

Tema 4. Transductores

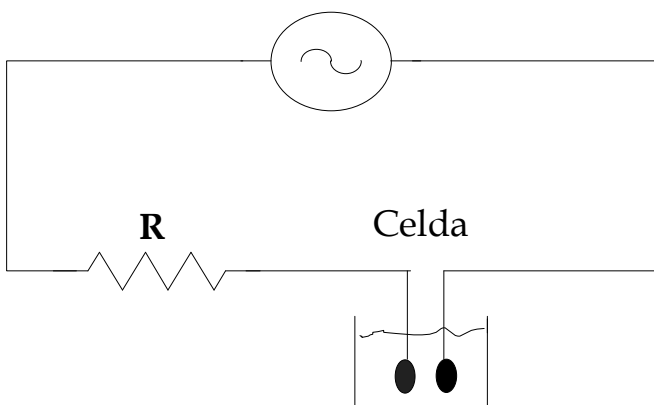
Introducción

Transductores son elementos que transforman una magnitud física en una señal eléctrica. Se pueden clasificar en dos grupos: Activos y pasivos. Son transductores activos los que hay que conectar a una fuente externa de energía eléctrica para que puedan responder a la magnitud física a medir como por ejemplo las fotorresistencias y termoresistencias, y son pasivos los que directamente dan una señal eléctrica como respuesta a la magnitud física como los fotodiodos y las sondas de pH.

Se denomina función de transferencia de un transductor a la relación matemática entre la magnitud física y la respuesta eléctrica. Dicha función puede ser de diferentes tipos. Una función de transferencia lineal tiene por expresión $S = a + bs$ donde S es la señal eléctrica, a y b son constantes y s es la señal física específica de cada transductor. Las funciones de transferencias no lineales pueden ser también de diferentes tipos: logarítmicas, como $S = a + b \ln s$; exponenciales, como $S = ae^{bs}$; polinómicas como $S = a + b s + c s^2 + d s^3 + \dots$, etc..

4.1 Transductores de conductividad

Para medir la conductividad de una disolución se emplea la celda de conductividades, que consiste en un par de electrodos plano-paralelos de Platino separados una cierta distancia. Cuando se conecta una fuente de tensión externa a los electrodos y se sumerge la celda en una disolución iónica, los iones se mueven debido al campo eléctrico que existe entre los electrodos. Si la fuente de tensión es de corriente continua, los iones que van llegando a los electrodos absorben o ceden electrones y se produce el fenómeno de electrolisis. Sin embargo, si se está interesado solo en el fenómeno del movimiento de los electrones por la disolución, el fenómeno de electrolisis es un efecto contraproducente. Por ello se escoge una fuente de tensión de corriente alterna para que los iones no tengan tiempo de intercambiar electrones con los electrodos, y la disolución se comporta como un medio conductor, con una conductividad dada, en cuyo interior se mueven los iones. Dicho conductor tendrá una resistencia eléctrica por lo que la celda es un transductor que transforma la conductividad de la disolución en resistencia eléctrica. Un montaje para medir la resistencia de la disolución y, posteriormente, la conductividad es el siguiente:



La resistencia R es conocida, tal que midiendo la ddp entre sus extremos (ddp_R) permite conocer la intensidad de la corriente que circula por la celda. Si medimos la ddp en los extremos de la celda (ddp_C) y aplicamos Ohm tendremos la resistencia de la celda (R_C)

$$I = \frac{ddp_R}{R} \quad R_C = \frac{ddp_C}{I} \quad (4.1)$$

Para obtener ahora el valor de la conductividad de la disolución se recurre a la expresión que la relaciona con la resistencia de la disolución: $R = C/\sigma$.

En dicha expresión C es una constante denominada constante de celda cuyo valor se determina midiendo la resistencia de una disolución patrón de KCl 0.1 Molar cuya conductividad está tabulada

4.2 Transductores de temperatura

4.2.1 Termoresistencias

Son conductores cuya resistencia varia con la temperatura. La función de transferencia de las termoresistencias es en general:

$$R = R_0 \{ 1 + a_1 (T - T_0) + a_2 (T - T_0)^2 + \dots + a_n (T - T_0)^n \} \quad (4.2)$$

donde R_0 es la resistencia a una temperatura T_0 (medida en grados Kelvin) de referencia.

Un elemento conductor que se emplea es el Platino, para el cual se tienen los siguientes valores numéricos de los coeficientes: $a_1 = 3.85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $a_2 = -5.83 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}$.

Si se consigue que a la temperatura de 273 K el valor de la resistencia sea de 100 ohmios y se desprecian los términos superiores al lineal se tiene finalmente la siguiente expresión para una Pt-100

$$R = 100 + 0.385 t \quad (t \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad (4.3)$$

En esta expresión se supone que el calentamiento de la resistencia es debida exclusivamente al contacto con el medio del que se quiere medir la temperatura. Al igual que en el caso del potenciómetro, interesa que la variación de resistencia se convierta en variación de tensión, para lo cual se le alimenta con una intensidad de corriente. Entonces la resistencia se calentará también por efecto Joule con lo que su temperatura será ligeramente diferente de la del medio exterior. Para que esta diferencia entre la temperatura de la resistencia y la exterior sea mínima y no afecte casi, hay que alimentar con una corriente pequeña. Para el caso del Pt-100 la corriente máxima es de 2.4 miliamperios si la resistencia está en contacto con el aire y de 10 mA si se sumerge en agua.

La termorresistencia de platino fue empleada por primera vez en 1871 por W. Siemens y ofrece una medida de la temperatura estable y exacta tal que se emplea como patrón de temperaturas desde -180°C hasta 600°C .

Otra aplicación del platino es la medida de velocidades de gases. Un hilo de platino se alimenta con una corriente constante para que se caliente. Entonces el paso de fluido cerca del platino produce su enfriamiento que es función de la velocidad del fluido, cambiando la resistencia y por tanto la diferencia de potencial en la resistencia de platino.

Otros conductores metálicos que también se utilizan para construir termoresistencias son el Cobre, el Niquel y el Molibdeno, cuyos respectivos coeficientes lineales (o de primer orden) de temperatura son 0.0043 , 0.00681 y 0.003786 K^{-1} .

4.2.2 Termistores: Son semiconductores cuya resistencia es variable con la temperatura.

- Para un semiconductor intrínseco o poco dopado, la resistencia disminuye cuando aumenta la temperatura. Por ello se denomina termistor NTC (Negative Temperature Coefficient).
- Para un semiconductor muy dopado, la variación de la resistencia con la temperatura es contraria al caso anterior, esto es, aumenta la resistencia si aumenta la temperatura (al igual como los conductores). Por ello se denominan PTC (Positive Temperature Coefficient).

Para un rango pequeño de temperaturas (una variación máxima de 50°C), las resistencias NTC tienen una dependencia con la temperatura de la forma

$$R = A \exp(B/T) \quad (4.4)$$

o también
$$R = R_0 \exp[B(1/T - 1/T_0)] \quad (4.5)$$

donde R_0 es la resistencia a T_0 (temperatura Kelvin), que se toma por convenio 298 K (25° C). El valor de la constante B se suele determinar midiendo la resistencia de la NTC a dos temperaturas diferentes y despejándola de (4.5)

$$B = \frac{\ln \frac{R_1}{R_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

(4.6)

Como el valor de B es también dependiente de la temperatura, a veces se emplea una relación empírica para la resistencia de la NTC de la forma:

$$R = \exp [A + B 1/T + C 1/T^2 + D 1/T^3] \quad (4.7)$$

o de la forma
$$1/T = a + b \ln R + c(\ln R)^2 + d(\ln R)^3 \quad (4.8)$$

Para que la función $R(T)$ de las resistencias NTC sea más lineal, se conectan otras resistencias fijas a la NTC en serie y en paralelo, como indica la figura 1:

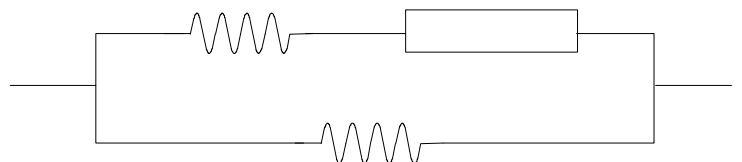


Figura 1

4.2.3 Uniones PN y transistores

En la curva característica de un diodo de unión PN se aprecia que la corriente que circula por el mismo es función de la temperatura. Este hecho se puede aprovechar para construir un sensor de temperatura. Si se conecta el diodo a través de una resistencia en serie con una fuente de tensión constante, al variar la temperatura variara la corriente que circula a través del circuito y por lo tanto también lo hará la ddp en la resistencia o en el propio diodo.

El elemento LM 335 responde a esta característica y posee una variación de tensión entre sus extremos de 10 mV/K en el rango de 0 a 100°C. El esquema de montaje es el de la figura 2.a

medida se realiza con un ordenador se puede aproximar esta tabla por una suma de potencias de la ddp para calcular la temperatura.

$$T = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 \quad (4.9)$$

donde los coeficientes a_i son conocidos.

Los termopares se construyen con un tamaño inferior al de las termoresistencias (como por ejemplo la de platino Pt-100) y a bajas temperaturas son incluso más exactas que éstas por lo que se emplean con más profusión. El rango de aplicación puede ser de -270°C hasta 3000°C . En cambio tienen el inconveniente de no ser tan lineales como las resistencias de platino en todo el amplio rango de aplicación.

Los termopares se clasifican según la naturaleza de los metales (puros o en aleación) que forman las uniones. Como ejemplo tenemos, entre otros:

- Termopar tipo J: unión de Hierro y Constantan. El rango es de 0°C a 760°C .
- Termopar tipo K: unión de Cromel y Alumel. El rango es de -184°C a 1260°C .
- Termopar tipo T: unión de Cobre y Constantan. El rango es de -184°C a 400°C

Para medir temperaturas con un termopar es necesario mantener una de las uniones a temperatura constante. Si se toma 0°C se puede emplear hielo fundente para mantener la temperatura constante. Pero como resulta realmente engorroso tener que disponer de un cubeta con hielo para la temperatura fría, se puede emplear otro recurso para eliminar dicha temperatura: dejar la unión fría a temperatura ambiente y colocar cerca de unión un sensor de temperatura que cree una tensión igual a la generada en dicha unión fría la cual restará a la generada en la unión caliente donde se mide la temperatura. En la práctica, basta con una sola unión entre dos metales (o aleaciones) diferentes para tener un termopar, y entonces la ddp entre estos dos metales es función de la temperatura.

4.3 Transductores luminosos

4.3.1 La luz: naturaleza ondulatoria. Intensidad luminosa.

la naturaleza electromagnética de la luz fue demostrada teóricamente por Maxwell quien encontró que los campos eléctrico y magnético cumplían una ecuación de ondas cuya velocidad de propagación coincidía numéricamente con la velocidad de la luz medida en varios experimentos.

Si se tiene una hilera de partículas y la primera de ellas empieza un movimiento armónico simple, las partículas siguientes realizan también este m.a.s. La propagación de un m.a.s. a lo largo de una hilera de partículas se denomina onda o movimiento ondulatorio. La ecuación de una onda es:

$$y = A \cos(\omega t - \omega x/v) = A \cos(\omega t - kx) \quad (4.10)$$

En una onda se cumplen las siguientes expresiones

$$\omega = 2\pi f; \quad k = 2\pi/\lambda; \quad \kappa = \omega/v; \quad v = \lambda/T = \lambda f \quad (4.11)$$

donde ω = pulsación de la onda; f = frecuencia; λ = longitud de onda; T = período; v = velocidad de propagación

Energía e intensidad de una onda: Una onda transporta energía puesto que es capaz de hacer vibrar sucesivamente a todas las partículas. Para una partícula que está realizando un m.a.s. la energía total (que es suma de energía cinética y potencial) es proporcional al cuadrado de la amplitud de vibración. La constante de proporcionalidad depende del tipo de onda $E = k A^2$. Puesto que la onda tiene una velocidad de propagación, se puede afirmar que la energía de la onda posee esa misma velocidad de propagación.

El ejemplo de una hilera de partículas, responde al de una onda unidimensional. Este tipo de ondas no tiene realidad física. Las ondas son realmente tridimensionales, pero se pueden suponer como suma de ondas unidimensionales. Existen diferentes tipos de ondas, siendo las más sencillas las ondas esféricas y las ondas planas. En las ondas esféricas el generador de ondas se encuentra en un punto del espacio y la onda generada por él se propaga en todas direcciones con lo que el conjunto de partículas que están en el mismo estado de vibración (o frente de ondas) forma una superficie esférica. Un ejemplo claro sería una vela en el centro de una habitación grande: todas las paredes se iluminan por igual. En las ondas planas el generador ocupa un volumen del espacio y la onda generada se propaga en una sola dirección con lo que el frente de ondas es un plano. Un ejemplo típico es el láser: el generador de láser puede ser un cristal de rubí o un tubo de gas y la onda sale por una ventana pequeña y se propaga en línea recta formando una especie de cilindro de luz. El ejemplo del láser nos servirá para definir otras magnitudes de la onda. Denominamos potencia de la onda a la energía total generada dividida por el tiempo total que ha estado el generador emitiendo energía, o en otras palabras, la energía emitida por el generador (y transportada por la onda) en un segundo: $P = E/t$. Esta potencia está distribuida por todo el cilindro de luz y se propaga a través de la sección del cilindro. Se define la intensidad de la onda como la potencia dividida por la superficie transversal del cilindro de propagación (la potencia propagada a través de la unidad de superficie).

$$I = \frac{P}{S} = \frac{E}{tS} \quad (4.12)$$

La intensidad de onda es la magnitud a la que son sensibles los sentidos humanos (bien el oído, para ondas acústicas o la retina para ondas luminosas).

Interacción de la luz con la materia: reflexión, refracción y absorción:

Cuando una onda plana luminosa incide sobre una superficie que separa dos medios diferentes, parte de la intensidad incidente se refleja y parte se refracta o transmite, cumpliéndose que la suma de las intensidades reflejada y refractada (o transmitida) es igual a la intensidad incidente. Si la onda luminosa incide sobre una lámina de caras plano-paralelas, también se produce el fenómeno de reflexión y transmisión a través de la lámina.

Cuando una onda plana electromagnética se propaga por un medio puede darse el caso de que la intensidad permanezca constante en cualquier sección transversal de él, en cuyo caso se dice que el medio es no absorbente, o ir disminuyendo con la distancia recorrida por la onda, en cuyo caso el medio es absorbente. El proceso de absorción de la intensidad de una onda por un medio depende de la frecuencia de la onda. Para frecuencias relativamente bajas (inferiores a 20 GHz) la onda electromagnética proporciona energía cinética a las moléculas y éstas rozan entre sí por lo que pierden

parte de la energía (que se convierte casi siempre en calor). Cuando la frecuencia es muy superior la onda electromagnética se comporta como un chorro de partículas llamadas fotones las cuales chocan con los electrones de los átomos y les proporcionan energía para subir de nivel energético dentro del propio átomo. En el momento del choque el fotón desaparece y su energía sirve para elevar de nivel al electrón. Bajo este punto de vista (teoría corpuscular de la luz) cada fotón posee una energía dada por la ecuación $E = hf$, donde h es la constante de Planck y tiene por valor $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Joule.seg.

4.3.2 Medida de intensidades luminosas: Ley de Lambert-Beer

La absorción de la luz por un medio material es un fenómeno que tiene aplicación en el campo de la Química. Se define la transmitancia como el cociente entre la intensidad transmitida y la intensidad incidente. También se define la absorbancia como el logaritmo decimal de la transmitancia cambiado de signo:

$$T = \frac{I_t}{I_i} \quad A = -\log_{10} T = \log_{10} \frac{I_i}{I_t} \quad (4.13)$$

La intensidad transmitida a través de un medio absorbente depende tanto de la naturaleza del medio como de la distancia recorrida por la luz en él. La ley de Lambert relaciona la intensidad de la luz en función de la distancia que recorre en el medio absorbente, y la ley de Beer relaciona la intensidad transmitida en función de la concentración de la disolución (para una distancia recorrida fija):

$$\text{Ley de Lambert:} \quad I = I_o e^{-k'x} \quad \text{Ley de Beer:} \quad I = I_o e^{-k''C} \quad (4.14)$$

Si tanto la distancia como la concentración son cualesquiera, se tiene la ley de Lambert-Beer

$$I = I_o e^{-kx} \quad (4.15)$$

4.3.3 Fototubos y fotomultiplicadores de vacío

Un fototubo de vacío es un transductor cuyo funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico descubierto por Albert Einstein. Cuando un fotón con suficiente energía llega a un metal, arranca un electrón de dicho metal. La construcción de un fototubo, o célula fotoeléctrica, es como sigue: en el interior de un tubo de vidrio donde existe el vacío se coloca un metal de forma semicilíndrica y enfrente se coloca un electrodo metálico. Se conecta una fuente de corriente continua al fototubo tal que el polo negativo se conecta al metal cilíndrico (cátodo) y el positivo se conecta a una resistencia en serie con el otro electrodo (ánodo). Cuando incide la luz sobre el metal cilíndrico, desprende electrones que son atraídos por el electrodo positivo. Así se genera una corriente por el circuito exterior al

fototubo y se crea una ddp entre los bornes de la resistencia que es proporcional a la intensidad de la luz incidente sobre la célula fotoeléctrica.

Cuando la intensidad de la luz incidente es muy pequeña y el fototubo genera una corriente demasiado pequeña, se emplea el fotomultiplicador. Este transductor es semejante al fototubo, pero los electrones que emergen del cátodo en vez de llegar directamente al ánodo, llegan a otro electrodo (denominado dínodo) sobre el que chocan, arrancando del mismo mayor número de electrones. Estos a su vez se dirigen hacia otro dínodo y le arrancan mas electrones aún. El proceso se repite en los nueve dínodos de que consta el fotomultiplicador hasta que todos los electrones llegan al ánodo y generan la corriente en el circuito exterior y crean ddp en la resistencia exterior conectada al fotomultiplicador.

4.3.4 Fotoresistencias: Son semiconductores cuya resistencia varia en función de la intensidad de la radiación electromagnética que incide sobre ellas. Si incide una radiación visible dicha intensidad se denomina iluminación. La dependencia de la resistencia con la iluminación es.

$$R = A E^{\alpha}$$

donde E es la iluminación (Intensidad de radiación). A y α son constantes que dependen de la naturaleza del semiconductor. Al aumentar la iluminación disminuye la resistencia, por lo tanto se comporta como una NTC. La precisión de las fotoresistencias es pobre debido a factores diversos que no entraremos a detallar. Por ello la aplicación de las fotoresistencias se reduce a funciones sencillas como: el apagado o encendido de farolas en función de la hora del día, la detección de incendios, e incluso en las cámaras fotográficas donde se controla la iluminación del objeto a fotografiar.

4.3.5 Fotodiodos y fototransistores.

En un diodo de unión PN existe una diferencia de potencial, o potencial de barrera, debido al paso de electrones de la zona N que van a llenar los huecos de la zona P. Dicha barrera de potencial no puede ser medida pues es alterada por los contactos metálicos que hay que emplear para medirla (las puntas del polímetro, por ejemplo). Cuando una unión PN se iluminan con radiación electromagnética (visible o invisible) la barrera de potencial de la unión se altera. La explicación teórica de dicha variación sale fuera de nuestro interés, pero el hecho que nos interesa es que dicha variación sí se puede medir con un voltímetro. Entonces se comprueba que la lectura del voltímetro es función de la intensidad de la radiación incidente en la unión PN. Este dispositivo se denomina fotodiodo. Para aumentar este fenómeno el fotodiodo se construye con tres zonas semiconductoras: una dopada P, otra dopada N y al medio de las dos se deja el semiconductor intrínseco. Por ello al fotodiodo también se le denomina diodo PIN. Cuando un fotodiodo se conecta a una resistencia exterior, por ésta circula una corriente que se demuestra que es proporcional a la intensidad luminosa, de modo que la luz produce una corriente que circula en sentido inverso del que indica el símbolo del propio diodo.

Un fototransistor es un dispositivo análogo en el funcionamiento al fotodiodo pues también posee una unión PN que se debe iluminar con radiación electromagnética. dicha unión PN es la formada por la Base y el Emisor. Al iluminar dicha unión, circula corriente por el diodo BE. Así pues la radiación electromagnética es la encargada de suministrar corriente a la base del transistor. Entonces, si el colector está unido a una fuente de tensión a través de una resistencia, circulará corriente por el transistor en el sentido colector-emisor. Un fototransistor se comporta como un transistor NPN en el cual la base no se conecta a ningún sitio puesto que la corriente de base está generada por la intensidad luminosa incidente en el mismo.

4.4 Transductores electroquímicos

4.4.1 Electroodos

Se denomina electrodo o semipila al sistema formado por un elemento químico o algún compuesto de este elemento y agua pura o alguna disolución acuosa de otro compuesto del mismo elemento químico, de modo que espontáneamente el elemento químico sufre una oxidación o una reducción. Ejemplos típicos de electrolitos pueden ser:

- Una barra de Zn sumergida en agua pura o en disolución de SO_4Zn . En este electrodo, el Zn metálico se oxida y se disuelve en el agua. Los electrones que pierde el Zn se quedan en el conductor.
 - Una barra de cobre sumergida en disolución de SO_4Cu . En este electrodo los iones Cu de la disolución se reducen y se incorporan al Cu metálico. Los electrones que necesita el ión Cu los toma del Cu metálico.
 - Cloro gaseoso que se hace burbujear en una disolución de cloruro. En este electrodo los iones cloruro se oxidan y pasan a forma gaseosa. Los electrones que desprende el ión cloro se pueden recoger en una barra sólida de un metal noble para que no intervenga en la reacción de oxidación.
- En todos los tipos de electrodos, la reacción redox empieza en el instante en ponerse en contacto los dos componentes los cuales van cargándose hasta llegar un momento en que la propia carga impide nuevas reacciones redox, esto es, se llega a un equilibrio en el que si se produce una nueva reacción redox, también se produce la contraria. Por ejemplo, en el electrodo de Zn al principio los átomos de la barra metálica pasan al agua, dejando los electrones en la propia barra. Así el agua se carga positivamente con los iones Zn y la barra se carga negativamente con los electrones perdidos por los átomos que se han ionizado y han pasado al agua. Al final se establece el equilibrio entre átomos que se ionizan y pasan al agua y iones que absorben electrones de la barra y pasan a átomos neutros. En este equilibrio existirá una d.d.p entre la barra metálica de Zn y el agua donde se han disuelto iones de Zn. Esta ddp se denomina potencial del electrodo. Un potencial de electrodo no se puede medir, pues para ello habría que colocar un contacto eléctrico en cada uno de los componentes del electrodo, con lo cual se introducirían nuevos electrodos, los formados por los cables del voltímetro y la disolución, y se estaría midiendo la suma de las ddp de todos los electrodos. En cambio si unimos adecuadamente dos electrodos, sí se puede medir la ddp total en los dos electrodos. Como ejemplo explicaremos la forma de unir un electrodo de Zn y uno de Cu:

En el electrodo de Zn hemos dicho que la barra de Zn metálico se carga negativamente y la disolución positivamente. En el electrodo de Cu, la barra de Cu metálico se carga positivamente, porque se le adhieren iones Cu de la disolución, y por lo tanto ésta última se cargará negativamente (debido a los iones de SO_4^{2-}). En cada uno de los electrodos se establece una ddp, o lo que es lo mismo, una fuerza de atracción entre la barra metálica y la disolución (la fuerza de Coulomb entre cargas eléctricas). Si conectamos un voltímetro entre las dos barras metálicas, teóricamente se podría medir la ddp entre los dos electrodos, pero en la práctica no ocurre así porque el voltímetro necesita que circule alguna corriente eléctrica por él (aunque sea pequeñísima) y no puede circular corriente por un circuito que está abierto, puesto que las dos disoluciones están separadas entre sí y no están conectadas eléctricamente. Esta conexión hay que hacerla sin mezclar las disoluciones puesto que entonces los electrodos no serían los originales. Para ello se usa o bien un tabique poroso para que los iones puedan pasar de una disolución a otra o lo que se denomina un puente salino, consistente en una disolución de otra sal contenida en un tubo en forma de U taponado en sus dos extremos con algodón y sumergidos, cada uno de los extremos, en cada disolución que forman los diferentes electrodos. (En realidad tanto el tabique poroso como el puente salino lo que hace es impedir que la mezcla de las dos disoluciones se realice rápidamente para que cada electrodo conserve su identidad o constitución típica). El conjunto formado por los dos electrodos antes descrito constituye una pila o generador de corriente continua de naturaleza química, y la fem de este generador es la suma de las ddp en cada electrodo.

En Química es costumbre definir el potencial de reducción o potencial de electrodo como la diferencia de potencial entre la forma reducida y la forma oxidada del par que forma el electrodo. Para el caso del Zn, el potencial de electrodo será la ddp entre la barra (donde están los átomos neutros) y la disolución (donde están los átomos oxidados), lo mismo que para el caso del Cu. Entonces la fem de la pila formada uniendo los dos electrodos será la diferencia de los potenciales de los dos electrodos: el potencial del electrodo donde tiene lugar la reducción menos el potencial del electrodo donde ocurre la oxidación.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{red}} - \varepsilon_{\text{ox}}$$

La fem de una pila depende de las concentraciones de las disoluciones de los electrodos. Esta dependencia es la que se aprovecha para construir una pila que sea sensible a la concentración de iones H de una disolución desconocida, esto es, que sea sensible al pH de la disolución.

Un electrodo de pH es en realidad una pila conteniendo dos electrodos. El electrodo sensible a los iones H está formado por una burbuja de vidrio especial que deja pasar sólo dichos iones. En el interior de la burbuja se coloca una disolución de ClH 0.1 M y un hilo de platino, y en el exterior de la burbuja deberá estar la disolución cuyo pH se desea medir. Si la concentración de esta disolución es mayor que la interior, penetrarán iones H⁺ y la disolución de ClH se cargará positivamente (y la exterior negativamente). Si la concentración de la disolución exterior es menor, saldrán iones H⁺ y las dos disoluciones se cargarán al revés que antes. El segundo electrodo está formado por un hilo de Ag sumergido en una disolución de ClAg . Este electrodo posee un potencial de electrodo constante en el tiempo y con la temperatura, por lo que la fem de este electrodo de pH dependerá sólo de la concentración de iones H de la disolución exterior donde se sumerge.

La fem del electrodo de pH depende del pH y de la temperatura como indica la siguiente gráfica:

