesitan además un grupo eléctrico junto con el porómetro debido a que la autonomía con las baterías es muy limitada.
- Necesidad de fungibles: estos instrumentos han de controlar el aire de entrada en humedad y cantidad de CO_2 por lo que llevan una serie de columnas con químicos para secar el aire y para retirar el CO_2 . Posteriormente necesitan una fuente externa de estos gases.

1.3. Objetivos y Alcance

Se establece como objetivo general de este proyecto el diseñar un instrumento de medida estrictamente de transpiración, sin incluir fotosíntesis como en los instrumentos comerciales. Se propone resolver este problema mediante la aplicación de sensores capacitivos, sencillos, robustos y más baratos que los IRGAs empleados en instrumentación disponible comercialmente.

La medida de fotosíntesis es técnicamente mucho más compleja que la de transpiración. Los flujos de fotosíntesis son entre dos y tres órdenes de magnitud menores que los de transpiración, lo que hace indispensable el uso de analizadores de alta precisión. Las recientes mejoras en la tecnología de medida de temperatura y humedad mediante sensores capacitivos hacen que sea viable plantearse el diseño de un porómetro para transpiración basado en esta tecnología. La implementación de un sistema de estas características permitiría solucionar la mayoría de los problemas anteriormente mencionados a cambio de eliminar la medida de fotosíntesis, tecnológicamente mucho más compleja.

Como objetivos específicos se plantean:

- Estudio de los fenómenos y mecanismos implicados en la transpiración y de la tecnología actual en porometría para medirla.
- Discusión y elección del esquema de diseño más adecuado para cumplir los objetivos marcados.
- Desarrollo de un modelo teórico a partir del esquema de diseño idóneo y estudio de la viabilidad técnica del mismo para medida de transpiración.
- Diseño del prototipo: elección de los componentes adecuados de acuerdo a accesibilidad, rendimiento, compatibilidad y otros factores para la implementación del sistema con las características planteadas.
- Discusión de los resultados obtenidos.

Capítulo 2: Fundamento teórico

Es importante conocer los fundamentos fisiológicos relacionados con la transpiración y la fotosíntesis para la realización toma de decisiones relacionadas con el proyecto a desarrollar. Dada la complejidad de éstos, se recurre a modelos simplificados que permiten interactuar con los fenómenos sin la necesidad de entrar en las interacciones biofísicas y bioquímicas de la planta, una tarea mucho más compleja. Un conocimiento adecuado de la transpiración permite buscar el enfoque óptimo del proyecto, identificando las ventajas y limitaciones de cada planteamiento.

2.1. Introducción a los fenómenos fisiológicos y modelo SPAC

La fotosíntesis es el proceso a través del cual se convierte energía lumínica en energía química almacenándola en forma de azúcares, y sirviendo de fuente de energía para las células vegetales. Para que la fotosíntesis tenga lugar únicamente hacen falta CO_2 , agua y luz. Experimentalmente, la fotosíntesis se mide a través de la captación de CO_2 atmosférico en términos de moles o masa por unidad de tiempo y de superficie de estudio. Valores típicos de fotosíntesis están entre $1\text{--}12 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

La transpiración es el fenómeno por el cual una planta pierde agua en estado vapor con la atmósfera a través de su superficie (fundamentalmente por las hojas). Las medidas de transpiración a través de las hojas y el cálculo de la conductancia al vapor de agua son importantes en casi todas las investigaciones sobre el agua en plantas[6]. Es un factor determinante en el balance energético y el estado hídrico de los organismos vegetales. La transpiración se mide experimentalmente a través de la cantidad de vapor de agua que las plantas sueltan a la atmósfera por las hojas, en términos de moles o masa por unidad de tiempo y de superficie de estudio. Valores típicos de transpiración se encuentran en el intervalo de 1 a 6 $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

Los fenómenos de transpiración y fotosíntesis se encuentran directamente relacionados como se ha comentado, y además presentan una fuerte dependencia con la temperatura:

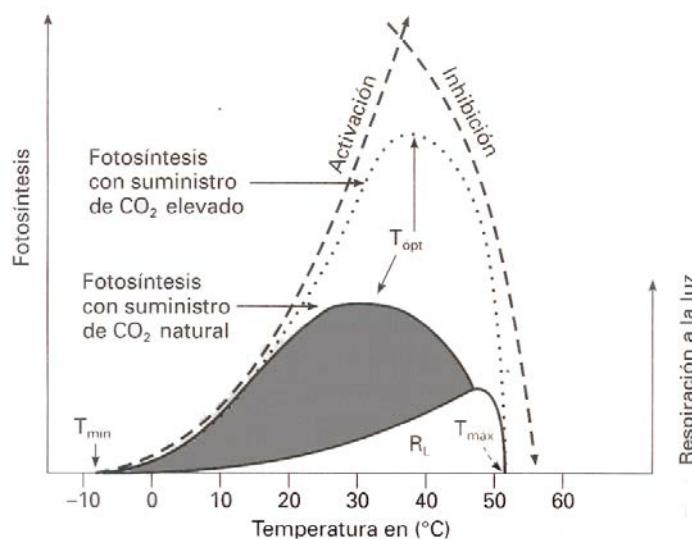


Figura 5 – Dependencia de la fotosíntesis con la temperatura

La fotosíntesis neta es el resultado del balance de tres fenómenos: fotosíntesis bruta, respiración y fotorrespiración. En estos fenómenos hay procesos metabólicos, biofísicos y bioquímicos en los cuales las enzimas tienen un papel fundamental, y que presentan poca actividad a bajas temperaturas, por eso la existencia de una temperatura mínima de actividad. Por otro lado, los fenómenos de respiración y fotorrespiración se incrementan a altas temperaturas, los cuales también requieren de CO_2 , sustrayéndolo del disponible para la fotosíntesis, causa de la existencia de una temperatura máxima de actividad[7].

Existe también una temperatura óptima a la que los fenómenos mencionados se equilibran en la que hay una fotosíntesis neta máxima, y es en las cercanías de esta temperatura donde interesa hacer estudios, donde las plantas están en un estado de alta actividad y desarrollo. En los períodos invernales, donde las temperaturas son menores, las plantas se encuentran en un estado de baja actividad, no siendo de interés para estudio.

La gran complejidad que las plantas exhiben en su estructura y funcionamiento hace necesaria la existencia de modelos que engloben todos estos aspectos. El modelo SPAC (continuo suelo-planta-atmósfera) es una buena aproximación teórica y funcional, ya que analiza el flujo de agua como un proceso dinámico a través de una serie de compartimentos desde la fuente, el suelo, hasta el sumidero final, la atmósfera, y está basado en asemejar el movimiento del agua a través de la planta a la ley de Ohm, empleando conceptos derivados de la física de circuitos eléctricos. Así, se habla de una fuerza motriz entre los extremos del circuito que corresponde al gradiente de potencial hídrico, y una serie de resistencias o capacitancias conectadas en serie o paralelo que limitan el libre movimiento del agua en la planta.

El modelo SPAC sugiere que el potencial hídrico en cada parte del vegetal dependerá del flujo, en caso de que los potenciales inicial y final y la resistencia total al paso del agua se mantengan constantes. De este modo, el control activo del flujo es un requerimiento imprescindible para evitar situaciones irreversibles en el estado hídrico presente y futuro del vegetal, incorporándose una resistencia variable: la resistencia estomática, forma que tiene la planta de controlar su transpiración [8].

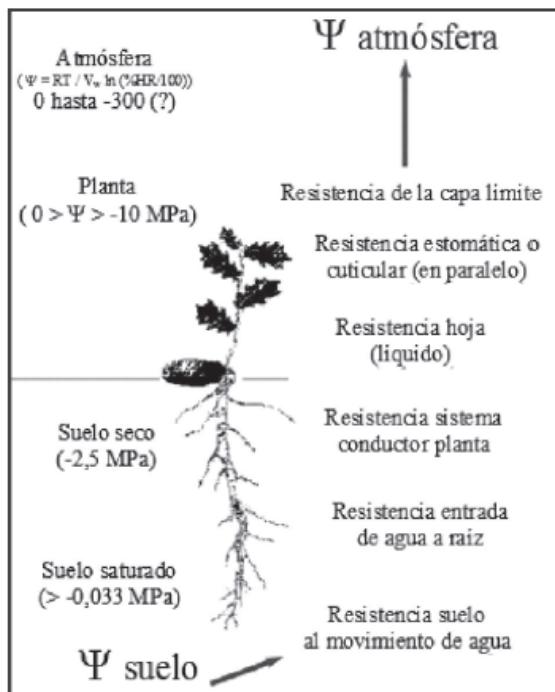


Figura 6 – Esquema del continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC)

Las partes de la planta encargadas de controlar estos fenómenos de intercambio de gases son los estomas, unos grupos de dos o más células epidérmicas especializadas cuya función es regular el intercambio gaseoso según las necesidades de CO_2 , protegiendo a la planta de un

ambiente altamente desecante. Los estomas se encuentran en las partes verdes aéreas de la planta, particularmente en las hojas, y pueden hallarse en una o las dos epidermis, generalmente en el envés [9]. Tienen la capacidad de abrirse y cerrarse en función de factores internos y externos para regular el intercambio de gases con la atmósfera.



Figura 7 – Micrografías de estomas vegetales

La transpiración en plantas ocurre de acuerdo a las leyes que gobiernan la evaporación desde superficies húmedas. El agua se evapora por toda la superficie externa de una planta, así como por todas las superficies interiores que están en contacto con el aire, para así difundir hacia la atmósfera a través de la capa límite. En plantas vasculares la transpiración tiene lugar principalmente por dos vías [10]:

- La transpiración cuticular, en la cual el agua se evapora a través de la cutícula, una capa cerosa externa a la planta que la protege contra la entrada de bacterias y hongos y contra la desecación por exposición a la atmósfera.
- La transpiración estomática, en la cual el agua se evapora dentro de los órganos de la planta, desde la superficie de las células colindantes con espacios intercelulares, llenos de aire. El agua se evapora en esta fase para posteriormente difundir por los estomas.

Desde la superficie de la planta el vapor difunde en la capa límite del aire y por tanto, en la atmósfera. La transpiración estomática en las plantas vasculares es aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que la transpiración cuticular.

La transpiración se ve afectada en gran medida por factores externos tales como la temperatura y la humedad ambiente o la cantidad de luz solar. La transpiración es mayor en condiciones de ambientes secos, temperaturas altas y dosis elevadas de radiación solar. A partir de la apertura estomática, la cual la planta puede regular, se controla esta tasa de intercambio de gases con la atmósfera. En condiciones que se presentan habitualmente en el hábitat natural de la planta y cuando el intercambio gaseoso no está impedido por ningún factor externo, los estomas se encuentran completamente abiertos, denominándose esta situación transpiración máxima. Estos valores se pueden encontrar tabulados y ser usados para como referencia para el diseño posterior. Las plantas de mayor interés para el proyecto presente son las mediterráneas esclerófilas y las especies caducifóleas de zonas templadas.

Plant type		Transpiration with stomata open
Humid tropics	Rainforest trees	Up to 1.8
	Cloud forest trees	0.4 (2-3)
	Lianas	up to 2
Semiarid tropics	Palms	1.2-1.8 (3)
	Dry woodland	0.8-1.4 (2)
	Mangroves	0.6-1.8
Mediterranean sclerophyllous species		(0.6) 1.5-3 (4)
Deciduous forest trees of the temperate zone	Light-adapted species	(1.5) 2.5-3.7
	Shade-adapted species	(0.8) 1.2-2.2
Evergreen conifers		1.4-1.7
Dwarf shrubs	Tundra	0.15-0.45
	Alpine heath	1.8-3
Herbaceous dicotyledons	Tall forbs	9-11 (16)
	Heliophytes	5.2-7.5
	Sciophytes	1.5-3
	Mountain plants	(1.5) 3-6
Grasses, sedges and rushes	Tundra	0.2-0.35
	Meadows	3-4.5
	Reeds	5-10
	Xerothermic sites	(2) 4.5 (9)
Desert plants	Coastal dunes	2-4
	Shrubs and semi-shrubs	2.8-7 (10)
	Cushion and rosette plants	1-5 (8)
Halophytes		1.2-2.5 (4.5)
Succulents	Leaf succulents	0.8-1.8
	Cacti	0.6-1.8
Floating plants		5-12

Figura 8 – Tabla de transpiraciones máximas. Valores en $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$

2.2. La transpiración como un proceso de difusión

El vapor de agua escapa de los tejidos de las plantas por difusión e intercambio con el aire debido a las diferencias de presión y concentración de agua entre los espacios intercelulares y la atmósfera. Considerando el proceso de transpiración como un proceso difusivo se puede modelar como:

$$J^w = g^w \cdot \Delta C^w [\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

Donde:

J^w : Tasa de transpiración [$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$] o [$\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

g^w : Conductancia al vapor de agua [m s^{-1}]

ΔC^w : Gradiente de concentración [$\text{mol H}_2\text{O m}^{-3}$] o [$\text{g H}_2\text{O m}^{-3}$]

Aunque es mucho más común en el campo de la fisiología emplear otra notación y sistema de unidades equivalente, véase:

$$E = g \cdot \Delta w [\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

Donde:

E : Tasa de transpiración [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$] o [$\text{mg H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

g : Conductancia al vapor de agua [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$] o [$\text{mg H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$]

Δw : Gradiente de fracción molar/másica de agua [mol mol^{-1}] o [g g^{-1}]

Tanto la transpiración (E) como la conductancia (g) son parámetros de interés en el estudio fisiológico de una planta. Son unos parámetros determinantes en casi todas las investigaciones relacionadas con el estado hídrico. La expresión de la conductancia al vapor de agua puede derivarse de la ley de Fick [11] y ser expresada como muestra la ecuación 2.

Estas medidas se han realizado tradicionalmente encapsulando la hoja o una de sus superficies dentro de una cámara o cubeta y midiendo el vapor aportado a la atmósfera por transpiración, lo que se denominan porómetros de difusión. Fundamentalmente se han empleado tres estrategias: porómetros transitorios o de sistema cerrado, porómetros de flujo constante o de sistema abierto y porómetros de balance nulo. Cada una de estas tecnologías presenta ventajas y desventajas. Para la elección de un sistema concreto para el presente proyecto se han de evaluar cada una de ellas e identificar la óptima.

La resistencia de la capa límite es un factor importante. El viento retira el aire con alto contenido en humedad y lo reemplaza por aire fresco. En condiciones de calma, al aire en contacto con la hoja tiende a saturarse, reduciendo la capacidad de la hoja para transpirar. En estos casos, el tamaño de la hoja pasa a ser también un factor a tener en cuenta. En condiciones de viento fuerte la resistencia de la capa límite disminuye, y tiende a ser despreciable al ser mucho menor que la resistencia que presentan los estomas. En ese caso desaparece la influencia del tamaño de la hoja.

El flujo de transpiración viene determinado por el gradiente de concentraciones entre la hoja y el ambiente y por la conductancia total, como se muestra en la ecuación 1. Este factor de conductancia total viene determinado por varias conductancias individuales, dispuestas en serie/paralelo como se ilustra en la figura siguiente.

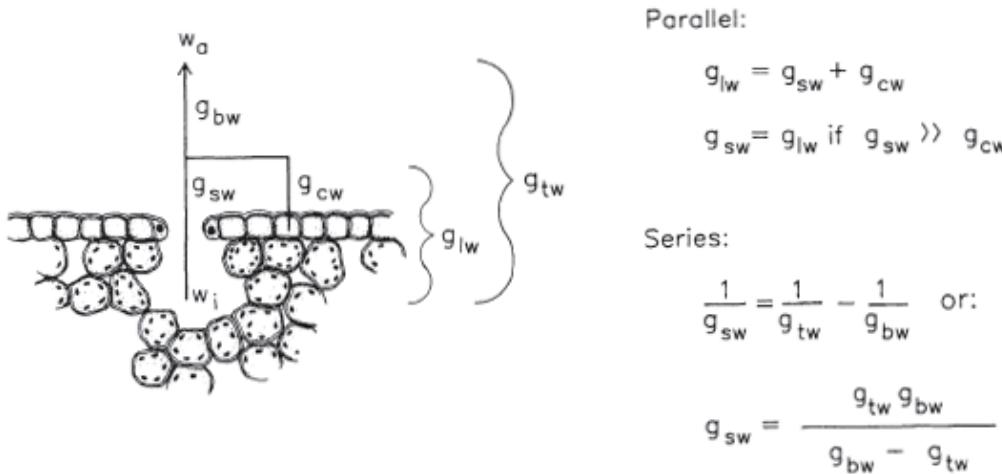


Figura 9 – Red de conductancias dispuestas en serie/paralelo e indicación de las relaciones entre las mismas y simplificaciones comúnmente aceptadas[6].

Los términos que aparecen en la figura hacen referencia a los conceptos que se detallan a continuación. El subíndice w en todos los términos hace referencia al agua:

g_{tw} : conductancia total

g_{lw} : conductancia de la hoja

g_{sw} : conductancia estomática

g_{bw} : conductancia de la capa límite

g_{cw} : conductancia cuticular

Se ha mencionado anteriormente que la cutícula tiene una conductancia 2 órdenes de magnitud menor que los estomas, por lo que se desprecia dicho mecanismo en el análisis, y la conductancia de la hoja será equivalente a la estomática. La influencia que sí se ha de contemplar es la de la capa límite. En términos de resistencia (factor inverso a la conductancia), es un factor a sumar directamente a la resistencia estomática, y que por tanto limita la difusión.

Experimentalmente lo que se puede medir es la conductancia total, pero la que tiene interés científico es la estomática, por lo que se plantean dos opciones:

- Se modela y estima o calcula la resistencia de la capa límite, para poder estimar la conductancia estomática a partir de la total medida y la de la capa límite modelada.
- Se minimiza la resistencia de la capa límite para poder despreciarla en los cálculos, haciendo la conductancia total equivalente a la estomática.

La opción idónea es la segunda, tener en cuenta que se deberá minimizar el efecto de la capa límite a la hora del diseño. El modelado de la capa límite en un ambiente tan complejo como es una cámara de medida hace que sea un problema de envergadura, por lo que no se considera una solución asequible.

Hay disponibles en literatura estudios realizados en hojas planas de dimensiones entre los 0,1 y los 100 cm[6] en los que se ha cuantificado la relación entre la resistencia de la capa límite y otros factores, los resultados se muestran en la figura siguiente:

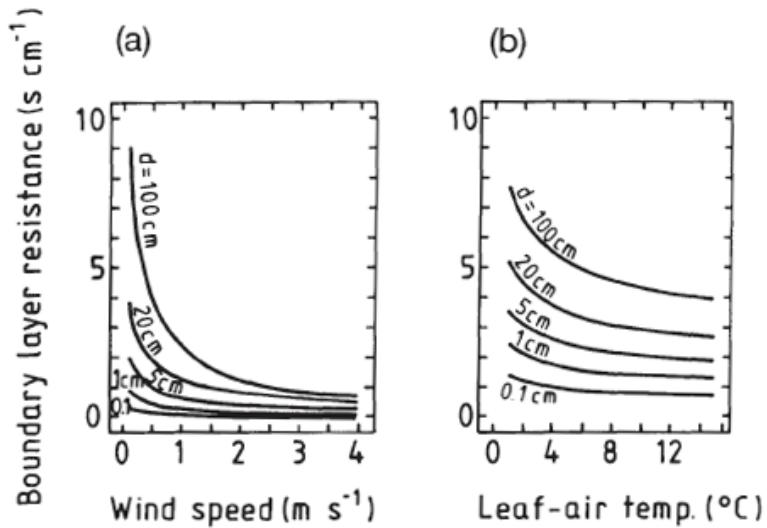


Figura 10 – Resistencia de la capa límite al flujo de vapor de agua en hojas de dimensiones de 0,1 a 100 cm. En (a) se representa el caso de convección forzada, en (b) el caso de convección natural [6]

Para el caso de convección natural del apartado b, la resistencia de la capa límite se ha demostrado depender fundamentalmente de la temperatura, debido a la dependencia del coeficiente de difusión con la misma.

Para el caso más representativo de este estudio mostrado, el apartado a, caso de convección forzada como se tendrá en la cámara de medida, la dependencia dominante es con la velocidad del viento en las inmediaciones de la hoja. En una cámara de medida se tienen condiciones de convección forzada en tamaños pequeños, como entre 1 y 5 cm de los que se muestran en la gráfica. Se observa que la resistencia de la capa límite se hace despreciable, aproximándose a cero cuando la velocidad del viento alcanza valores de 1-2 m/s. Esta condición será tenida en cuenta posteriormente para asemejar la resistencia estomática a la total, por tanto la conductancia estomática a la total.

2.2.1. Sistemas cerrados o transitorios

En este tipo de sistemas las plantas, brotes u hojas se emplazan dentro de una cámara cerrada de forma estanca. Y se hace circular el aire. Debido al intercambio de gases, la cantidad de CO₂ en la atmósfera contenida disminuye y la cantidad de vapor de agua, la humedad ambiente, aumenta. Para realizar las medidas de transpiración se mide la humedad en un determinado momento inicial y tras un periodo de tiempo se realizan las mediciones de nuevo. La diferencia en humedad es debida al vapor aportado por la planta. La variación producida por la planta será función del volumen de la cubeta, de la superficie de hoja expuesta y del tiempo que dure el experimento. La transpiración se calculará como:

$$E = \frac{(C_{H_2O,f} - C_{H_2O,i}) \cdot V}{\Delta t \cdot L} \quad (3)$$

Siendo:

C_{H_2O} : las concentraciones de agua, final e inicial del experimento [mol m⁻³]

V : Volumen de la cubeta de medida [m³]

Δt : Duración del experimento de medida [s]

L : Área de la hoja en contacto con la atmósfera contenida o de referencia [m²]

Estos sistemas fueron los primeros en desarrollarse. El diseño básico ha sufrido modificaciones a lo largo de los años pero el principio de operación se ha mantenido básicamente el mismo. Una pequeña cámara que contiene el sensor de humedad se sujet a la hoja a medir y se mide con precisión el tiempo necesario para el cambio de humedad entre dos niveles previamente seleccionados o bien el cambio de humedad para un intervalo de tiempo previamente fijado. En el caso de porómetros sin agitación las medidas dependerán de la geometría de la cámara, del sensor y de la hoja. Aunque en teoría es posible calcular la conductancia estomática a partir del incremento en humedad en la cubeta, el retraso, la dinámica de los sensores y la absorción de agua en la cubeta hacen que sea necesaria la calibración empírica del porómetro. Estos sistemas tienen una aplicabilidad limitada ya que modifican las condiciones naturales de la planta al encerrar la hoja dentro de una atmósfera que aumenta en humedad y temperatura, por tanto reduciendo el gradiente de humedad, modificando la tasa de transpiración y pudiendo afectar a la apertura estomática y ser por lo tanto una fuente de falsedad en las medidas.

Estos porómetros son de construcción simple y relativamente barata respecto a otros sistemas. Puede incrementarse la precisión de este sistema incluyendo varios ciclos de medidas, generalmente cuatro o cinco, entre los cuales se restablecen las condiciones naturales y se recomienza el proceso.

2.2.2. Sistemas de balance nulo.

En este tipo de sistemas la hoja se encierra en una cámara o cubeta igual que en el anterior, pero ésta no se cierra de forma estanca sino que se hace pasar un flujo de aire a través de la misma, en contacto con la hoja y se vierte de nuevo a la atmósfera. La corriente de aire se verá empobrecida en CO_2 y enriquecida en humedad debido a la influencia de la hoja. Los sistemas de balance nulo son un tipo de sistema abierto en el que se introduce una corriente de aire seco de entrada de la cubeta para realizar el intercambio de gases con la planta, y se ajusta el flujo de éste para que la corriente final tenga una humedad constante. La corriente de salida se analiza para conocer saber que el estado estacionario se ha alcanzado, y la transpiración se calculará a través del flujo de aire seco introducido en el sistema y la humedad en la cubeta. Las ecuaciones tienen en este caso de siguiente forma:

$$E = \frac{(u_o - u_i) \cdot C_{H_2O}}{L} = \frac{u_s \cdot C_{H_2O}}{(1 - w_{H_2O}) \cdot L} \quad (4)$$

Siendo:

u : *flujos volumétricos de aire saliente (o), entrante (i) y de aire seco (s) [m³s⁻¹]*

C_{H_2O} : *concentración de agua vapor, constante [mol m⁻³]*

w_{H_2O} : *fracción molar de vapor [mol mol⁻¹]*

L : *Área de la hoja en contacto con la corriente de aire [m²]*

Los sistemas de balance nulo tienen ventajas inherentes frente a los porómetros transitorios. Como se alcanza un estado estacionario se minimizan los errores relativos a la dinámica de los sensores y de absorción de agua por parte de los materiales de la cubeta. La calibración es por tanto mucho más sencilla también, ya que el sensor se puede calibrar en condiciones constantes de humedad por diversos métodos.

Aunque teóricamente la determinación de la conductancia estomática sólo requiere de conocer el flujo de aire seco de entrada, y la humedad en la cámara, en la realidad las condiciones no son isotermas y esto hace que sea necesario medir también temperaturas de la cámara y de la hoja. Otro problema de estos sistemas es que requieren retirar la humedad del aire suministrado. Esto se realiza pasando la corriente a través de gel de sílice o de otros desecantes, añadiendo fungibles al sistema, y dando como resultado un aire bajo en humedad, aunque no nula. Estos sistemas son más complejos que los demás, también más caros.

2.2.3. Sistemas abiertos o de flujo constante

Los sistemas de flujo constante son similares a los de balance nulo, con la diferencia que en este tipo de sistemas lo que se mide es temperatura y humedad de la corriente de aire antes de entrar a la cubeta y al salir de ésta una vez alcanzado el estado estacionario, para por tener por diferencia entre ellas la cantidad de vapor proveniente de la planta. Estos datos, junto con el caudal de aire introducido permiten calcular la transpiración de la siguiente forma:

$$E = \frac{u_o \cdot C_{H_2O,o} - u_i \cdot C_{H_2O,i}}{L} \quad (5)$$

Siendo:

u : *flujos volumétricos de aire saliente (o) y entrante (i) en la cámara [m³s⁻¹]*

C_{H_2O} : *concentraciones de agua vapor, saliente y entrante [mol m⁻³]*

L : *Área de la hoja en contacto con la corriente de aire [m²]*

A diferencia de los porómetros de balance nulo, donde se varía el flujo de aire a la entrada hasta alcanzar un valor que compense la humedad aportada por la planta, los sistemas de flujo constante inyectan un flujo determinado de aire seco o atmosférico. La principal desventaja de este tipo de porómetros es que la hoja y la cámara pueden estar expuestas a niveles de humedad diferentes de los ambientales, dependiendo del flujo introducido en el sistema. Si las variaciones de presión de vapor son grandes, puede haber absorción o desorción de agua por parte de los materiales. También las estomas pueden reaccionar a los cambios en la presión de vapor.

Estos sistemas son de construcción más sencilla que los porómetros de balance nulo al llevar únicamente una línea de aire atmosférico, y no previamente desecado, y al no necesitar de un controlador para el aire introducido.

2.3. Comparación y elección del sistema a emplear

Conocidos los diferentes sistemas que hay para medir la transpiración y las ventajas y desventajas de cada uno, se ha de elegir el óptimo para la aplicación que se le quiere dar.

El primero en descartarse es el porómetro transitorio por las razones que se exponen a continuación:

Este sistema modifica de forma sustancial la atmósfera de medida, afectando ampliamente a la planta, efecto difícil o imposible de cuantificar al ser responder cada especie de forma distinta a los estímulos provocados. Esta tecnología es inherentemente menos precisa que el resto debido a las características dinámicas de los sensores. Se desea evitar el uso de los analizadores de gas de infrarrojos, ya que pese a ser rápidos en las medidas y precisos, presentan los inconvenientes mencionados en cuanto a precio, fragilidad y consumo. Los sensores que se desean usar, de tipo capacitivo, presentan características dinámicas más pobres que las de un IRGA haciendo preferibles otros sistemas frente a los transitorios.

Entre el sistema de balance nulo y el de flujo constante la elección es más compleja.

El uso de aire atmosférico presenta una gran ventaja frente al del aire seco, ya que no requiere del uso de sílica gel para retirar humedad, por lo que se evita peso, y el uso de un material fungible, pero por el contrario, el uso de aire seco permite mantener el ambiente que rodea a la hoja en condiciones de humedad similares a las naturales. Usando aire atmosférico ésta aumentará inexorablemente debido a la misma transpiración.

Por otro lado, los sistemas de balance nulo requieren medir menos parámetros, que los de flujo constante, pues la humedad de entrada está fijada en cero, y la de la cámara y la de la salida son iguales y constantes. En los de flujo constante se han de medir tanto la corriente de entrada como la de salida.

La medida de ambas corrientes presenta una desventaja en cuanto a que hay que duplicar los sensores, y en caso de instrumentos de alto coste o consumo puede ser un factor limitante. Por el contrario, en los porómetros de balance nulo se requiere el uso de un controlador y un actuador para el aire seco de entrada que los de flujo constante no necesitan.

El tipo de porómetro elegido para su desarrollo será finalmente el de flujo constante por dos razones principalmente: tiene una mayor sencillez instrumental al carecer de controlador y actuador automático, lo que hace un diseño más robusto, y que la duplicidad de sensores en el flujo constante se puede aprovechar para mejorar notablemente la precisión del instrumento. Los sensores actualmente tienen un precio reducido y un tamaño muy pequeño, por lo que los inconvenientes de duplicarlos se ven compensados con las ventajas.

El problema introducido de la modificación de las condiciones atmosféricas habrá de ser tenido en cuenta posteriormente a la hora de elegir parámetros de diseño tales como flujos empleados y gradientes de humedad permitidos, de forma que se minimice el impacto.

Capítulo 3: Desarrollo del modelo y discusión

Dadas las limitaciones identificadas, y los objetivos perseguidos que se han analizado en el capítulo anterior, el modelo de sistema abierto ha sido identificado como sistema idóneo para el diseño del porómetro. En la siguiente fase se ha de ahondar en otros aspectos prácticos que surgen en el desarrollo. En concreto, la forma de establecer un modelo de cálculo de transpiración y conductancia estomática es especialmente delicada cuando se han de alcanzar niveles adecuados de exactitud.

3.1. Sistema de unidades

Se ha mencionado en el capítulo anterior la posibilidad de realizar todos los cálculos de transpiración y conductancia tanto en base molar como en base mísica. Aunque estas magnitudes en base mísica se pueden encontrar en la literatura, especialmente en la antigua, en las últimas décadas se ha desarrollado principalmente la formulación en base molar, pues presenta ciertas ventajas, expresando los gradientes en términos de fracciones molares. Aplicando la ley de Fick de forma simplificada y expresando los gradientes como diferencias finitas se tiene que el flujo de transpiración se puede calcular como:

$$E = D_{wa} \frac{\Delta C}{\Delta X} [\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (6)$$

Donde:

D_{wa} : Difusividad del agua vapor en aire [m^2/s]

ΔC : Gradiente de concentración de agua entre la hoja al aire [mol/m^3]

ΔX : longitud de camino de difusión [m]

Siendo la conductancia el coeficiente de proporcionalidad entre la fuerza impulsora y el flujo obtenido, se puede asemejar a:

$$g = \frac{D_{wa}}{\Delta X} [\text{m s}^{-1}] \quad (7)$$

Se conoce que la dependencia de los coeficientes de difusión con la temperatura y la presión es la siguiente[12]:

$$D_{wa} = D_{wa}^0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.8} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right) [\text{m}^2\text{s}^{-1}] \quad (8)$$

Donde:

D_{wa}^0 : Coeficiente de difusión del agua en aire en condiciones de referencia [m^2s^{-1}]

T, T_0 = Temperatura de trabajo y de referencia respectivamente [K]

P, P_0 : Presión de trabajo y de referencia respectivamente [Pa]

Se puede apreciar que los coeficientes de difusión y la concentración del gas son sensibles a la temperatura y a la presión, por consiguiente la conductancia se ve afectada por los mismos parámetros. En el caso de plantas con la misma apertura estomática y concentraciones de agua, se obtendrán diferentes valores de conductancia si los gradientes se expresan en términos de

concentraciones o densidades. Dicha ecuación puede modificarse para expresarla en término de fracciones molares como:

$$E = D_{wa} \frac{\Delta C_w}{\Delta X} = D_{wa} \cdot \frac{C_T \cdot \Delta w}{\Delta X} \rightarrow E = D_{wa} \cdot C_T \cdot \frac{\Delta w}{\Delta X} \quad (9)$$

Y por consiguiente la conductancia estomática tiene la forma:

$$g = \frac{D_{wa} \cdot C_T}{\Delta X} [\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

Cabe destacar que la dependencia con la temperatura y la presión del término $D_{wa} \cdot C_T$:

$$D_{wa} \cdot C_T = D_{wa}^0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{P_0}{P}\right) \cdot \left(\frac{P}{R \cdot T}\right) = D_{wa}^0 \cdot \left(\frac{1}{T_0}\right)^{1,8} \cdot \frac{P_0}{R} \cdot (T)^{0,8} \quad (11)$$

En general, unificando los resultados mencionados:

$$\text{En base básica: } D_{wa} \propto \frac{T^{1,8}}{P} \quad \text{En base molar: } D_{wa} \propto T^{0,8}$$

De esta manera la dependencia con la presión desaparece, y la dependencia con la temperatura queda elevada a un factor 0,8 en vez de 1,8 como ocurre empleando términos de concentración. También, las fracciones molares son independientes de las condiciones en las que se midan. La notación en términos de fracciones molares hace el estudio de conductancias mucho más representativo al poder ser fácilmente comparable con otros estudios o condiciones.

3.2. Modelo de sistema abierto

En un sistema abierto, como es el modelo propuesto, un flujo de aire pasa a través de la cámara y la tasa de transpiración se calcula por diferencia entre el contenido de vapor de agua a la entrada y a la salida. De forma simplificada, estos sistemas son como se muestra a continuación:

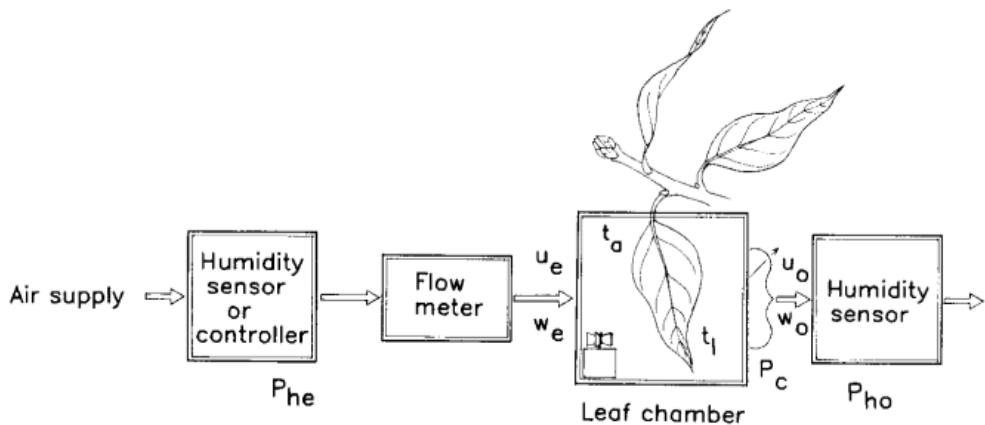


Figura 11 – Diagrama simplificado de un porómetro de sistema abierto

En un sistema abierto, la tasa de transpiración es igual a la cantidad adicional de vapor de agua que sale de la cámara con respecto a la que ha entrado. El agua aportada por la hoja en forma de transpiración viene dada por la expresión:

$$E \cdot L = u_0 w_0 - u_i w_i \quad (12)$$

Donde:

E : Tasa de transpiración [$\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$]

L : Área de hoja expuesta al intercambio [m^2]

u : flujos molares totales de entrada (i) y salida (o) [mol s^{-1}]

w : fracciones molares de agua de entrada (i) y salida (o) [mol mol^{-1}]

Las medidas de flujo provenientes del caudalímetro estarán expresadas en base mísica o volumétrica. Para convertirlas en base molar se hará uso de la ecuación de gases ideales, al trabajar en condiciones atmosféricas la aproximación es válida.

Como se puede apreciar en la ecuación 12 tanto los flujos de gas de entrada como de salida influyen en el cálculo de la transpiración. Aplicando un balance de materia puede calcularse el flujo de salida sabiendo que la diferencia entre el flujo saliente y el entrante se debe únicamente a la aportación de agua por la hoja, por lo que:

$$u_o - u_i = u_o w_o - u_i w_i \quad (13)$$

$$u_o = u_i \cdot \left(\frac{1 - w_i}{1 - w_o} \right) \quad (14)$$

La medición del caudal corriente arriba es poco práctica ya que el sellado perfecto de la cámara no es posible y se pueden presentar fugas por las juntas, rugosidades de la hoja u otros espacios. Por eso, el caudalímetro se localiza preferentemente en la entrada, y la corriente de salida es mejor estimarla.

Sustituyendo la ecuación 14 en la ecuación 12 y reordenando se obtiene una expresión útil para el modelo del porómetro:

$$E = \frac{u_i \cdot (w_o - w_i)}{L \cdot (1 - w_o)} \quad [\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (15)$$

Esta expresión depende únicamente de factores fácilmente medibles, caudal de entrada, fracciones molares de agua en las corrientes de entrada y salida, y área de la hoja expuesta al intercambio.

Como se ha comentado anteriormente, la conductancia al vapor de agua es un parámetro tan relevante o más como la transpiración en sí misma. Una planta transpirará más o menos en función del gradiente de humedad entre el interior de la hoja, pero la conductancia es un parámetro fisiológico independiente de las condiciones ambientales. Esto es importante ya que en la cubeta la atmósfera se verá alterada. Los estomas de las hojas responden a las condiciones atmosféricas, pero si éstas se ven alteradas en magnitud aceptable y en un tiempo relativamente corto la conductividad estomática no cambiará durante la medida. Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la conductividad al vapor de agua puede calcularse como:

$$g = \frac{E}{\Delta w} \quad (16)$$

Siendo Δw la fuerza impulsora del mecanismo de transpiración, el gradiente de humedad entre los espacios intercelulares en la hoja y la atmósfera.

La ecuación 16 no es estrictamente cierta ya que la tasa de evaporación no es un proceso exclusivamente difusivo, sino que hay una cierta componente convectiva en el flujo, y debe ser tenida en cuenta en el cálculo de la conductancia total. La transpiración adicional que tiene lugar debido al flujo convectivo es igual a la tasa de transpiración multiplicada por la media de las fracciones molares de agua entre los espacios intercelulares y el ambiente[6]:

$$E = g \cdot (w_{int} - w_a) + E \cdot \left(\frac{w_{int} + w_a}{2} \right) \quad (17)$$

La conductancia total se calculará por tanto como:

$$g = \frac{E \cdot (1 - w_m)}{\Delta w} \quad (18)$$

Siendo:

w_m : fracción molar media entre los espacios intercelulares y el ambiente;

$$w_m = \frac{w_{int} + w_a}{2}$$

Δw : gradiente de fracción molar entre los espacios intercelulares y el ambiente, fuerza impulsora;

$$\Delta w = w_{int} - w_e$$

Para el cálculo de las fracciones molares de agua, necesarias en el cálculo de la transpiración y de la conductancia estomática, se harán las siguientes suposiciones:

- La cámara está en condiciones de mezcla perfecta, por lo que humedad y temperatura medidas en la corriente de salida se suponen es a la de la cámara.
- El aire en los espacios intercelulares de las hojas se encuentra saturado de agua en plantas correctamente hidratadas [13].

De acuerdo a la ley de Dalton de las presiones parciales, las fracciones molares de vapor en la corriente de aire pueden calcularse a través de la presión de saturación del agua a la temperatura de la corriente y de la humedad relativa:

$$w = \frac{P_{v,sat}(T) \cdot \left(\frac{HR}{100} \right)}{P} \quad (19)$$

Donde:

P_v : Presión de vapor del agua [Pa]

HR : Humedad Relativa de la corriente [%]

P : Presión total medida [Pa]

Teniendo en cuenta estas suposiciones para calcular las fracciones de agua en los distintos puntos. Para estimar la presión de vapor de agua en el aire se han considerado varios modelos[14]. Uno de ellos es el formulado por Goff-Gratch[15], modelo es el empleado como referencia por el Instituto Smithsonian [16], la ecuación de Wexler[17], tomada como referencia por la Organización Meteorológica Mundial, y la ecuación de Richards [18], una expresión simplificada para el cálculo de presiones de vapor. El rango de temperaturas a emplear es reducido y está centrado en las temperaturas atmosféricas, rango en el cual todos los modelos predicen unos resultados muy similares. Se prefiere el empleo del modelo más simple, el de Richards, ya que el cálculo de presiones parciales es recurrente y se reduce el coste computacional, y las diferencias son mínimas. Esta ecuación tiene la forma:

$$P_{v,sat} = 101325 \cdot \exp(13.3185 \cdot t - 1.976 \cdot t^2 - 0.6445 \cdot t^3 - 0.1229 \cdot t^4) \text{ [Pa]} \quad (20)$$

Donde:

$$t = 1 - \left(\frac{T_s}{T} \right)$$

T_s : Temperatura de ebullición estándar del agua (373.15 K)

T : Temperatura de trabajo [K]

Establecidas estas relaciones queda patente que para la estimación de transpiración y conductancia estomática es necesaria únicamente la medida de 7 parámetros:

- Caudal de entrada
- Temperatura y humedad de la corriente de entrada
- Temperatura y humedad de la corriente de salida
- Temperatura de la hoja
- Presión interna

3.3. Implementación del modelo y discusión

Una vez identificadas las variables que afectan al proceso y las interacciones entre ellas para la creación de un modelo, éste se ha implementado en Matlab para su estudio (ver código en el anexo I). Este código se compone de una función principal denominada 'EjecutarPorometro.m' cuyo parámetro de entrada es un vector conteniendo los siete parámetros de medida necesarios mencionados anteriormente y devuelve los valores de transpiración y de conductancia estomática. A su vez, los cálculos de presión de saturación, al ser recurrentes, se han implementado en una función independiente, llamada 'Psaturacion.m' cuyo argumento de entrada es la temperatura del aire, y cuya salida es la presión de saturación.

En esta primera parte se desea estudiar la viabilidad técnica del proyecto en cuanto a la tecnología actual disponible en el mercado.

El primer código que se ha implementado es el llamado 'EnsayosPorometro.m' y se encuentra disponible para su consulta en el anexo II. Este *script* define todos los parámetros que serían registrados con los sensores, ya mencionados:

- Caudal de entrada [$mL\ min^{-1}$]
- Temperatura y humedad de la corriente de entrada [$^{\circ}\text{C}$, %HR]
- Temperatura y humedad de la corriente de salida [$^{\circ}\text{C}$, %HR]
- Temperatura de la hoja [$^{\circ}\text{C}$]
- Presión interna en la cámara de medida [bar]

Estas variables, se introducen en las unidades habituales de medida, y se convierten todas a ellas al sistema internacional de unidades, con el que se trabajará posteriormente. Usando el modelo desarrollado previamente, se calculan la transpiración y la conductancia a las que corresponderían esas medidas, valores que se muestran por pantalla para su consideración.

Aplicando este modelo es posible ajustar las condiciones en las que trabajaría el instrumento, acotando sus valores a unos intervalos razonables, ya que hay una interdependencia entre todas ellas. Este es el caso de las humedades relativas de entrada y salida y el caudal. La humedad de entrada, supuesto que no se establece un pretratamiento del aire, se considerará que tiene un valor en el rango atmosférico. La humedad de salida aumentará respecto a la de entrada, pero este aumento será función del caudal de aire inyectado, cuanto mayor sea este, menor es el tiempo de residencia en la cámara para el intercambio de gases con la hoja, y menor es el incremento en humedad.

Este modelo establece también un parámetro de diseño, que es el diámetro de la ventana circular de la cubeta, por tanto la superficie de contacto con la hoja. Valores comunes en instrumentos comerciales se encuentran entre los 18-20mm [19], que permiten un intercambio adecuado de gases pero son suficientemente pequeños como para ser usado en gran variedad de hojas.

Las medidas de transpiración se realizan fundamentalmente en periodo primaveral o estival, cuando las plantas presentan un estado de actividad alta¹. Para el caso de especies de mayor interés, las mediterráneas esclerófilas y las caducifolias de zonas templadas, la zona de interés se encuentra en el intervalo de 15 a 35°C. Fuera de ese intervalo la planta se encuentra en un estado de baja actividad. Se simulan las relaciones entre parámetros en los límites de dichos intervalos:

	Temperaturas bajas (~15°C)	Temperaturas altas (~35°C)
Transp. Baja (~1 $\frac{mmol}{m^2 s}$)	$Q = 75 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 25\%$ $Q = 100 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 20\%$ $Q = 150 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 15\%$	$Q = 30 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 25\%$ $Q = 50 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 15\%$ $Q = 100 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 6\%$
Transp. Alta (~6 $\frac{mmol}{m^2 s}$)	$Q = 350 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 35\%$ $Q = 400 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 30\%$ $Q = 500 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 23\%$	$Q = 150 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 27\%$ $Q = 200 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 20\%$ $Q = 250 \frac{mL}{min} \rightarrow \Delta HR = 15\%$

Tabla 1 - Pares de datos caudal – incremento de humedad relativa para las distintas condiciones límite de medida.

En la tabla 1 se muestran para las condiciones extremas anteriormente mencionadas varias condiciones de medida del porómetro. Las medidas contempladas en la misma casilla son equivalentes, en unas mismas condiciones de temperatura y transpiración, qué incremento en humedad ambiental producirá la inyección de un determinado caudal de aire.

Se pueden observar que las condiciones más exigentes son:

- Transpiración baja y temperatura alta: se requieren caudales muy bajos para observar un incremento apreciable en la humedad relativa, pudiendo dar problemas de control o mezcla a tener en cuenta en el diseño posterior. En caudales ligeramente más altos el gradiente de humedad entre entrada y salida disminuye tanto que pueden aparecer problemas de sensibilidad y exactitud en los sensores.
- Transpiración alta y temperatura baja: en estas condiciones el aire tienen una presión de saturación baja, y la transpiración incrementa de forma elevada la humedad. Se requieren caudales relativamente altos para mantener el gradiente de humedad en un intervalo conservador que no modifique en exceso las condiciones ambientales de la planta, o bien si se desea introducir un caudal menor se deberán hacer frente a gradientes mayores, con el perjuicio que eso ocasiona.

Conocidos los rangos en los que el porómetro podría trabajar y las regiones en las que aparecerán los mayores problemas, se ha desarrollado un modelo en Matlab para simular y analizar un funcionamiento más realista del equipo y de la influencia de los errores de medida de cada variable en las medidas globales. Este modelo se ha implementado en el *script* llamado 'ErroresPorometro.m' y se encuentra disponible para su consulta en el anexo III. Como parámetros de entrada en este *script* se tienen los parámetros de lectura de los sensores y el error cometido en las medidas.

En este caso, en vez de simular la medida de la transpiración que realizaría el porómetro con los valores reales, se simula la misma con el resultado de sumar a la medida un cierto error cometido. Primero se considera el error en las variables una por una, calculándose el impacto en la

¹ Recuérdese que la transpiración vegetal es consecuencia de la necesidad de las plantas de capturar CO₂ de la atmósfera para realizar la fotosíntesis. Los estomas se abren y no pueden evitar perder agua en consecuencia.

medida global, y todas en conjunto posteriormente, para ver el efecto combinado de las mismas sobre las estimaciones de transpiración y conductancia.

Se hace una primera simulación tomando unas condiciones ambientales promedio, una temperatura en el entorno de los 25°C y una humedad entorno al 50%, para una planta de transpiración en el entorno de los $2.5 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En cuanto a los errores introducidos por los sensores, haciendo una búsqueda por la tecnología actual, se encuentra que valores razonables están en el intervalo de:

- Medida del caudal: $\pm 1\%$ del valor medido
- Temperatura: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
- Humedad relativa: valor medido (%) $\pm 2\%$
- Presión: $\pm 100 \text{ Pa}$

Tomando esos valores referencia, se tienen los siguientes resultados:

Valor absoluto de error introducido						
$V_{in}[\text{m}^3/\text{s}]$	$T_{in}[\text{K}]$	$T_{out}[\text{K}]$	$HR_{in}[\%]$	$HR_{out}[\%]$	$T_{hoja}[\text{K}]$	$P_{in}[\text{Pa}]$
$2.5 \cdot 10^{-8}$	0,3	0,3	2	2	0,3	100
Porcentaje de error introducido						
V_{in}	T_{in}	T_{out}	HR_{in}	HR_{out}	T_{hoja}	P_{in}
1,00	0,10	0,10	4,00	2,85	0,10	0,10
Porcentaje de error cometido en E y en g por error en las medidas						
V_{in}	T_{in}	T_{out}	HR_{in}	HR_{out}	T_{hoja}	P_{in}
E	1,00	-4,42	6,07	-9,60	9,64	0,00
g	1,00	-4,42	11,23	-9,60	18,35	-6,11
Factor de amplificación del error en E y en g por error en las medidas						
V_{in}	T_{in}	T_{out}	HR_{in}	HR_{out}	T_{hoja}	P_{in}
E	1,00	-43,93	60,41	-2,40	3,37	0,00
g	1,00	-43,93	111,68	-2,40	6,42	-60,66

Tabla 2 – Análisis de errores estimados en E y g por error en las medidas de los sensores.

Puede verse en la tabla 2 la influencia del error de cada una de las variables por separado en el cómputo total de E y g, véase:

- El error cometido en la medida del caudal se transmite directamente, un 1% de error en la medida será un 1% de error en la estimación de E y de g.
- La medida de las temperaturas de las corrientes de entrada y salida son muy críticas, es el error que más se amplifica en las estimaciones. En las condiciones de referencia dadas, se ve que 0.3°C de error en la medida de la temperatura, que supone un 0,10% de error sobre la medida global en escala absoluta, produciría una subestimación de casi el 4,5% en E y en g para el caso de la entrada, una sobreestimación del 6% en E y del 11% en g para el caso de la salida. Esto corresponde a amplificaciones de más de 40 veces, hasta más de 100 veces.

Se aprecia también que un error positivo en la medida de temperatura de la corriente de entrada se traduce en un error negativo en E y en g, pero el mismo error positivo se traduce en un error positivo en E y g si es de la temperatura de salida. Esta compensación de los errores es un factor que puede ser aprovechado para mejorar el rendimiento general del sistema.

- El error en la medida de humedad es, a priori, el mayor de los cometidos. Aunque se amplifica relativamente poco (un 1% de error de medida en la entrada se traduce en -2,4% de error de E y g, y si el error del 1% es en la salida se produce un 3,4% de error

en E y sobre un 6,4% en g) la humedad es la magnitud más difícil de medir, y los sensores dan los mayores errores. Los sensores introducen una incertidumbre mucho mayor (sobre el 0,10% para temperatura, y sobre el 2% para humedad). En global, son la principal fuente de error.

- La temperatura de la hoja ha de ser medida para conocer la presión de vapor en los espacios intercelulares, parámetro que influye en el cálculo de la conductancia pero no en la transpiración. Es también un factor crítico, cuyos errores de estimación se amplifican enormemente, en un factor en el entorno de las 60 veces, y con signo contrario al del error introducido.
- La presión es una preocupación menor. Es una magnitud fácil de medir con buena precisión, que apenas tiene influencia en E, y con una transmisión sin amplificar en g, que dadas las pequeñas magnitudes de los errores no son una fuente de error apreciable.

Se han simulado los errores cometidos y transmitidos en las diferentes condiciones límite mencionadas anteriormente, y pese a que los factores exactos varían, las tendencias se mantienen, por lo que los resultados en estas condiciones medias son representativos de todo el rango de condiciones y sirven de referencia.

El conocimiento de los factores críticos para el diseño del equipo es fundamental para la correcta elección de los sensores. Se ha analizado satisfactoriamente en el caso anterior las influencias independientes de los errores en cada medida en la medida global, pero en el caso de un equipo real, éstos se producen todos juntos, y no todos se dan en su máxima magnitud, sino que están acotados por un valor, y el error real introducido será un factor aleatorio dentro de ese intervalo. Una buena forma de estimar los efectos en estas condiciones es la creación de una estadística con un elevado número de pruebas. Esta se ha implementado en el archivo 'EstadisticaErrores.m', script disponible para su consulta en el anexo IV.

En este script se definen las lecturas de los sensores y los errores máximos cometidos, proporcionados por los fabricantes de sensores (se han tomado como valores orientativos los mismos que en el código anterior) y se ejecuta un número definido de veces para que el resultado sea representativo estadísticamente (estimado en 50.000 iteraciones) con distintos errores dados por una distribución aleatoria dentro de los intervalos marcados. Los resultados se organizan en un histograma y se calcula el intervalo de confianza al 95% y al 99%. Esta información se encuentra en el anexo V.

Estos resultados se muestran muy dependientes del incremento en la humedad relativa. Al trabajar con imprecisiones relativamente grandes, si el incremento de humedad es pequeño se incurre en errores desmesurados. Para estimar el comportamiento correctamente en todo el intervalo se han hecho simulaciones de error en varios puntos de operación (pares caudal – gradiente de humedad) y en el anexo V se han incluido todas las gráficas de las distribuciones de error obtenidas para los casos descritos. Los intervalos de confianza obtenidos de la información simulada se recogen en la tabla siguiente:

	Intervalo de confianza 95%	Intervalo de confianza 99%
ΔHR=20%	E: -17,61 % / 17,62 %	E: -23,15 % / 23,15 %
	g: -25,64 % / 27,07 %	g: -34,15 % / 35,38 %
ΔHR=10%	E: -33,52 % / 33,54 %	E: -44,06 % / 44,08 %
	g: -38,17 % / 39,38 %	g: -50,54 % / 51,76 %
ΔHR=6%	E: -53,55 % / 53,46 %	E: -70,35 % / 70,26 %
	g: -56,98 % / 58,39 %	g: -75,33 % / 76,74 %

Tabla 3 – Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida.

Estos intervalos de error obtenidos, especialmente con incrementos de humedad reducidos, son inasumibles. Es necesario realizar correcciones al modelo.

3.4. Corrección al modelo mediante autocalibración y discusión

Se plantea el aprovechamiento de la multiplicidad de los sensores de humedad y temperatura, disponibles a entrada y salida mediante la realización de una autocalibración previa a las medidas de transpiración y conductancia. En condiciones de reposo y sin una hoja introducida en la cubeta la humedad y la temperatura que registren los sensores deberá ser la misma, por lo que es posible corregir las diferencias entre ellos de la siguiente manera:

- Se realiza una medida previa en vacío, condiciones en las cuales los sensores, una vez estabilizados, deberían mostrar los mismos valores. Se realiza un promedio de las lecturas y se calcula la desviación respecto de esa media que mide cada uno de los sensores.
- Se corrige a partir de ese momento el resto de medidas realizadas por los sensores con ese parámetro de desviación. Así, se produce una compensación por varios factores:
 - Al ser un sistema basado en lecturas diferenciales, esta corrección permite que la diferencia de humedad entre entrada y salida queda mucho más cercana a la realidad, pese a no ser exactos los valores leídos.
 - En caso de que ambas lecturas sean superiores o inferiores al valor real, la media también lo será, pero los errores del mismo signo en humedad y temperatura repercuten con signo contrario en las estimaciones de E y g.
 - En caso de que los errores de lectura sean uno positivo y otro negativo, la media tenderá hacia el cero.

Este modelo se ha implementado en el fichero 'EstadisticaErroresAutoZero.m' cuyo código se ha recogido en el anexo VI. Se parten de los mismos datos de referencia tomados en el apartado anterior para estas simulaciones, y se obtienen unos intervalos de confianza para el error que se recogen en la tabla siguiente. Los todos los gráficos con las distribuciones de error e histogramas pueden encontrarse en el anexo VII:

	Intervalo de confianza 95%	Intervalo de confianza 99%
ΔHR=20%	E: -3,09 % / 3,09 %	E: -3,79 % / 3,87 %
	g: -6,13 % / 6,50 %	g: -6,68 % / 7,28 %
ΔHR=10%	E: -3,05% / 3,04 %	E: -3,73 % / 3,77 %
	g: -4,65 % / 4,80 %	g: -5,16 % / 5,40 %
ΔHR=6%	E: -2,95 % / 2,97 %	E: -3,626 % / 3,71 %
	g: -4,26% / 4,41 %	g: -4,77 % / 5,05 %

Tabla 4 - Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida para el sistema autocalibrante.

Se aprecia que los resultados mejoran notablemente en este caso respecto al anterior. Errores instrumentales en el rango del 5-6 % como máximo son asumibles para las aplicaciones deseadas, así que el instrumento se considera viable, y el modelo satisfactorio.

Además, implementando el sistema de autocalibración se consigue una mayor robustez al no verse el sistema afectado de forma apreciable por el gradiente de humedad producido entre entrada y salida ni por el caudal. En el caso en que no se realizaba la calibración in situ de los sensores, el error cometido era mayor cuanto mayor era el caudal, por tanto menor era el gradiente de humedad. Para este caso en el que sí se calibra, la tendencia es la opuesta. A mayor caudal, y por tanto menor gradiente, el intervalo de error cometido es menor pese a variar poco.

Serán por tanto estos puntos de operación altos en caudal los preferidos para trabajar, por dos razones:

- El error cometido será menor que en el caso de trabajar a caudales bajos. En cuanto a la medida de pequeños gradientes de humedad, se estará condicionado por la resolución que proporcione el sistema de medida. Se deseará que sea alta para evitar la aparición de una nueva fuente de error.
- Se desea construir una cámara de medida sin elementos externos de agitación activa, para conseguir mayor simplicidad en el diseño y menor consumo energético. La agitación se conseguirá a través de la geometría y de la cámara, por lo que un mayor caudal promoverá una mayor turbulencia y agitación, evitando problemas de la creación de una capa límite importante que limite la difusión en gran medida.

Aplicando este modelo en las distintas condiciones límite que se han considerado en apartados anteriores se tiene que:

Confianza 95%	Temperaturas bajas (~15°C)	Temperaturas altas (~35°C)
Transp. Baja $(\sim 1 \frac{\text{mmol}}{\text{m}^2 \text{s}})$	<i>Intervalo de E: -3.36% / 3.42%</i> <i>Intervalo de G: -6.90% / 7.43%</i>	<i>Intervalo de E: -3.09% / 3.15%</i> <i>Intervalo de G: -4.68% / 4.84%</i>
Transp. Alta $(\sim 6 \frac{\text{mmol}}{\text{m}^2 \text{s}})$	<i>Intervalo de E: -3.42% / 3.44%</i> <i>Intervalo de G: -10.52% / 12.34%</i>	<i>Intervalo de E: -3.31% / 3.33%</i> <i>Intervalo de G: -6.72% / 7.20%</i>

Tabla 5 – Intervalos de confianza al 95% para los distintos casos extremos con el sistema autocalibrante.

Confianza al 99%	Temperaturas bajas (~15°C)	Temperaturas altas (~35°C)
Transp. Baja $(\sim 1 \frac{\text{mmol}}{\text{m}^2 \text{s}})$	<i>Intervalo de E: -4.23% / 4.24%</i> <i>Intervalo de G: -7.52% / 8.30%</i>	<i>Intervalo de E: -3.83% / 3.96%</i> <i>Intervalo de G: -5.22% / 5.55%</i>
Transp. Alta $(\sim 6 \frac{\text{mmol}}{\text{m}^2 \text{s}})$	<i>Intervalo de E: -4.22% / 4.28 %</i> <i>Intervalo de G: -11.24% / 13.55%</i>	<i>Intervalo de E: -4.05% / 4.10%</i> <i>Intervalo de G: -7.36% / 8.03%</i>

Tabla 6 - Intervalos de confianza al 99% para los distintos casos extremos con el sistema autocalibrante.

De acuerdo a este modelo de corrección, se obtienen los mayores errores para el caso de transpiraciones altas y temperaturas bajas. Esto se produce porque en esas condiciones se ha de trabajar con gradientes de humedad muy elevados. El aire relativamente frío, a 15°C, presenta una baja humedad en el punto de saturación, lo que obliga a trabajar con caudales y gradientes mayores.

En el caso de la humedad, al hacerse la corrección con un único punto (el de la humedad de entrada, la ambiental), los errores se incrementan al alejarse de ese punto de calibración, lo que ocurre a transpiraciones altas donde se estima un aumento de hasta un 30% en la humedad relativa. Un aumento de caudal a gradiente constante no produce aumento alguno en el error cometido, pues éste presenta un comportamiento proporcional no amplificado como se ha demostrado anteriormente. Incluso en estas condiciones extremas es de esperar que un error máximo del 10-12% produzca unos resultados representativos de lo que se quiere medir, pese a ser un escenario altamente improbable.

La vegetación se encuentra en un estado de alta actividad (en el que presentan altas tasas de transpiración y de fotosíntesis, por tanto de crecimiento) fundamentalmente en el periodo estival. Durante los periodos primaveral u otoñal en los que estas temperaturas pueden producirse con mayor facilidad una planta presenta un estado de actividad menor, siendo altamente improbable que se den a la vez las dos condiciones límite (baja temperatura y alta transpiración).

Se ha analizado los casos que dan los mayores errores, para así observar cuales son las variables más críticas de todo este proceso. Para una serie de experimentos aleatorios compuesta por 50.000 iteraciones, en un punto de operación intermedio, a temperatura de 25°C y gradiente de humedad del 15%, se han recopilado las combinaciones de errores que se traducen en un error global en la medida de la conductancia de más del 13.2%, en la tabla 7, y de menos del -10.8%, en la tabla 8.

	V_{in}	T_{in}	T_{out}	HR_{in}	HR_{out}	T_{hoja}	P_{in}
1.	0.9118	-0.4981	-0.3821	0.9887	0.8553	-0.8562	0.5605
2.	0.9582	-0.9289	-0.9577	0.9851	0.9612	-0.2847	-0.1359
3.	0.8824	-0.9087	-0.8168	0.9720	0.9603	0.5537	0.9753
4.	0.7800	-0.2437	-0.8860	0.9951	0.9714	-0.2011	-0.8997
5.	0.9304	0.0454	-0.5336	0.9841	0.8519	-0.6720	-0.8811
6.	0.9353	0.1889	-0.6751	0.9882	0.8988	0.8912	0.8475
7	0.6518	0.4023	-0.6724	0.9951	0.9623	-0.6695	-0.5723
8.	0.9573	-0.8297	-0.5539	0.9971	0.7560	0.5887	-0.8359
9.	0.8946	0.8455	0.3491	0.9987	0.9317	0.7884	0.6991

Tabla 7 – Error individual de cada una de las variables en los casos de que la desviación total en g es mayor al 13.2% en el caso más desfavorable

	V_{IN}	T_{in}	T_{out}	HR_{in}	HR_{out}	T_{hoja}	P_{in}
1.	-0.9417	-0.8101	0.6286	-0.9956	0.2140	0.6929	-0.6776
2.	-0.9830	-0.1782	-0.1660	-0.9886	-0.2318	0.9426	-0.6307
3.	-0.9044	0.6817	-0.0460	-0.9928	-0.2259	0.0835	-0.6623
4.	-0.9981	0.0561	0.8252	-0.9907	-0.3674	-0.1698	-0.9197
5.	-0.9585	0.0486	-0.6181	-0.9910	-0.4473	-0.0498	-0.9035
6.	-0.9972	0.3105	0.1015	-0.9850	-0.3422	-0.1600	-0.9413
7.	-0.9128	0.5804	0.0315	-0.9980	-0.6367	0.6623	-0.4060
8.	-0.8821	0.7519	0.1505	-0.9949	-0.2560	-0.1436	-0.8085

Tabla 8 – Error individual de cada una de las variables en los casos de que la desviación total en g es menor al -10.8% en el caso más desfavorable

Las tablas 7 y 8 muestran el factor multiplicador del error máximo que aplica en cada caso, para cada variable. De esta manera, por ejemplo en el caso de la humedad, cuyo error máximo es del $\pm 2\%$, un factor de 0,9910 indicara que la lectura será 1,982% superior a la real, o en la temperatura, cuyo error máximo es de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, cuando el factor es de -0,6181 se está leyendo una valor 0,18543 $^{\circ}\text{C}$ inferior al real. Esta forma de análisis se muestra extremadamente útil para identificar los factores críticos de diseño.

Las influencias que se observan (se hablará para el caso positivo, el negativo será igual pero inverso en signos), es que en todos los casos el error de medida en la humedad de entrada es muy alto (en todo caso superior al 97% del máximo), siendo por tanto el factor predominante. Despues de éste, la humedad de salida y el caudal son las variables que más influyen, siendo en todo caso superiores al 70% del valor máximo. El resto de valores, las temperaturas y la presión tienen una influencia menor, ya que tienen un valor aparentemente aleatorio, incluso positivo en unos casos y negativo en otros, lo que muestra que no son factores determinantes en el error global.

Esta información se ha de tener en cuenta en las fases posteriores de diseño del porómetro.

Capítulo 4: Diseño del prototipo

Se ha explorado exhaustivamente la tecnología existente en cuanto a medida de humedad, temperatura, presión y caudal, y se ha visto que es posible encontrar sensores con exactitudes algo mayores a las anteriormente mencionadas como referencia, así como distintos tipos de tecnología, con características diversas. Otros elementos necesarios para el diseño del prototipo han sido elegidos de forma razonada para obtener el mejor un alto rendimiento del mismo.

El esquema global de prototipo del porómetro que se propone es el siguiente:

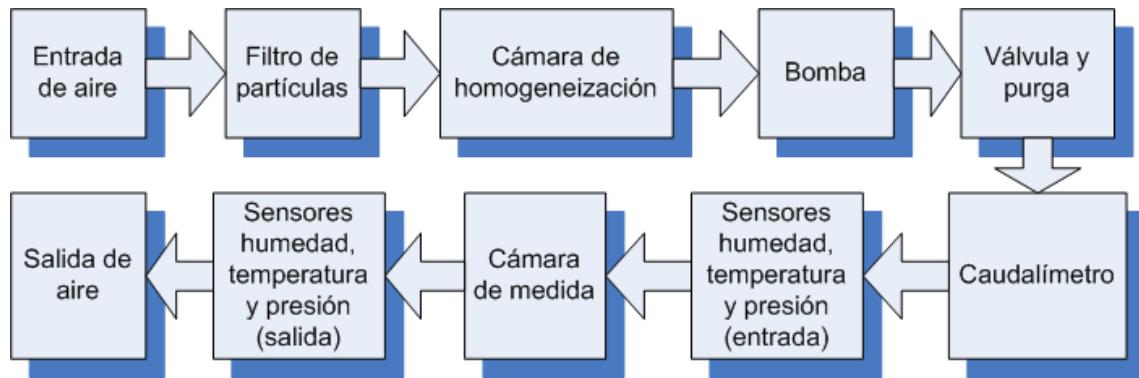


Figura 12 - Diagrama de diseño del porómetro

A lo largo de este capítulo se describirán en detalle las partes que componen el prototipo del porómetro propuesto y que se han mostrado de forma esquemática en la figura 12.

4.1. Elección de sensores

4.1.1. Medida de humedad y temperatura

Tras una exploración del mercado de sensores de humedad y temperatura, se llegó a acotar las opciones a dos, quedaban unas prestaciones altas y similares, adecuadas a la aplicación que se les quiere dar de acuerdo al modelo desarrollado en el capítulo anterior.

Por un lado, la empresa Vaisala comercializa los sensores de humedad y temperatura más exactos y precisos del mercado. Están basados en los sensores Humicap, analógicos, y que posteriormente incorporan una compleja electrónica que permite aumentar la precisión de los mismos hasta $\pm 1.7\%$ en humedad (incluyendo histéresis, no linealidad y repetibilidad), y $\pm 0.2^\circ\text{C}$ para temperatura, medida a través de una sonda Pt1000 de clase 1/10B según la normativa IEC 60751[20].

La alternativa a los sensores anteriormente mencionados son los manufacturados por la marca Sensirion. Estos sensores están hechos con tecnología CMOS, y tienen una precisión algo menor que los Vaisala, $\pm 1.8\%$ para el caso de humedad, pudiendo presentar cierta histéresis, y $\pm 0.3^\circ\text{C}$ para el caso de la temperatura.

Estos sensores son propiamente digitales, no requiriendo de una electrónica añadida ni conversores analógico digital de ningún tipo. Además son de tamaño minúsculo, de forma

aproximadamente ortoédrica con dimensiones de 13,5x3,7x3,1 mm[21]. Cada sensor es individualmente calibrado en una cámara de humedad de alta precisión, consiguiendo sus altas prestaciones.



Figura 13 – Sondas de humedad y temperatura, Vaisala HMP110 (izquierda) y Sensirion SHT75 (derecha)

Hay una gran diferencia en tamaño y coste, aunque la diferencia en prestaciones no es tan grande. Con el análisis anteriormente realizado se ve que las características del sensor Sensirion SHT75 proporcionan un rendimiento adecuado, y tiene la gran ventaja de tener un tamaño mucho más reducido que el Vaisala, por lo que se prefiere éste.

En el anexo VIII se presenta más información sobre el sensor, forma de conexión, calibración y comunicación.

4.1.2. Medida de temperatura de la hoja

Para esta cuestión no se pueden usar los sensores anteriormente mencionados, ya que éstos sólo sirven para medir en aire, pero no en superficie. Se han explorado los diferentes tipos de sensores de temperatura disponibles comercialmente, teniendo en cuenta que la característica más importante es la precisión, por encima del coste y de la respuesta dinámica. Los sensores que mejor se ajustan a estas características, dando buenas prestaciones, son las termorresistencias (RTD, por sus siglas en inglés, resistance temperature detector)[22].

Se pueden localizar en el mercado sondas del tipo Pt100 que dan buenas prestaciones, soportadas sobre superficies para medidas superficiales y con un tamaño del orden de 1 ó 2 mm. Hay multitud de fabricantes para este tipo de sensores.

El estándar de precisión en la medida de temperatura, el IEC 60751 (también llamado a veces IEC751) contempla las siguientes clases de sondas RTD (T en °C)[23]:

- Clase C: $\pm(0,60+0,01 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$
- Clase B: $\pm(0,30+0,005 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$
- Clase A: $\pm(0,15+0,002 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$
- Clase 1/3B: $\pm(0,10+0,0017 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$
- Clase 1/10B: $\pm(0,03+0,0005 \cdot T) \text{ } ^\circ\text{C}$

Para los requerimientos necesarios, una sonda de clase A o superior sería satisfactoria en prestaciones (con una precisión de $\pm 0,22 \text{ } ^\circ\text{C}$ como mínimo, a $35 \text{ } ^\circ\text{C}$, la mayor temperatura considerada).

Al ser una sonda RTD inherentemente analógica, será necesario convertirla en digital para poder tratarla. La medida de resistencias puede hacerse con precisión a través de un puente de Wheatstone, y se requerirá de amplificación y conversión posterior a un valor digital.

El principal problema en el uso de una sonda RTD para la medida de temperatura en la hoja es el impedimento estructural. La hoja se encuentra encerrada en una cámara de medida de poco

volumen, en la que no se deben poner obstáculos al flujo de gas. Hay disponibles termorresistencias para medida en superficie de precisión tan pequeñas como $1,2 \times 1,6$ mm y planas. Se ha explorado esa opción pero se ha descartado debido a las características mecánicas de este tipo de sensores. El tamaño tan reducido de las sondas y de los conectores se consigue a través de la miniaturización, y hacen que sea extremadamente frágil, y se prevén posibles roturas al requerirse la colocación y retirada continua de hojas de la cámara, además de requerir de un sistema de presión adicional para asegurar el buen contacto, y por tanto el equilibrio térmico con la hoja.

Se plantea un sistema alternativo a la introducción de la sonda Pt100 en la cámara. El uso de un termopar permite solucionar las limitaciones mecánicas y estructurales mencionadas. Mientras que una sonda Pt100 es un arrollamiento de cable de platino (por definición, con cierto volumen y rígido), un termopar está compuesto por dos cables de distinto metal con dos uniones a distinta temperatura entre las cuales se genera una diferencia de potencial que es proporcionar a la diferencia de temperatura entre las uniones [22]. No requiere un volumen para contener el arrollamiento de cable como en el caso de la Pt100, sino que la unión caliente, la zona sensible, es puntual. Hay disponibles comercialmente termopares con aislamiento mineral, se encuentran en el interior de una vaina deformable y ligeramente flexible, tan fina como 0,5mm de diámetro, y que puede ser fácilmente introducida dentro de la cámara a través de las juntas de silicona.

El problema que presentan los termopares es la precisión en la medida. Ningún tipo de termopar por sí mismo proporciona una precisión mejor que $\pm 0,5^\circ\text{C}$, y en la mayoría de los casos está en el intervalo de ± 1 a $\pm 1,5^\circ\text{C}$ hasta $\pm 2,5^\circ\text{C}$. En montaje diferencial, en cambio, pueden alcanzar una gran precisión [24]. En vez de estimar la temperatura de la unión fría o emplear sistemas de compensación, se propone unir solidariamente a un elemento con alta inercia térmica y con un medidor de temperatura de precisión, como una Pt100, de forma que estén en equilibrio térmico. Así, la temperatura del elemento de referencia es conocida con precisión, y la tensión registrada es función de la diferencia de temperaturas entre la hoja y la referencia, siendo nula cuando se encuentran a la misma temperatura.

Esta aplicación no es exigente en cuanto a condiciones de termopar, no es necesario el uso de altas temperaturas, ni termopares resistentes a ambientes oxidantes o reductores, criogénicos, ni ciclos de temperatura, por lo que unos termopares de uso general como el tipo K (Chromel – Alumel) puede ser empleado.

En el anexo IX se detalla el sistema el sistema propuesto para medida de temperatura de hoja, así como los sistemas de amplificación necesarios para la correcta medida con Arduino.

4.1.3. Medida de caudal

La tecnología de medida de caudal de gas está muy desarrollada. Hay multitud de compañías que comercializan este tipo de sensores. Para caudales de gas en el rango que se manejan, la tecnología más extendida por su mayor precisión a bajos caudales es la de medidores básicos por conductividad térmica, basada en la medida de la asimetría de la distribución de temperaturas que se genera por la presencia de un hilo caliente inmerso en un flujo de gas.

Así, casas como Sensirion, Sierra, Brooks Instruments, Honeywell, Omron y otras comercializan instrumentos con prestaciones similares. Las principales diferencias se encuentran en la precisión de la medida (deseada en el entorno del 1%) y en las diferentes calidades, resistencia a agentes físicos o químicos, conectividad y tamaño, peso o precio.

Para realizar estas medidas se ha elegido emplear un caudalímetro Sensirion ASF1430. Este instrumento es un caudalímetro digital bidireccional, con una precisión de medida del 1%, calibrado y compensado para los cambios de temperatura. Puede medir caudal con elevada precisión en el intervalo 0,01 – 400 sccm (standard cubic centimeters per minute, centímetros cúbicos estándar por minuto), y con precisión reducida hasta 440 sccm. Integra un elemento sensor de precisión con un circuito de conversión analógica – digital de calidad que resulta en un elemento de alta resolución y características dinámicas rápidas [25]. Tiene un precio competitivo, buenos parámetros de exactitud y precisión, y salida digital, útil para un sencillo tratamiento de

datos. En el anexo X se puede encontrar más información sobre el instrumento, conexión y comunicación con el mismo. El sensor se muestra en la figura 14.a.

4.1.4. Medida de presión

Se ha mostrado que la presión no es una variable crítica para el funcionamiento del porómetro, y no es necesario buscar elementos de elevada precisión o sensibilidad. Hay sensores de presión absoluta con precisiones en el entorno de $\pm 10-20$ mbar, precisión suficiente para la aplicación requerida, y de pequeño tamaño. La mayoría de ellos son analógicos, aunque algunas compañías comienzan a sacar al mercado sensores de presión digitales.

Para la medida de presión se ha elegido un sensor Honeywell SSCDANNO30PAAA5. Este sensor mide presiones absolutas hasta 30 psi (aprox. 2 bares), con una precisión de $\pm 2\%$. La presión de trabajo variará previsiblemente entre 1 y 1,5 bar, por lo que se hace adecuado a lo esperado[26]. En el anexo XI se puede encontrar más información sobre las conexiones, funciones de transferencia y la operación del sensor. Puede verse el sensor en la figura 14.b



Figura 14 - Caudalímetro Sensirion ASF1430 (a) Y sensor de presión Honeywell SSCDANNO30PAAA5 (b)

4.2. Procesamiento de datos

Para recopilar todos los datos que se obtienen de las medidas individuales de los sensores y procesar dicha información para aplicar el modelo de cálculo y obtener datos de transpiración y de conductancia estomática es necesario emplear hardware y software. Para el caso de sensores analógicos, se requiere de un conversor analógico-digital (CAD) que registre valores analógicos tales como voltaje (generalmente en una escala de 0 a 5 V) o de intensidad (lo más común, en una escala de 4 a 20 mA). En el caso de sensores digitales, proporcionan directamente una señal que puede interpretarse con un ordenador u otro sistema de computación. Por esto, se preferirán los sensores digitales frente a los analógicos.

Para realizar el procesamiento de datos, tras explorar las diferentes opciones que se plantean, como emplear ordenadores convencionales, o distintos tipos de microprocesadores y microcontroladores, se ha elegido implementar todo a través de la plataforma de electrónica Arduino[27].

Arduino es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexible y fácil de usar. Arduino es el sistema elegido ya que permite recibir información y entradas de una gran variedad de sensores y puede intervenir en el entorno a través del uso de actuadores como motores o luces. Arduino incorpora un microcontrolador que se programa usando un lenguaje de programación especial, basado en lenguaje Wiring, el lenguaje de programación Arduino, de manejo simple y versátil. Este microcontrolador puede usarse de forma autónoma, sin necesidad de un ordenador, y tienen un tamaño reducido.

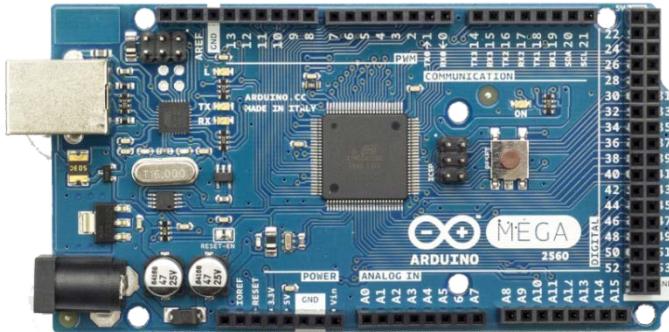


Figura 15 - Arduino Mega 2560

El uso de Arduino presenta otras ventajas: La alimentación de la placa tienen un rango amplio de voltajes admitidos, lo que la hace ideal para el uso con baterías, y tiene salidas estabilizadas incorporadas a 5 V y 3,3V que corresponden con las tensiones de alimentación más comunes en los sensores.

En cuanto a comunicación con el entorno:

- Arduino tiene una serie de pines de entrada analógica, los cuales con un CAD de 10 bits, tienen como entrada un valor de tensión (entre 0 y 5 V habitualmente) y como salida un valor digital entre 0 y 1023.
- Tiene una serie de pines reversibles de entrada y salida digital, tienen la capacidad de escribir y leer valores de *HIGH* o *LOW*, es decir, una tensión baja, 0V idealmente que corresponde a un 0 lógico, y una tensión alta de 5V por lo general, un 1 lógico.
- Tiene una serie de pines *PWM* (*Pulse-Width Modulation*, modulación por ancho de pulsos en español), que funcionan como una salida analógica, en los cuales puede escribirse el valor de un voltaje concreto dentro del rango de trabajo del microprocesador.
- Incluye una serie de conectores para comunicación, varias líneas construidas con tecnología *TTL* (*Transistor-Transistor Logic*), otras que soportan el estándar de comunicación *SPI* (*Serial Peripheral Interface*), y otros que lo hacen a través de *TWI* (*Two-Wire Interface*) o *I²C* (*Inter-Integrated Circuit*).

Para la presentación de resultados se le puede acoplar fácilmente una pantalla de tipo LCD, lo que elimina la necesidad de conexión a un ordenador.

Las características mencionadas de Arduino hacen que sea una solución versátil y útil para los fines que se buscan.

4.3. Elementos no sensitivos

Para la realización del prototipo se han de tener en cuenta otras partes, como son la neumática, la eléctrica y la electrónica auxiliar. A continuación se describen estos elementos. Para estos elementos se han tenido en cuenta aspectos como el material, para evitar interacciones con la corriente de gas, así como otras consideraciones puramente prácticas, como diámetros o conexiones.

4.3.1. Cámara de medida

La cámara o cubeta, el lugar en el que se realizará el intercambio de gases, se encuentra ya diseñado y construido por los investigadores de la unidad de recursos forestales del CITA. La cámara tiene el aspecto que se muestra en las figuras 16 y 17.

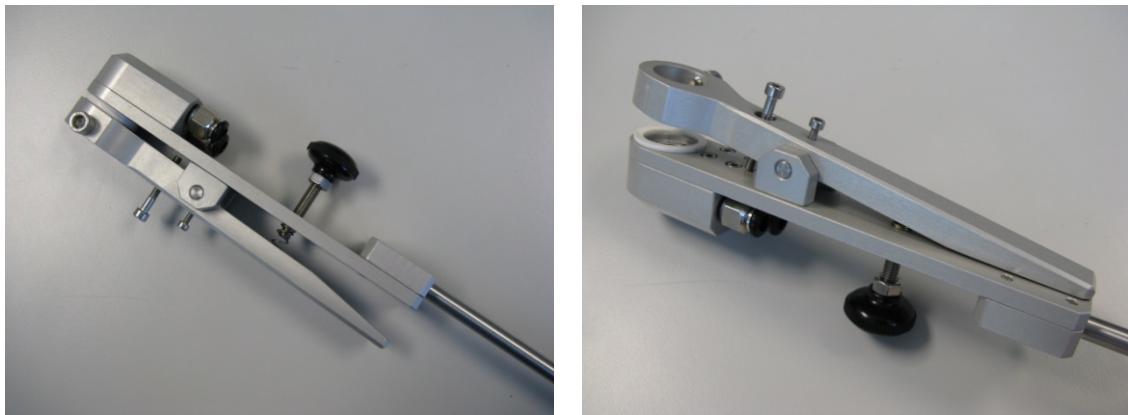


Figura 16 – Cámara de medida, cerrada y abierta.

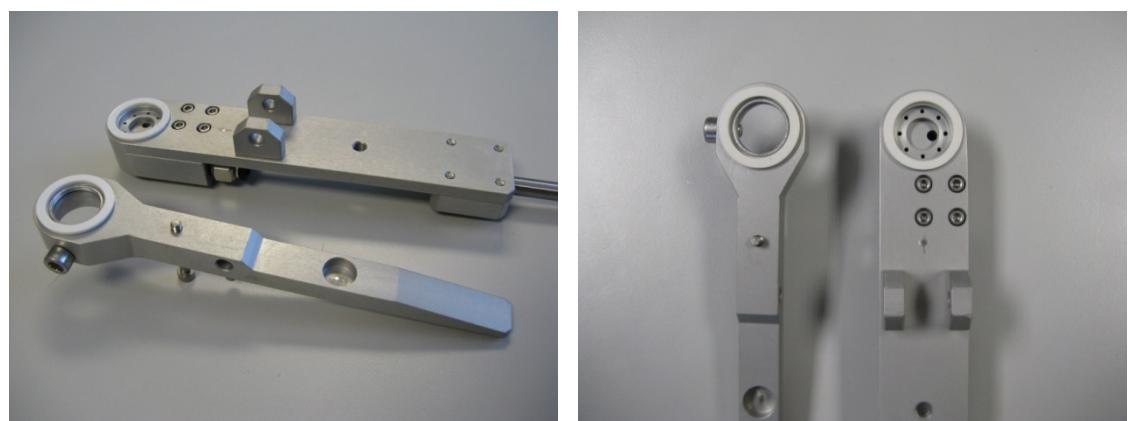


Figura 17 – Cámara desmontada. Detalle del sistema de *manifold* a la derecha.

Las cámaras de medida pueden tener distintas configuraciones. Algunas hacen el contacto con la hoja a través de una ventana, una superficie plana, mientras que en otras la hoja se encuentra completamente envuelta. Se dan otras diferencias de diseño en función de la aplicación, como la presencia o no de elementos de agitación activa, de elementos de disipación térmica, activos o pasivos, o incluso de control de temperatura como celdas Peltier.

Esta cámara forma un circuito para el aire, el cual inyecta a través de un distribuidor neumático o *manifold* en la corona exterior de un volumen que está en contacto con la hoja. Este tipo de diseño hace pasar el caudal de aire por varios orificios de pequeño tamaño, aumentando su velocidad y orientando el flujo hacia la hoja para así evitar el uso de sistemas de agitación activa y mantener la cámara en estado turbulento. El aire se extrae de la cámara a través de una abertura en la parte central de la misma. Es un diseño ideado para ser sencillo y no requerir elementos externos.

La verificación de la turbulencia requeriría de simulación fluidodinámica computacional o de ensayos de comportamiento, lo que queda fuera del alcance del presente proyecto debido a su complejidad, pudiendo constituir un proyecto en sí mismo. Las velocidades de salida de gas por los ocho orificios de 2 mm de diámetro serán en todo caso menores a 0,25 m/s. Por comparación con los valores de la figura 10, podría requerirse agitación externa.

La cámara tiene mecanizadas dos roscas de 1/8" para la inserción de rácores que la conecten al circuito neumático, y un diseño en forma de pinza para poder introducir y extraer las hojas de medida con facilidad. El cierre de la cámara se hace de forma estanca con dos juntas de silicona.

4.3.2. Materiales

El gas de trabajo es aire a temperaturas cercanas a la atmosférica y presiones poco superiores a la atmosférica, por lo que no se han de considerar propiedades de los materiales en cuanto a ambientes oxidantes/reductores, corrosivos, altas presiones o temperaturas extremas. Lo que es importante considerar es la absorción de agua para evitar interferencias en las medidas, especialmente en las conducciones, donde la superficie de material por unidad de volumen es mayor. Hay diversos materiales que satisfacen esta restricción.

Materiales habituales que pueden ser usados para los distintos elementos no sensitivos, que cumplen las restricciones planteadas y son fácilmente accesibles y de precio competitivo son:

- Polímeros fluorados, que presentan las siguientes características [28]–[30]:
 - PTFE, Politetrafluoretileno o Teflón, que presenta una absorción de agua del menor a 0,001% y comportamiento altamente inerte, aunque a un precio más elevado.
 - FEP, Etileno-propileno fluorado (absorción de agua es menor a 0,01%).
 - PFA, Perfluoroalcoxialcano (absorción de agua es menor a 0,03%).
- Poliolefinas, destacando los siguientes [30], [31]:
 - PMP, Polimetilpenteno (más conocido por nombres comerciales como Nalgene o TPX, cuya absorción de agua es menor a 0,01%)
 - PP, Polipropileno (absorción de agua menor a 0,01%)
 - PE, Polietileno (en menor medida que los demás, pero de bajo precio y fácil accesibilidad, presenta una absorción de agua menor a 0,1%)
- Otros materiales desarrollados como Norprene o Viton, inertes y más elásticos que polímeros convencionales, también de mayor precio y menor accesibilidad.

4.3.3. Conducciones

Para las conducciones se empleará teflón de 6 mm de diámetro externo y 4 mm de interno por dos razones:

- El teflón es el material que menor interacción presenta con el agua, lo que es especialmente importante en conducciones, donde hay mayor superficie por unidad de volumen. Además, presenta una flexibilidad suficiente para la aplicación requerida.
- Tanto las conducciones de teflón de 6 mm de diámetro externo y 4 mm de interno pueden encontrarse fácilmente en proveedores de materiales industriales, así como los accesorios necesarios para sus conexiones, como rácores, tes, adaptadores y reguladores. En la figura 18 se muestran los que se requieren en el presente diseño.



Figura 18 – Regulador de caudal, te, rácor y reductor. Accesorios requeridos para el prototipo

4.3.4. Filtro de partículas

Se empleará un filtro de teflón de tamaño menor a 5 μm de tamaño de poro para evitar la entrada de polvo, polen o pequeños insectos u otras partículas o cuerpos extraños al sistema. El teflón, como la mayoría de polímeros fluorados, es altamente inerte por lo que la interacción del plástico con el aire será mínima.

4.3.5. Cámara de homogeneización

Para evitar que variaciones puntuales en temperatura o humedad del aire de entrada afecten significativamente a las medidas que se están tomando se coloca una cámara de homogeneización o buffer antes a la entrada del sistema, un volumen en el cual se inyectará el aire atmosférico y del cual se extraerá el aire para medida.

El empleo del buffer se explica por las modificaciones a corto plazo en el aire que entra a la cubeta más las introducidas por el operador o la planta. La piel tiene una temperatura superior a la del aire y transpira, por lo que el aire en las inmediaciones de la superficie cutánea tendrá una humedad superior a la del ambiente. En cuanto a las plantas, la interferencia en cuanto a temperatura es despreciable debido a que está prácticamente en equilibrio con el ambiente, pero su superficie transpira, por lo que deberá mantenerse una distancia prudencial.

A mayor tamaño del *buffer*, mayor será la amortiguación producida de las perturbaciones de entrada. Por el contrario, el equipo está pensando para ser portátil y trabajar en condiciones de campo, y conviene evitar sobredimensionar el elemento.

Mediante un balance de materia en estado no estacionario puede calcularse el efecto de la perturbación en el aire de entrada al sistema, para así determinar un tamaño adecuado. El modelo empleado para el cálculo del tamaño del *buffer* puede encontrarse en el anexo XII, y se ha determinado en 1000 mL.

En cuanto al material constructivo, como en el resto de elementos del circuito neumático, lo fundamental es evitar interacciones con el gas. A través de proveedores de material de laboratorio se puede encontrar recipientes adecuados, para este equipo, un recipiente de TPX de 1000 mL proporciona un comportamiento inerte así como una rigidez muy elevada, necesaria para evitar que compresiones o expansiones del material afecten al caudal inyectado.

4.3.6. Bomba, válvulas y purga

Los caudales de aire que se van a suministrar van a ser bajos, en el rango de 50-400 mL/min, y también se desean incrementos de presión bajos. Todo el sistema debe estar a una presión ligeramente por encima de la atmosférica para evitar la entrada de aire atmosférico a través de posibles fugas o faltas de estanqueidad. Un valor de sobrepresión razonable se ha determinado en 10 mm c.d.a. [6] , aproximadamente 100 Pa o 1 mbar. Una sobrepresión tan baja puede ser fácilmente alcanzada por pequeños equipos de impulsión.

En la práctica, aparecerán una serie de pérdidas de carga primarias debidas a las conducciones, y secundarias por los accesorios empleados para las conexiones y elementos ajenos a los conductos. En el anexo XIII se ha hecho una estimación del valor máximo que estas pérdidas pueden alcanzar, y se ha estimado este valor en el entorno de 300 Pa.

La bomba a emplear debe satisfacer las condiciones anteriores, y dar un cierto margen para un buen control. Se ha explorado el mercado de bombas de bajo caudal y presión y se encuentran útiles para el propósito que se maneja las bombas de la empresa GAST, por su serie de bombas de diafragma miniatura. La serie más pequeña, la 2D1034, tiene unas dimensiones máximas de 34x26x16 mm que la hace muy fácil de integrar en un sistema portátil, proporciona un caudal máximo de 650 mL/min a presión nula, y una presión máxima de 5 psi, sobre 0,35 bar, a caudal nulo.

A un caudal de 400 mL/min, como el máximo que se maneja, la bomba proporciona una presión entorno a 0,1 bar. Esta sobrepresión es mayor a la estimada que requerirá el sistema, y se plantea controlar el régimen de la bomba con una válvula a la entrada del sistema, y una purga controlada. Los detalles sobre la curva de la bomba, y la forma de control se encuentran en el anexo XIV para su consulta. Se muestran también en el citado anexo los accesorios necesarios para el diseño de prototipo.



Figura 19 - Bomba miniatura GAST 2D1034

4.3.7. Ubicación de sensores de humedad y temperatura

Los sensores de humedad y temperatura se deben incluir en la corriente de aire. Estos elementos presentan una deriva temporal, y una degradación de la calidad con el paso de los años, por lo que es posible que se requiera un reemplazo. Se plantea por tanto la colocación de los sensores en un lugar de fácil acceso. Para evitar la realización de mecanizados a medida, de alto coste, se plantea la posibilidad de insertar los sensores en una teca de diámetro suficiente como para albergarlos. Se evitará soldar el sensor a los cables por recomendación del fabricante (para una máxima precisión) y para facilitar el posible cambio, por lo que los cables se soldarán a un socket o base, en el cual se insertará por presión el sensor. La salida de cables podría sellarse con parafina, silicona u otro tipo de sellado no destructivo, y en caso de que el pequeño volumen muerto resultante fuera una fuente de error, se puede llenar de un material no absorbente y compacto, como lana de vidrio.

4.4. Análisis Económico

Para poder realizar una estimación de la viabilidad económica del porómetro diseñado se listan en la siguiente tabla todos los componentes, así como los precios estimados de todos los componentes necesarios.

Componente	Precio Unitario	Cantidad	Precio total
SENSORES			
Sensor de humedad y temperatura Sensirion SHT75	23,88 €	2	47,76 €
Caudalímetro Sensirion ASF1430	273,15 €	1	273,15 €
Transceptor Maxim Integrated MAX232ACPE	5,27 €	1	5,27 €
Sensor de presión Honeywell SSCDANN030PAAA5	27,38 €	2	54,76 €
Termopar de aislamiento mineral tipo K, Ø0,5 mm	44,90 €	2	89,80 €

Cable de termopar, accesorios de conexión termopar, accesorios conexión Pt100	30,00 €	1	30,00 €
Amplificación instrumentación para termopar y Pt100, Texas Instruments INA122P y resistencias precisión 1%	7,80 €	2	15,60 €
Sonda Pt100 con conexión	42,70 €	1	42,70 €
PROCESAMIENTO DE DATOS			
Arduino Mega 2560	47,19 €	1	47,19 €
Pack electrónica auxiliar: (<i>protoboard</i> , puentes de conexión, resistencias, condensadores, LEDs, transistores, diodos, LCD...)	72,76 €	1	72,76 €
CÁMARA, TUBOS Y ACCESORIOS NEUMÁTICOS			
Cámara de medida	350,00 €	1	350,00 €
Filtro PFTE 5 µm	0,40 €	1	0,40 €
Tubo PFTE, $\varnothing_{ext}=6\text{mm}$, $\varnothing_{int}=4\text{mm}$	4,16 €/m	5	20,80 €
Racor de conexión rápida, Aignep PC06-01	4,16 €	8	33,28 €
Reductor, Aignep PGJ 10-06	2,91 €	4	11,64 €
Unión de tubo en T, Aignep PUT 06-00, Ø6mm	1,91 €	2	3,82 €
Unión de tubo en T, Aignep PUT 10-00, Ø10mm	2,57 €	2	5,14 €
Regulador de caudal bidireccional Aignep 8860	9,28 €	2	18,56 €
Buffer Nalgene PMP 32-1000	10,00 €	1	10,00 €
Bomba GAST 2D1034-101-1035	187,58 €	1	187,58 €
SERVICIOS Y ELEMENTOS ADICIONALES			
Diseño de circuitos integrados	100,00 €	1	100,00 €
Batería Recargable Li-Ion 12V larga duración	58,62 €	1	58,62 €
Otros gastos	100,00 €	1	100,00 €

Tabla 9 – Análisis económico del prototipo proyectado.

El coste estimado del prototipo diseñado es de 1578,83€, un precio considerablemente menor al de los instrumentos comercialmente disponibles, en más de un orden de magnitud, de los cuales se ha hablado en el capítulo 1. Además del coste en términos económicos, el porómetro diseñado presentaría toda una serie de ventajas ya definidas respecto a otros instrumentos, lo que lo hace viable para su ejecución.

4.5 Implementación del prototipo

Se ha llevado a cabo la implementación del prototipo diseñado para comprobar la validez de lo hecho a lo largo del presente proyecto. Se han adquirido los elementos indicados a lo largo del capítulo y se ha realizado la integración de todos los elementos en placas de montaje rápido. El resultado obtenido se muestra en la figura 20.

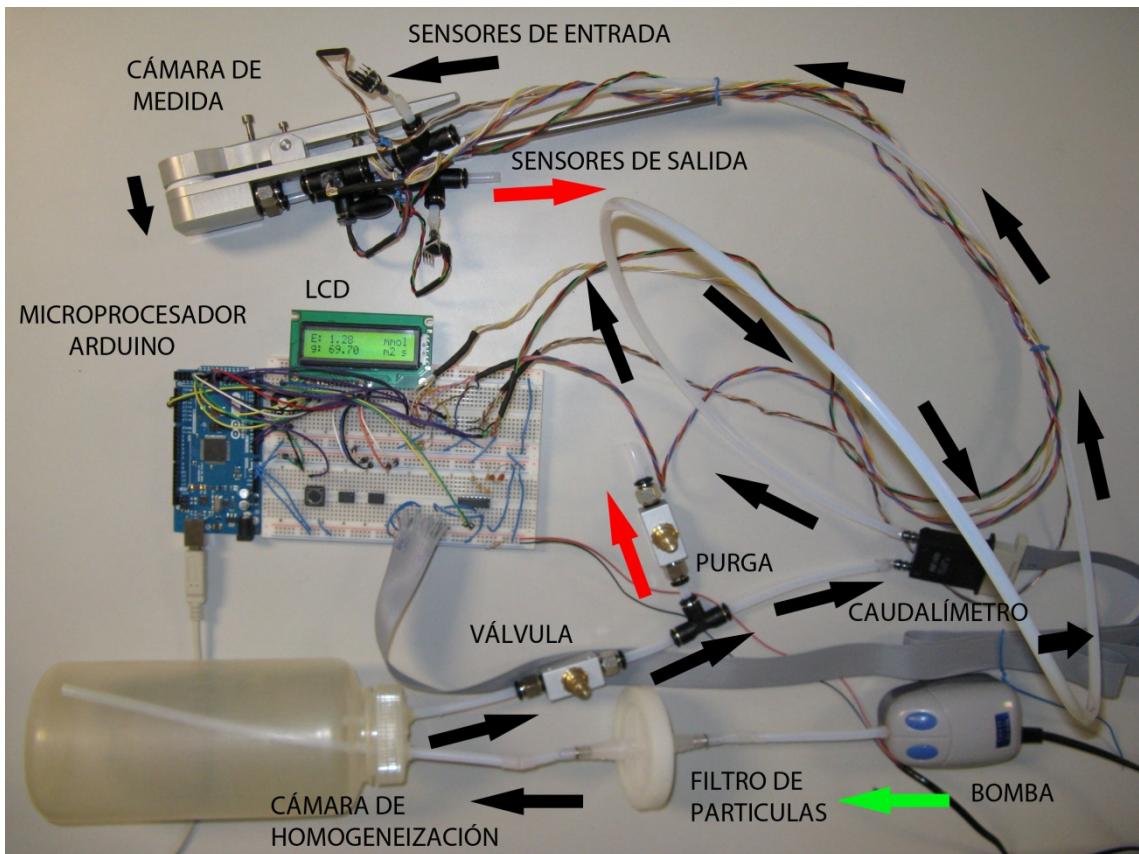


Figura 20 - Implementación del prototipo de porómetro diseñado

Para una mejor identificación de los componentes se han rotulado con su función, y se ha marcado la dirección del flujo de aire con flechas. La flecha verde indica una entrada de aire, mientras que las flechas rojas indican salidas (una a través de la purga, y otra a la salida de la cámara). Las flechas negras indican el recorrido por las conducciones.

Las señales de todos los sensores se llevan al Arduino, el microprocesador, que realiza las lecturas y los acondicionamientos para proporcionar un valor final de transpiración y de conductancia estomática que muestra por el LCD.

El *sketch* de Arduino que contiene el código para la ejecución del porómetro se encuentra incluido en el Anexo XV. Esta programación está diseñada para su funcionamiento autónomo, sin necesidad de un ordenador, proporcionando las lecturas de transpiración y conductancia por la pantalla LCD. Opcionalmente, si se conecta al ordenador, se mostrarán por pantalla todas las variables medidas, no solamente las finales de transpiración y conductancia. Esto puede ser útil en caso de mal funcionamiento, para identificar las causas de error.

El prototipo funciona correctamente, es capaz de medir las variables implementadas con coherencia, y está listo para fases posteriores, como estudios de comportamiento de la cámara, implementación en circuito impreso, miniaturización y montaje, calibración y finalmente trabajo en campo.

Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto ha sido desarrollar un prototipo de porómetro para medida de transpiración en plantas basado en sensores capacitivos. El ámbito de este proyecto se encuentra compartido entre la fisiología y la ingeniería, haciendo necesaria la aplicación de conocimientos de ambas ramas. Ante un objetivo tan amplio como el que se persigue, se ha organizado un esquema de actuación que puede agruparse en tres etapas:

En primer lugar, se ha realizado un estudio de los fenómenos teóricos, fisiológicos, implicados. En esta primera parte es donde se ha revisado gran cantidad de bibliografía. Los complejos fenómenos de transpiración están basados en gran cantidad de procesos e interacciones fisiológicas, pero un modelo simplificado como el SPAC proporciona una simplificación de gran utilidad. En esta parte la función de expertos ecofisiólogos ha sido fundamental, tanto a la hora de orientar la búsqueda bibliográfica, como a la hora de contestar a las cuestiones que se plantean. En ocasiones, la experiencia ha sido el factor clave para encontrar respuesta a ciertas incógnitas.

En segundo lugar, se ha planteado un modelo matemático que describe los procesos involucrados. En esta parte es donde se unen la fisiología vegetal y la ingeniería. Las hipótesis planteadas en el primer apartado han de ser comprobadas desde un punto de vista técnico. El objetivo general, ha sido acotado, y se había decidido desde el punto de vista teórico cuál es la solución idónea. A pesar de eso, la viabilidad técnica del proyecto no estaba asegurada. Una de las hipótesis, el empleo de sensores capacitivos, menos precisos que los habitualmente empleados, lo cual plantea problemas como se ha podido comprobar. Este proyecto no podría haber sido llevado a cabo sin duplicar los sensores, pero identificar limitaciones como esta requiere de un modelado. Se han empleado herramientas adecuadas al problema, en este caso modelado con Matlab, que han permitido determinar las condiciones en las que el proyecto es técnicamente viable.

En tercer y último lugar, se ha llevado a cabo el diseño del prototipo que satisfaga las características y condiciones descritas en el capítulo anterior, de creación del modelo. El diseño de un prototipo se ha entendido como un objetivo muy práctico. De este proyecto se obtiene un instrumento cuyos componentes se han pensado para proporcionar el mejor rendimiento, tanto en sensores como en los elementos no sensitivos, en cuanto a tamaños, materiales, rendimientos y otras consideraciones. Es por esto que se proponen los elementos concretos que este prototipo debe de tener, y no de forma genérica.

El conjunto, se considera que del proyecto se extraen unos resultados altamente satisfactorios. Ante la identificación de unas deficiencias importantes en la tecnología disponible en porometría se presenta una solución alternativa e innovadora que resuelve los problemas planteados. Además, el diseño tiene un coste mucho menor a las alternativas tradicionales, y al haber sido ideado para una plataforma de electrónica abierta tan versátil como Arduino, admite una gran personalización con relativamente poco esfuerzo adicional. El instrumento desarrollado presenta la respuesta esperada, con la aparición de inconvenientes menores únicamente, fuera del alcance del presente proyecto.

Este proyecto es ampliamente multidisciplinar. Para su realización se han necesitado conocimientos de fisiología y de varias ramas de la ingeniería. La parte fisiológica se encuentra totalmente fuera de las áreas de estudio abarcadas en la Ingeniería Química, y de la parte electrónica se tenía únicamente un conocimiento muy elemental. La necesidad de desenvolverse en estas áreas, junto con las propias de la Ingeniería Química, ha requerido una fuerte inversión de tiempo y esfuerzo. Pese a las dificultades, el trabajo realizado cumple ampliamente los requerimientos planteados, y en el camino se han adquirido una serie de competencias de las cuales no se disponían con anterioridad, y que se espera que puedan ser de utilidad en el futuro próximo, en el mundo laboral.

5.2. Líneas futuras

A partir del prototipo desarrollado en el presente proyecto surgen nuevas líneas que pueden complementar o ampliar al desarrollado aquí. Uno de los más inmediatos podría ser la miniaturización, calibración y puesta a punto como sistema de campo. Del trabajo del laboratorio a la medida en campo hay diferencias que podrían afectar al funcionamiento del porómetro. Estos pueden ser bien debidos a la naturaleza, como la radiación solar directa e intermitente sobre el instrumento, pudiendo requerir de tratamientos superficiales de los componentes, la adición de filtros como espejos calientes, o elementos activos de disipación térmica u otros.

Otro proyecto complementario a este podría ser un estudio fluidodinámico detallado de la cámara de medida para su optimización o para su adaptación a otro tipo de hojas, como las aciculares de árboles como el pino, o en hojas pequeñas como las pinnadas que serían imposibles de medir con un diseño como el planteado.

Puede ser interesante incorporar otras prestaciones, como de comunicación inalámbrica, o de almacenamiento de grandes cantidades de datos e incorporación de nuevas funciones de medida no incluidas en el presente prototipo, como el pretratamiento del aire para la realización de curvas de respuesta.

Mediante la ampliación del presente proyecto se podría llegar tan cerca como se desee al nivel de complejidad de los instrumentos comerciales, siendo constantemente mejorado. Al ser un instrumento innovador, podrían incluso surgir líneas de trabajo en campos tan diversos como el marketing, o la investigación de mercados, si se planteara la posibilidad de un estudio para su posible comercialización.

Todo este abanico de posibilidades queda abierto para futuros proyectos, los resultados positivos hacen que sea viable la inversión en este campo, y se espera que esta línea que se abrió pueda continuarse en un futuro cercano.

Bibliografía

- [1] J. J. Peguero-Pina, D. Sancho-Knapik, F. Morales, J. Flexas, and E. Gil-Pelegrín, "Differential photosynthetic performance and photoprotection mechanisms of three Mediterranean evergreen oaks under severe drought stress," *Funct. Plant Biol.*, vol. 36, no. 5, p. 453, 2009.
- [2] K. Ishida, T. Shimazaki, F. Tanei, and T. Yagi, "Infrared Gas Analyzer," 1975.
- [3] W. Fabinski, "Multicomponent Infrared Gas Analyzer," 1991.
- [4] PP Systems, "Ciras-3, Portable Photosynthesis System." 2013.
- [5] LI-COR, "LI-6400XT System, Photosynthesis, Fluorescence, Respiration." 2013.
- [6] R. W. Pearcy, J. Ehleringer, H. A. Mooney, and P. W. Rundel, *Plant Physiological Ecology*. London: Chapman and Hall, 1991, p. 457.
- [7] J. Azcón-Bieto and M. Talón, *Fundamentos de Fisiología Vegetal*, McGraw Hil. Madrid, 2000, p. 522.
- [8] E. Gil-Pelegrín, J. J. Peguero-Pina, I. Aranda, and A. Vilagrosa, "El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal," *Invest Agrar Sist Recur*, vol. 14, no. 3, pp. 358–370, 2005.
- [9] M. M. Arbo and A. M. González, "Morfología de las Plantas Vasculares," 2013. [Online]. Available: <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema13/13-4estomas.htm>.
- [10] W. Larcher, *Physiological Plant Ecology*, Springer. Berlin, 2003, p. 513.
- [11] P. S. Nobel, *Biophysical Plant Physiology and Ecology*. San Francisco, 1984, p. 608.
- [12] E. N. Fuller, P. . Schettler, and J. C. Geddings, "A new method for the prediction of binary gas-phase diffusion coefficients," *Ind. Eng. Chem.*, vol. 58, pp. 19–27, 1966.
- [13] T. D. Sharkey, K. Imai, G. D. Farquhar, and I. R. Cowan, "A direct confirmation of the standard method of estimating intercellular partial pressure of CO₂," *Plant Physiol.*, vol. 69, pp. 657–659, 1982.
- [14] A. L. Buck, "New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor," *Natl. Cent. Atmospheric Res. Boulder*, vol. December, pp. 1527–1532, 1981.
- [15] J. A. Goff and S. Gratch, "Low-pressure properties of water from -160° to 212°F," *Trans. Amer. Soc. Heat. Vent. Eng.*, vol. 52, pp. 95–121, 1946.
- [16] R. J. List, *Smithsonian Meteorological Tables*, 6th ed. Smithsonian Institution Press, 1949, p. 350.
- [17] A. Wexler, "Vapor Pressure formulation for water in the range 0° to 100°C - A revision," *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, vol. 80, p. 775, 1976.
- [18] J. M. Richards, "Simple Expression for the saturation vapor pressure of water in the range -50 degrees to 140 degrees," *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 4, pp. 15–18, 1971.
- [19] PP Systems, "CIRAS-2 Portable Photosynthesis System." PP Systems, 2005.

- [20] Temperature Controls, "RTD accuracy – Class A, Class B, 1/3 DIN, 1/10 DIN." [Online]. Available: <http://www.temperature.com.au/Support/RTDSensors/RTDaccuracyClassAClassB13DIN110DIN.aspx>.
- [21] Sensirion, "Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75) - Humidity and Temperature Sensor IC," vol. 71, no. December. pp. 1–12, 2011.
- [22] A. Creus Solé, *Instrumentación Industrial*, 8th ed. Barcelona: Marcombo, 2011, p. 777.
- [23] Omega, "RTD Specifications." .
- [24] TC S.A., "Guía de Termometría para Termopares y Resistencias, Versión 6.0." Madrid, p. 73, 2010.
- [25] Sensirion, "ASF1430 Bidirectional Mass Flow Meter - Datasheet." pp. 1–12, 2008.
- [26] Honeywell, "TruStability® Silicon Pressure Sensors: SSC Series-Standard Accuracy."
- [27] M. Banzi, *Introducción a Arduino*. Madrid: Anayta Multimedia, 2014, p. 127.
- [28] Boedeker, "PTFE, FEP and PFA Specifications." [Online]. Available: http://www.boedeker.com/feppfa_p.htm.
- [29] Saint-Gobain, "NORPRENE® Chemical Tubing."
- [30] Bove-ag plásticos y elastómeros S.L., "Plásticos mecanizables." [Online]. Available: http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_polipropileno.html.
- [31] Mitsui Chemicals America INC., "TPX® Polymethylpentene (PMP) Properties." [Online]. Available: http://www.mitsuichemicals.com/tpx_phy.htm.
- [32] Maxim Integrated, "+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers - Datasheet," pp. 1–38.
- [33] J. Blasco Alberto, "Pérdidas de carga para gases." [Online]. Available: http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/if_activ/if_activ_perdidas_carga_gases.htm.
- [34] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo, S.A., 1970, p. 660.

Índice de figuras

Figura 1 – Valores de fotosíntesis (arriba) de resistencia estomática (abajo) para Q. Coccifera, Q. Suber y Q. Ilex en función del potencial hídrico antes del amanecer (izquierda) y al mediodía (derecha)	2
Figura 2 – Ciras 3, Medidor de transpiración y fotosíntesis de PP-Systems.	3
Figura 3 – LI-COR LI-6400XT, medidor de transpiración y fotosíntesis de LI-COR.....	3
Figura 4 – Porómetro AP4 de Delta-T (a) y porómetro SC-1 de Decagon (b).....	4
Figura 5 – Dependencia de la fotosíntesis con la temperatura.....	7
Figura 6 – Esquema del continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC).....	8
Figura 7 – Micrografías de estomas vegetales	9
Figura 8 – Tabla de transpiraciones máximas. Valores en $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$	10
Figura 9 – Red de conductancias dispuestas en serie/paralelo e indicación de las relaciones entre las mismas y simplificaciones comúnmente aceptadas[6].	11
Figura 10 – Resistencia de la capa límite al flujo de vapor de agua en hojas de dimensiones de 0,1 a 100 cm. En (a) se representa el caso de convección forzada, en (b) el caso de convección natural [6]	12
Figura 11 – Diagrama simplificado de un porómetro de sistema abierto	18
Figura 12 - Diagrama de diseño del porómetro	29
Figura 13 – Sondas de humedad y temperatura, Vaisala HMP110 (izquierda) y Sensirion SHT75 (derecha)	30
Figura 14 - Caudalímetro Sensirion ASF1430 (a) Y sensor de presión Honeywell SSCDANNO30PAAA5 (b)	32
Figura 15 - Arduino Mega 2560	33
Figura 16 – Cámara de medida, cerrada y abierta.	34
Figura 17 – Cámara desmontada. Detalle del sistema de <i>manifold</i> a la derecha.	34
Figura 18 – Regulador de caudal, te, rácor y reductor. Accesorios requeridos para el prototipo	35
Figura 19 - Bomba miniatura GAST 2D1034	37
Figura 20 - Implementación del prototipo de porómetro diseñado	39
Figura 21 – Distribución de error cometido en el cálculo de E con $\Delta\text{HR}=20\%$	59
Figura 22 – Distribución de error cometido en el cálculo de g con $\Delta\text{HR}=20\%$	59
Figura 23 - Distribución de error cometido en el cálculo de E con $\Delta\text{HR}=10\%$	60
Figura 24 - Distribución de error cometido en el cálculo de g con $\Delta\text{HR}=10\%$	60
Figura 25 – Distribución de error cometido en el cálculo de E con $\Delta\text{HR}=6\%$	61
Figura 26 – Distribución de error cometido en el cálculo de g con $\Delta\text{HR}=6\%$	61
Figura 27 - Distribución de error en el cálculo de E, $\Delta\text{HR}=20\%$, en el sistema autocalibrante.....	67
Figura 28 – Distribución de error en el cálculo de g, $\Delta\text{HR}=20\%$, en el sistema autocalibrante.....	67
Figura 29 – Distribución de error en el cálculo de E, $\Delta\text{HR}=10\%$, en el sistema autocalibrante.....	68

Figura 30 – Distribución de error en el cálculo de g , $\Delta HR=10\%$, en el sistema autocalibrante.....	68
Figura 31 – Distribución de error en el cálculo de E , $\Delta HR=6\%$, en el sistema autocalibrante.	69
Figura 32 – Distribución de error en el cálculo de g , $\Delta HR=6\%$, en el sistema autocalibrante.	69
Figura 33 – Imagen y diagrama del sensor de temperatura y humedad Sensirion SHT75.....	71
Figura 34 – Función de linealización de la señal del SHT75 en modo de 12 bits.	72
Figura 35 - Conexión de la sonda Pt100 para medida de temperatura de referencia.....	74
Figura 36 – Conexión de los termopares en modo diferencial para medida de temperatura.....	75
Figura 37 – Imagen y diagrama del caudalímetro Sensirion ASF1430	77
Figura 38 – Diagrama del transceptor Maxim Integrated MAX232ACPE	77
Figura 39 – Dibujo y diagrama del sensor de presión Honeywell SSCDANNO3OPAAA5	80
Figura 40 – Variación de la humedad del aire en la cámara frente al tiempo de aplicación de la perturbación para un caudal de 200 mL/min y distintos volúmenes de cámara (mL).....	84
Figura 41 - Variación de la temperatura del aire en la cámara frente al tiempo de aplicación de la perturbación para un caudal de 200 mL/min y distintos volúmenes de cámara (mL).....	84
Figura 42 - Nomograma de pérdidas secundarias[34]	88
Figura 43 – Imagen y características Bomba GAST Serie 2D1034	90
Figura 44 – Diodo MOSFET de potencia Vishay ARF520	90
Figura 45 – Curvas de las bombas GAST serie 2D1034.....	91
Figura 46 – Control de la bomba por el sistema de válvula y purga	92

Índice de tablas

Tabla 1 - Pares de datos caudal – incremento de humedad relativa para las distintas condiciones límite de medida.....	22
Tabla 2 - Análisis de errores estimados en E y g por error en las medidas de los sensores.....	23
Tabla 3 - Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida.	24
Tabla 4 - Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida para el sistema autocalibrante.....	25
Tabla 5 - Intervalos de confianza al 95% para los distintos casos extremos con el sistema autocalibrante.....	26
Tabla 6 - Intervalos de confianza al 99% para los distintos casos extremos con el sistema autocalibrante.....	26
Tabla 7 - Error individual de cada una de las variables en los casos de que la desviación total en g es mayor al 13.2% en el caso más desfavorable	27
Tabla 8 - Error individual de cada una de las variables en los casos de que la desviación total en g es menor al -10.8% en el caso más desfavorable	28
Tabla 9 - Análisis económico del prototipo proyectado.....	38
Tabla 10 - Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida.	62
Tabla 11 - Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida para el sistema autocalibrante.....	70
Tabla 12 - Constantes de la ecuación de linealización del SHT75.....	72
Tabla 13 - Constantes de la ecuación de compensación de temperatura del SHT75.....	72
Tabla 14 - Constantes de la ecuación de cálculo de temperatura.....	73
Tabla 15 - Constantes de la ecuación de temperatura de rocío	73
Tabla 16 - Ejemplos de interpretación de los valores recibidos del caudalímetro. Los valores marcados con un asterisco no son posibles, se indican únicamente para ilustrar el procedimiento.....	78

Anexos

Anexo I – Funciones Matlab de cálculo del porómetro y de presiones de vapor

```
function [ E,g ] = EjecutarPorometro( Par )
```

Constantes de diseño del porómetro

```
Mw=29e-3; %kg/mol
R=8.314; %Pa·m3/(mol*K)
L=pi()*(18/2)^2/1000^2; %m^2 Ventana circular de 18 mm de diámetro.
```

Lectura de parámetros

```
Vin=Par(1); % m3/s
Tin=Par(2); % K
Tout=Par(3); % K
HRin=Par(4); % %HR
HRout=Par(5); % %HR
Tleaf=Par(6); % K
Pin=Par(7); % Pa
```

Cálculos de transpiración/conductancia

```
%Supuesto de saturación en el interior de la hoja. Cálculo de las
%fracciones molares de vapor en las corrientes de entrada y salida, así
%como en la hoja. Cálculo de caudales
```

```
Pvleaf=Psaturacion(Tleaf);
wleaf=Pvleaf/Pin;
Pvin=Psaturacion(Tin)*HRin;
Pvout=Psaturacion(Tout)*HRout;
win=Pvin/Pin;
wout=Pvout/Pin;
DW=wleaf-wout;
uin=Pin/(R*Tin)*Vin;
uout=uin*((1-wout)/(1-win));

%Cálculo de transpiración y conductancia
E=(uout*wout-uin*win)/L; %mol m^-2 s^-1
wm=(wleaf+wout)/2;
g=E*(1-wm)/(wleaf-wout); %%mol m^-2 s^-1
```

```
end
```

```
function [ Pvsat ] = Psaturacion( T )
%Calcula la presión de saturación del agua vapor a la temperatura T

%T en Kelvin, Pvsat en Pa
Ts=373.16; %K Ts: Temperatura de ebullición a presión estandar
t=1-(Ts/T);
Pvsat=101325*exp(13.3185*t-1.976*t^2-0.6445*t^3-0.1229*t^4);
end
```

Anexo II – *Script ‘EnsayosPorometro.m’*

Simulación de resultados del porometro

Parámetros de entrada

```
Vin=100;           % mL/min
Tin=25;           % °C
Tout=25.2;         % °C
HRin=50/100;       % %HR
HRout=70/100;       % %HR
Tleaf=24.7;         % °C
Pin=1.05;          % bar
```

Conversión a sistema internacional: Acondicionamiento de entradas

```
Vin=Vin/1000^2/60; % m3/s
Tin=Tin+273.15;    % K
Tout=Tout+273.15;    % K
Tleaf=Tleaf+273.15; % K
Pin=Pin*1e5;         % Pa

Par=[Vin,Tin,Tout,HRin,HRout,Tleaf,Pin];
```

Ejecución y resultados

```
[E,g]=EjecutarPorometro(Par);

disp('Transpiración [mmol/m2s]: '); disp (E*1000);
disp('Conductancia [mmol/m2s]: '); disp (g*1000);
```

Anexo III – Script ‘ErroresPorometro.m’

Simulacion de las distribuciones de error

Parámetros de entrada

```
clear all; close all;

%Simulación del funcionamiento del porómetro

%Parámetros de entrada:

    %V: Flujo volumétrico de aire a la entrada
    %Tin: Temperatura de entrada
    %Tout: Temperatura de salida
    %HRin: Humedad relativa de entrada
    %HRout: Humedad relativa de salida
    %Tleaf: Temperatura de la hoja
    %L: Area de la ventana
    %Pin: Presion interna

    Vin=50;           % mL/min
    Tin=25;           % °C
    Tout=25.2;         % °C
    HRin=50/100;       % %HR
    HRout=65/100;       % %HR
    Tleaf=24.7;         % °C
    Pin=1.05;          % bar

    %Valores absolutos del error a simular en las variables anteriores

    EVin= Vin*0.01;    % mL/min
    ETin= 0.3;           % °C
    ETout= 0.3;           % °C
    EHRin= 2/100;         % %HR
    EHRout= 2/100;         % %HR
    ETleaf= 0.3;           % °C
    EPin= 100;           % Pa
```

Conversión a sistema internacional: Acondicionamiento de entradas

```
Vin=Vin/1000^2/60;      % m3/s
EVin=EVin/1000^2/60;    % m3/s
Tin=Tin+273.15;         % K
```

```
Tout=Tout+273.15; % K
Tleaf=Tleaf+273.15; % K
Pin=Pin*1e5; % Pa

ParametrosRef=[Vin,Tin,Tout,HRin,HRout,Tleaf,Pin];
RangoError=[EVin,ETin,ETout,EHRin,EHRout,ETleaf,EPin];
PorcentajeError=100*(RangoError./ParametrosRef);
```

Cálculo del porómetro en las condiciones de referencia y error

```
[Eref,gref]= EjecutarPorometro(ParametrosRef);

%Inicialización de las variables
ErrorE=ones(1,length(ParametrosRef)); ErrorG=ones(1,length(ParametrosRef));

%Simulacion de los errores de medida, respuesta del sistema al error
%introducido en una variable individualmente.

for i=1:length(ParametrosRef)
    ParametrosRef(i)=ParametrosRef(i)+RangoError(i);
    [E,g]= EjecutarPorometro(ParametrosRef);
    ParametrosRef(i)=ParametrosRef(i)-RangoError(i);
    ErrorE(i)=(E-Eref)/Eref*100; ErrorG(i)=(g-gref)/gref*100;
end

ParametrosRef=ParametrosRef+RangoError;
[E,g]= EjecutarPorometro(ParametrosRef);
ErrorET=(E-Eref)/Eref*100; ErrorGT=(g-gref)/gref*100;
```

Presentación de los resultados obtenidos:

```
%Valor absoluto de amplificación del error, porcentaje de error
%introducido, porcentaje de error cometido en el cálculo de E y g, factor
%de amplificación del error, y efecto global de los errores combinados
%sobre E y g

AmplificacionE=ErrorE./PorcentajeError; AmplificacionG=ErrorG./PorcentajeError;
Titulos={'Vin','Tin','Tout','HRin','HRout','Tleaf','Pin'};
disp('Valor absoluto de error introducido');disp(' ');
RangoErrorstr=num2str(RangoError,4);
disp (Titulos); disp(RangoErrorstr);disp(' ');
disp('Porcentaje de error introducido (%));disp(' ');
```

```
disp (Titulos);disp(PorcentajeError);

disp('Porcentaje de Error cometido en E y en G por error en las medidas');disp('
');

disp(Titulos);disp (ErrorE);disp(ErrorG);

disp('Factor Amplificación en error cometido en E y en G por error en las
medidas');disp('
');

disp(Titulos);disp (AmplificacionE);disp(AmplificacionG);

disp(['Total Error en E: ',num2str(ErrorET), '%']);
disp(['Total Error en G: ',num2str(ErrorGT), '%']);
```

Anexo IV – *Script ‘EstadisticaErrores.m’*

En este anexo se incluye el *script* de Matlab empleado para la obtención de los histogramas e intervalos de confianza que se muestra en el anexo V, y cuyo resumen se incluye en la memoria.

Simulación estadística de los errores cometidos

Parámetros de entrada

```
%V: Flujo volumétrico de aire a la entrada
%Tin: Temperatura de entrada
%Tout: Temperatura de salida
%HRin: Humedad relativa de entrada
%HRout: Humedad relativa de salida
%Tleaf: Temperatura de la hoja
%L: Área de la ventana
%Pin: Presión de la cubeta

clear all; close all;

Vin=150;           % mL/min
Tin=25;           % °C
Tout=25.2;         % °C
HRin=50/100;       % %HR
HRout=56/100;       % %HR
Tleaf=24.7;         % °C
Pin=1.05;          % bar

%Errores máximos

EVin=Vin*0.01;     % mL/min
ETin=0.3;           % K
ETout=0.3;           % K
EHRin=2/100;         % %HR
EHRout=2/100;         % %HR
ETleaf=0.3;           % K
EPin=100;           % Pa
```

Conversion a sistema internacional: Acondicionamiento de entradas

```
Vin=Vin/1000^2/60; %m3/s
EVin=EVin/1000^2/60;%m3/s
Tin=Tin+273.15;     %K
```

```
Tout=Tout+273.15; %K
Tleaf=Tleaf+273.15; %K
Pin=Pin*1e5; %Pa
```

Matriz de errores aleatorios

```
a=-1; b=1;maxiter=50000;
r = a + (b-a).*rand(maxiter,7);
ErrorMax=[EVin,ETin,ETout,EHRin,EHROUT,ETleaf,EPin];
ParametrosRef=[Vin,Tin,Tout,HRin,HRout,Tleaf,Pin];
[Eref,gref]= EjecutarPorometro(ParametrosRef);
disp('E ref:');disp(Eref*1000);disp('g ref:');disp(gref*1000);
```

Simulación del porómetro con distintos vectores de error aleatorio

```
for j=1:maxiter

rr=r(j,:);

RangoError=ErrorMax.*rr;
ParametrosError=ParametrosRef+RangoError;
[E,g]= EjecutarPorometro(ParametrosError);
ErrorET(j)=(E-Eref)/Eref*100; ErrorGT(j)=(g-gref)/gref*100;

end
```

Presentación de los resultados

```
%Histograma de los errores simulados
ErrorET=sort(ErrorET);ErrorGT=sort(ErrorGT);
[nE,xE]=hist(ErrorET,20);[nG,xG]=hist(ErrorGT,20);
int=1:maxiter;figure;
bar(xE,nE/maxiter);title('Error en E');xlabel('Error (%)');ylabel('Frecuencia
Relativa');grid on;
figure;
bar(xG,nG/maxiter);title('Error en G');xlabel('Error (%)');ylabel('Frecuencia
Relativa');grid on;

%Cálculo de los intervalos de confianza
[muE,sigmaE] = normfit(ErrorET);[muG,sigmaG] = normfit(ErrorGT);
ZE95=norminv(0.025,muE,sigmaE);ZG95=norminv(0.025,muG,sigmaG);
ZE99=norminv(0.005,muE,sigmaE);ZG99=norminv(0.005,muG,sigmaG);
```

```
disp(['Intervalo de confianza de E al 95%: ',num2str(muE+ZE95),'% / ',num2str(muE-  
ZE95),'%']);  
disp(['Intervalo de confianza de E al 99%: ',num2str(muE+ZE99),'% / ',num2str(muE-  
ZE99),'%']);  
disp(['Intervalo de confianza de G al 95%: ',num2str(muG+ZG95),'% / ',num2str(muG-  
ZG95),'%']);  
disp(['Intervalo de confianza de G al 99%: ',num2str(muG+ZG99),'% / ',num2str(muG-  
ZG99),'%']);
```

Anexo V – Estudio de los errores generados en el sistema inicial

En el presente anexo se representan las distribuciones de error obtenidas para los casos mencionados en la memoria, y que surgen de la ejecución del código recogido en el anexo IV. El intervalo de confianza de la distribución se realiza por ajuste a una distribución normal debido a su gran correlación. Se han simulado tres casos, con gradientes de humedad entre entrada y salida del 20%, 10% y 6%. Estos gráficos y los intervalos de confianza que de ellos se extraen han sido fundamentales para validar los modelos empleados.

Caso 1: $\Delta HR=20\%$

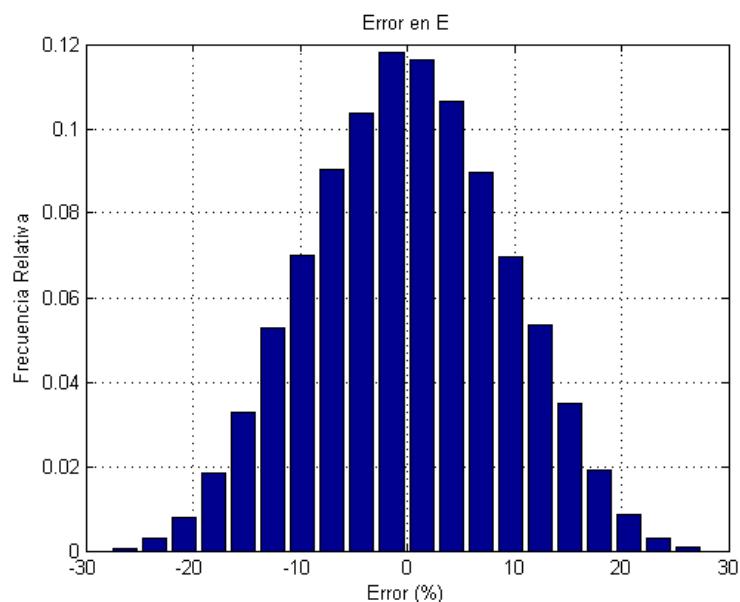


Figura 21 – Distribución de error cometido en el cálculo de E con $\Delta HR=20\%$

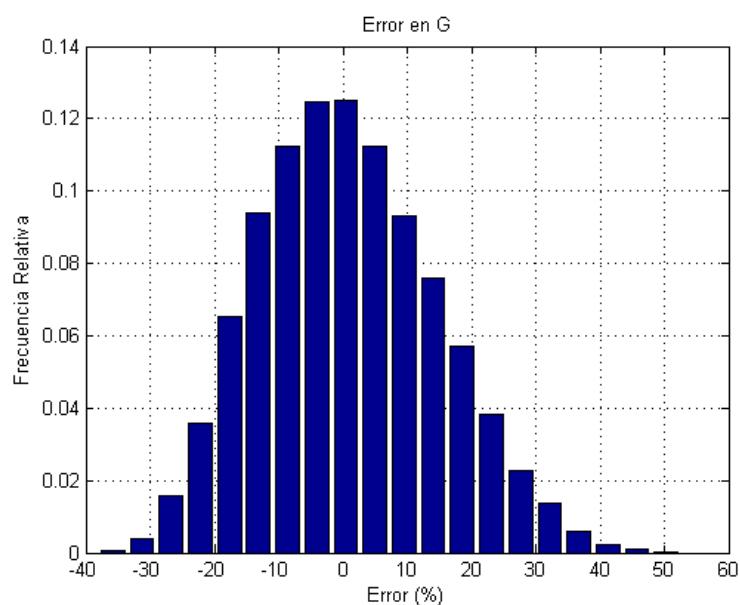


Figura 22 – Distribución de error cometido en el cálculo de g con $\Delta HR=20\%$

Ajustando a una distribución normal las distribuciones obtenidas en la figura 21 y en la figura 22 se obtienen los siguientes intervalos de confianza, acotando el error:

Intervalo de confianza de E al 95%: -17.61% / 17.62%

Intervalo de confianza de E al 99%: -23.15% / 23.15%

Intervalo de confianza de G al 95%: -25.64% / 27.07%

Intervalo de confianza de G al 99%: -34.15% / 35.58%

Caso 2: $\Delta\text{HR}=10\%$

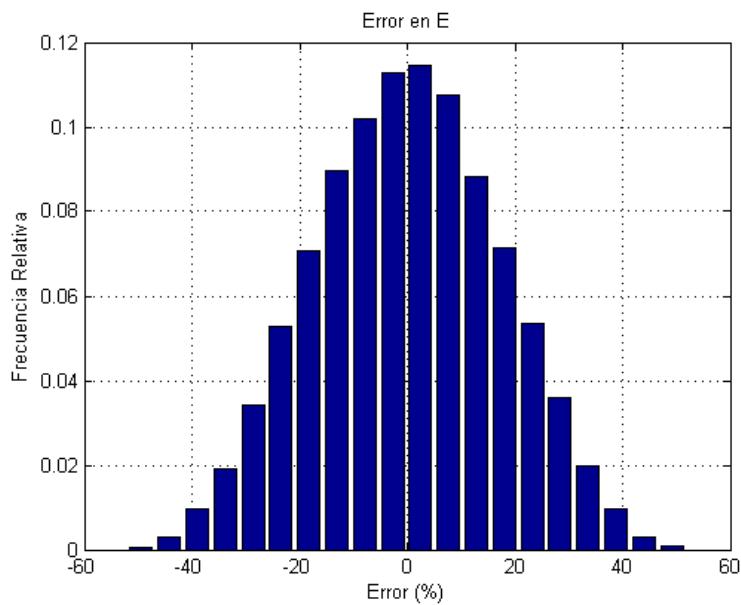


Figura 23 - Distribución de error cometido en el cálculo de E con $\Delta\text{HR}=10\%$

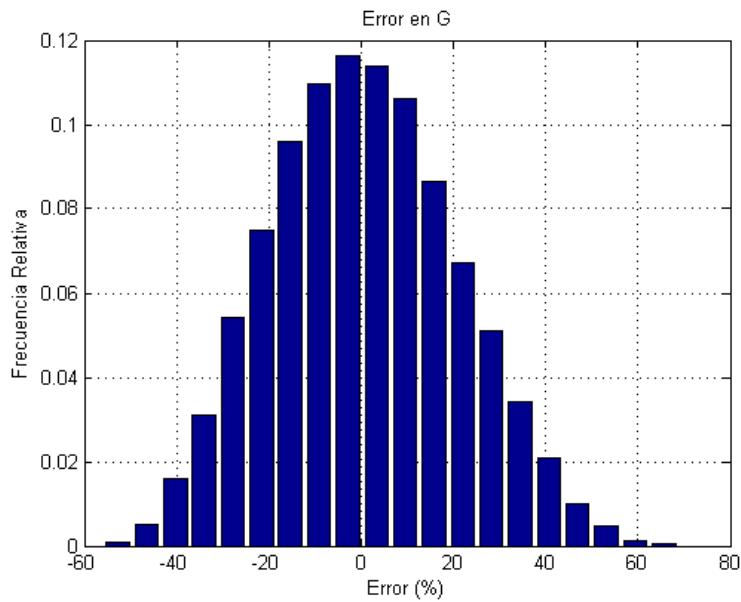


Figura 24 - Distribución de error cometido en el cálculo de g con $\Delta\text{HR}=10\%$

Las distribuciones de error mostradas en la figura 23 y en la figura 24 corresponden a los siguientes intervalos de confianza del error:

Intervalo de confianza de E al 95%: -33.52% / 33.54%

Intervalo de confianza de E al 99%: -44.06% / 44.08%

Intervalo de confianza de G al 95%: -38.17% / 39.38%

Intervalo de confianza de G al 99%: -50.54% / 51.76%

Caso 3: $\Delta HR=6\%$

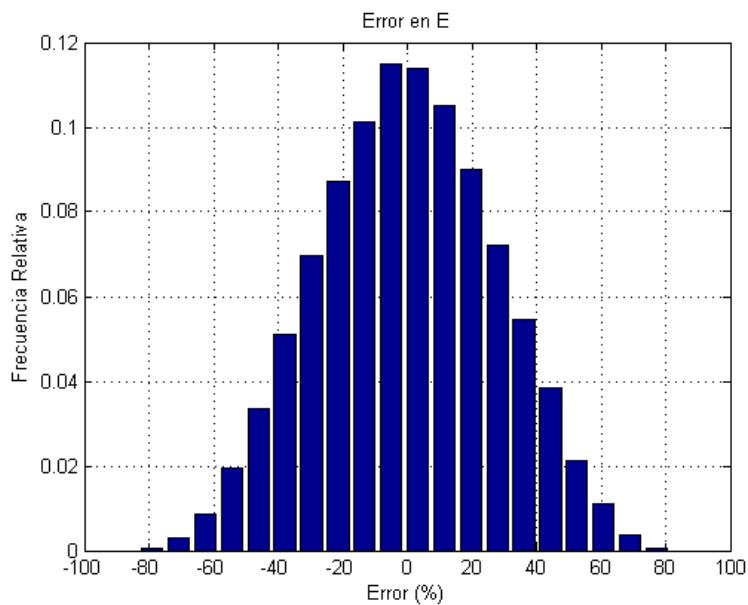


Figura 25 – Distribución de error cometido en el cálculo de E con $\Delta HR=6\%$

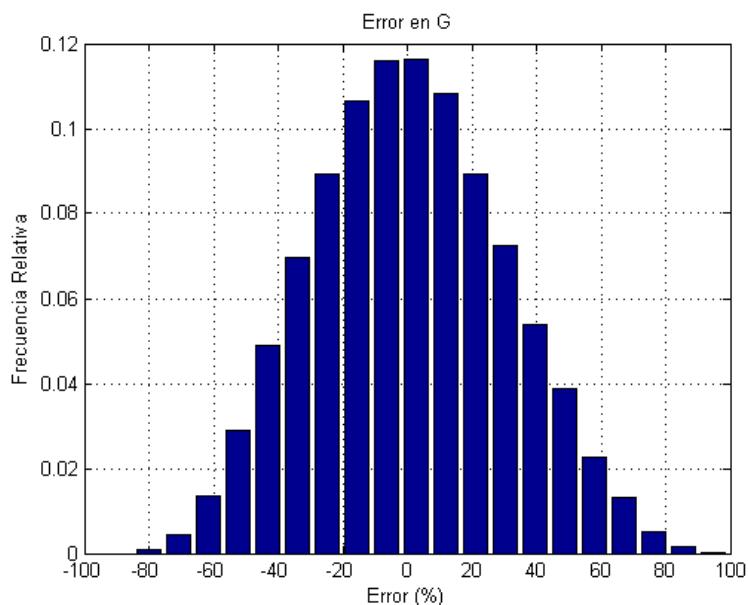


Figura 26 – Distribución de error cometido en el cálculo de g con $\Delta HR=6\%$

Los intervalos de confianza resultantes de las simulaciones anteriores, cuyos resultados se encuentran en la figura 25y en la figura 26, donde el gradiente de humedad es del 6% son:

Intervalo de confianza de E al 95%: -53.55% / 53.46%

Intervalo de confianza de E al 99%: -70.35% / 70.26%

Intervalo de confianza de G al 95%: -56.98% / 58.39%

Intervalo de confianza de G al 99%: -75.33% / 76.74%

Todos los resultados obtenidos para este modelo pueden representarse juntos en una tabla comparativa, que permita fácilmente identificar los errores y su evolución para el modelo simulado, esta discusión se incluye en la memoria.

	Intervalo de confianza al 95%	Intervalo de confianza al 99%
ΔHR=20%	E: -17,61 % / 17,62 %	E: -23,15 % / 23,15 %
	g: -25,64 % / 27,07 %	g: -34,15 % / 35,38 %
ΔHR=10%	E: -33,52 % / 33,54 %	E: -44,06 % / 44,08 %
	g: -38,17 % / 39,38 %	g: -50,54 % / 51,76 %
ΔHR=6%	E: -53,55 % / 53,46 %	E: -70,35 % / 70,26 %
	g: -56,98 % / 58,39 %	g: -75,33 % / 76,74 %

Tabla 10 - Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida.

Anexo VI – Script ‘EstadisticaErroresAutoZero.m’

En este anexo se incluye el *script* de Matlab empleado para la obtención de los histogramas e intervalos de confianza que se muestra en el anexo VII, y cuyo resumen se incluye en la memoria.

Simulación estadística de los errores cometidos en el sistema autocalibrado

Parámetros de entrada

```
%V: Flujo volumétrico de aire a la entrada
%Tin: Temperatura de entrada
%Tout: Temperatura de salida
%HRin: Humedad relativa de entrada
%HRout: Humedad relativa de salida
%Tleaf: Temperatura de la hoja
%L: Área de la ventana
%Pin: Presión de la cubeta

clear all; close all;

Vin=150;           % mL/min
Tin=25;           % °C
Tout=25.2;         % °C
HRin=50/100;       % %HR
HRout=56/100;       % %HR
Tleaf=24.7;         % °C
Pin=1.05;          % bar

%Errores máximos

EVin=Vin*0.01;     % mL/min
ETin=0.3;           % K
ETout=0.3;           % K
EHRin=2/100;         % %HR
EHRout=2/100;         % %HR
ETleaf=0.3;           % K
EPin=100;           % Pa

tolError=6.14;       % %
```

Conversion a sistema internacional: Acondicionamiento de entradas

```
Vin=Vin/1000^2/60; %m3/s
EVin=EVin/1000^2/60;%m3/s
Tin=Tin+273.15; %K
Tout=Tout+273.15; %K
Tleaf=Tleaf+273.15; %K
Pin=Pin*1e5; %Pa
```

Matriz de errores aleatorios

```
a=-1; b=1;maxiter=50000;
r = a + (b-a).*rand(maxiter,7);
ErrorMax=[EVin,ETin,ETout,EHRin,EHRout,ETleaf,EPin];
```

Simulacion del porometro de referencia y con distintos vectores de error aleatorio

```
ParametrosRef=[Vin,Tin,Tout,HRin,HRout,Tleaf,Pin];
ParametrosCal=[Vin,Tin,Tin,HRin,HRin,Tin,Pin];
[Eref,gref]= EjecutarPorometro(ParametrosRef);
disp(['E= ',num2str(Eref*1000), ' mmol m-2 s-1']);disp(['g= ',num2str(gref*1000), ' mmol m-2 s-1']);
```

Aplicación del sistema de autocalibrado y compensación

```
for j=1:maxiter

    %Creación de valores aleatorios de medidas registradas por los sensores y afectadas
    %por el error en la medida
    rr=r(j,:);
    RangoError=ErrorMax.*rr;
    LecturasCal=ParametrosCal+RangoError;
    ParametrosError=ParametrosRef+RangoError;

    %Corrección de la medida de Humedad:
    SH1=LecturasCal(4);SH2=LecturasCal(5); MediaH=(SH1+SH2)/2;
    DesvH1=(SH1-MediaH)/MediaH; DesvH2=(SH2-MediaH)/MediaH;
    ParametrosError(4)=ParametrosError(4)*(1-
    DesvH1);ParametrosError(5)=ParametrosError(5)*(1-DesvH2);

    %Corrección de la medida de Temperatura:
```

```
ST1=LecturasCal(2);ST2=LecturasCal(3); ST3=LecturasCal(6); MediaT=(ST1+ST2+ST3)/3;
DesvT1=(ST1-MediaT)/MediaT; DesvT2=(ST2-MediaT)/MediaT; DesvT3=(ST3-MediaT)/MediaT;
ParametrosError(2)=ParametrosError(2)*(1-
DesvT1);ParametrosError(3)=ParametrosError(3)*(1-DesvT2);
ParametrosError(6)=ParametrosError(6)*(1-DesvT3);

%Ejecución del modelo del porómetro para las variables afectadas por el error
aleatorio.

[E,g]= EjecutarPorometro(ParametrosError);
ErrorET(j)=(E-Eref)/Eref*100; ErrorGT(j)=(g-gref)/gref*100;

%Estudio de los casos más desfavorables
if ErrorGT(j)>tolError
    disp(rr);
end

end
```

Presentacion de los resultados

```
ErrorET=sort(ErrorET);ErrorGT=sort(ErrorGT);

% Representacion en forma de histograma de los errores simulados

ErrorET=sort(ErrorET);ErrorGT=sort(ErrorGT);
[nE,xE]=hist(ErrorET,20);[nG,xG]=hist(ErrorGT,20);
int=1:maxiter;figure;
bar(xE,nE/maxiter);title('Error en E');xlabel('Error (%)');ylabel('Frecuencia
Relativa');grid on;
figure;
bar(xG,nG/maxiter);title('Error en G');xlabel('Error (%)');ylabel('Frecuencia
Relativa');grid on;

%Cálculo de intervalos de confianza
disp(['Intervalo de confianza de E al 95%:
',num2str(round(ErrorET(maxiter*0.025)*100),'% /
',num2str(round(ErrorET(maxiter*0.975)*100),'%)]);
disp(['Intervalo de confianza de E al 99%:
',num2str(round(ErrorET(maxiter*0.005)*100),'% /
',num2str(round(ErrorET(maxiter*0.995)*100),'%)]);
```

```
disp(['Intervalo de confianza de G al 95%:  
',num2str(round(ErrorGT(maxiter*0.025)*100)/100),'% /  
' ,num2str(round(ErrorGT(maxiter*0.975)*100)/100),'%' ]);  
disp(['Intervalo de confianza de G al 99%:  
',num2str(round(ErrorGT(maxiter*0.005)*100)/100),'% /  
' ,num2str(round(ErrorGT(maxiter*0.995)*100)/100),'%' ]);
```

Anexo VII – Estudio de los errores generados en el sistema autocalibrante.

En el presente anexo se recogen las distribuciones de error obtenidas para los casos mencionados en la memoria del sistema autocalibrante, y que surgen de la ejecución del código recogido en el anexo VI. En este caso, la distribución de error en la conductancia no se ajusta a una normal u otra distribución, por lo que los intervalos de confianza se extraerán de los valores obtenidos en los casos aleatorios. Se han simulado tres casos, con gradientes de humedad entre entrada y salida del 20%, 10% y 6%. Estos gráficos y los intervalos de confianza que de ellos se extraen han sido fundamentales para validar el modelo.

Caso 1: $\Delta HR=20\%$

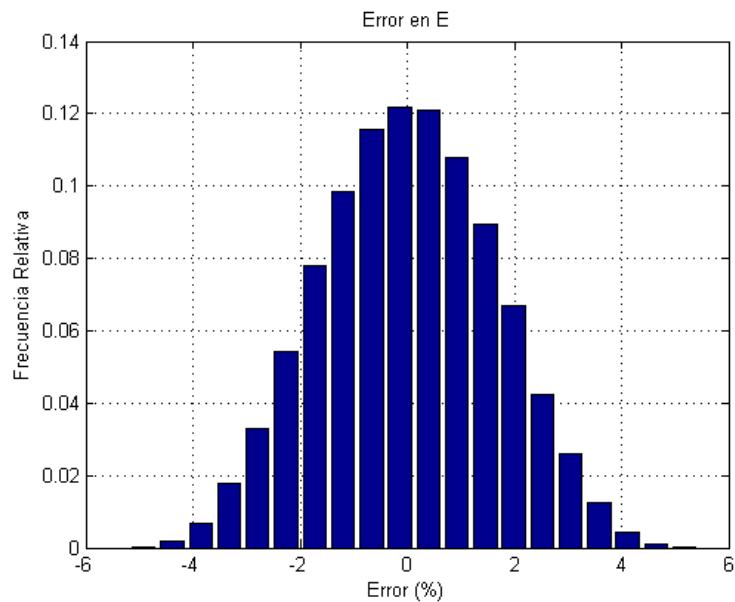


Figura 27 - Distribución de error en el cálculo de E, $\Delta HR=20\%$, en el sistema autocalibrante.

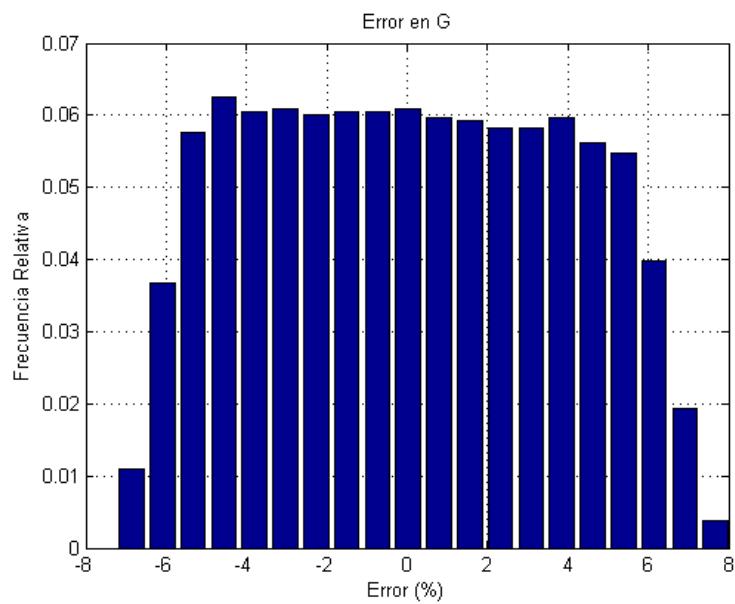


Figura 28 – Distribución de error en el cálculo de g, $\Delta HR=20\%$, en el sistema autocalibrante.

Calculando los intervalos de confianza para el error de E y g a partir de las distribuciones mostradas en la figura 27 y la figura 28 se tienen los siguientes resultados:

Intervalo de confianza de E al 95%: -3.09% / 3.09%

Intervalo de confianza de E al 99%: -3.79% / 3.87%

Intervalo de confianza de G al 95%: -6.13% / 6.5%

Intervalo de confianza de G al 99%: -6.68% / 7.28%

Caso 2: $\Delta HR=10\%$

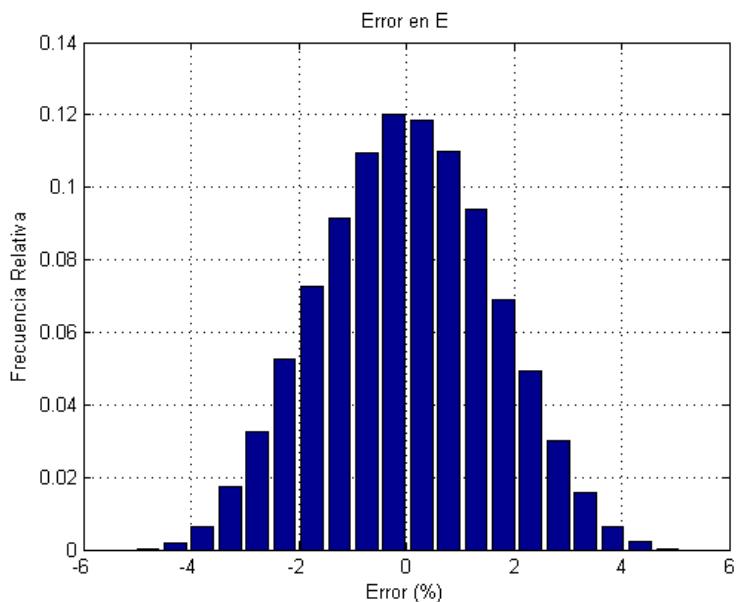


Figura 29 – Distribución de error en el cálculo de E, $\Delta HR=10\%$, en el sistema autocalibrante.

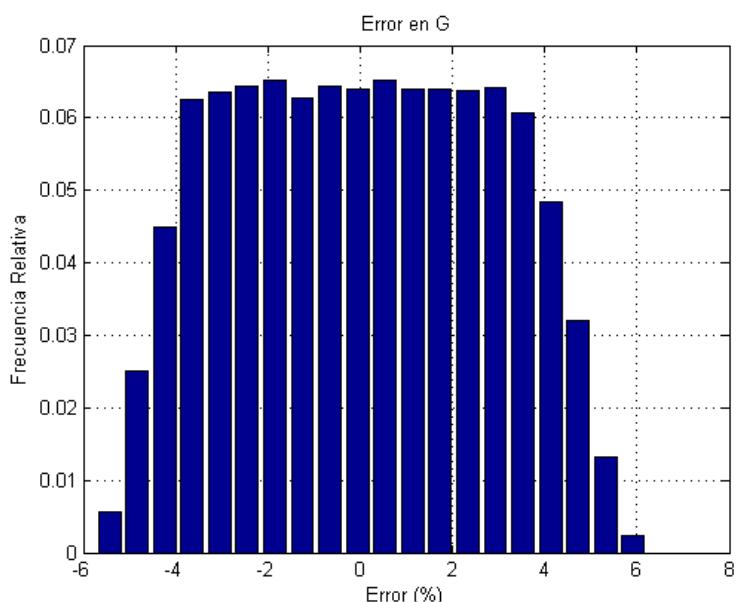


Figura 30 – Distribución de error en el cálculo de g, $\Delta HR=10\%$, en el sistema autocalibrante.

Calculando los intervalos de confianza para el error de E y g a partir de las distribuciones mostradas en la figura 29 y la figura 30 se tienen los siguientes resultados:

Intervalo de confianza de E al 95%: -3.05% / 3.04%

Intervalo de confianza de E al 99%: -3.73% / 3.77%

Intervalo de confianza de G al 95%: -4.65% / 4.8%

Intervalo de confianza de G al 99%: -5.16% / 5.4%

Caso 3: $\Delta HR=6\%$

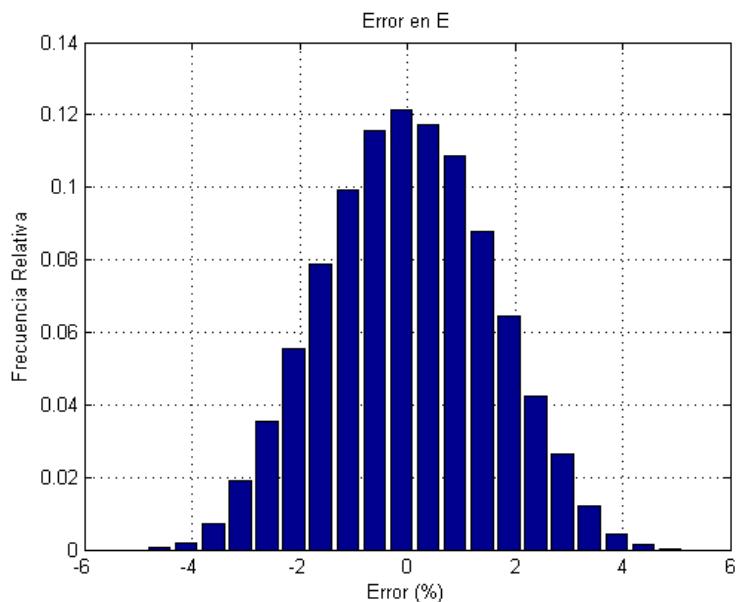


Figura 31 – Distribución de error en el cálculo de E, $\Delta HR=6\%$, en el sistema autocalibrante.

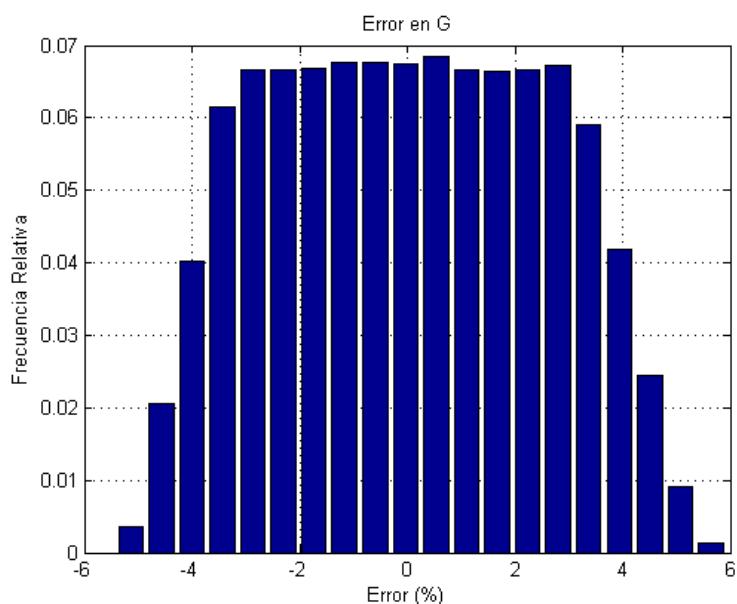


Figura 32 – Distribución de error en el cálculo de g, $\Delta HR=6\%$, en el sistema autocalibrante.

Calculando los intervalos de confianza para el error de E y g a partir de las distribuciones mostradas en la figura 31 y la figura 32 se tienen los siguientes resultados:

Intervalo de confianza de E al 95%: -2.95% / 2.97%

Intervalo de confianza de E al 99%: -3.62% / 3.71%

Intervalo de confianza de G al 95%: -4.26% / 4.41%

Intervalo de confianza de G al 99%: -4.77% / 5.05%

Todos los resultados obtenidos para este modelo pueden representarse juntos en una tabla comparativa, que permita fácilmente identificar los errores y su evolución para el modelo simulado, esta discusión se incluye en la memoria.

	Intervalo de confianza al 95%	Intervalo de confianza al 99%
ΔHR=20%	E: -3.09 % / 3.09 %	E: -3,79 % / 3,87 %
	g: -6,13 % / 6,50 %	g: -6,68 % / 7,28 %
ΔHR=10%	E: -3,05% / 3,04 %	E: -3,73 % / 3,77 %
	g: -4,65 % / 4,80 %	g: -5,16 % / 5,40 %
ΔHR=6%	E: -2,95 % / 2,97 %	E: -3,626 % / 3,71 %
	g: -4,26% / 4,41 %	g: -4,77 % / 5,05 %

Tabla 11 - Dependencia del intervalo de confianza del error en la lectura con el gradiente de humedad relativa entre entrada y salida para el sistema autocalibrante.

Anexo VIII - Sensores de humedad y temperatura

El sensor de humedad y temperatura elegido es el Sensirion SHT75 [21]. Este elemento integra los elementos sensitivos con el procesamiento de la señal de forma compacta y proporciona una señal de salida completamente calibrada y compensada. Como elemento sensitivo se emplea un sensor capacitivo basado en tecnología CMOSens®, que se caracteriza por su fiabilidad y su estabilidad temporal. Incluye un convertidor analógico digital de 14 bits y circuito de conexión serie para comunicación con el microprocesador.

La interfaz serie del SHT75 está optimizada para la lectura del sensor así como para un uso eficiente de la energía. Puede conectarse en un bus de comunicación I²C, aunque no se comunica a través de este protocolo. El sensor presenta cuatro pines: dos de alimentación (pin 2 es la fuente de voltaje y el pin 3 es tierra) y dos de comunicación (pin 1 es SCK, el reloj, y pin 4 es DATA, el bus de datos bidireccional).

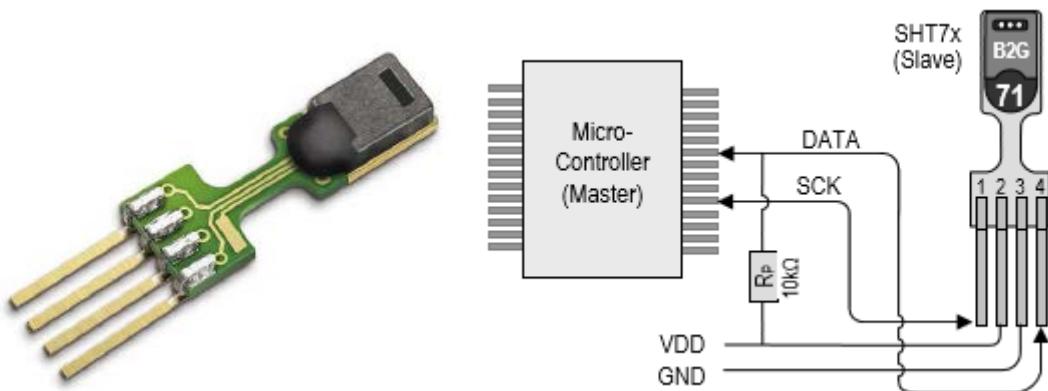


Figura 33 – Imagen y diagrama del sensor de temperatura y humedad Sensirion SHT75

El pin SCK se emplea para sincronizar la comunicación entre el microcontrolador y el sensor.

El pin DATA es un pin tri-estado que se emplea para la transferencia de datos entre el sensor y el microcontrolador. Se requiere una resistencia de *pull-up* en la línea de datos para asegurar la correcta comunicación.

El sensor está calibrado en condiciones de referencia, y el fabricante proporciona las ecuaciones para la linealización de la señal y para la compensación de temperatura. La lectura de humedad se recibe en formato binario y deberá convertirse a decimal para operar.

Para compensar la no-linealidad del sensor el fabricante proporciona la siguiente ecuación:

$$HR_{lineal} = c_1 + c_2 \cdot S_{HR} + c_3 \cdot S_{HR}^2 \quad [\%RH] \quad (21)$$

Donde:

HR_{lineal} : humedad relativa medida y linealizada.

S_{HR} : señal de salida de humedad relativa (en formato decimal)

c_1, c_2, c_3 : constantes de calibración, proporcionadas por el fabricante.

Estas constantes dependen de la resolución a la que se realiza la medida:

S_{HR}	C_1	C_2	C_3
12 bit	-2,0468	0,0367	-1,5955E-6
8 bit	-2,0468	0,5872	-4,0845E-4

Tabla 12 – Constantes de la ecuación de linealización del SHT75

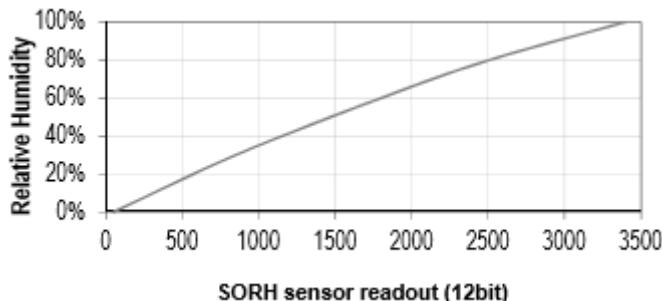


Figura 34 – Función de linealización de la señal del SHT75 en modo de 12 bits.

En los casos en los que la temperatura difiera significativamente de la de calibración (25°C) será necesario realizar también una compensación de la señal de humedad con la temperatura. La desviación de la señal de humedad es de aproximadamente 0,12%HR/°C @ 50%HR

La corrección mencionada se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$HR_{comp} = (T - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot S_{HR}) + HR_{lineal} \quad (22)$$

Donde:

HR_{comp} : Humedad relativa linealizada y compensada (%HR)

HR_{lineal} : Humedad relativa linealizada.

S_{HR} : señal de salida de humedad relativa (en formato decimal)

T : Temperatura de trabajo (°C)

t_1, t_2 : constantes de calibración, proporcionadas por el fabricante.

Donde las constantes de compensación de nuevo dependen de la temperatura y vienen mostradas en la siguiente tabla:

S_{HR}	t_1	t_2
12 bit	0,01	0,00008
8 bit	0,01	0,00128

Tabla 13 – Constantes de la ecuación de compensación de temperatura del SHT75

Para obtener la temperatura a partir de la señal enviada por el sensor se emplea una ecuación lineal, ya que el sensor empleado es muy lineal por su propio diseño. Dicha interpretación de la señal recibida es función de la tensión de alimentación y de la resolución del convertidor analógico digital como se muestra en la siguiente ecuación:

$$T = d_1 + d_2 \cdot S_T$$

Donde:

T: temperatura (°C)

S_T : Señal de salida de temperatura (en formato decimal)

d_1, d_2 : constantes de calibración de temperatura, proporcionadas por el fabricante.

Voltaje alimentación	d_1 (°C)	S_T	d_2 (°C)
5V	-40,1		
4V	-39,8		
3,5V	-39,7		
3V	-39,6		
2,5V	-39,4		

Tabla 14 – Constantes de la ecuación de cálculo de temperatura

Adicionalmente a las anteriores medidas, el sensor permite calcular el punto de rocío del aire de forma indirecta a través de la siguiente ecuación:

$$T_d = T_n \cdot \frac{\ln\left(\frac{HR}{100\%}\right) + \frac{m \cdot T}{T_n + T}}{m - \ln\left(\frac{HR}{100\%}\right) - \frac{m \cdot T}{T_n + T}} \quad (23)$$

Donde:

T_d : Temperatura de rocío (°C)

T_n, m : constantes de la ecuación de punto de rocío.

HR: humedad relativa (%HR)

T: Temperatura de trabajo (°C)

Rango de temperaturas	T_n (°C)	m
Sobre agua, 0-50°C	243,12	17,62
Sobre hielo, -40 – 0 °C	272,62	22,46

Tabla 15 – Constantes de la ecuación de temperatura de rocío

Al tener este sensor una comunicación optimizada para sus funciones, todas las funciones deben programarse con el protocolo que indica el fabricante, a disposición del usuario en la hoja de características. Existe una librería de funciones de código libre que evita la necesidad de programación paso a paso de la comunicación para este sensor. Esta librería está disponible bajo el nombre 'Sensirion.h'. Se prefiere emplear ya que simplifica notablemente el uso del sensor, e incorpora todas ecuaciones y compensaciones previamente mencionadas, proporcionando un valor de temperatura y humedad listo para su manipulación posterior.

Anexo IX – Medida de temperatura de hoja

Para la medida de la temperatura de la hoja se empleará una termorresistencia Pt100 como referencia de temperatura absoluta y un montaje de termopares en forma diferencial para medida de la diferencia de temperaturas respecto de la referencia. De esta manera se consigue una medida con la precisión de una Pt100. Se empleará una de clase A, con conexión a 3 hilos.

La conexión de la termorresistencia de referencia se hará a tres hilos, y a través un puente de Wheatstone no equilibrado, como se muestra en la figura 35.

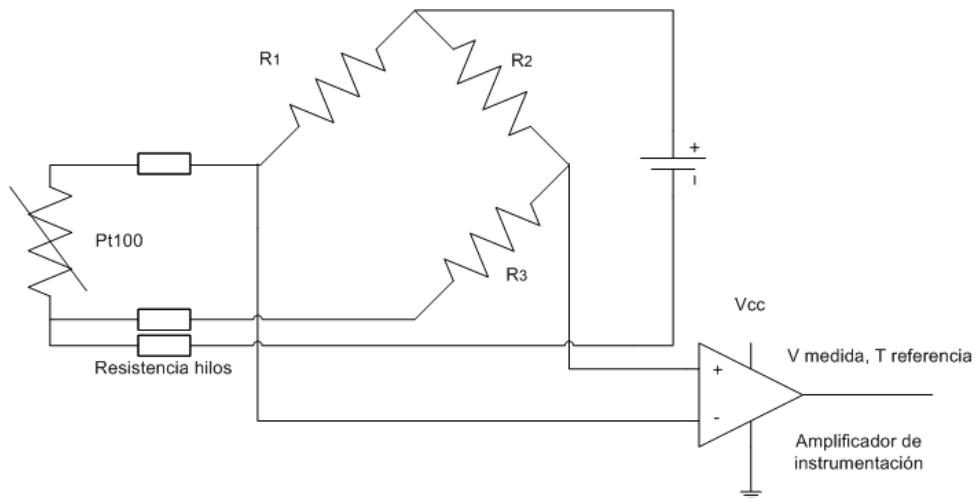


Figura 35 - Conexión de la sonda Pt100 para medida de temperatura de referencia

El objetivo de hacer este tipo de conexión es eliminar la influencia de la resistencia de los cables de medida. Al haberlas incluido en ambas ramas del puente, en caso de que las resistencias de los hilos sean iguales, se equilibrarán, eliminando esa fuente de error.

Para evitar el autocalentamiento de la sonda la corriente máxima que deberá atravesarla debe ser de 1 mA, por lo que se ajustará la tensión en concordancia. Las resistencias 1 a 3 deberán ser de precisión para un rendimiento óptimo. Las tensiones en los puntos medios de ambas ramas del puente se llevan a un amplificador de instrumentación, cuya función es acondicionarla para poder ser leída con Arduino. El amplificador de instrumentación responde a la ecuación siguiente:

$$V_{out} = G \cdot (V_{in}^+ + V_{in}^-) \quad (24)$$

Donde:

R1, R2, R3: Resistencias del puente de Wheatstone [Ω]

R_{Pt100} : Resistencia de la sonda Pt100 [Ω]

R_h : Resistencia de los hilos conductores [Ω]

V_{out} : Voltaje de salida del amplificador [V]

V_{in}^+ : Tensión en la entrada no inversora [V]

V_{in}^- : Tensión en la entrada inversora [V]

G: Ganancia del amplificador de instrumentación [V/V]

El error de posición se elimina, y la tensión de salida se puede leer directamente y correlacionarse con la temperatura.

La tensión a la salida se relaciona con las distintas resistencias del circuito de la siguiente forma:

$$V_{out} = G \cdot \frac{E \cdot (R_2 R_H + R_2 R_{Pt100} - R_1 R_3 - R_1 R_H)}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + 2 R_1 R_H + 2 R_2 R_H + R_2 R_{Pt100} + 2 R_3 R_H + R_3 R_{Pt100} + 3 R_H^2 + 2 R_H R_{Pt100}} \quad (25)$$

Aunque esta expresión se puede simplificar si las resistencias 1 a 3 tienen el mismo valor:

$$V_{out} = G \cdot \frac{E \cdot (R_{Pt100} - R^2)}{2R^2 + 6R R_H + 2R R_{Pt100} + 3 R_H^2 + 2R_H R_{Pt100}} \quad (26)$$

Y puede simplificarse más en el caso de despreciarse el valor de las resistencias de los hilos, ya que se encuentran equilibradas:

$$V_{out} = G \cdot \frac{E \cdot (R_{Pt100} - R)}{2R + 2R_{Pt100}} \quad (27)$$

Se encuentran tabulados los pares de datos temperatura – resistencia para sondas Pt100 y se puede encontrar también la expresión matemática de ajuste, marcada por el estándar IEC 60751 [24]

$$\frac{R_{Pt100}}{R_0} = 1 + A \cdot T + B \cdot T^2 \quad (\text{para } T > 0^\circ\text{C}) \quad (28)$$

Donde:

R_{Pt100} : Resistencia de la sonda Pt100 [Ω]

R_0 : Resistencia a la temperatura de 0°C [Ω]

T: Temperatura [$^\circ\text{C}$]

A, B: constantes de ajuste ($A=3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $B=-5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$)

Para el caso de los termopares en montaje diferencial, se tiene el esquema mostrado en la figura siguiente:

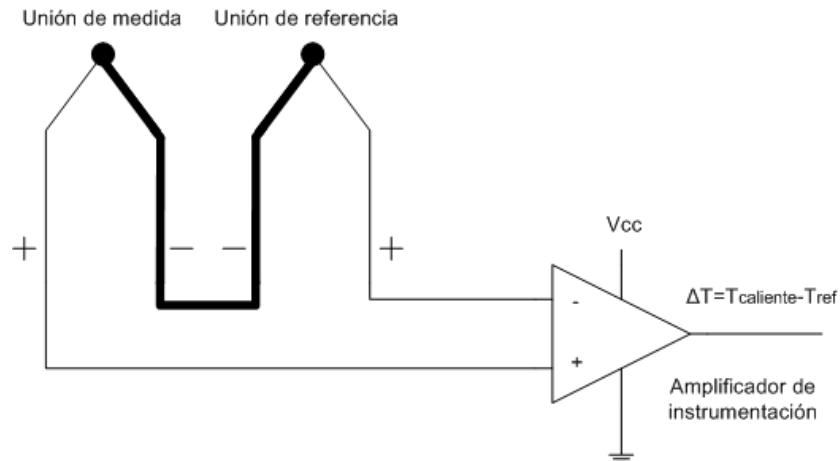


Figura 36 – Conexión de los termopares en modo diferencial para medida de temperatura

La unión de referencia se deberá encontrar en equilibrio térmico con la Pt100, para tener una referencia de precisión. La unión de medida se colocará en contacto con la hoja. Ya que las polaridades de los termopares están en sentidos opuestos, en equilibrio térmico entre las uniones se tendrá un valor de tensión de 0V. Si la unión de medida se encuentra a una temperatura mayor a la de referencia se generará un voltaje positivo neto entre las dos, el cual se amplifica mediante un amplificador de instrumentación y se llevará al microcontrolador para su lectura.

Esta tensión generada, función de la diferencia de temperaturas entre las uniones, se puede relacionar con la temperatura a través de las tablas de los termopares, o bien mediante las correlaciones matemáticas disponibles en bibliografía, marcadas por el estándar IEC 60584.1 [24]

$$E = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i(T)^i + c_0 \cdot \exp[c_1(T - 126,9868)^2] \quad [\mu V] \quad (29)$$

Donde:

E: Tensión del termopar [μV]

T: Temperatura de la unión [$^{\circ}C$]

Coeficientes:

$$b_0 = -17,600\,413\,686$$

$$b_1 = 38,921\,204\,975$$

$$b_2 = 1,855\,877\,003\,2 \cdot 10^{-2}$$

$$b_3 = -9,945\,759\,287\,4 \cdot 10^{-5}$$

$$b_4 = 3,184\,094\,571\,9 \cdot 10^{-7}$$

$$b_5 = -5,607\,284\,488\,9 \cdot 10^{-10}$$

$$b_6 = 5,607\,505\,905\,0 \cdot 10^{-13}$$

$$b_7 = -3,202\,072\,000\,3 \cdot 10^{-16}$$

$$b_8 = 9,715\,114\,715\,2 \cdot 10^{-20}$$

$$b_9 = -1,210\,472\,127\,5 \cdot 10^{-23}$$

$$c_0 = 118,5976$$

$$c_1 = -1,183\,432 \cdot 10^{-4}$$

La expresión mencionada en la ecuación 36 abarca todo el rango de temperaturas del termopar con elevada precisión, desde los $0^{\circ}C$ hasta $1372^{\circ}C$. El rango de trabajo del porómetro será mucho más reducido, por lo que puede encontrarse una expresión lineal equivalente que genere una mucha menor carga computacional:

$$E = 40,3076 \cdot T - 5,30720 \quad [\mu V] \quad (30)$$

$$R^2 = 0,999974 \quad \text{para } 0 < T < 40^{\circ}C$$

O por una expresión de segundo grado para mayor precisión:

$$E = 1,94466 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 39,5297 \cdot T - 0,251080 \quad [\mu V] \quad (31)$$

$$R^2 = 0,99999945 \quad \text{para } 0 < T < 40^{\circ}C$$

Anexo X - Caudalímetro

El caudalímetro empleado, el Sensirion ASF1430 [25] es un caudalímetro digital que se encuentra armado en una carcasa químicamente inerte de PBT (Tereftalato de polibutileno). El ASF1430 se presenta en un formato con ocho pines, diseñado para comunicación digital por el estándar de comunicaciones SPI (*Serial Peripheral Interface*, no soportado en las últimas versiones del instrumento) y para comunicación por interfaz RS-232.

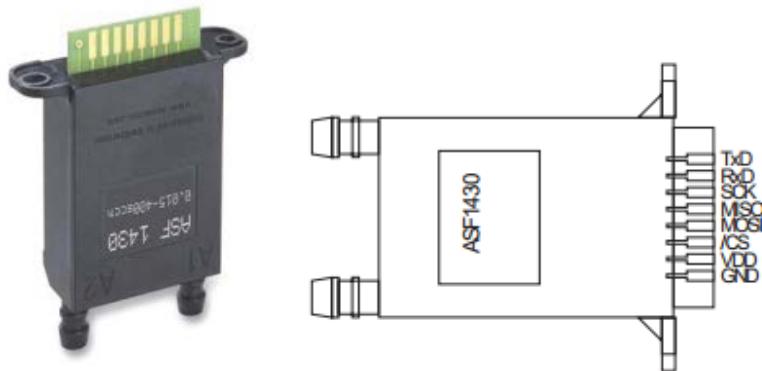


Figura 37 – Imagen y diagrama del caudalímetro Sensirion ASF1430

Para la conexión por interfaz RS-232 se emplearán los pines VDD (Voltaje de alimentación), GND (tierra), TxO (línea de transmisión) y RxI (línea de recepción).

La interfaz RS-232 emplea la tensión en el intervalo +3 a +15 V para el nivel lógico 0, y una tensión de -3 a -15 V para el nivel lógico 1. Esta interfaz no es compatible con las comunicaciones disponibles en Arduino, todas ellas limitadas a una tensión en el intervalo de 0 a +5V. Para poder realizar la comunicación de uno con otro se emplea un transceptor Maxim Integrated MAX232ACPE, que transforma la interfaz RS-232 en TTL, soportada por Arduino a través de puerto serie [32].

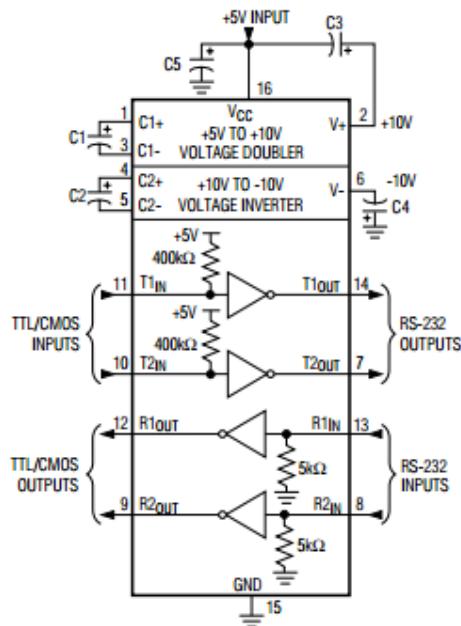


Figura 38 – Diagrama del transceptor Maxim Integrated MAX232ACPE

El protocolo RS-232 para el caudalímetro en cuestión debe ser configurado con los siguientes parámetros:

- Baudrate: 19200
- Data bits: 8
- Stop bits: 1
- Parity: none
- Protocol: none
- Echo: the sensor generates an echo.

Con estos parámetros el sensor puede ser conectado. Los comandos se mandan en formato ASCII y los valores medidos se leen como un valor entero de 16 bits con signo, precedidos de dos bytes de sincronización en formato binario (0x7F).

Así, el caudalímetro enviará grupo de cuatro bytes de datos, de los cuales los dos primeros serán 0x7F de sincronización (127 en formato decimal, o 01111111 en binario) y los dos últimos contienen la información de medida.

Para la lectura de caudal y temperatura deberán extraerse los bytes de medida desechando los bytes de sincronización, se concatenarán en formato binario y se convertirán a formato decimal. Este número será dividido por un factor 70 en caso de que la medida corresponda a caudal para obtener un valor en sccm o mL/min o por un factor 100 en caso de que la medida corresponda a una medida de temperatura, siendo ésta en grados centígrados (°C).

Los casos de exceso de caudal puntual (Peak Overflow) y exceso de caudal permanente (Overflow) tienen un código propio. Aunque el caudalímetro está calibrado hasta 400 sccm, muestra un valor hasta los 440 sccm con precisión reducida.

Valor recibido (hex)	Valor recibido (dec)	Caudal (sccm)	Temperatura (°C)
0x7852	30802	overflow	--
0x7851	30801	Peak overflow	--
0x7850	30800	440,000	+308,00*
0x04D2	1234	17,629	12,34
0x0001	1	0,014286	0,01
0X0000	0	0,000000	0,00
0xFFFF	-1	-0,014286	-0,01
0XFB2E	-1234	-17,629	-12,34
0X87B0	-30800	-440,000	-308,00*

Tabla 16 – Ejemplos de interpretación de los valores recibidos del caudalímetro. Los valores marcados con un asterisco no son posibles, se indican únicamente para ilustrar el procedimiento.

Los valores negativos serán identificados como 1 en el bit más representativo (MSB, primer bit de la secuencia) y serán convertidos al valor decimal no directamente, sino por sustracción de un factor 10000 en hexadecimal o del 65536 en decimal.

El caudalímetro es bidireccional, por eso presenta valores positivos y negativos, aunque solo se empleará en un sentido, el positivo.

Este instrumento acepta una serie de comandos, los cuales se envían en formato ASCII con retorno de carro posterior. La configuración se almacena en una memoria interna EEPROM no volátil, por lo que puede ser configurado una única vez y usado de la misma manera tras interrupciones de potencia. Tras la interrupción de cada comando en instrumento devuelve OK.

Los comandos de configuración más relevantes que acepta el caudalímetro son:

- Go: Inicio de una serie de medidas
- Get: Realización de una medida puntual
- S: Detención del comando en ejecución
- Mod: Selección modo caudal ('F') o modo temperatura ('T')
- Res: Ajuste de la resolución de medida (desde '0' correspondiendo a una resolución de 8 bits hasta '7' que corresponde a 15 bits)
- Test: Comprobación del estado del sensor.
- Reset: Regresión a valores de fábrica.

La estrategia recomendada por el fabricante es la realización de las medidas de caudal en modo 'Go', en el que el caudalímetro realizará las medidas de caudal de forma continua, enviando cada medida tan pronto como esté disponible. El usuario leerá la que le interese en cada momento. De esta forma se evitan excesivos ciclos de escritura de la memoria, que acortarían la vida útil del sensor de forma notable.

Anexo XI - Sensores de presión

El sensor de presión elegido es un medidor analógico de presión absoluta Honeywell SSCDANNO30PAAA5 [26]. Viene en un encapsulado tipo DIP, con ocho terminales de conexión, de los cuales se utilizan tres. De estos terminales de conexión útiles, dos corresponden a la alimentación, (pin 2 al voltaje de alimentación y pin 4 a tierra) y en el pin 3 se encuentra la señal de salida del sensor. Esta salida es en forma de voltaje, en un rango de 0-5V.

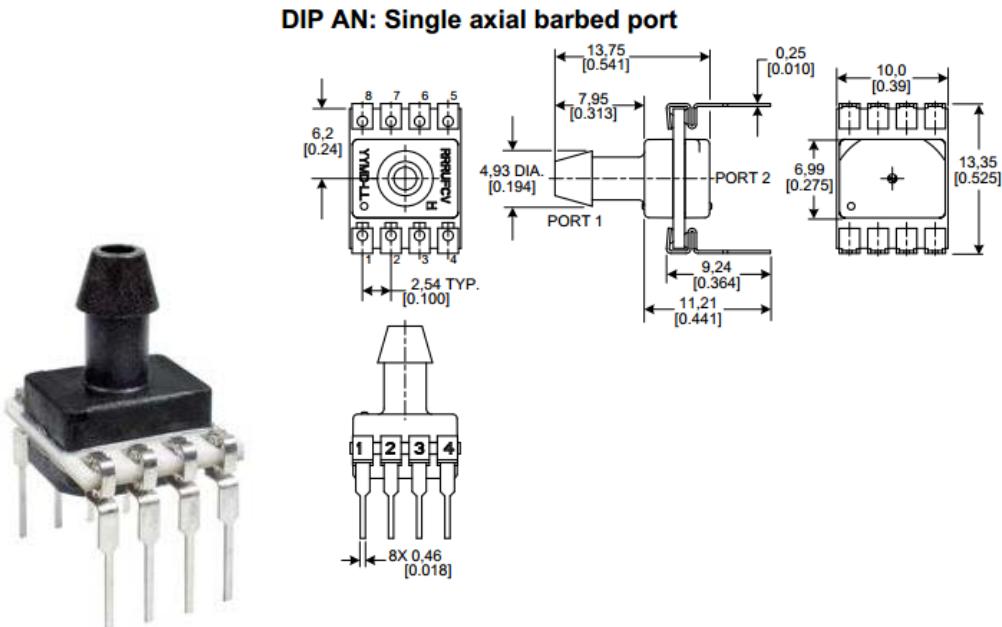


Figura 39 – Dibujo y diagrama del sensor de presión Honeywell SSCDANNO30PAAA5

Este sensor tiene las siguientes características:

$$P_{min} = 0 \text{ psia} \quad P_{max} = 30 \text{ psia} = 2,068 \text{ bar} \quad V_{supply} = 5 \text{ V}$$

Para calcular la presión a la que está sometido el sensor se realiza a través de la conversión del voltaje de salida a través de la siguiente función de transferencia indicada por el fabricante:

$$V_{salida} = \frac{0,8 \cdot V_{supply}}{P_{max} - P_{min}} \cdot (P_{medida} - P_{min}) + 0,10 \cdot V_{supply} \quad [V] \quad (32)$$

Para tener la presión como función del voltaje leído:

$$P_{medida} = \frac{15}{2} \cdot V_{salida} - 3,75 \quad [\text{psia}] \quad (33)$$

Esta señal se lleva a un convertidor analógico-digital (CAD) de 10 bits integrado en el microcontrolador Arduino. Este CAD acepta una entrada de tensión comprendida entre 0 y 5 V, y produce una salida digital de 10 bits, es decir, de un número comprendido entre 0 y 1023. Así, a la señal de 0 V se convierte en un 0, la de 5 V en un 1023, y cualquier voltaje intermedio tendrá un valor que se podrá obtener por interpolación lineal entre los dos anteriores. Así, la salida analógica para cualquier voltaje será:

$$S_{digital} = \frac{1023}{5} \cdot V \quad [-] \quad \rightarrow \quad V = \frac{5}{1023} \cdot S_{Digital} \quad [V] \quad (34)$$

Integrando esta función en la anterior se tiene que:

$$P_{medida} = \frac{15}{2} \cdot \frac{5}{1023} \cdot S_{Digital} - 3,75 = \frac{25}{682} \cdot S_{Digital} - 3,75 \quad [psia] \quad (35)$$

Se desea que la presión medida esté expresada en sistema internacional (Pascal, Pa) por lo que se realizará un cambio de unidades en la misma función de transferencia:

$$1 \text{ psi} = 6894,76 \text{ Pa}$$

$$P_{medida} = 252,74 \cdot S_{Digital} - 25855,34 \quad [Pa] \quad (36)$$

Será la ecuación 36 la que se introduzca en el programa para el tratamiento de datos.

Anexo XII - Volumen de cámara de homogeneización

Se ha estimado la influencia de la proximidad del operador o de una planta en la composición del aire. Usando el sensor de humedad, se aprecia que en un intervalo de 5 segundos y a una distancia aproximada de 2 cm, la medida se ve afectada por un incremento en el entorno de 3°C y del 30% de humedad relativa.

Se modela esta perturbación a través de un balance de materia no estacionario al contenido en humedad, supuesto que la cámara de homogeneización se encuentra en condiciones de mezcla perfecta (propiedades de la salida iguales a las del contenido de la cámara). Para un balance sin reacción se tiene que:

$$Entrada - Salida = Acumulación \quad (37)$$

$$Q \cdot w_e - Q \cdot w(t) = V \cdot \frac{dw(t)}{dt} \quad (38)$$

Donde:

Q : Caudal [$mL \ min^{-1}$]

w_e : Humedad absoluta en al corriente de entrada [$g \ mL^{-1}$]

$w(t)$: Humedad absoluta en la cámara de homogeneización [$g \ mL^{-1}$]

V = Volumen de la cámara de homogeneización [mL]

Se asume que para el rango de temperaturas tan estrecho como el que se considera, la humedad de saturación no varía, y que por tanto las humedades relativas son proporcionales a las humedades absolutas, lo que se tiene una ecuación diferencial ordinaria lineal:

$$Q \cdot HR_e - Q \cdot HR(t) = V \cdot \frac{dHR(t)}{dt} \quad (39)$$

Donde:

HR_e : Humedad relativa en la corriente de entrada [-]

$HR(t)$: Humedad relativa en la cámara de homogeneización [-]

Esta ecuación se expresará en su forma estándar y se resolverá mediante un factor de integración:

$$\frac{dHR(t)}{dt} + \frac{Q}{V} \cdot HR(t) = \frac{Q \cdot HR_e}{V} \quad (40)$$

Por simplicidad, se pueden agrupar las constantes:

$$K_1 = \frac{Q}{V} \quad K_2 = \frac{Q \cdot HR_e}{V} \quad \rightarrow \quad \frac{K_2}{K_1} = HR_e$$

Quedando la ecuación:

$$\frac{dHR(t)}{dt} + K_1 \cdot HR(t) = K_2 \quad (41)$$

Definición factor de integración y resolución de la EDO:

$$P(t) = e^{\int K_1 dt} = e^{K_1 \cdot t} \quad (42)$$

$$e^{K_1 \cdot t} \cdot \frac{dHR(t)}{dt} + e^{K_1 \cdot t} \cdot K_1 \cdot HR(t) = e^{K_1 \cdot t} \cdot K_2 \quad (43)$$

$$\frac{d}{dt}(HR(t) \cdot e^{K_1 \cdot t}) = e^{K_1 \cdot t} \cdot K_2 \quad (44)$$

$$HR(t) \cdot e^{K_1 \cdot t} = \int e^{K_1 \cdot t} \cdot K_2 \cdot dt = \frac{K_2}{K_1} \cdot e^{K_1 \cdot t} + C \quad (45)$$

A tiempo inicial ($t=0$), se tiene que la humedad relativa es la inicial de la cámara:

$$C = HR_{inic} - \frac{K_2}{K_1} \quad (46)$$

Por tanto:

$$HR(t) = \frac{K_2}{K_1} + \left(HR_{inic} - \frac{K_2}{K_1} \right) \cdot e^{-K_1 \cdot t} \quad (47)$$

$$HR(t) = HR_e + (HR_{inic} - HR_e) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (48)$$

Para la variación en temperatura se recurre a un balance de energía en estado no estacionario, de forma similar a la humedad. De nuevo, ya que el rango de temperaturas de interés de estudio es estrecho, se asume que las propiedades del aire no variarán con la temperatura, así como la mezcla completa del aire en el buffer.

$$Entrada - Salida = Acumulación \quad (49)$$

$$Q \cdot \rho_e \cdot c_{p,e} \cdot T_e - Q \cdot \rho \cdot c_p \cdot T(t) = V \cdot \frac{d(\rho \cdot c_p \cdot T(t))}{dt} \quad (50)$$

Suposiciones:

$$\begin{aligned} \rho_e &= \rho = \bar{\rho} & c_{p,e} &= c_p = \bar{c}_p \\ Q \cdot T_e - Q \cdot T(t) &= V \cdot \frac{dT(t)}{dt} \end{aligned} \quad (51)$$

La ecuación resultante de aplicar las suposiciones detalladas anteriormente es equivalente a la obtenida en el caso del balance de materia, como se muestra en su forma estándar:

$$\frac{dT(t)}{dt} + \frac{Q}{V} \cdot T(t) = \frac{Q \cdot T_e}{V} \quad (52)$$

Y la resolución es análoga:

$$T(t) = T_e + (T_{inic} - T_e) \cdot e^{-\frac{Q}{V}t} \quad (53)$$

Se calcula la influencia de una perturbación, similar a la que cabría esperar en condiciones estándar de medida. Se toma como referencia un caso de un caudal medio-alto, de 200 mL/min y un aire a 25°C y con una humedad relativa inicial del 40%, que se ve aumentada por la interferencia del operador en los valores obtenidos experimentalmente, hasta un 70% de humedad y 28°C.

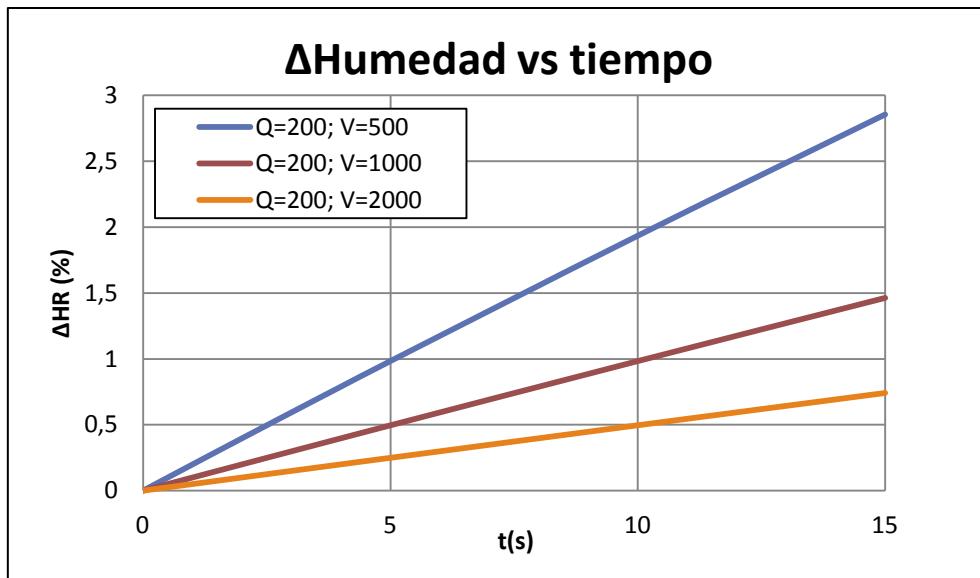


Figura 40 – Variación de la humedad del aire en la cámara frente al tiempo de aplicación de la perturbación para un caudal de 200 mL/min y distintos volúmenes de cámara (mL).

En la figura anterior se muestra el incremento en humedad en la cámara debido a la aparición de una perturbación de tipo escalón en la corriente de entrada. A mayor volumen, menor es la repercusión en la composición de la corriente de salida. Para un tiempo de perturbación máximo estimado en unos 5 segundos, se ve que el aumento de la humedad es del 1% para una cámara de 500 mL, del 0,5% para 1000 mL y del 0,25% aproximadamente para 2000 mL de volumen de buffer. Una variación del 0,5 - 1% en la humedad de entrada se consideraría aceptable, apenas afectando a las medidas, por lo que teóricamente un volumen de entre 500 - 1000 mL proporciona una amortiguación suficiente.

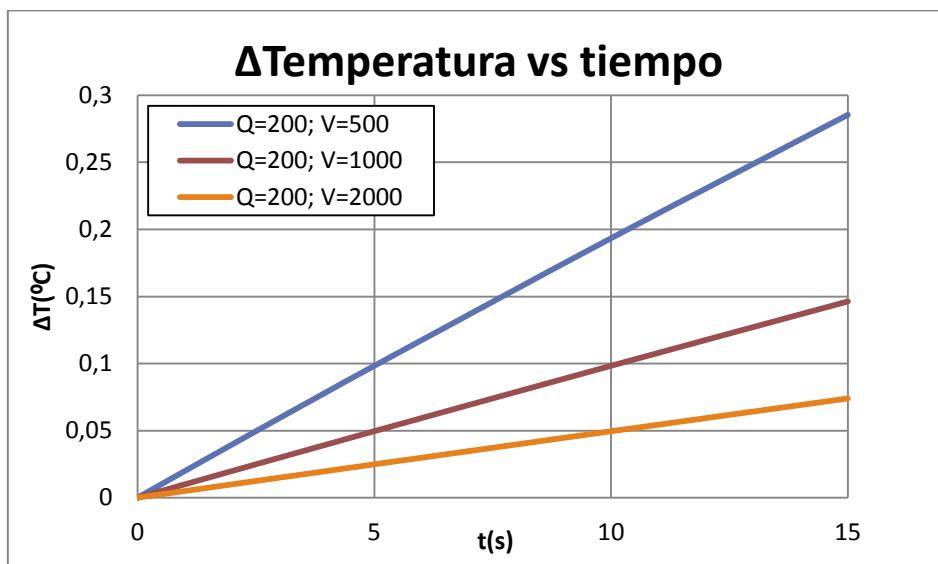


Figura 41 - Variación de la temperatura del aire en la cámara frente al tiempo de aplicación de la perturbación para un caudal de 200 mL/min y distintos volúmenes de cámara (mL).

En la figura anterior se muestra el valor del incremento de temperatura en la cámara por la aplicación de una perturbación de tipo escalón en la temperatura de la corriente de entrada. En este caso se aprecia en la figura que el efecto en la temperatura del aire es prácticamente despreciable en todos los casos, no siendo mayor a 0,1°C en ninguno de los estudios planteados, por lo que no supone una restricción añadida a la que impone en incremento en humedad.

La mayor restricción vendrá marcada por tanto por la humedad. Volúmenes de entre 500 y 1000 mL proporcionarían una amortiguación suficiente, pero se va a optar por la colocación de un volumen de 1000 mL debido a que el modelo supone mezcla perfecta en la cámara, y esta condición no se cumplirá estrictamente, aunque se estima que la convección provocada por la corriente de entrada de aire más la difusión (para un caudal de 200 mL/min se tendrá un tiempo medio de residencia de 5 minutos) proporcionarán una mezcla suficiente sin necesitar de elementos de agitación activa.

Anexo XIII - Pérdidas de carga en conductos y accesorios

En el caso de gases, su densidad varía con la presión. Esto hace que a priori no puedan emplearse las ecuaciones desarrolladas para líquidos en el cálculo de pérdidas de carga; la disminución de la presión en la tubería debida a las pérdidas hará que la densidad, y por tanto la conservación de la masa y la velocidad del gas cambien significativamente[33].

El total de longitud en conductos se estima en unos 5 m, y habrá presentes unos accesorios que provocarán unas pérdidas de cargas secundarias, tales como tes, rácores, o reguladores. Pueden considerarse como un incremento en la longitud equivalente de la conducción.

La formula general para el cálculo de pérdidas de carga es la siguiente:

$$h_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (54)$$

Donde:

h_l : Altura de pérdidas [m]

f : factor de fricción [-]

L : Longitud de tubería [m]

D : Diámetro interior de tubería [m]

v : velocidad del fluido [m]

g : aceleración de la gravedad $[9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}]$

Experimentalmente, se ha demostrado que esta expresión sí tiene validez para el cálculo de pérdidas de carga en tuberías de gas si se cumplen ciertas condiciones[33]:

- Si la diferencia de presión es inferior al 10% de la inicial se puede usar esta fórmula como si fuera un líquido.
- Si la diferencia de presión es mayor de un 10% pero menor de un 40%, se puede emplear usando la presión media.

Para el resto de casos es necesario emplear una fórmula empírica, se ha encontrado recomendada la siguiente:

$$w^2 = \frac{D \cdot A^2}{\bar{V}_1 \cdot f \cdot L} \cdot \frac{P_1^2 - P_2^2}{P_1} \quad (55)$$

Donde:

w : gasto másico [kg/s]

D : Diámetro interior de tubería [m]

A : sección tubería [m^2]

\bar{V}_1 : Volumen específico del gas en la sección 1 $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

f : factor de fricción [-]

L : Longitud de tubería [m]

P_1, P_2 : Presión del fluido en las secciones 1 y 2 respectivamente [Pa]

Para el caso de mayores pérdidas, cuando el caudal sea máximo, 400 mL/min, se calcula el régimen de flujo:

$$\text{Caudal: } Q = 400 \frac{\text{mL}}{\text{min}} = 6,67 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Diámetro: } D = 4 \text{ mm} = 0,004 \text{ m}$$

$$\text{Área: } A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,004^2}{4} = 1,26 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{velocidad: } u = \frac{Q}{A} = \frac{6,667 \cdot 10^{-6}}{1,257 \cdot 10^{-5}} = 0,53 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Viscosidad cinemática: } \nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{u \cdot D}{\nu} = \frac{0,53 \cdot 0,004}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 141,3 \quad (56)$$

El número de Reynolds es mucho menor a 2000 por lo que se tiene un régimen aminar de flujo. En este caso, el factor de fricción se define como:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{141,3} = 0,453 \quad (57)$$

Y la altura de pérdidas:

$$h_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,453 \cdot \frac{5}{0,004} \cdot \frac{0,53^2}{2 \cdot 9,81} = 8,11 \text{ m. c. gas} \quad (58)$$

Que en términos de presión, para el aire estándar ($\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$):

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 1,2 \cdot 9,81 \cdot 8,11 = 95,4 \text{ Pa} \quad (59)$$

La estimación de las pérdidas de cargas secundarias se puede hacer por medio de estimación de longitud equivalente. Se ha empleado un nomograma de pérdidas de carga secundarias [34], del cual se ha tenido que extrapolar a diámetros menores que los contemplados. Se es consciente de que la exactitud de las estimaciones se ha comprometido, pero se acepta como referencia.

Es especialmente intrincado estimar las pérdidas en el filtro de partículas y en la cámara de medida. La pérdida de carga en el filtro dependerá de empaquetamiento del material, del grosor, del diámetro... por lo que no se estimará, sino que se aplicará un margen de seguridad. La cámara, pese a ser un elemento peculiar, se hará una estimación interpretándola como un codo de 180°, ocho estrechamientos de $d/D=1/4$, y una entrada común, pese a prever que la pérdida será algo mayor por la turbulencia que genera. El nomograma empleado es el siguiente:

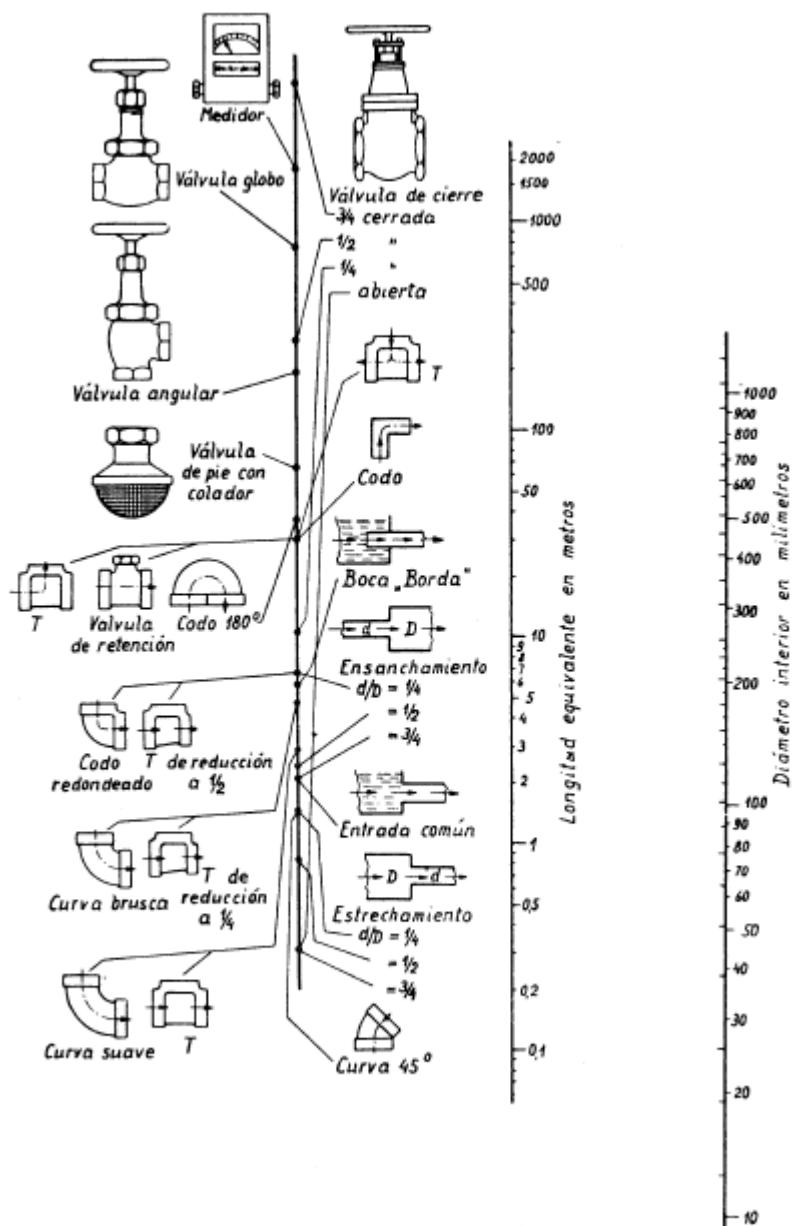


Figura 42 - Nomograma de pérdidas secundarias[34]

Los elementos que se tendrán presentes en el circuito son:

- Medidor: No se tendrá en cuenta el nomograma, el fabricante indica la caída de presión 120 Pa.
- Válvula de globo: $L_{eq} = 1,5\text{m}$
- 2xBoca "borda", 2xT y Codo 180°: $L_{eq} = 0,25\text{ m}$
- 2xEnsanchamiento $d/D = 1/4$: $L_{eq} = 0,15\text{m}$
- Entrada común: $L_{eq} = 0,07\text{ m}$
- 10xEstrechamiento $d/D = 1/4$: $L_{eq} = 0,04\text{m}$

La longitud equivalente total será de 3,52 m excluido el medidor de caudal:

$$h_l = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,453 \cdot \frac{3,52}{0,004} \cdot \frac{0,53^2}{2 \cdot 9,81} = 5,71 \text{ m. c. gas} \quad (60)$$

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 1,2 \cdot 9,81 \cdot 5,71 = 67,2 \text{ Pa} \quad (61)$$

Y teniendo en cuenta el medidor de caudal:

$$P_{secundarias} = 67,2 + 120 = 187,2 \text{ Pa} \quad (62)$$

El total de pérdidas, como suma de las primarias y las secundarias será:

$$P_{total} = P_{primarias} + P_{secundarias} = 95,4 \text{ Pa} + 187,2 \text{ Pa} = 282,6 \text{ Pa} \quad (63)$$

Anexo XIV - Bomba y válvulas de regulación.

La bomba a emplear es de la empresa GAST, serie 2D1034. Estas bombas se caracterizan por tener bajos niveles de ruido y vibración, ser compactas y ligeras y tener un bajo consumo, entre otras características. Entre las aplicaciones recomendadas por el fabricante destacan el análisis de aire y gas, y otros equipos de laboratorio, como es el caso que nos ocupa.



Model Number	Milliamps at Nominal Voltage	Potential Operating Voltage Range	Net Weight	
			oz	g
2D1034-101-1060*	30-70	4.5V DC	.56	16
2D1034-101-1061*	25-45	6V DC	.56	16
2D1034-101-1075*	30-80	6V DC	.56	16
2D1034-101-1058*	20-50	7.5 DC	.56	16
2D1034-101-1034**	70-110	6V DC	.56	16
2D1034-101-1035**	45-100	12V DC	.56	16

* Ironless core motor

** Iron core motor

Figura 43 – Imagen y características Bomba GAST Serie 2D1034

Como se puede apreciar en la figura anterior, la bomba está dotada de olivas de conexión para facilitar el acople de los tubos, y de orificios para tornillo para una correcta fijación. Hay diversos modelos que trabajan a distintas tensiones.

El fabricante proporciona la siguiente curva característica de la bomba. Los distintos modelos de la serie, unos con núcleo de hierro y otros de material plástico, y con distintos voltajes nominales. Ya que se plantea el desarrollo de un sistema portátil, alimentado por baterías, se considera el modelo de bomba 2D1034-101-1035, que trabaja a 12V, el voltaje más común en baterías. La conexión deberá ser hecha directamente a las baterías, evitando extraer la corriente del controlador (ya que se presentan consumos más altos que en el caso de los elementos electrónicos). Esta conexión puede hacerse si la bomba trabaja a la misma tensión de la batería, y un control todo/nada de la bomba puede hacerse a través de un diodo MOSFET de potencia, como el Vishay IRF520.

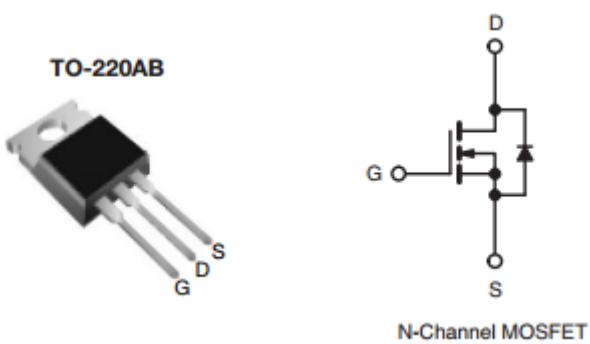


Figura 44 – Diodo MOSFET de potencia Vishay ARF520

Este tipo de componentes electrónicos tienen tres entradas: S (Source), D (Drain) y G (Gate), y funcionan como un interruptor. Aplicando un 1 lógico sobre el pin Gate, el diodo permite el paso de corriente entre los pines S y D, una corriente que no proviene del componente electrónico que envía la señal lógica. Aplicando un 0 lógico, abre el circuito entre S y D.

El fabricante de la bomba proporciona la siguiente curva:

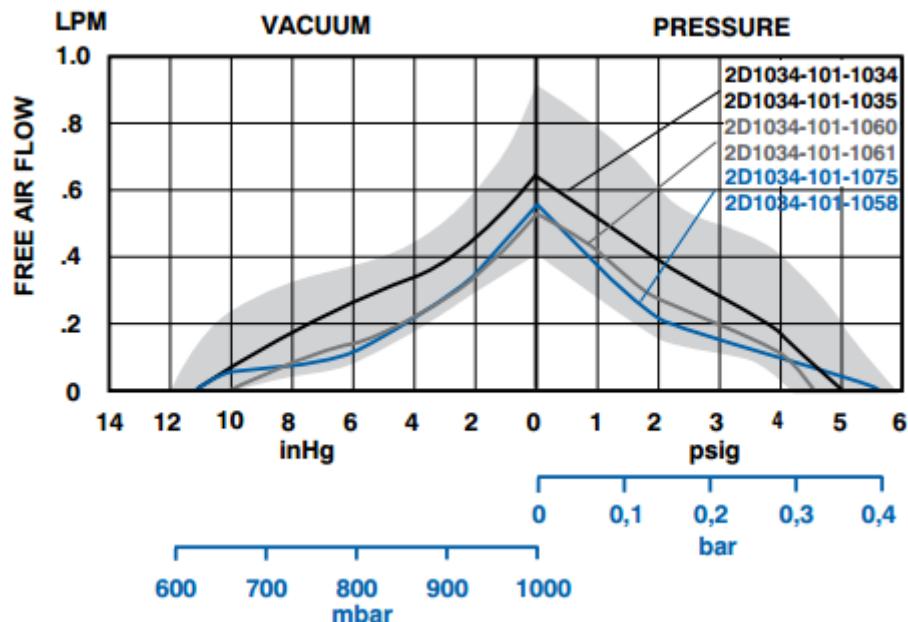


Figura 45 – Curvas de las bombas GAST serie 2D1034²

Para realizar el control del régimen de operación de la bomba se plantea el uso de dos válvulas, una tras la bomba, a la entrada del sistema, y otra para controlar el caudal de purga, saliente del sistema. Con esto se consiguen dos grados de libertad para determinar el punto de trabajo de la bomba. Se ha estimado en el anexo anterior que la pérdida de carga del sistema será baja, en el entorno de los 300-400 Pa. En este régimen de pérdidas la bomba proporcionará prácticamente el caudal máximo.

En la figura siguiente se ilustra el efecto deseado por el sistema de válvula y purga propuesto. A partir del régimen libre de la bomba, marcado por el punto 1, abriendo la válvula de purga puede conseguirse un caudal mayor de la bomba, por tanto una presión menor, sin que todo el flujo entre en el sistema. El efecto aparente es un desplazamiento de la curva de la bomba hacia abajo, tal como muestra la flecha verde, hasta llevar el punto de operación al estado 2, y siendo la curva aparente la dibujada en azul. En este momento se tiene un caudal que entra al sistema y un caudal de purga como muestra la figura 46. La válvula colocada entre la bomba y la entrada al sistema permite mover el punto de operación en la nueva curva, siguiendo la trayectoria marcada en flecha roja, hasta el punto de operación final, el punto 3. La pérdida de carga introducida por la válvula se indica en la figura en cuestión.

² Nótese que la curva está dada como caudal en función de la altura, en vez de la representación inversa, más habitual.

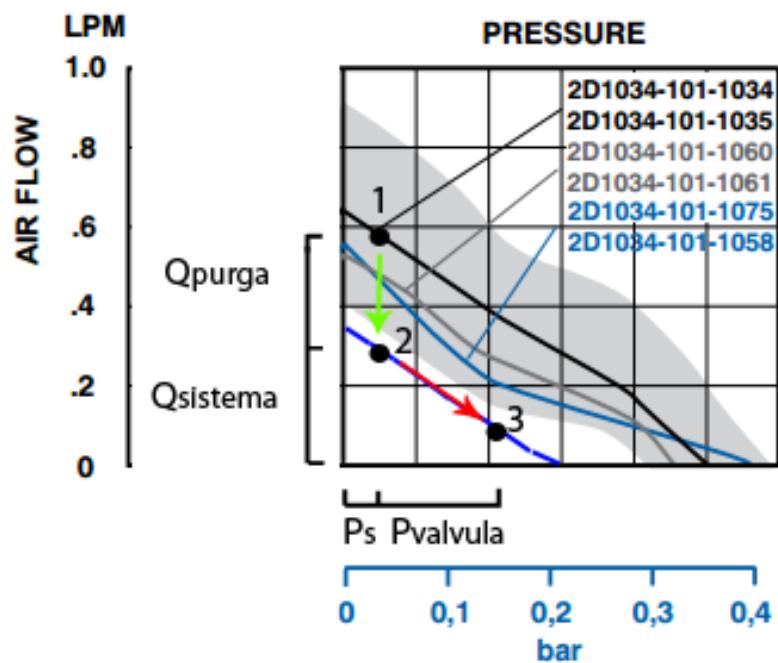


Figura 46 – Control de la bomba por el sistema de válvula y purga

Anexo XV – *Sketch* de Arduino

/*Este código de Arduino ejecuta el porómetro. Lee la información de los sensores de entrada, las acondiciona a sistema internacional de unidades y calcula la transpiración y conductancia estomática.

Si Arduino está conectado a un ordenador mostrará todas las variables por pantalla a través de puerto serie. Si no, mostrará únicamente a través del LCD los valores de E y g.

Este programa realiza autocalibración y puede funcionar de forma autónoma.

```
/*
//Inclusion de librerias e inicializacion de las variables
#include <Sensirion.h>
#include <LiquidCrystal.h>

const uint8_t dataPinIn = 49;
const uint8_t clockPinIn = 48;

const uint8_t dataPinOut = 51;
const uint8_t clockPinOut = 50;

byte inByte, inByte1, inByte2, inByte3, inByte4, measByte1, measByte2,
trash;
int iter=0, inint, pinCalibracion=44, calibrar, hcalibrado=0;
long niter=0;
float flow=0, Pin=0, Pout=0, Tin, Tout, HRIn, HROut, DewPointIn,
DewPointOut, Avg, DesvTin=0, DesvTout=0, DesvHRin=0, DesvHROut=0;

float Pvleaf, wleaf, Pvin, Pvout, win, wout, DW, uin, uout, E, wm, g,
A=0.000314159;

LiquidCrystal lcd(41, 40, 37, 36, 33, 32);
Sensirion tempSensorIn = Sensirion(dataPinIn, clockPinIn);
Sensirion tempSensorOut = Sensirion(dataPinOut, clockPinOut);

void setup()
{
    //Inicia las comunicaciones con el ordenador (Puerto serial), el
    caudalímetro (Puerto serial 1), y el LCD
    Serial.begin(19200);
    Serial.println("Iniciando...");
    Serial1.begin(19200);
    pinMode(pinCalibracion, INPUT);
    digitalWrite(pinCalibracion, HIGH);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.print("Iniciando...");
    delay (1000);
}

void loop()
{
    //Medida de caudal
    while (Serial.available() > 0) {
        inByte = Serial.read();
        Serial1.write(inByte);
    }
}
```

```
}

while (Serial1.available() > 0) {
    trash = Serial1.read();
}

while (Serial1.available() != 4) {}

inByte1 = Serial1.read();
inByte2 = Serial1.read();
inByte3 = Serial1.read();
inByte4 = Serial1.read();
inint=inByte3*256+inByte4;
flow=inint;
flow=flow/70.0;
Serial.println();
Serial.println("-----");
-----"); Serial.println();
if (inint>30800){
    Serial.println("Overflow");
} else {
    Serial.print("Flow: ");
    Serial.print(flow); Serial.println(" mL/min");
}

//Medida de presión

inint=analogRead(1);
Pin=inint;
Pin=252.74*Pin-25855.34;
inint=analogRead(2);
Pout=inint;
Pout=252.74*Pout-25855.34;

//Medida de Humedad y temperatura

tempSensorIn.measure(&Tin, &HRIn, &DewPointIn);
tempSensorOut.measure(&Tout, &HROut, &DewPointOut);

//Correccion por autocalibracion

Tin=Tin*(1-DesvTin);
Tout=Tout*(1-DesvTout);
HRIn=HRIn*(1-DesvHRin);
HROut=HROut*(1-DesvHROut);

//Muestra de los resultados de las medidas por pantalla

Serial.print("Temperature In: ");
Serial.print(Tin);
Serial.print(" C, Humidity In: ");
Serial.print(HRIn);
Serial.print(" %, Pressure In: ");
Serial.print(Pin);
Serial.println(" Pa");

Serial.print("Temperature Out: ");
Serial.print(Tout);
Serial.print(" C, Humidity Out: ");
Serial.print(HROut);
Serial.print(" %, Pressure Out: ");




```

```
Serial.print(Pout);
Serial.println(" Pa");

//Autocalibracion
calibrar=digitalRead(pinCalibracion);

if (calibrar==LOW) {
  Avg=(Tin+Tout)/2;
  DesvTin=(Tin-Avg)/Avg;
  DesvTout=(Tout-Avg)/Avg;
  Avg=(HRIn+HROut)/2;
  DesvHRin=(HRIn-Avg)/Avg;
  DesvHROut=(HROut-Avg)/Avg;
  Serial.println();
  Serial.println("Calibracion completada, SOLTAR");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("SOLTAR");
  hacalibrado=1;
  Serial.println();
  while (calibrar==LOW){
    calibrar=digitalRead(pinCalibracion);
    delay(100);
  }
}

if (niter==3){
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Calibrar...    ");
}

//Si ya se ha realizado la calibracion, comenzar los calculos de E
y g.

if (hacalibrado==1){
  lcd.setCursor(0,0);

  //Acondicionamiento de entradas
  Tin=Tin+273.15; Tout=Tout+273.15;
  HRIn=HRIn/100.0; HROut=HROut/100.0;
  flow=flow/1000000.0/60.0;

  //Ejecucion porometro
  Pvleaf= Psaturacion (Tout);
  wleaf=Pvleaf/Pin;
  Pvin=Psaturacion (Tin)*HRIn;
  Pvout=Psaturacion (Tout)*HROut;
  win=Pvin/Pin;
  wout=Pvout/Pin;
  DW=wleaf-wout;
  uin=Pin/(8.314*Tin)*flow;
  uout=uin*((1.0-wout)/(1.0-win));
  E=(uout*wout-uin*win)/A;
  wm=(wleaf+wout)/2.0;
  g=E*(1.0-wm)/(wleaf-wout);

  //Imprimir por pantalla y por LCD los resultados
  E=E*1000.0;
  g=g*1000.0;
  Serial.print("Transpiracion: ");
  Serial.print(E);
  Serial.print(" mmol m-2 s-1, conductancia: ");
}
```

```
Serial.print(g);
Serial.println("mmol m-2 s-1");
Serial.println();
Serial.println("-----");
-----");
lcd.print("E: "); lcd.print(E); lcd.print("      ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("g: "); lcd.print(g); lcd.print("      ");
lcd.setCursor(12,0); lcd.print("mmol");
lcd.setCursor(12,1); lcd.print("m2 s");
}
niter++;

}

//Funcion de calculo de Presion de saturacion
float Psaturacion (float T) {
    float t=(1.0- 373.16/T);
    float Psat=101235*exp(13.3185*t-1.976*t*t-0.6445*t*t*t-
0.1229*t*t*t*t);
    return Psat;
}
```