

Capítulo 1

Importancia del pH en las industrias y módulo de laboratorio

1.1 Introducción

En la mayoría de los procesos industriales es muy importante el control de los niveles de pH que presenten los productos que son elaborados o las soluciones que serán utilizadas para alguna parte del proceso.

Su medición se emplea normalmente como indicador de calidad, es por ello que su regulación es muy importante. Encontramos su uso frecuente en plantas que realizan tratamiento de aguas residuales (neutralización) antes de retirarla de la planta, en industrias alimentarias para las bebidas gaseosas, cervezas, yogurt, embutidos, alimentos, salsas, mermeladas, en la industria farmacéutica, para jarabes y medicamentos, en la industria cosmética, para controlar el nivel de pH de los productos que tendrán contacto con la piel, entre otros.

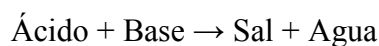
En la actualidad hay muchas industrias que realizan un control manual de pH, que resta eficiencia y productividad a la planta. Hay que tener en cuenta que un valor distinto de la consigna puede causar acidez de la solución o activación de bacterias (para el caso de la industria cervecera) y por ello es necesario que se trabaje con rechazo a disturbios, y así evitar variaciones en las consignas buscadas en el proceso.

1.2 Concepto de ácidos y bases

Según el químico sueco Svante Arrhenius los ácidos son sustancias capaces de ionizarse en agua para formar iones¹ hidrógeno (H^+) y las bases o sustancias alcalinas son sustancias capaces de ionizarse en agua para ceder iones hidroxilo (OH^-).

Sin embargo, otra teoría más satisfactoria fue la formulada en 1923 por el químico danés Johannes Brønsted y paralelamente por el químico británico Thomas Lowry, que indica que los ácidos son sustancias capaces de ceder protones² (iones hidrógeno) y las bases como sustancias capaces de aceptar dichos protones, por lo tanto no es necesaria la presencia de un medio acuoso. Según esta teoría, una reacción ácido-base es la transferencia de un protón de un ácido hacia una base.

Una reacción acuosa que se produce entre un ácido y una base forma generalmente sal y agua, así:



1.2.1 Clasificación de ácidos y bases

Según el grado de ionización en solución acuosa, los ácidos y bases se clasifican como fuertes y débiles.

Teóricamente, los ácidos fuertes son los que se ionizan completamente en el agua, su concentración es igual a la concentración de iones hidrógeno a temperatura y presión constantes. En su mayoría son inorgánicos, tales como: ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido perclórico.

Las bases fuertes se disocian completamente en agua. Entre ellas se encuentran: hidróxido de sodio, hidróxido de potasio e hidróxido de calcio.

Los ácidos débiles se ionizan levemente. Las disoluciones acuosas de éstos ácidos contienen moléculas de ácido no ionizadas. Entre éstos se encuentran el ácido fluorhídrico, el ácido acético, el ácido carbónico.

Las bases débiles también se disocian levemente y entre ellas encontramos hidróxido de amonio, hidracina.

1.2.2 Propiedades de los ácidos y bases

Las propiedades de la mayoría de los ácidos protónicos son:

- Presentan sabor ácido.

¹ Ión: Partícula cargada por haber recibido o donado electrones.

² Protón: Partícula subatómica con carga eléctrica elemental positiva.

- Hacen cambiar el color de muchos indicadores (tintes de color fuerte).
- Reaccionan con óxidos metálicos e hidróxidos metálicos para formar sales y agua.
- Reaccionan con sales de ácidos más débiles para formar ácidos más débiles.
- Las soluciones acuosas de ácidos protónicos conducen corriente eléctrica porque están ionizadas.

Las propiedades de la mayoría de las soluciones acuosas básicas son:

- Presentan sabor amargo.
- Produce sensación resbalosa, por ejemplo los jabones.
- Hacen cambiar el olor de muchos indicadores.
- Reaccionan con ácidos protónicos para formar sales y agua.
- Sus soluciones acuosas conducen la corriente eléctrica porque están ionizadas o disociadas.

1.3 Concepto de pH

El potencial Hidrógeno (pH) es una forma convencional y muy conveniente de expresar según una escala numérica adimensional, el grado de acidez o basicidad de soluciones acuosas diluidas. Es en realidad una medida de la actividad de los iones hidrógeno en una solución electrolítica³.

Aplicando una definición matemática se expresan los términos con una letra 'p' minúscula que antepone al símbolo como 'logaritmo negativo del símbolo'. De esta manera el pH es el negativo del logaritmo de la concentración molar de iones hidrógeno. Hay que tener en cuenta que se trabaja con pH en lugar de pH_3O debido a que el ión H_3O es representado por H^+ . De esta manera:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}_3\text{O}] = -\log[\text{H}^+]$$

La facilidad de trabajar con esta definición radica en que se genera una escala más fácil de visualizar, de lo contrario se trabajarían con números muy pequeños. Por ejemplo, si se dispone de una concentración de 0.0000001 moles/L de H^+ , es mucho más cómodo trabajar con el logaritmo negativo que vale 7, que con 0.0000001.

La medida de pH es muy útil para medir la acidez o basicidad de una sustancia, el rango de pH se encuentra entre 0 y 14. Siendo la zona ácida la que tiene valores de pH menores a 7 ($[\text{H}^+] > [\text{OH}^-]$) y la zona básica la que tiene valores de pH mayores a 7 ($[\text{H}^+] < [\text{OH}^-]$). Si el valor de pH es 7, la solución será neutra, lo que significa que la concentración de ácido es igual a la de base ($[\text{H}^+] = [\text{OH}^-]$).

La relación de concentraciones de H^+ y OH^- se pueden observar en la tabla 1.1

³ Electrolítica: Solución que al disolverse en agua forma disoluciones conductoras de electricidad.

Tabla 1.1 Relaciones entre pH, pOH, $[H^+]$ y $[OH^-]$:

$[H^+]$	pH	pOH	$[OH^-]$
10^{-14}	14	0	1
10^{-13}	13	1	10^{-1}
10^{-12}	12	2	10^{-2}
10^{-11}	11	3	10^{-3}
10^{-10}	10	4	10^{-4}
10^{-9}	9	5	10^{-5}
10^{-8}	8	6	10^{-6}
10^{-7}	7	7	10^{-7}
10^{-6}	6	8	10^{-8}
10^{-5}	5	9	10^{-9}
10^{-4}	4	10	10^{-10}
10^{-3}	3	11	10^{-11}
10^{-2}	2	12	10^{-12}
10^{-1}	1	13	10^{-13}
1	0	14	10^{-14}

1.3.1 Métodos de medición del pH

El pH de una solución puede medirse de distintas maneras y usando distintos instrumentos. Entre ellos encontramos:

- *Papel indicador*: También conocido como papel tornasol, es el método más barato e inexacto respecto a los demás. El papel está impregnado con indicador universal que al ser introducido en la solución a analizar, toma un color diferente que luego debe compararse con un diagrama de colores para obtener el valor aproximado de pH de la solución. El más conocido es el papel tornasol o papel de litmus.
- *Uso de sustancias químicas*: Estas sustancias adquieren un color distinto a cada valor diferente de pH. Es por ello que estas sustancias se agregan a las soluciones de pH desconocido para luego compararlas con soluciones estándar de pH conocido que también han sido afectadas por este indicador químico. Se usan frecuentemente el naranja de metilo y la fenolftaleína.
- *pH-metro*: Es un sensor que realiza internamente una medida de la diferencia de potencial entre dos electrodos, uno de referencia (generalmente 7) y otro de medida (externo). Por lo tanto, se tiene un preciso valor de diferencia de potencial y con un amplificador se puede obtener la medida exacta del valor de pH de una solución.

1.3.2 Valoraciones ácido-base y cambios en el pH

Las valoraciones son importantes para los estudios cuantitativos de las reacciones ácido-base y se realiza agregando gradualmente una disolución patrón (conocida) sobre una de concentración desconocida hasta completar la reacción química. En este proceso

se va graficando la variación del nivel de pH a medida en que se va a agregando más disolución patrón. Esta curva resultante se conoce como curva de valoración y se presenta un ejemplo en la figura 1.1 para el caso de valoración ácido y base fuertes.

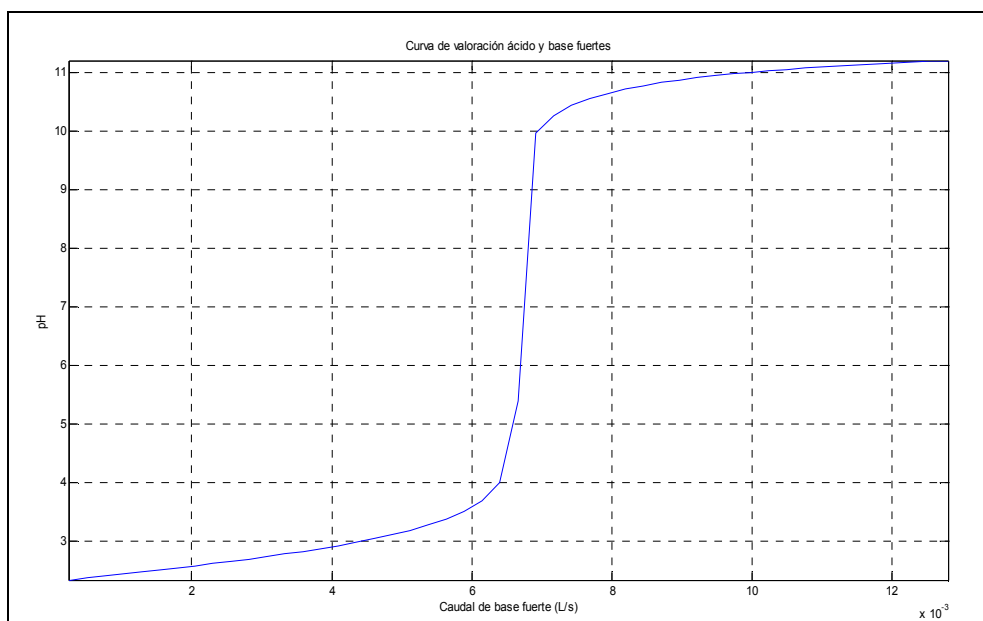


Figura 1.1 Curva de valoración ácido y base fuertes.

Las curvas de valoración difieren en los casos que se traten reacciones de: ácido fuerte-base fuerte, ácido fuerte-base débil, ácido débil-base fuerte y ácido débil y base débil. Debido a que los productos obtenidos son sales y aguas, trataremos un poco estos tipos de sales.

1.3.2.1 Sales de bases fuertes solubles y ácidos fuertes

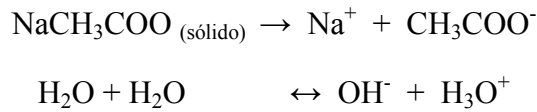
Las sales que se obtienen al reaccionar bases y ácidos fuertes producen soluciones neutras al agregarse la misma cantidad de ácido y de base, esto significa que al alcanzar el equilibrio químico, el pH resultante tiene el valor de 7.

Considerando una solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) que contiene los iones: Na^+ , Cl^- , H_3O^+ y OH^- . El catión Na^+ de la sal es un ácido débil que no reacciona con el anión OH^- , y el anión Cl^- de la sal no reacciona con el catión H_3O^+ . Es por ello que las sales resultantes son neutras porque ningún ión reacciona para alterar el equilibrio.

1.3.2.2 Sales de bases fuertes y ácidos débiles

Cuando se realiza esta reacción las sales que se obtienen son siempre básicas, debido a que los aniones de los ácidos débiles reaccionan con el agua para formar iones hidroxilo.

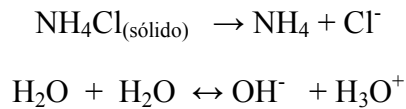
Considerando una solución de acetato de sodio (NaCH_3COO), que es producto de la base NaOH y el ácido CH_3COOH , tenemos:



El catión Na^+ es un ácido débil y no reacciona con el anión OH^- . Sin embargo se sigue formando CH_3COOH con lo que se obtiene un exceso de OH^- , por ello, la solución se hace básica.

1.3.2.3 Sales de bases débiles y ácidos fuertes

Este tipo de soluciones adquieren un carácter ácido. Considerando una solución de cloruro de amonio NH_4Cl , que es producto del HCl y del NH_3 , tenemos:



Por los iones que quedan de la reacción se puede observar que el ión amoniacal reaccionará con los OH^- , formando NH_3 y por tanto un exceso de H_3O^+ , por ello, la solución obtenida será predominantemente ácida.

1.3.2.4 Sales de bases débiles y ácidos débiles

En este tipo de sales pueden darse los casos en que la sal resultante sea predominantemente ácida, básica o neutra dependiendo de las fuerzas relativas del ácido molecular y base molecular de las que deriva la sal.

1.4 Importancia del pH en aplicaciones industriales

La inspección y regulación del pH es de vital importancia en muchas de las aplicaciones industriales por su empleo constante en los subprocesos. Las aplicaciones se encuentran en muchos campos tales como: tratamiento de la pureza del agua en las entradas a las calderas, regulación de la velocidad de reacciones químicas, tratamiento y neutralización de aguas residuales para su posterior utilización, regulación de acidez y control de activación de bacterias en la cerveza, regulación del pH en la fermentación del etanol, sulfitación⁴ en el jugo de caña, entre otros.

⁴ Sulfitación: Procedimiento para eliminar el color al azúcar, normalmente con dióxido de azufre .

1.4.1 Neutralización de aguas residuales

Como aguas residuales se les conoce a los residuos líquidos provenientes de las distintas áreas y procesos de cada industria. Si esta agua fuera directamente arrojada al medio ambiente, se produciría una contaminación ambiental masiva, ya que esta agua normalmente es portadora de productos químicos muy dañinos para la persona y plantas.

Por ello nace la necesidad de procesar esta agua en una planta de tratamiento de aguas residuales o efluentes, en las que se aplican tratamientos físicos, biológicos y químicos, para arrojarla sin los residuos dañinos.

La etapa física tiene por objetivo el asentamiento de sólidos pesados, reducción de aceites, grasas y arenas. La etapa biológica, tiene por objetivo degradar las bacterias y otros contenidos biológicos de las aguas residuales. En la última etapa se aplica un proceso de desinfección cuyo objetivo es llevar el agua a los estándares aprobados por cada legislación antes de su descarga. Es para esta etapa que se emplea la medida y regulación de pH, siendo muy importante para cumplir dichos estándares.

Industria minera: Los procesos mineros son muy contaminantes debido a la continua adición de metales pesados, que hacen del agua, un producto inutilizable para el riego o evacuación sin previo aviso. El tratamiento de las aguas residuales, porque los procesos son muy contaminantes, ya que adicionan en esta agua metales pesados que los hacen inutilizables para el riego o evacuación sin un previo tratamiento. Para regular la salida se trabaja con todas las fases antes expuestas y la neutralización con ácidos y bases para que puedan ser desechados a los ríos.

Industria alimentaria: En este tipo de industrias no se añaden normalmente tantos metales pesados, pero hay mucho uso de sustancias químicas que son evacuadas en las aguas residuales y por ello también es muy importante contar con una planta de tratamientos de efluentes para la posterior descarga.

La planta Calixto Romero localizada en Piura cuenta con una planta de tratamiento de efluentes en la que se busca neutralizar el agua ($\text{pH}=7$) y separarla del lodo para su posterior uso en tierras de cultivo. El control se realiza añadiendo, mediante bombas, soluciones de control NaOH y H_2SO_4 según el producto sea ácido o básico respectivamente. Se trabaja con estructura de control *ON-OFF* y monitores de temperatura, nivel en los tanques, y sistema de fallas en los equipos.

1.4.2 Control de pH en los productos en la industria alimentaria

Dentro de la industria de los alimentos es muy importante evitar la contaminación y garantizar que el producto final se encuentre exento de microorganismos dañinos para el consumidor y con las condiciones de calidad requeridas por este. Los niveles de pH son muy importantes en la elaboración de los productos alimenticios, ya que sirve como indicador de condiciones higiénicas en el proceso de transformación del producto. Por ello, en ocasiones se elige que un producto tenga un valor bajo de pH lo que permite aumentar su tiempo de conservación.

Para eliminar los agentes patógenos indeseados, se utilizan bactericidas, que tardan en eliminar los microorganismos. La concentración iónica del hidrógeno afecta a esos microorganismos y también a la acción de los bactericidas, por lo tanto el índice de pH influye directamente en el control aplicado para evitar la activación de microorganismos y bacterias.

Industria lechera: El pH es un indicador de la conservación higiénica de la leche en todo el proceso, desde la recolección hasta la entrega. El valor adecuado de pH debe ser 6.8, si fuese menor indica una posible infección del ganado, que aumentaría su gravedad si continua disminuyendo. Durante la conservación, el pH es determinante para predecir si hay contaminación ocasionada por el amoníaco, usado para conservar el frío en la refrigeración.

Para usar la leche en quesos, el valor de pH debe encontrarse entre 6.1 y 6.5. Y para la elaboración de los quesos y para su maduración es importante que el pH esté entre los valores de 4.1 a 5.3 para que disminuya la velocidad de crecimiento de los agentes patógenos.

Dentro de las condiciones para preparar yogurt, la refrigeración debe iniciarse con la condición de que el pH alcance valores entre 4.4 y 4.6. Cuando se agrega fruta al yogurt, ésta debe ser del mismo nivel de pH, así se evitan reacciones indeseadas. El valor de pH que debe tener este producto debe encontrarse entre 4 y 4.4 para una mejor conservación.

Industria cervecera: El control de nivel de pH en la producción de la cerveza es muy importante para poder evitar la activación de agentes patógenos y para obtener el sabor característico de cada cerveza.

En la empresa Backus en Motupe, departamento de Lambayeque, se hace un seguimiento y control del nivel de pH, teniendo en cuenta de que su valor necesariamente debe encontrarse entre 4.2 y 4.5. Es importante respetar este intervalo para satisfacer las condiciones y estándares de calidad que se han impuesto, debido a que un valor de pH menor a 4.2 produce acidez, y un valor mayor a 4.5 provoca una activación de agentes patógenos. En la planta de Backus en Trujillo, se recibe el producto transportado para su posterior envasado, en esta planta ya no se controla el pH pero si se mide para verificar que después del transporte siga cumpliendo los estándares establecidos. En caso de no cumplir, el producto se desecha, es por ello que el control en la planta de Motupe es muy estricto.

Industria de las bebidas gasificadas: Las bebidas gasificadas contienen conservantes, acidulantes, edulcorantes, y agua potable un mínimo de 6g/L de anhídrido carbónico. Por lo general presentan un valor de pH bajo, alrededor de 3 y 4. Las bebidas gaseosas por tanto constituyen un medio desfavorable para el desarrollo de microorganismos. El agua empleada para su fabricación no puede salirse de los límites de pH entre 6.5 y 9.5 para conservar adecuadamente sus propiedades.

En la empresa Amveb Peru ubicada en Sullana se regula en valor de pH con la inyección de CO₂, aumentando el flujo de CO₂ para disminuir el pH y viceversa. Se controla usando un PID programado manualmente y válvulas neumáticas activadas con señales 4-20 mA, para controlar el flujo de CO₂.

Industria azucarera: La importancia del control de pH en la industria azucarera en evitar la generación de microorganismos dañinos para los productos. En el caso de la producción de azúcar, la dextranasa es un compuesto indeseable sintetizado por microorganismos contaminantes, debido a que produce pérdidas muy significativas cuando incrementa su viscosidad. Es por ello que el seguimiento del nivel de pH se realiza durante todo el proceso de fabricación.

En el ingenio azucarero Pichichí ubicado en Colombia se trabaja con caña de azúcar como materia prima, que después de pasar por molienda da como producto el bagazo y el jugo de caña. El bagazo se usa para las calderas y el jugo de caña pasa al proceso de sulfitación, que consiste en eliminar el color al azúcar, utilizando para ello dióxido de azufre. La siguiente etapa es la clarificación, cuyo objetivo es eliminar la mayor cantidad de impurezas que posee el jugo. Esta es una etapa muy importante ya que determina en su mayoría la calidad del producto final.

Dentro del proceso de clarificación, existen otros subprocesos como el de alcalinización, que consiste en agregar cal al jugo de caña para que la sacarosa no se convierta en miel, controlando el nivel de pH hasta un valor de 7; luego está el subproceso de calentamiento hasta una temperatura oscilante entre 98 - 103°C y finalmente pasa el producto por el clarificador que permiten separar el jugo clarificado de los sólidos decantados.

El proceso continúa con la filtración, que tiene por objetivo, separar los últimos residuos sólidos, luego pasa a los evaporadores para eliminar el agua residual y luego se pasa a la etapa de cristalización, de la que sigue solamente la etapa de centrifugación para separar los cristales de la miel que los rodea y la etapa de secado y envasado.

1.4.3 Control de pH en la Industria del etanol.

El etanol es obtenido a partir de la destilación de los jugos de caña de azúcar y su uso es pretendido como combustible para reemplazar los productos derivados del petróleo.

Las materias primas que se utilizan para su obtención pueden presentar alto contenido de sacarosa (caña de azúcar, betarraga, melazas), alto contenido de almidón (maíz, papa, yuca), o alto contenido de celulosa (madera, residuos agrícolas).

El proceso a partir del almidón es más complicado que a partir de la sacarosa, y a partir de la celulosa es inclusive más complicado porque debe primero convertirse en azúcares.

El proceso de fermentación de los azúcares es realizado utilizando microorganismos que pueden ser levaduras o bacterias, así se produce etanol y grandes cantidades de CO₂, además de productos no deseados como metanol, ácidos y aldehídos.

En la planta Caña Brava en el departamento de Piura se trabaja con caña de azúcar como materia prima, en este proceso la primera etapa es la obtención del jugo de caña, que después de un proceso de evaporación para eliminar el agua en exceso se mezcla con levadura para pasar a la etapa de fermentación, en la que es muy importante el control de pH para evitar la infección del producto. El proceso de fermentación tiene una duración aproximada de 8 horas, y a la salida el etanol mezclado con la levadura ingresa a una centrífuga separadora, para obtener etanol con algunas impurezas. Luego se pasa una columna de destilación para poder separar el etanol de los elementos residuales como alcohol secundario, metanol, ácidos y aldehídos. La última etapa es la separación en tamices moleculares, que funciona como un colador encargado de separar el etanol del agua residual, con el criterio de que las moléculas de etano son más pequeñas que las de agua y pueden atravesar el filtro.

1.4.4 Riego tecnificado y fertilizantes

Es muy utilizado el término fertirrigación cuando se trata el tema de uso de fertilizantes con agua de riego, de esta manera se logra que los cultivos dispongan de distintos nutrientes en el momento que sea necesario.

El control de los niveles de pH en esta aplicación tiene por objetivo prevenir reacciones químicas de fertilizantes en las líneas de riego, ya que si existe un pH muy básico existe la posibilidad de formar precipitados y por tanto obstrucción de líneas. Los valores de pH ligeramente ácidos permiten asimilar los diferentes nutrientes. Inclusive el proceso fisiológico de absorción de nutrientes de las raíces es afectado por el nivel de pH, ya que fuera de los rangos adecuados la absorción es afectada y si la desviación es muy elevada se pueden elevar los niveles de toxicidad por absorción de elementos fitotóxicos.

1.4.5 Tratamiento de aguas para entrada a calderas

Las calderas son un caso especial de los intercambiadores de calor, diseñadas para generar vapor saturado a partir de agua que ingresa a la misma. El agua es llevada a su punto de saturación con ayuda del calor generado al quemar combustibles pesados, bagazo, cáscara de semillas de algodón, entre otros. El vapor generado es utilizado en muchos procesos en los que se necesita calor, por ello es muy útil en todas las plantas industriales.

Para el buen funcionamiento de las calderas es necesario que el agua de ingreso esté libre de impurezas, y que el valor de pH sea neutro, dado que si presentara algún tipo predominancia ácida o básica se produciría corrosión o incrustaciones (salinidad) respectivamente en el sistema agua-vapor que incluye el depósito de alimentación, caldera, y retorno de los condensadores.

1.5 Módulo de control de pH del laboratorio del Departamento de Electrónica y Automática de la Universidad de Piura

El módulo con el que se ha trabajado ha sido diseñado en la tesis “Diseño e implementación de un módulo de laboratorio para el control PID de pH”, en este módulo se pueden encontrar diversos elementos de accionamiento y control industrial. Entre sus componentes se encuentran bombas, pHmetro, agitador magnético, electrodos, reactivos entre otros.

El proceso consiste en un sistema de inyección continua de solución fuertemente ácida (HCl) que empleará como variable de control el flujo de base fuerte (NaOH), obteniendo como señal de salida el pH de la solución final. Cada solución se agrega al reactor por medio de una bomba independiente, que en el caso de la bomba para base puede ser regulada con niveles de corriente de 4-20 mA.

Para la adquisición de señales se emplea el hardware Compact FieldPoint y el software LabView, que permite programar gráficamente y también observar el proceso a manera de SCADA.

Se muestran a continuación los principales elementos constituyentes del módulo de laboratorio.

1.5.1 Reactivos

Como soluciones para la reacción se emplearon ácido clorhídrico e hidróxido de sodio, con las que se logró una reacción de ácido y base fuertes con generación de sal y agua como producto final.

- *Ácido clorhídrico (HCl)*. Es un ácido muy utilizado en la industria por ser relativamente barato y efectivo. Es muy corrosivo por sus vapores en concentraciones altas (mayores al 10%).

Este ácido es muy peligroso en altas concentraciones porque puede ser motivo de irritaciones y quemaduras, además de causar problemas respiratorios por exposición prolongada a estos vapores. Es recomendable que su almacenamiento se haga con botellas de vidrio.

- *Hidróxido de sodio (NaOH)*. Es una base fuerte, segura, barata y en estado sólido pero muy soluble. Es por ello que es fácil de manejar. Para poder emplearlo se disuelve previamente en agua destilada, de esta manera se obtiene una solución básica según los niveles de molaridad que se requieran.

Es recomendable que su almacenamiento se haga con envases plásticos en estado sólido, además, para tomar precauciones por sus niveles de concentración es necesario tener en cuenta que con el tiempo el NaOH absorbe CO₂ de la atmósfera y por tanto disminuye su nivel de pH.

1.5.2 Reactor

Es el depósito en el que se realiza la mezcla del ácido y la base y se da por tanto la reacción química. Con un dispositivo de mezclado se trata de homogeneizar la solución para una lectura de pH válida.

Debido a la estructura existente se puede asumir que: el reactor presenta volumen constante (1.8 L) porque la tubería de desagüe logra mantener siempre una misma altura de solución final, que las propiedades de los reactivos permanecerán constantes durante todo el periodo de trabajo - sobre todo por efectos ambientales como temperatura-, y que no hay pérdidas de calor por la reacción exotérmica. Se puede visualizar el reactor utilizado en el módulo de laboratorio en la figura 1.2



Figura 1.2 Reactor del módulo de pH.

1.5.3 Bomba de ácido

La bomba de ácido (Ver figura 1.3) será la que se mantendrá constante durante todo el tiempo de experimento. Consiste en una bomba proporcional dosificadora ON-OFF de marca Walchem, modelo EZB30D2VC.

Teóricamente arroja un flujo máximo de 0.21 L/min pero es regulable para arrojar un exceso que puede estar entre el 70 y 100% del caudal nominal, por lo que el flujo volumétrico de trabajo para esta tesis es de 0.4L/min. La regulación del caudal se realiza manualmente.

Por ello es muy importante la previa calibración de las bombas antes de ponerlas en uso. Esta calibración debe ser manual, es decir, medir el volumen que la bomba suministra en un intervalo de tiempo para la obtención del caudal. El flujo máximo se da en la mayor cantidad de pulsaciones por minuto (360), y considerando que la bomba es proporcional, el flujo requerido se obtendrá con una interpolación lineal.



Figura 1.3. Bomba proporcional de ácido

1.5.4 Bomba de base

Como bomba de solución básica se emplea una proporcional dosificadora de la marca Walchem, modelo EHE35E2-VC. Esta bomba puede funcionar como *ON-OFF*, con regulación manual según perilla y con excitación externa que es la empleada al usarse la misma como actuador dentro de la estructura de control.

Se puede apreciar dicha bomba en la figura 1.4



Figura 1.4 Bomba proporcional de base.

El flujo teórico máximo es de 0.52 L/min pero al igual que en la bomba de ácido, ésta puede proporcionar un flujo real que puede encontrarse entre el 70 y 100% adicional, por ello también debe regularse la entrada de corriente (4 - 20 mA) para arrojar el caudal básico deseado.

1.5.5 Agitador magnético

El agitador magnético es un elemento muy importante para este módulo, ya que con la ayuda de una cápsula imantada que gira dentro del reactor permite que la solución producto de la reacción sea uniforme y por tanto todo el producto tenga el mismo nivel de pH.

El agitador que se ha empleado en este módulo se muestra en la figura 1.5 y es de la marca VELP, modelo AGE; con una potencia de 40 W. La pastilla rotatoria, puede girar hasta una velocidad de 1200 rpm.



Figura 1.5 Reactor del módulo de laboratorio.

1.5.6 Electrodo

El electrodo es utilizado para sumergirse en la solución de la que se requiere medir el pH. En el módulo del laboratorio se cuenta con un electrodo de la marca Hanna Instruments, modelo 1210B/5, unido mediante un cable conector al monitor de pH. Se muestra el electrodo empleado en la figura 1.6.



Figura 1.6 Electrodo del pHmetro.

1.5.7 Monitor de pH

El conector del electrodo va unido con el monitor de pH cuya función es mostrar el valor del pH de la solución medida y además permite enviar señales de corriente (4-20mA) para registrarlas con ayuda de algún *software*. El monitor de laboratorio es de la marca Hanna Instruments, modelo HI8510 E420, y el rango de medición va de 0 a 14 y una resolución de 0.01. En la figura 1.7 se puede apreciar el monitor de laboratorio.



Figura 1.7 Monitor de pH.

1.5.8 Reservorios

Como reservorios para la extracción se emplean 2 baldes de 20 L que contienen ácido y base independientemente. Con cada una de las bombas antes mencionadas se procede a la succión e ingreso de solución al reactor. Un último reservorio es empleado para almacenar los productos de desecho, que es la salida de la reacción. Se pueden observar estos tanques de almacenamiento en la figura 1.8.



Figura 1.8 Reservorios de almacenamiento de ácido y base.

1.5.9 Instrumentación para el control

Para aplicar el control de pH empleando el módulo de laboratorio se empleó el *software* LabView y el *hardware* FieldPoint de la marca National Instruments, debido a que se trabaja con una estructura de control que se facilita empleando este *software*.

1.5.9.1 Software LabView

El empleo de este *software* ha sido de vital importancia para desarrollar el controlador predictivo que se aplicó al módulo. La programación que se realiza en este *software* es gráfica y amigable. Además permite procesar las señales obtenidas, filtrarlas, enviar señales al actuador, además de funcionar adicionalmente como un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA).

Más adelante se desarrollará el proceso de modelado del controlador y algunas funciones importantes de este módulo.

En la figura 1.9 se muestra una ventana de este software, en la que se está supervisando el desarrollo del control.



Figura 1.9 Ventana gráfica del LabView.

1.5.9.2 Compact FieldPoint

Este *hardware* permite adquirir y enviar señales analógicas que han sido procesadas por el *software* en forma digital y así poder enviar la señal requerida según la previa programación al actuador.

En el Compact FieldPoint del laboratorio se cuenta con varios canales de escritura y lectura, además de bloques especiales para leer señales de termocuplas, pudiéndose controlar varios procesos a la vez.

Se puede observar en la figura 1.10 este *hardware* de control

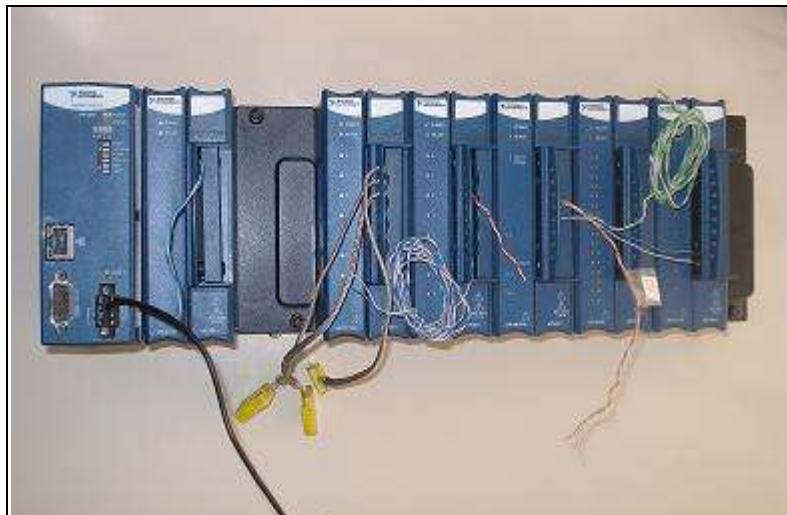


Figura 1.10 Módulo Compact FieldPoint.

Este dispositivo se empleó para obtener la señal de corriente enviada por el pHmetro y luego enviar la señal a la bomba para regular el caudal necesario para el control del sistema.

Es necesario también el uso de una computadora para interactuar con el usuario e ingresar los valores de referencia y parámetros de control.

En la figura 1.11 se muestra el módulo implementado durante un experimento de control (a) y la computadora para el registro de datos y accionamiento de las bombas de suministro de soluciones ácida y básica (b).



Figura 1.11a Módulo de pH implementado en funcionamiento.

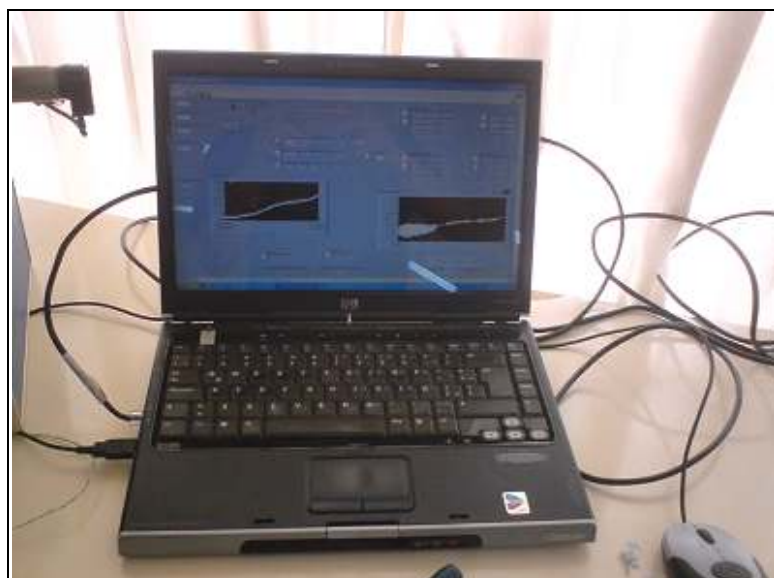


Figura 1.11b Supervisión del proceso en curso.