

**M. M. GONZÁLEZ-REAL y A. BAILLE**

Área de Ingeniería Agroforestal

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica  
Universidad Politécnica de Cartagena

Correo electrónico:

[mayla.gonreal@upct.es](mailto:mayla.gonreal@upct.es)

[alain.baille@upct.es](mailto:alain.baille@upct.es)

---

## PARTE II

# EL CLIMA DEL INVERNADERO

## VARIABLES CARACTERÍSTICAS Y MEDIDA



### Contenido de la Parte II

#### Material de lectura:

- *Unidad 1. Variables características del aire*
- *Unidad 2. Variables de radiación*
- *Unidad 3. Variables ligadas al estado fisiológico de la planta*

#### Referencias

#### Lectura complementaria

#### Aplicaciones

Cartagena, 2003



Conjunto de sensores para la caracterización del clima



Caracterización de la radiación solar  
bajo invernadero



Medida de la temperatura de superficie  
de hojas de rosal con un radiotermómetro



## PARTE II. UNIDAD 1

### VARIABLES CARACTERÍSTICAS DEL AIRE

*Las variables del medio aéreo más comúnmente medidas fuera y dentro de un invernadero son la temperatura y la humedad. Otros sensores de interés son los que miden la velocidad del*

*viento (en el exterior) y la concentración en CO<sub>2</sub> del aire (en el interior). La obtención de medidas fiables requiere el uso de sensores robustos, que sean sencillos de manejo y de fácil mantenimiento por parte del agricultor. Además, deben de tener un coste relativamente bajo. Todas estas exigencias limitan el número de sensores adecuados para su uso en condiciones de producción. Esta Unidad presenta los principales sensores del medio aéreo utilizados en invernaderos, y su base teórica de funcionamiento.*

## 1- INTRODUCCIÓN

Las variables del medio aéreo que se miden con más frecuencia fuera y dentro de un invernadero son la temperatura y la humedad. Otros sensores de interés son los que miden la velocidad del viento (en el exterior) y la concentración en CO<sub>2</sub> (en el interior). La obtención de medidas fiables requiere el uso de sensores robustos, que sean sencillos de manejo y de fácil mantenimiento por parte del agricultor. Además, deben de tener un coste relativamente bajo. Todas estas exigencias limitan el número de sensores adecuados para su uso en condiciones de producción. El primer epígrafe de esta Unidad presenta los principales sensores del medio aéreo utilizados en invernadero, y su base teórica de funcionamiento.

Las variables características de la radiación, ya sea de corta o de larga longitud de onda, representan unos componentes fundamentales del balance de energía del invernadero y, por consiguiente, inciden de forma decisiva en el determinismo del clima interior. El segundo epígrafe de esta Unidad se dedica a la presentación de los principales sensores de medida de las componentes de la radiación solar (incluyendo la fracción fotosintéticamente activa, o PAR) y de la radiación neta.

## 2- LAS VARIABLES DEL MEDIO AÉREO

### 2.1- MEDIDA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE

El método actualmente más utilizado para la medida de la temperatura del aire es el basado en la **termo-resistencia**. La base de este sensor se asienta en el hecho de que la resistencia de un elemento metálico depende de la temperatura.

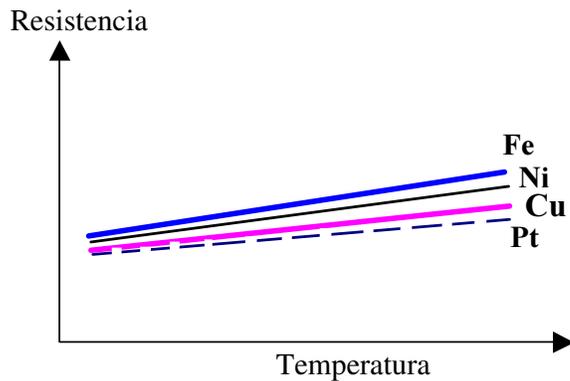
La resistencia de hilos metálicos aumenta con la temperatura siguiendo una ley polinómica:

$$R(T) = R_0 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 \dots \quad (1a)$$

siendo:  $R(T)$  = resistencia ( $\Omega$ ) a la temperatura  $T$ ,  $R_0$  = resistencia ( $\Omega$ ) a la temperatura  $T_0$  (= 273 K).  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes características del metal utilizado.

Dentro del rango de temperaturas usuales se puede considerar una variación lineal de la resistencia con la temperatura (Figura 1) y utilizar un desarrollo de primer orden:

$$R(T) = R_0 + \alpha(T - T_0) \quad (1b)$$

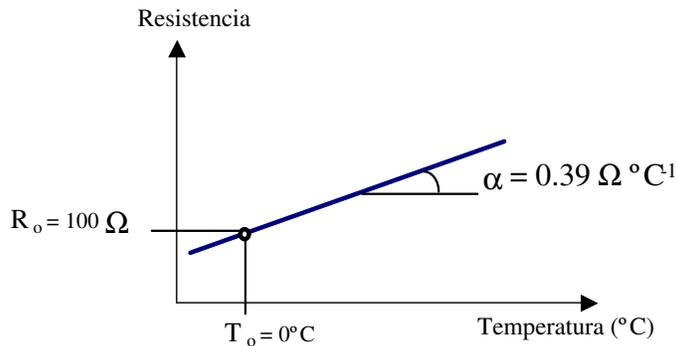


**Figura 1:** Variación de la resistencia eléctrica de diferentes metales con la temperatura.

Las resistencias más utilizadas son las de platino que poseen las características siguientes:

- La resistencia  $R_0$  es igual a  $100 \Omega$  a la temperatura  $T_0 = 0^\circ\text{C}$
- $\alpha = 3.908 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  y  $\beta = -5.802 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

El metal más comúnmente utilizado en la fabricación de las termo-resistencias es el platino (Figura 2).

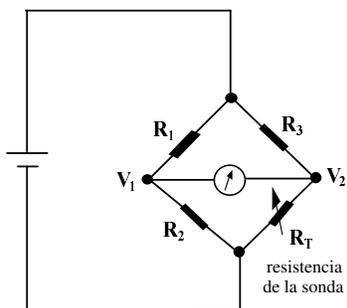


**Figura 2.** Variación de la resistencia eléctrica de sondas de platino tipo PT100 ( $100 \Omega$  de resistencia a  $0^\circ\text{C}$ ) con la temperatura. La sensibilidad es igual a  $0.39 \Omega/^\circ\text{C}$ .

La medida se efectúa con la ayuda de un puente de Wheastone que comporta tres resistencias ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ) y una resistencia variable  $R_T$  que corresponde a la resistencia de la sonda (Figura 3). Se aplica en dos extremidades de una de las diagonales una tensión  $V$ , mientras que las dos restantes están conectadas a un galvanómetro.

Cuando varía la resistencia  $R_T$ , aparece un desequilibrio y se mide una corriente en el galvanómetro. El interés de este tipo de montaje es que permite obtener una indicación igual a cero para una temperatura de referencia, en general  $0^\circ\text{C}$ . Se puede medir la resistencia y determinar la temperatura aplicando la relación que liga la resistencia con la temperatura (Ecn. 1b).

Sin embargo, para determinar la temperatura se mide generalmente la corriente (o la tensión) de desequilibrio del puente y se asocia con la temperatura que toma  $R_T$ .



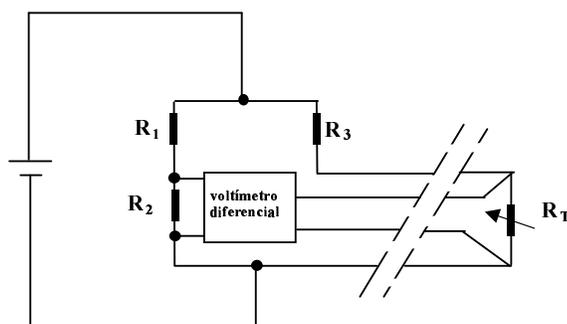
**Figura 3.** Esquema del principio del puente de Wheatstone, utilizado en la medida de la temperatura con termo-resistencias.

El puente de Wheatstone está equilibrado y no pasa corriente por el galvanómetro cuando se cumple la relación:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_T}$$

Actualmente, se utilizan voltímetros en lugar de galvanómetros (Figura 4). Si consideramos que  $V$  es la tensión de alimentación y  $V_1$  y  $V_2$  las tensiones que existen en los extremos de una diagonal, la relación que liga la diferencia de tensión con la temperatura es la siguiente:

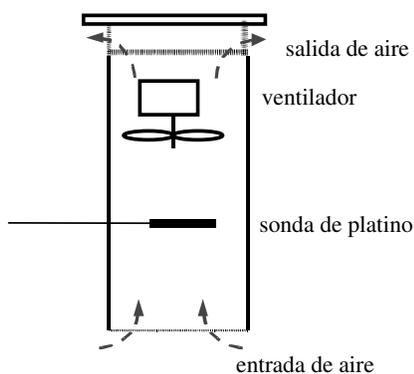
$$V_1 - V_2 = V \left( \frac{R_0}{R_1 + R_0} \right) \alpha T \tag{2}$$



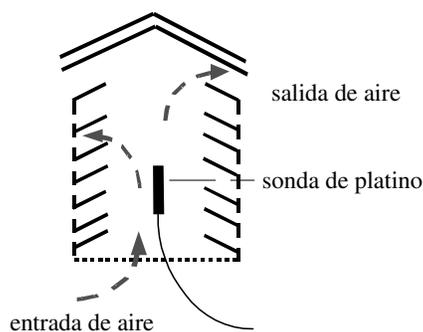
**Figura 4.** Esquema de montaje de termo-resistencia con cuatro hilos.

En la práctica, generalmente:  $R_1 = R_3$  y  $R_2 = R_0$   
siendo  $R_0$  el valor de  $R_T$  a  $0^\circ\text{C}$

En la práctica, las medidas de temperatura del aire se realizan en abrigo con ventilación dinámica (uso de pequeños ventiladores, Figura 5a), o con ventilación natural (Figura 5b).



**Figura 5 a.** Medida de la temperatura del aire en un abrigo ventilado (ventilación forzada).



**Figura 5 b.** Medida de la temperatura del aire en un abrigo estático (ventilación natural).

## 2.2- MEDIDA DE LA HUMEDAD DEL AIRE

### - El psicrómetro

El psicrómetro (Figura 6) está basado en (a) la medida de las temperaturas de bulbo seco y húmedo (generalmente, por medio de termo-resistencias) y en (b) la ecuación psicrométrica. Comporta por lo tanto dos sensores de temperatura situados dentro de un abrigo ventilado. Uno de ellos, cubierto con una gasa mantenida constantemente húmeda, mide la temperatura húmeda del aire ( $T_h$ ) y el otro mide la temperatura seca ( $T_s$ ). La diferencia de temperatura entre estos dos sensores permite determinar el resto de las variables que caracterizan el aire húmedo (humedad relativa, tensión de vapor, humedad específica, etc.).

La ecuación psicrométrica viene dada por la expresión siguiente:

$$e_a = e^*_s(T_h) - \gamma(T_s - T_h)$$

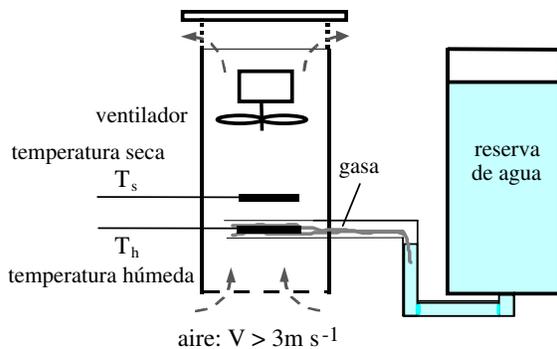
siendo:

$\gamma$  la constante psicrométrica ( $= 0,066 \text{ kPa K}^{-1}$  a nivel del mar, para valores de velocidad del aire  $V > 3 \text{ m s}^{-1}$ )

$e_a$  = tensión de vapor actual o real (kPa)

$e^*_s(T_h)$  = tensión de vapor saturante a la temperatura de bulbo húmedo  $T_h$  (kPa)

$T_s$  y  $T_h$  = temperaturas de bulbo seco y húmedo, respectivamente, (en °C)



**Figura 6a.** Esquema de un psicrómetro ventilado



**Figura 6b.** Vista de un psicrómetro

Partiendo de la medida de  $T_s$ , de  $T_h$  y con la ecuación psicrométrica se puede determinar:

- La tensión de vapor saturante a la temperatura  $T$ . La tensión de vapor saturante,  $e^*_s(T)$ , depende solamente de la temperatura. La función que liga  $e^*_s(T)$  con la temperatura  $T$  es, entre otras, la fórmula de Alt:

$$e^*_s(T) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{T}{3}\right) \right]^{8,827} \text{ (kPa)}$$

Ejemplo, para  $T_h = 25 \text{ °C}$  y  $T_s = 35 \text{ °C}$

$$e^*_s(T_h) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{25}{3}\right) \right]^{8,827} = (0,6107)(1,20)^{8,827} = 3,17 \text{ kPa}$$

$$e^*_s(T_s) = 0,6107 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin\left(\frac{35}{3}\right) \right]^{8,827} = (0,6107)(1,286)^{8,827} = 5,62 \text{ kPa}$$

- La tensión de vapor actual es, según la ecuación psicrométrica:

$$e_a = e^*_s(T_h) - \gamma(T_s - T_h) = (3,17) - (0,066)(10) = 2,51 \text{ kPa}$$

- La humedad relativa del aire:

$$HR = \left( \frac{e_a}{e^*_s(T_s)} \right) 100$$

Para el ejemplo anterior,  $HR = \left( \frac{2,51}{5,62} \right) 100 \cong 45 \%$

- El déficit de saturación del aire:

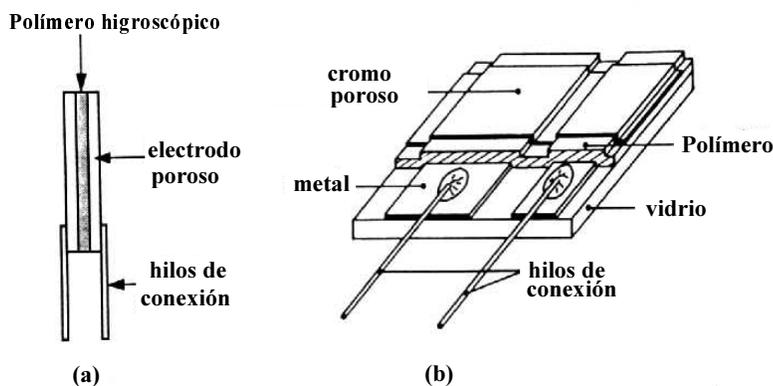
$$D_a = e^*_s(T_s) - e_a = 3,11 \text{ kPa}$$

Para pasar de presión ( $e$ , kPa) a contenido de vapor de agua,  $q$  ( $g_{\text{vapor agua}}/kg_{\text{aire}}$ ) se utiliza la ecuación de los gases perfectos ( $e = (n/V) R T$ ), siendo  $q = (M/\rho)(n/V) \cong (e M)/(\rho R T)$ . Con  $M = 18 \text{ g mol}^{-1}$ ,  $\rho =$  densidad del aire ( $kg \text{ m}^{-3}$ ),  $n/V$  ( $\text{mol m}^{-3}$ ),  $T$  en K y  $R$  la constante de los gases perfectos ( $= 0.00831 \text{ kPa m}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). A  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\rho = 1.2 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $T = 298 \text{ K}$ ), la equivalencia, es  $1 \text{ kPa} \cong 6.06 \text{ } g_{\text{vapor agua}}/kg_{\text{aire}}$

### - Las sondas capacitivas

Un higrómetro capacitivo está integrado por una lámina de polímero higroscópico sobre la que se depositan dos electrodos metálicos porosos (Figura 7). El conjunto constituye un condensador. Cuando el polímero absorbe moléculas de agua, su volumen aumenta y la distancia entre los electrodos se incrementa, lo que induce una variación de la capacitancia del condensador.

Este tipo de sensor es fácil de utilizar y es fiable para valores de HR comprendidos entre 5 y 95%. Sin embargo, deben de calibrarse unas 2 veces al año con el fin de asegurar una precisión de  $\pm 3\%$ . Son sensibles al polvo y a la contaminación.



**Figura 7.** Esquema: (a) del principio de un higrómetro basado en la variación de la capacitancia y (b) de la realización del sensor en la práctica. Según Guyot 1997.

## 2.3- MEDIDA DE LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub>

### Principio del análisis por infrarrojos

La técnica de análisis por infrarrojos es actualmente la más utilizada en tecnología de invernaderos, en fisiología y en estudios de contaminación atmosférica, debido a su precisión. Los gases heteroatómicos (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO e hidrocarburos gaseosos) tienen un espectro de absorción característico. Es decir, absorben la radiación a longitudes de onda

específicas. Por el contrario, las moléculas gaseosas que tienen átomos idénticos (p.e.: O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) no absorben la radiación infrarroja, por lo que no interfieren en la determinación de la concentración de moléculas heteroatómicas.

En el caso del CO<sub>2</sub>, la banda de absorción principal se sitúa a una longitud de onda  $\lambda = 4.25 \mu\text{m}$  y tiene picos secundarios a  $\lambda = 2.66, 2.77$  y  $14.99 \mu\text{m}$ . El único gas heteroatómico, presente en el aire y con un espectro de absorción que se solapa con el del CO<sub>2</sub> es el del vapor de agua. Ambos gases absorben la radiación en la zona  $\lambda = 2.7 \mu\text{m}$ . Dado que la concentración de vapor de agua en el aire es superior a la del CO<sub>2</sub>, esta interferencia plantea un problema a la hora de la medida. Esto explica que sea preciso proceder al secado del aire previamente al análisis. En otros casos, el problema de interacción se resuelve filtrando la gama de longitud de onda en la que la absorción de ambos gases coincide.

### **Cámara de medida irga (“infra-red gas analyser”)**

La cámara de medida por infrarrojos (IRGA) consta esencialmente de tres partes (Figura 8):

- Una fuente de IR
- Dos tubos donde pasa el CO<sub>2</sub>: uno de referencia (aire seco) y otro de muestra o análisis
- Un detector con dos cámaras de absorción de IR

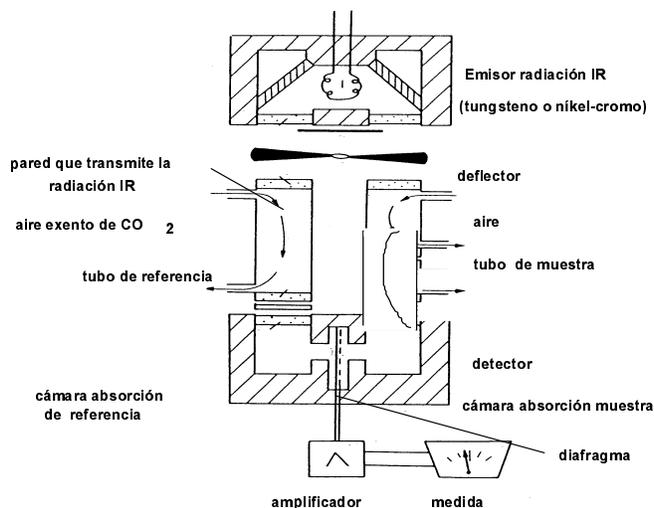
La fuente de IR suele ser una espiral de tungsteno, o bien de níquel-cromo, que se calienta a una temperatura de unos 600-800 °C. El haz que emite la fuente es separado con la ayuda de deflectores de forma que llegue a cada tubo, aproximadamente, la misma cantidad de radiación. Los extremos de los dos tubos (referencia y muestra) están equipados con paredes que transmiten la radiación infrarroja.



Para llevar a cabo la medida de la concentración de CO<sub>2</sub>, se hace pasar por el tubo de referencia aire exento de CO<sub>2</sub> o bien nitrógeno, mientras que el aire a analizar se hace pasar por el tubo de muestra. De este modo, la radiación IR atraviesa el tubo de referencia sin ser absorbida, mientras que el nivel de radiación se reduce en el tubo de muestra debido a la absorción del CO<sub>2</sub>.

Las dos cámaras del detector absorben la radiación IR en la gama de longitudes de onda que coincide con los picos de absorción del CO<sub>2</sub> ( $\lambda = 4.25, 2.66, 2.77$  y  $14.99 \mu\text{m}$ ). La cantidad de radiación IR que llega a la cámara del detector, después de atravesar el tubo de muestra, es reducida en la gama de longitudes de onda en las que absorbe el CO<sub>2</sub>. Así pues, cuanto mayor sea la concentración de CO<sub>2</sub> en el tubo de muestra, menor será la cantidad de radiación que llega a la cámara de muestra del detector respecto a la que llega a la cámara de referencia.

Las cámaras del detector están separadas por un diafragma que forma el electrodo de un condensador. La amplitud de la vibración de la membrana viene determinada por la diferencia de energía absorbida entre las dos cámaras que se traduce por una variación de presión, siendo ésta transmitida al aparato de medida.



**Figura 8.** Esquema de funcionamiento de un IRGA.

## 2.4- MEDIDA DE LA VELOCIDAD Y DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO

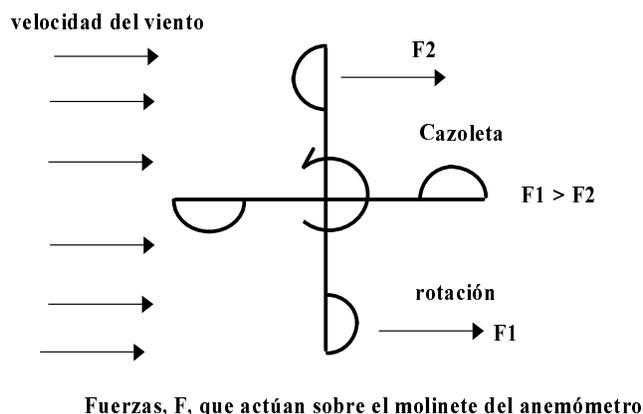
### Velocidad del viento (anemómetros analógicos con cazoletas)

**Principio:** el sensor comporta tres o cuatro cazoletas dispuestas de forma simétrica respecto a un eje vertical (Figura 9). El viento ejerce una fuerza superior sobre la parte cóncava de las cazoletas, por lo que el flujo de aire hace girar el sistema. Hay que tener en cuenta el umbral de arranque del aparato, que corresponde al valor mínimo de la velocidad del viento a partir de la cual se puede disponer de la medida (en este caso,  $0.5 \text{ m s}^{-1}$ ).

En las Figuras 10 y 11 se presentan dos tipos de anemómetros:

- Un anemómetro en el que eje de rotación engrana un alternador (Figura 10)

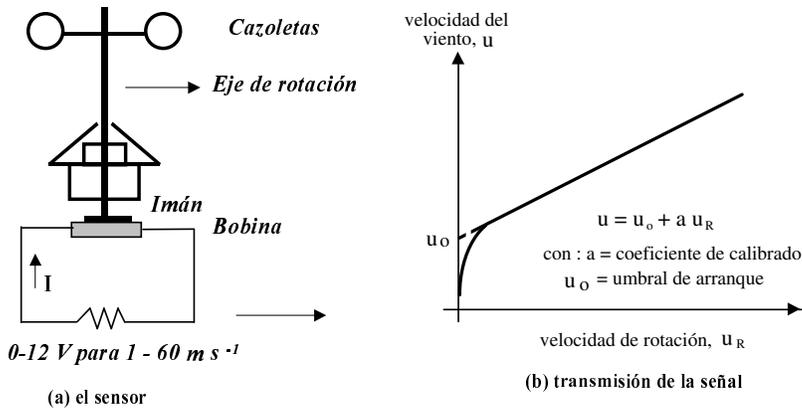
El desplazamiento del imán sobre el circuito impreso induce una corriente que es función de la velocidad de rotación. La señal de salida es, en general, una tensión alterna. La relación entre tensión de salida y velocidad no es lineal.



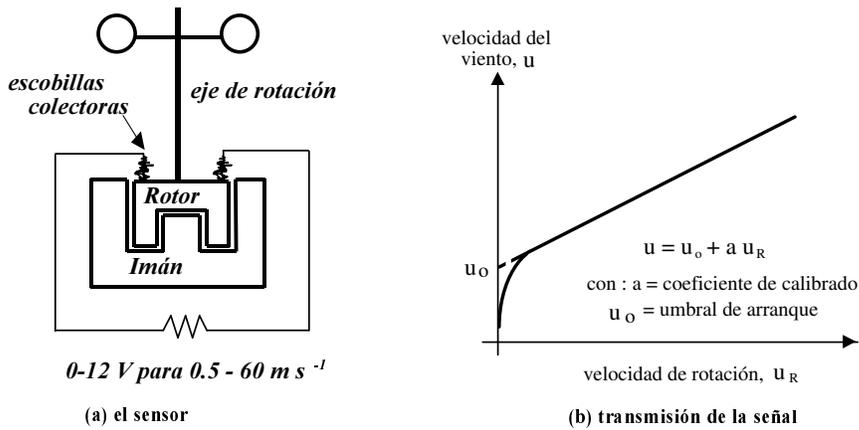
**Figura 9.** Principio de funcionamiento de un anemómetro a cazoletas.

- Un anemómetro en el que el eje de rotación engrana una dinamo (Figura 11)

La rotación del sistema arrastra un rotor. El desplazamiento del rotor induce una corriente que se recupera en las escobillas colectoras. En general, el circuito comporta una resistencia en cuyos extremos se mide una tensión continua proporcional a la velocidad del viento.



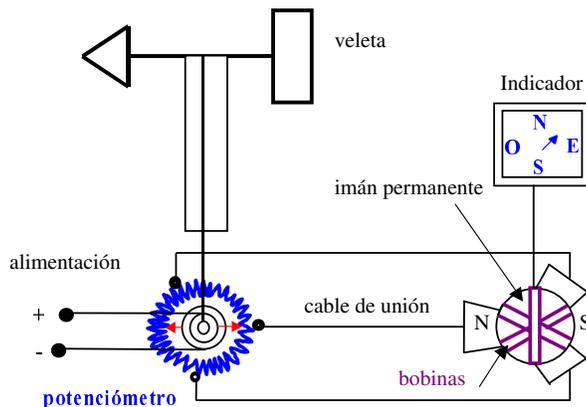
**Figura 10.** Principio de funcionamiento de un anemómetro con imán.



**Figura 11.** Principio de funcionamiento de un anemómetro con dinamo.

**Medida de la dirección del viento**

El sistema de la veleta, al girar, acciona el cursor de un potenciómetro, dotado de una pista circular con tres puntos de toma de tensión que están separados de 120° (Figura 12). La tensión entre cada uno de ellos varía en función de la posición que toma la veleta. Los tres puntos están unidos a un estator que comporta tres bobinas separadas 120°. El rotor es un imán permanente. Las corrientes que salen del potenciómetro crean un campo magnético en el indicador, de tal forma que el rotor gira en el mismo sentido que la veleta.



**Figura 12.** Principio de funcionamiento de una veleta. Adaptado de Guyot, 1997.

La tensión de salida es continua y varía desde 0 V hasta la tensión de alimentación del aparato (por ejemplo: 12 voltios). La dirección del viento se da en grados, siendo la tensión de salida proporcional a la dirección (ejemplo: 0-12 V para 0-360 grados).