

DESARROLLO DE UN SISTEMA DIFUSO PARA INTERPRETACIÓN DE GASOMETRÍAS ARTERIALES

Jesús Caeiro Costoya
Román Casas Riveira
Jan Duinkerken Rodríguez
Diego García López
Jesús Mosteiro García

Índice

Índice de figuras	4
Índice de cuadros	4
1. Resumen	5
2. Introducción	6
3. Material y Métodos	11
3.1. Lógica difusa	11
3.2. Fuzzy Logic Toolbox	11
3.3. Clasificación	13
3.3.1. Variables de entrada	13
3.3.2. Variables de salida	14
3.3.3. Reglas	15
4. Resultados	19
5. Discusión	26
6. Conclusiones	28
Referencias	30

Índice de figuras

1.	Gasometría arterial	6
2.	Reacción ácido-base	7
3.	Tabla esquemática de los rangos normales	7
4.	Tabla esquemática [1]	9
5.	Coche viejo/ Coche nuevo	10
6.	Interfaz de Fuzzy logic toolbox	11
7.	Sistema de lógica difusa	12
8.	Representación de las reglas	12
9.	Gráfico de superficie	13
10.	Rangos del pH	13
11.	Rangos del HCO_3^-	14
12.	Rangos del PaCO_2	14
13.	Output	15
14.	Rangos del HCO_3^-	19

Índice de cuadros

1.	Estados por defecto si no hay ninguna anormalidad	17
2.	Situación respiratoria	17
3.	Situación metabólica	17
4.	Compensaciones totales	17
5.	Compensaciones parciales	18

1. Resumen

A lo largo de esta práctica estudiaremos la creación de un sistema difuso para el análisis y diagnóstico de gasometrías arteriales.

Buscaremos los valores normales y no normales de cada una de las entradas que puedan tener consecuencias en el diagnóstico de una gasometría arterial. A partir de estos valores crearemos una serie de conjuntos difusos, que posteriormente serán utilizados para, mediante reglas, producir unas salidas que apliquen también lógica difusa para crear diferentes valores de salida para cada una de las dos situaciones: la respiratoria y la metabólica. Estas salidas se utilizarán para determinar el diagnóstico de la gasometría.

Primeramente, realizaremos una introducción de los conceptos clave para el desarrollo de esta práctica: las gasometrías arteriales y los conjuntos difusos. Procederemos explicando brevemente la lógica difusa y la herramienta Fuzzy Logic Toolbox en Matlab, así como analizando las entradas, salidas y reglas que utilizará nuestro sistema.

Posteriormente veremos los resultados de la implementación, los cuales demostraron que nuestro sistema era bastante bueno para un desarrollo temprano, a pesar de poseer ciertos errores en los límites entre diagnósticos. Estos errores son tratados en la discusión, donde además ofrecemos diferentes soluciones para mejorar nuestro sistema, así como un pequeño repaso de los cambios realizados para llegar hasta aquí.

Finalizaremos con unas conclusiones generales del proyecto, donde veremos los puntos clave en la creación del sistema. También incluimos un apartado del trabajo a realizar a partir de ahora para utilizar nuestro sistema, y terminaremos hablando de los diversos beneficios que podría suponer tanto nuestro sistema como otros similares en el ámbito sanitario.

2. Introducción

La gasometría arterial se trata de una técnica de medición respiratoria invasiva que permite, en una muestra de sangre arterial, determinar el pH, las presiones arteriales de oxígeno y dióxido de carbono y la concentración de bicarbonato.



Figura 1: Gasometría arterial

Esta prueba tiene como objetivo realizar un análisis de dichos gases determinar la acidez (pH) de la sangre.

El pH es un valor utilizado con el objetivo de medir la alcalinidad (base) o acidez de una determinada sustancia, indicando el porcentaje de hidrógeno que encontramos en ella, midiendo la cantidad de iones ácidos (H^+). La escala del pH varía del 0 al 14, de forma que se considera 7 como un valor de pH neutro, menos de 7 se vuelve más ácido, arriba de 7 se vuelve más alcalino. El nivel idóneo del pH en la sangre debe oscilar entre 7.35 y 7.45

Según este valor de pH, la sangre se puede encontrar en tres estados:

- Normal: el pH se encuentra entre valores normales y no supone ningún problema.
- Acidosis: el pH se encuentra por debajo de los valores normales, por lo que la sangre contiene demasiado ácido (o muy poca base).
- Alcalosis: el pH se encuentra por encima de los valores normales, por lo que la sangre contiene demasiada base (o muy poco ácido).

De la misma manera, esta acidosis y alcalosis se puede deber a dos motivos:

- La acidosis metabólica y la alcalosis metabólica son el resultado de un desequilibrio en la producción y en la eliminación renal de los ácidos o de las bases.
- La acidosis respiratoria y la alcalosis respiratoria se deben a cambios en la exhalación del dióxido de carbono por trastornos pulmonares o respiratorios.

Cada alteración de tipo ácido-base provoca mecanismos de compensación automáticos que intentan devolver el pH de la sangre a la normalidad. En general, el sistema respiratorio compensa los trastornos metabólicos, mientras que los mecanismos metabólicos compensan las alteraciones respiratorias.

En un primer momento, los mecanismos compensatorios pueden restaurar un pH cercano a la normalidad. Por lo tanto, si el pH de la sangre ha cambiado significativamente, ello significa que la capacidad del cuerpo para compensar las alteraciones está fallando. En tales casos, los médicos deben buscar y tratar urgentemente la causa subyacente del trastorno ácido-base.

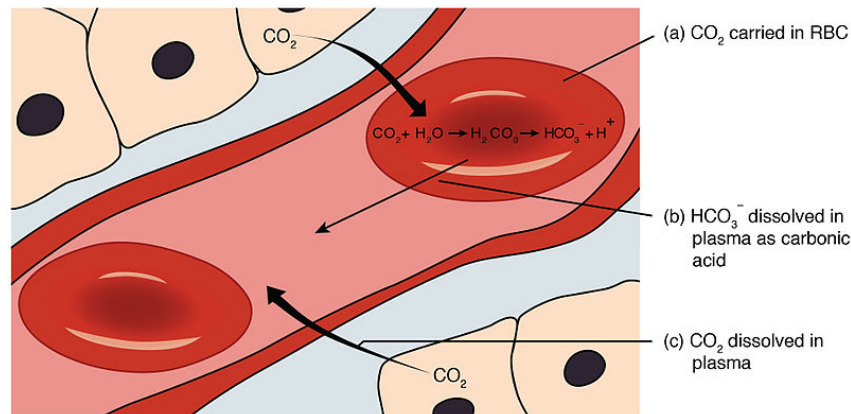


Figura 2: Reacción ácido-base

La prueba nos permite obtener valores que midan tanto el pH como los elementos utilizados como mecanismos de compensación. Estos valores han de estar entre unas franjas de normalidad, que son:

- pH de sangre arterial: 7.38 a 7.42
- Presión parcial de dióxido de carbono (PaCO_2): 38 a 42 mmHg (5.1 a 5.6 kPa)
- Presión parcial de oxígeno (PaO_2): 80 a 100 milímetros de mercurio (mmHg) o 11.2 a 13.5 kilopascal (kPa)
- Bicarbonato (HCO_3^-): 22 a 28 miliequivalentes por litro (mEq/L)
- Saturación de oxígeno (SaO_2): 95 % a 100 %

La GSA en el adulto: ¿cuáles son los valores normales?	
Componente de la GSA	Rango normal
pH	7,35-7,45
PaCO_2	35-45 mmHg
PaO_2	80-100 mmHg
HCO_3^-	22-26 mEq/l
SaO_2	95-100%

Figura 3: Tabla esquemática de los rangos normales

La interacción entre estos valores es la que, en última instancia, modifica el pH sanguíneo y nos permite definir en qué estado se encuentra:

- Una disminución del pH causado por una presión parcial de dióxido de carbono elevada nos indica que estamos ante una acidosis respiratoria. Las causas están relacionadas principalmente con la disminución de la frecuencia respiratoria o el mal funcionamiento de dicho mecanismo.
- Un aumento del pH causado por una presión parcial de dióxido de carbono baja nos indica que estamos ante una alcalosis respiratoria. Se debe, básicamente, a la eliminación excesiva de CO_2 . Por ejemplo, mediante la hiperventilación, ejercicio, fiebre...
- Una disminución del pH causado por una presión parcial de HCO_3^- baja nos indica que estamos ante una acidosis metabólica. Las causas pueden ir desde pérdidas gastrointestinales como una diarrea a insuficiencia renal o intoxicación.
- Un aumento del pH causado por una presión parcial de HCO_3^- alta nos indica que estamos ante una alcalosis metabólica. La disminución de dicho componente en sangre puede ser causada por deshidratación, vómitos, diuréticos...

A partir de estos cuatro conceptos, podemos elaborar una pequeña tabla que nos permita visualizar rápidamente la situación de los valores y el diagnóstico a partir de estos:

Además, estos dos mecanismos también pueden equilibrarse entre ellos, de manera que una alcalosis metabólica, por ejemplo, puede quedar compensada por una acidosis respiratoria. De esta manera, podemos deducir los siguientes diagnósticos:

- Alcalosis respiratoria.
- Alcalosis metabólica.
- Acidosis respiratoria.
- Acidosis metabólica.
- Alcalosis respiratoria compensada parcial o totalmente por acidosis metabólica.
- Alcalosis metabólica compensada parcial o totalmente por acidosis respiratoria.
- Acidosis respiratoria compensada parcial o totalmente por alcalosis metabólica.
- Acidosis metabólica compensada parcial o totalmente por alcalosis respiratoria.
- Acidosis respiratoria y metabólica mixta.
- Alcalosis respiratoria y metabólica mixta.

Tipos de desequilibrio acidobásico ^{6,7}				
		pH	PaCO ₂	HCO ₃ ⁻
Acidosis respiratoria	No compensada	<7,35	>45 mmHg	Normal
	Parcialmente compensada	<7,35	>45 mmHg	>26 mEq/l
	Completamente compensada	7,35 a 7,39	>45 mmHg	>26 mEq/l
Acidosis metabólica	No compensada	<7,35	Normal	<22 mEq/l
	Parcialmente compensada	<7,35	<35 mmHg	<22 mEq/l
	Completamente compensada	7,35 a 7,39	<35 mmHg	<22 mEq/l
Alcalosis respiratoria	No compensada	>7,45	<35 mmHg	Normal
	Parcialmente compensada	>7,45	<35 mmHg	<22 mEq/l
	Completamente compensada	7,41 a 7,45	<35 mmHg	<22 mEq/l
Alcalosis metabólica	No compensada	>7,45	Normal	>26 mEq/l
	Parcialmente compensada	>7,45	>45 mmHg	>26 mEq/l
	Completamente compensada	7,41 a 7,45	>45 mmHg	>26 mEq/l
Acidosis respiratoria y metabólica mixta		<7,35	>45 mmHg	<22 mEq/l
Alcalosis respiratoria y metabólica mixta		>7,45	<35 mmHg	Hg > 26 mEq/l

Figura 4: Tabla esquemática [1]

La relevancia de esta prueba radica en su facilidad en la interpretación y coste, lo que la convierte en una prueba que aporta mucha información para, por ejemplo, diagnósticos de urgencia. De la misma manera supone una de las pruebas más solicitadas de manera complementaria para el diagnóstico estándar de enfermedades respiratorias y padecimientos que afectan los pulmones. El examen también suministra información acerca del equilibrio ácido-básico del cuerpo, el cual puede revelar indicios importantes acerca del funcionamiento del pulmón y del riñón y del estado metabólico general del cuerpo.

Tras profundizar en el método e importancia de la gasometría arterial, podemos determinar que la automatización de esta prueba supondría un elemento interesante de cara al proceso de diagnóstico estándar, favoreciendo la eliminación de procesos rutinarios en el ámbito de la medicina, permitiendo a sus profesionales centrarse en los elementos más complejos y menos automatizables.

Por ello, a lo largo de esta práctica trataremos de diagnosticar de manera automática el resultado de gasometrías arteriales mediante el uso de conjuntos difusos en la aplicación Fuzzy Logic ToolBox en Matlab.

Los conjuntos difusos (o, en inglés, *fuzzy set*) son un tipo de conjunto que permite a los elementos pertenecer de forma parcial a él mediante la asignación de un número entre 0 y 1. Dicho número representa la confianza o certeza de la presencia de dicho elemento al conjunto difuso.

Históricamente, los conjuntos difusos han permitido la representación del conocimiento humano debido a su característica tan distintiva respecto al resto de mecanismos de representación del conocimiento: la modelación de la incertidumbre. Su capacidad para representar de manera simple y manejable las imprecisiones en la representación nos ofrece la posibilidad de mejorar los sistemas de decisiones e inteligencia artificial. Además de eso, también nos ofrece la posibilidad de categorizar dentro de un conjunto de elementos una característica. Veámoslo mediante un ejemplo, como tomar una decisión respecto al estado de un coche. Estudiemos primeramente una característica como la edad de dicho coche.

Si utilizásemos los conjuntos normales, deberíamos primeramente determinar qué coches están en buen estado a partir de una edad o, como mucho, dividirla en 3 conjuntos: nuevos, seminuevos y viejos.

Digamos que los coches nuevos van de 0 a 5 años, los seminuevos de 5 a 15 y los viejos e 15 en adelante.



Figura 5: Coche viejo/ Coche nuevo

Utilizando estos conjuntos, no estableceríamos ninguna diferencia entre un coche recién salido de fábrica y uno con 4 años. De la misma manera, un coche con 4 años y medio es nuevo, mientras que uno con 5 años y dos meses es seminuevo. Estos conjuntos son rígidos y nos ofrecen un sesgo demasiado grande conforme nos acercamos a sus límites.

Aplicando conjuntos difusos, podríamos indicar que los coches nuevos tienen un valor de 1 durante sus dos primeros años, que decae hasta 0 durante los 3 siguientes. De la misma manera, un coche empieza a ser seminuevo a partir de los 4 años, alcanzando su valor máximo a los 9-10 y descendiendo hacia los 15, donde se entrecruzaría con el conjunto difuso de los viejos.

Esto nos permite ver con claridad que un coche de 1 año es más nuevo que uno de 4, y que las diferencias entre un coche de 4 años y medio y uno de 5 son meramente anecdóticas. Esto, junto con el estudio de otras características aplicando el mismo sistema, nos ofrecería una visión mucho más real del coche que la que tendríamos si aplicásemos conjuntos rígidos.

El objetivo del uso de conjuntos difusos en esta práctica es, por lo tanto, evitar ser excesivamente rígidos con los valores ofrecidos en la gasometría. Si bien como indicábamos antes, un valor normal del pH está entre 7.35 y 7.45, ningún médico se atrevería a tratar de la misma manera a un paciente con un valor de 7.47 que a uno con un valor de 8.5. Es por ello que la aplicación de conjuntos difusos en campos poco rígidos como la medicina, donde las leves modificaciones pueden ser causadas por mil cosas y no son concluyentes de por sí, pero sí en conjunto, puede resultar muy beneficiosa en aras de automatizar el proceso.

3. Material y Métodos

3.1. Lógica difusa

La lógica difusa es la rama de la inteligencia artificial que emplea el concepto de conjuntos difusos para emular la capacidad de los seres humanos de razonar y tomar decisiones en entornos en los que exista cierta incertidumbre. Esta puede proceder de a imprecisiones en los datos, falta de información o conocimiento, o valores lógicos parciales (tanto valores de verdad como pertenencia).

Así, surge una clase de sistemas capaces de transformar una serie de valores numéricos de entrada en las salidas deseadas basándose en el uso de lógica difusa: los sistemas de inferencia difusos.

Estos aplican una serie de funciones de pertenencia a las variables de entrada para conocer el grado de pertenencia de las mismas a cada uno de los conjuntos difusos. Procesando estos valores empleando un motor de inferencia que es definido a partir de una serie de reglas lógicas en las que las condiciones y conclusiones son la pertenencia a los diferentes conjuntos difusos. Las salidas también se expresan como un valor numérico en un rango y sus grados de pertenencia a los conjuntos del mismo se pueden calcular aplicando, de nuevo, funciones de pertenencia.

3.2. Fuzzy Logic Toolbox

En este trabajo, emplearemos Fuzzy logic toolbox como nuestra herramienta de elección para trabajar con lógica difusa. Fuzzy logic toolbox es un conjunto de herramientas disponibles en el entorno de desarrollo para cómputos numéricos Matlab. Diseñadas para analizar, diseñar y simular sistemas basados en lógica difusa, permiten obtener soluciones de forma sencilla y guiada en tareas complejas.

Esta herramienta nos permite aplicar sobre una serie de entradas los conjuntos difusos que queramos, permitiéndonos etiquetar dichos conjuntos. Posteriormente, estos valores en dichos conjuntos de entrada son utilizados con unas reglas para transformarlos en otros conjuntos difusos de salida, que serán usados como salidas finales.

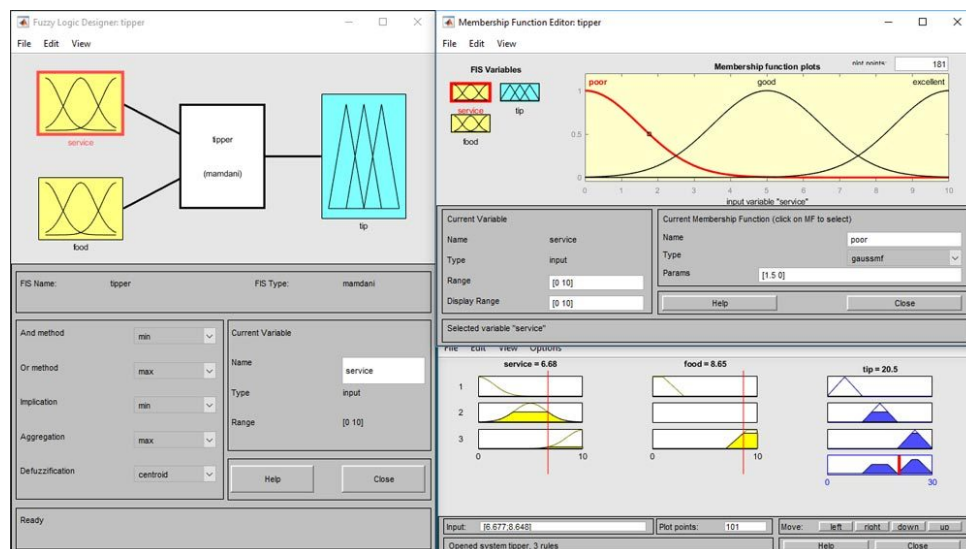


Figura 6: Interfaz de Fuzzy logic toolbox

En primer lugar, podemos observar la vista general del sistema (7), desde la que podemos acceder a los gráficos de cualquiera de las variables, así como al motor de inferencias (desde el que especificaremos las reglas del sistema). En este caso, nuestro sistema tendrá 3 entradas y 2 salidas.

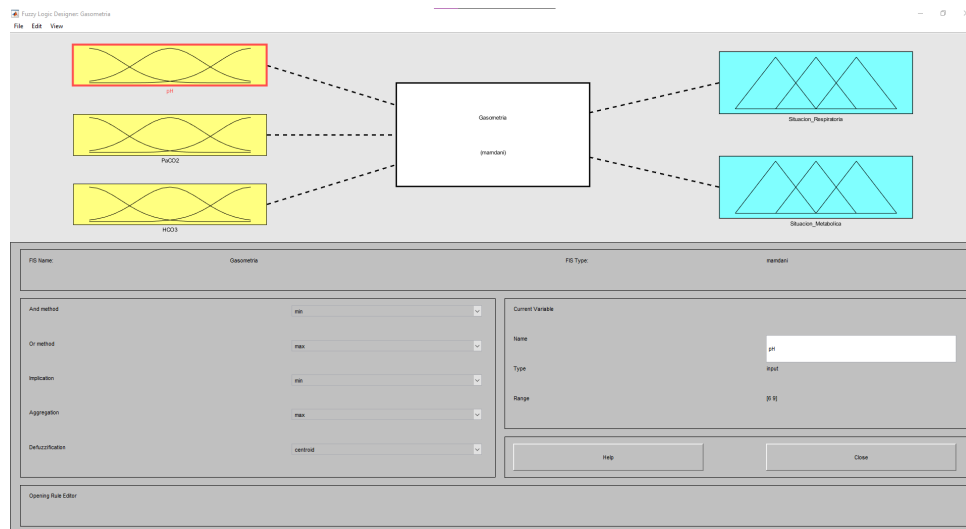


Figura 7: Sistema de lógica difusa

En la figura 8 podemos observar la ventana de visualización de las reglas finales de nuestro sistema. Cada fila representa una de las 17 reglas, y cada columna una de las variables. Los plots de las variables de entrada aparecen en amarillo, mientras que los de salida están en azul. Las líneas rojas verticales marcan los valores actuales con los que estamos probando las reglas, y las áreas resaltadas en las gráficas son las correspondientes a aquellas funciones de pertenencia que se están activando actualmente (la altura hasta la que se colorea la gráfica es el grado de pertenencia del valor actual de la variable).

Las variables de salida muestran una fila adicional con los resultados finales, que combinan todas las reglas activadas y resaltan los valores de salida resultantes con una línea roja similar a las que vimos en las variables de entrada.

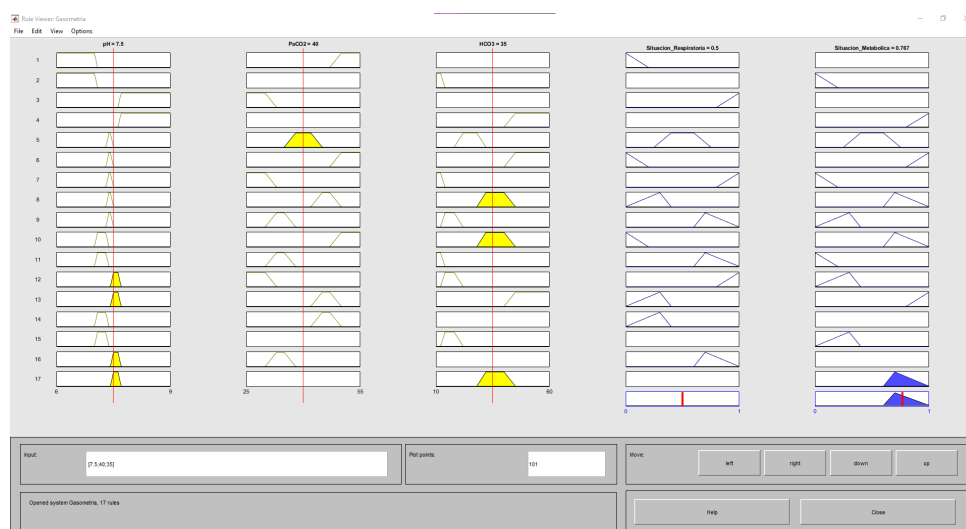


Figura 8: Representación de las reglas

La figura 9 muestra uno de los gráficos de superficie resultantes de las funciones de pertenencia de nuestro sistema. En este caso, podemos observar como el valor de la salida correspondiente a la Situación Respiratoria depende de los de PaCO_2 y pH. Esta representación gráfica nos ayuda a comprender con un rápido vistazo como las variables del sistema interactúan entre ellas.

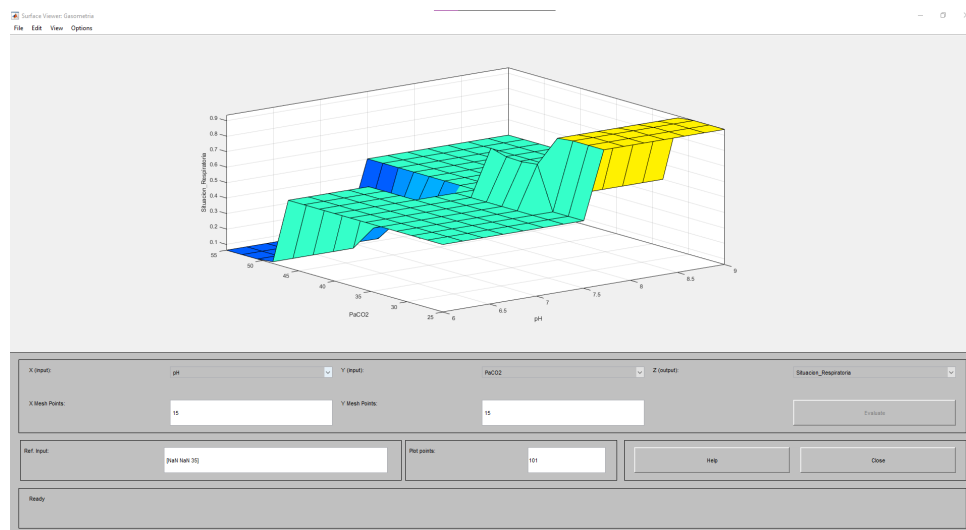


Figura 9: Gráfico de superficie

3.3. Clasificación

3.3.1. Variables de entrada

Estudiaremos las tres variables de entrada que pueden afectar a la gasometría. Cada una de ellas con cinco situaciones posibles. Hemos obtenido los rangos de los valores normales de las tres variables del siguiente artículo de Medline [2]. Por otra parte, obtuvimos los rangos fuera de lo normal del pH, HCO_3 y PaCO_2 de los siguientes artículos [3], [4] y [5] respectivamente.

■ pH

- Muy ácido: si se encuentra por debajo del ácido.
- Ácido: si se encuentra entre 7 y 7.25.
- Normal: si se encuentra entre 7.35 y 7.45.
- Básico: si se encuentra por 7.55 y 7.65.
- Muy básico: si se encuentra por encima del básico.

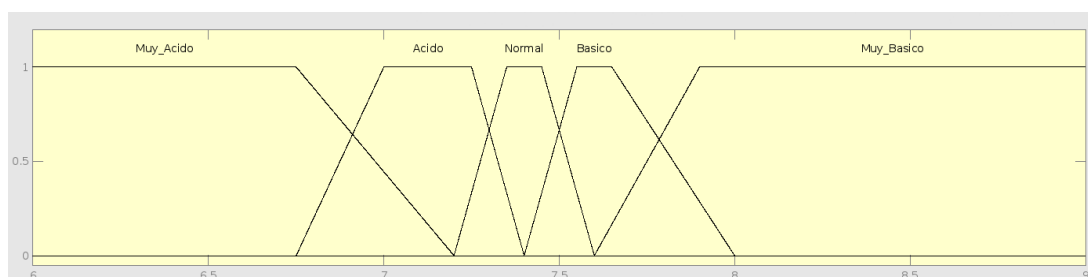


Figura 10: Rangos del pH

■ Bicarbonatos(HCO_3^-)

- Hipobicarbonatemia severa: si se encuentra por debajo de la moderada.
- Hipobicarbonatemia moderada: si se encuentra entre 14 y 18 mEq/L.
- Normal: si se encuentra entre 22 y 26 mEq/L.
- Hiperbicarbonatemia moderada: si se encuentra entre 32 y 40 mEq/L.
- Hiperbicarbonatemia severa: si se encuentra por encima de la moderada.

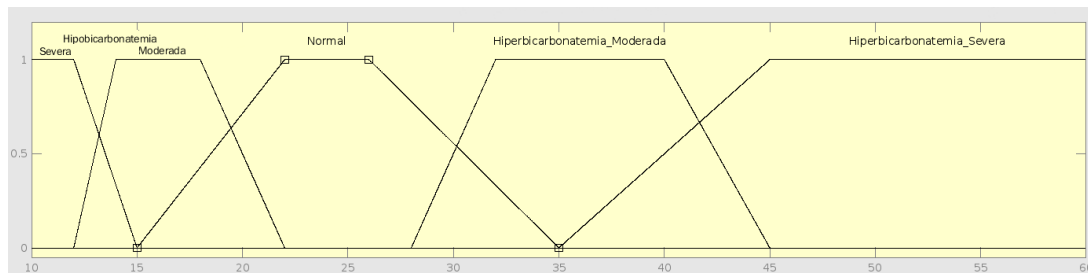


Figura 11: Rangos del HCO_3^-

■ PaCO_2

- Hipocapnia severa: si se encuentra por debajo de la moderada.
- Hipocapnia moderada: si se encuentra entre 30 y 33 mmHg.
- Normal: si se encuentra entre 35 y 45 mmHg.
- Hiperapnia moderada: si se encuentra entre 47 y 51 mmHg.
- Hiperapnia severa: si se encuentra por encima de la moderada.

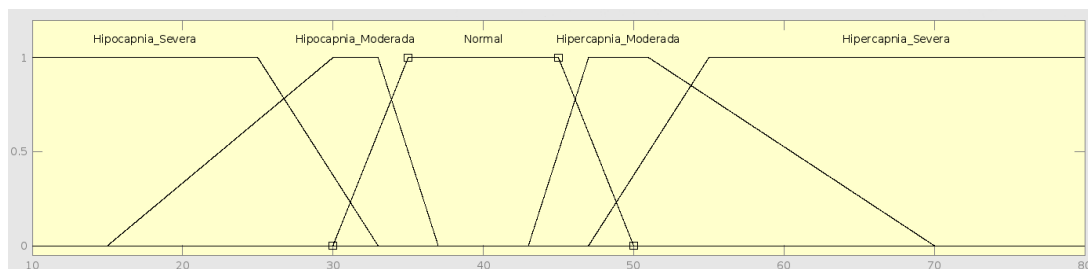


Figura 12: Rangos del PaCO_2

3.3.2. Variables de salida

Trabajaremos con dos variables de salida: la situación a nivel respiratorio en base al pH y la presión parcial de CO_2 y la situación a nivel metabólico en base al pH y la presión parcial de HCO_3^- . Los valoraremos según su relevancia en moderado o severo. De esta manera, con estas dos salidas podremos concluir si estamos ante cada una de las salidas de manera sencilla. Los valores del output irán de 0 a 1 medidos de la siguiente manera en ambas gráficas:

- Acidosis severa: disminuye desde 0 hasta 0.2

- Acidosis moderada: aumenta su valor desde 0 hasta 0.3 y disminuye hasta 0.4
- Normal: aumenta desde 0.25 hasta 0.4 y disminuye desde 0.6 hasta 0.75
- Alcalosis moderada: aumenta desde 0.6 hasta 0.7 y disminuye desde 0.7 hasta 1
- Alcalosis severa: aumenta desde 0.8

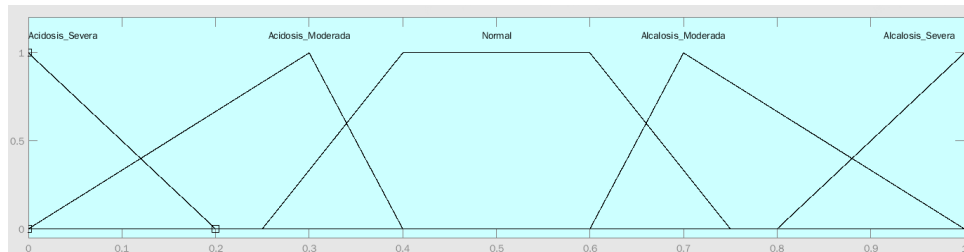


Figura 13: Output

3.3.3. Reglas

■ Situación de normalidad

- Si (pH es Normal) y (HCO_3^- es Normal) y (PaCO_2 es Normal) entonces (Situación respiratoria Normal) (Situación metabólica Normal) (1)
- Si (PaCO_2 es Normal) entonces (Situación respiratoria Normal)
- Si (HCO_3^- es Normal) entonces (Situación metabólica Normal)

Estas normas nos permiten tratar la situación de perfecta normalidad. Además, las otras dos reglas las introducimos debido a que el conjunto de reglas que montamos primeramente no indicaba a cada una de las situaciones cuándo debía ser normal por separado. Estas reglas han recibido menor peso para que no afecten a las reglas que se encargan del diagnóstico real.

■ Situación respiratoria

- Si (pH es Ácido) y (PaCO_2 es Hipercapnia moderada) entonces (Situación respiratoria Acidosis moderada)
- Si (pH es Muy ácido) y (PaCO_2 es Hipercapnia severa) entonces (Situación respiratoria Acidosis severa)
- Si (pH es Básico) y (PaCO_2 Hipocapnia moderada) entonces (Situación respiratoria Alcalosis moderada)
- Si (pH es Muy básico) y (PaCO_2 Hipocapnia severa) entonces (Situación respiratoria Alcalosis severa)

■ Situación metabólica

- Si (pH es Ácido) y (HCO_3^- es Hipobicarbonatemia moderada) entonces (Situación metabólica Acidosis moderada)
- Si (pH es Muy ácido) y (HCO_3^- es Hipobicarbonatemia severa) entonces (Situación metabólica Acidosis severa)

- Si (pH es Básico) y (HCO_3^- es Hiperbicarbonatemia moderada) entonces (Situación metabólica Alcalosis moderada)
- Si (pH es Muy básico) y (HCO_3^- es Hiperbicarbonatemia severa) entonces (Situación metabólica Alcalosis severa)

Estos dos conjuntos de reglas permiten establecer los casos estándar de modificación del pH, tanto respiratoria como metabólicamente. En ellos vemos una modificación del pH junto con su causa principal, siendo esta la PaCO_2 en situación respiratoria y el HCO_3^- en situación metabólica.

■ Situaciones de compensación total

- Si (pH es Normal) y (PaCO_2 es Hipocapnia severa) y (HCO_3^- es Hipobicarbonatemia severa) entonces (Situación respiratoria Alcalosis severa) (Situación metabólica Acidosis severa)
- Si (pH es Normal) y (PaCO_2 es Hipercapnia severa) y (HCO_3^- es Hiperbicarbonatemia severa) entonces (Situación respiratoria Acidosis severa) (Situación metabólica Alcalosis severa)
- Si (pH es Normal) y (PaCO_2 es Hipocapnia moderada) y (HCO_3^- es Hipobicarbonatemia moderada) entonces (Situación respiratoria Alcalosis moderada) (Situación metabólica Acidosis moderada)
- Si (pH es Normal) y (PaCO_2 es Hipercapnia moderada) y (HCO_3^- es Hiperbicarbonatemia moderada) entonces (Situación respiratoria Acidosis moderada) (Situación metabólica Alcalosis moderada)

Estas reglas tratan los casos en los que el pH se mantiene debido a dos situaciones contrarias a nivel metabólico y respiratorio, sean estos severo o moderado.

■ Situaciones de compensación parcial

- Si (pH es Ácido) y (PaCO_2 es Hipercapnia severa) y (HCO_3^- es Hiperbicarbonatemia moderada) entonces (Situación respiratoria Acidosis severa) (Situación metabólica Alcalosis moderada)
- Si (pH es Básico) y (PaCO_2 es Hipercapnia moderada) y (HCO_3^- es Hiperbicarbonatemia severa) entonces (Situación respiratoria Acidosis moderada) (Situación metabólica Alcalosis severa)
- Si (pH es Ácido) y (PaCO_2 es Hipocapnia moderada) y (HCO_3^- es Hipobicarbonatemia severa) entonces (Situación respiratoria Alcalosis moderada) (Situación metabólica Acidosis severa)
- Si (pH es Básico) y (PaCO_2 es Hipocapnia severa) y (HCO_3^- es Hipobicarbonatemia moderada) entonces (Situación respiratoria Alcalosis severa) (Situación metabólica Acidosis moderada)

Estas reglas ofrecen situaciones de compensación no completa, donde una situación de las dos es severa y la otra moderada, ofreciéndonos leves variaciones del pH.

A continuación, presentamos un resumen de las reglas propuestas en forma de tabla, para facilitar su comprensión.

PaCO₂	HCO₃⁻	Situación respiratoria	Situación metabólica
Normal		Normal	
	Normal		Normal
Normal	Normal	Normal	Normal

Cuadro 1: Estados por defecto si no hay ninguna anormalidad

pH	PaCO₂	Situación respiratoria
Muy básico	Hipocapnia severa	Alcalosis severa
Básico	Hipocapnia moderada	Alcalosis moderada
Ácido	Hipercapnia moderada	Acidosis moderada
Muy Ácido	Hipercapnia severa	Acidosis severa

Cuadro 2: Situación respiratoria

pH	HCO₃⁻	Situación metabólica
Muy básico	Hiperbicarbonatemia severa	Alcalosis severa
Básico	Hiperbicarbonatemia moderada	Alcalosis moderada
Ácido	Hipobicarbonatemia moderada	Acidosis moderada
Muy ácido	Hipobicarbonatemia severa	Acidosis severa

Cuadro 3: Situación metabólica

pH	PaCO₂	HCO₃⁻	Situación respiratoria	Situación metabólica
Normal	Hipocapnia severa	Hipobicarbonatemia severa	Alcalosis severa	Acidosis severa
Normal	Hipocapnia moderada	Hipobicarbonatemia moderada	Alcalosis moderada	Acidosis moderada
Normal	Hipercapnia moderada	Hiperbicarbonatemia moderada	Acidosis moderada	Alcalosis moderada
Normal	Hipercapnia severa	Hiperbicarbonatemia severa	Acidosis severa	Alcalosis severa

Cuadro 4: Compensaciones totales

pH	PaCO₂	HCO₃⁻	Situación respiratoria	Situación metabólica
Básico	Hipocapnia severa	Hipobicarbonatemia moderada	Alcalosis severa	Acidosis moderada
Básico	Hipercapnia moderada	Hiperbicarbonatemia severa	Acidosis moderada	Alcalosis severa
Ácido	Hipocapnia moderada	Hipobicarbonatemia severa	Alcalosis moderada	Acidosis severa
Ácido	Hipercapnia severa	Hiperbicarbonatemia moderada	Acidosis severa	Alcalosis moderada

Cuadro 5: Compensaciones parciales

Consideramos que estas reglas deberían de ser capaces de modelar adecuadamente los conocimientos sobre el diagnóstico basado en gasometrías arteriales que hemos recopilado de nuestras fuentes. Pese a no cubrir todas las posibilidades numéricas, sí abarcan todas las situaciones que son posibles a partir de mediciones reales en los casos en los que no aparecen artefactos que puedan afectar a los valores de forma impredecible. Los casos restantes no se encuentran dentro del alcance de este trabajo.

4. Resultados

El siguiente script de Matlab nos permite evaluar el sistema sobre un array de casos de prueba, mostrando para cada uno el resultado esperado, las entradas y salidas numéricas, y el diagnóstico resultante del sistema tanto para la situación respiratoria como para la metabólica.

```
1 gas = readfis('Gasometria.fis');
2
3 val = [
4     [7.30, 68, 28]
5     ...
6     ];
7
8 pre = [
9     "Acidosis respiratoria moderada"
10    ...
11    ];
12
13 for i = 1:size(val, 1)
14     disp("-----")
15     result = evalfis(gas, val(i, :));
16     disp("Caso " + i + ": " + pre(i))
17     disp("      " + num2str(val(i, :)))
18     disp(result);
19
20     for j = 1:size(gas.Outputs, 2)
21         max_mf = 0; max_mf_val = 0.0;
22         for k = 1:size(gas.Outputs(j).MembershipFunctions, 2)
23             mf_val = evalmf(gas.Outputs(j).MembershipFunctions(k), result(j));
24             if mf_val > max_mf_val
25                 max_mf_val = mf_val;
26                 max_mf = k;
27             end
28         end
29
30         disp(gas.Outputs(j).Name + ": " + ...
31             gas.Outputs(j).MembershipFunctions(max_mf).Name + " (" + result(j) + ")")
32     end
33 end
```

Al ejecutarlo, iterará sobre cada uno de los casos de prueba evaluando el sistema de inferencia difuso y, para cada una de las salidas, evaluará todas las funciones de pertenencia y mostrará la etiqueta asociada a la que tenga el valor más alto para el valor numérico obtenido. Obtendremos una salida como la de la figura 14.

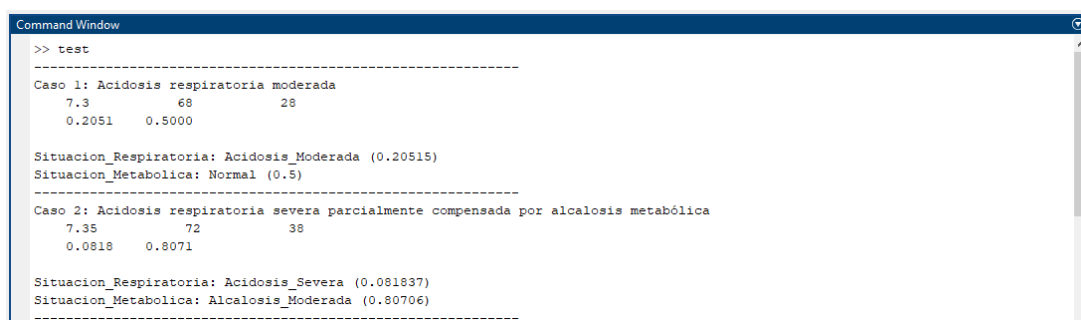


Figura 14: Rangos del HCO_3^-

En total, hemos recopilado una colección de 30 casos de prueba para validar el sistema. Todos ellos se caracterizan por poderse resolver completamente con tan solo la información asociada a el pH, el valor de PaCO_2 , y el de HCO_3^- , puesto que hemos excluido aquellos casos para los que las mediciones de otros valores, como la presión parcial de oxígeno, sean necesarios para el diagnóstico. Estas otras métricas quedan fuera del alcance de este trabajo.

En esta sección se detallan los resultados obtenidos sobre todos estos casos, que se listan a continuación:

Los casos de prueba y las situaciones esperadas asociadas a las mismas han sido extraídas de las siguientes fuentes: el cuestionario “Arterial Blood Gas Interpretation for NCLEX Quiz (40 Questions)” [6], el artículo “Interpretación de la gasometría en sangre arterial: Un vistazo al equilibrio interior del paciente” [7], y el artículo “Alcalosis metabólica severa por ingesta de bicarbonato” [4].

■ Situación 1

- Entrada: pH 7.3, PaCO_2 68, HCO_3^- 28
- Situación esperada: Acidosis respiratoria moderada
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.20515 \Rightarrow Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.5 \Rightarrow Normal

■ Situación 2

- Entrada: pH 7.35, PaCO_2 72, HCO_3^- 38
- Situación esperada: Acidosis respiratoria severa parcialmente compensada por alcalosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.081837 \Rightarrow Acidosis Severa
 - Situación Metabólica 0.80706 \Rightarrow Alcalosis Moderada

■ Situación 3

- Entrada: pH 7.1, PaCO_2 70, HCO_3^- 24
- Situación esperada: Acidosis respiratoria severa
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.086712 \Rightarrow Acidosis Severa
 - Situación Metabólica 0.5 \Rightarrow Normal

■ Situación 4

- Entrada: pH 7.61, PaCO_2 22, HCO_3^- 25
- Situación esperada: Alcalosis respiratoria severa
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.77965 \Rightarrow Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.5 \Rightarrow Normal

■ Situación 5

- Entrada: pH 7.6, PaCO₂ 31, HCO₃⁻ 25
- Situación esperada: Alcalosis respiratoria moderada
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.75528 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.5 ⇒ Normal

■ Situación 6

- Entrada: pH 7, PaCO₂ 23, HCO₃⁻ 12
- Situación esperada: Acidosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.77665 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.073918 ⇒ Acidosis Severa

■ Situación 7

- Entrada: pH 7.39, PaCO₂ 27, HCO₃⁻ 19
- Situación esperada: Acidosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.77006 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.26274 ⇒ Acidosis Moderada

■ Situación 8

- Entrada: pH 7.5, PaCO₂ 40, HCO₃⁻ 34
- Situación esperada: Alcalosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.5 ⇒ Normal
 - Situación Metabólica 0.7117 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 9

- Entrada: pH 7.57, PaCO₂ 37, HCO₃⁻ 30
- Situación esperada: Alcalosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.5 ⇒ Normal
 - Situación Metabólica 0.67055 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 10

- Entrada: pH 6.9, PaCO₂ 68, HCO₃⁻ 13
- Situación esperada: Acidosis respiratoria y metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.11171 ⇒ Acidosis Severa
 - Situación Metabólica 0.17546 ⇒ Acidosis Moderada

■ Situación 11

- Entrada: pH 7.57, PaCO₂ 22, HCO₃⁻ 17
- Situación esperada: Alcalosis respiratoria parcialmente compensada por acidosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.8367 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.24937 ⇒ Acidosis Moderada

■ Situación 12

- Entrada: pH 7.39, PaCO₂ 44, HCO₃⁻ 26
- Situación esperada: Normal
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.48361 ⇒ Normal
 - Situación Metabólica 0.5 ⇒ Normal

■ Situación 13

- Entrada: pH 7.55, PaCO₂ 25, HCO₃⁻ 22
- Situación esperada: Alcalosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.77229 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.5 ⇒ Normal

■ Situación 14

- Entrada: pH 7.17, PaCO₂ 48, HCO₃⁻ 36
- Situación esperada: Acidosis respiratoria parcialmente compensada por alcalosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.25196 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.79414 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 15

- Entrada: pH 7.34, PaCO₂ 24, HCO₃⁻ 20
- Situación esperada: Acidosis metabólica parcialmente compensada por alcalosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.77778 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.27178 ⇒ Acidosis Moderada

■ Situación 16

- Entrada: pH 7.64, PaCO₂ 25, HCO₃⁻ 19
- Situación esperada: Alcalosis respiratoria parcialmente compensada por acidosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.81826 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.26274 ⇒ Acidosis Moderada

■ Situación 17

- Entrada: pH 7.45, PaCO₂ 50, HCO₃⁻ 30
- Situación esperada: Alcalosis metabólica totalmente compensada por acidosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.22222 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.73787 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 18

- Entrada: pH 7.6, PaCO₂ 53, HCO₃⁻ 38
- Situación esperada: Alcalosis metabólica parcialmente compensada por acidosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.21412 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.78109 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 19

- Entrada: pH 7.5, PaCO₂ 19, HCO₃⁻ 22
- Situación esperada: Alcalosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.78755 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.5 ⇒ Normal

■ Situación 20

- Entrada: pH 7.39, PaCO₂ 59, HCO₃⁻ 35
- Situación esperada: Acidosis respiratoria totalmente compensada por alcalosis metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.22363 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.77503 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 21

- Entrada: pH 7.5, PaCO₂ 30, HCO₃⁻ 23
- Situación esperada: Alcalosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.77229 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.5 ⇒ Normal

■ Situación 22

- Entrada: pH 7.3, PaCO₂ 50, HCO₃⁻ 25
- Situación esperada: Acidosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.22771 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.5 ⇒ Normal

■ Situación 23

- Entrada: pH 7.32, PaCO₂ 26, HCO₃⁻ 20
- Situación esperada: Acidosis metabólica parcialmente compensada por alcalosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.77778 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.27178 ⇒ Acidosis Moderada

■ Situación 24

- Entrada: pH 7.18, PaCO₂ 20, HCO₃⁻ 10
- Situación esperada: Acidosis metabólica parcialmente compensada por alcalosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.78459 ⇒ Alcalosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.081837 ⇒ Acidosis Severa

■ Situación 25

- Entrada: pH 7.05, PaCO₂ 77, HCO₃⁻ 17
- Situación esperada: Acidosis respiratoria y metabólica
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.081837 ⇒ Acidosis Severa
 - Situación Metabólica 0.24937 ⇒ Acidosis Moderada

■ Situación 26

- Entrada: pH 7.58, PaCO₂ 60, HCO₃⁻ 57
- Situación esperada: Alcalosis metabólica parcialmente compensada por acidosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.21863 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.92583 ⇒ Alcalosis Severa

■ Situación 27

- Entrada: pH 7.6, PaCO₂ 54, HCO₃⁻ 54
- Situación esperada: Alcalosis metabólica parcialmente compensada por acidosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.23184 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.93484 ⇒ Alcalosis Severa

■ Situación 28

- Entrada: pH 7.48, PaCO₂ 53, HCO₃⁻ 40
- Situación esperada: Alcalosis metabólica totalmente compensada por acidosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.20014 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.79986 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 29

- Entrada: pH 7.46, PaCO₂ 49, HCO₃⁻ 35
- Situación esperada: Alcalosis metabólica totalmente compensada por acidosis respiratoria
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.24447 ⇒ Acidosis Moderada
 - Situación Metabólica 0.76698 ⇒ Alcalosis Moderada

■ Situación 30

- Entrada: pH 7.37, PaCO₂ 47, HCO₃⁻ 23
- Situación esperada: Normal
- Diagnóstico del sistema:
 - Situación Respiratoria 0.44338 ⇒ Normal
 - Situación Metabólica 0.5 ⇒ Normal

5. Discusión

Como vemos, mediante la implantación de un algoritmo hemos probado un conjunto de 30 casos que abarcan la mayoría de las posibilidades de nuestro sistema. Por lo tanto, procederemos a examinar y comentar los resultados obtenidos en dicha prueba.

En general, los resultados tienden a ser correctos. Esto no quiere decir que en una primera instancia fuese así, sino que nuestros conjuntos difusos ya pasaron por un proceso de corrección en el que nos encargamos de cubrir las impurezas más obvias. Dicho proceso se caracterizó por dos elementos principalmente:

- Una suavización de las pendientes de los conjuntos difusos para dar más visibilidad a los valores dudosos entre rangos. Esto se debe a que en un primer momento supuso un problema que en ciertos límites algún valor cayese únicamente en un conjunto. Por ejemplo: si detectásemos un PH como muy ácido y su situación respiratoria como acidosis moderada, no saltaría ninguna de las reglas previstas. Por ello, esta suavización hizo que, aunque fuese de manera leve, las reglas que producían la salida correcta se activasen.
- Un reajuste de los límites hacia los valores extremos, ya que en ocasiones se hallaban fuera de los rangos esperados. Esto supuso un problema en el análisis de casos severos, donde ciertos valores se encontraban directamente fuera de nuestra gráfica esperada.

Una vez hablado de las modificaciones previas, queda contextualizado el hecho de que los resultados sean mayoritariamente correctos. Una buena selección de los valores de los conjuntos difusos junto con una amplia selección de reglas hace posible que los casos que no están demasiado ajustados a nuestros límites sean correctos.

Sin embargo, esto no ocurre en todas y cada una de nuestras situaciones. Por ejemplo, podemos ver en la situación 4 que nuestro sistema devuelve una alcalosis moderada con un valor de 0.78, muy cercano al 0.875 que la consideraría severa. Esto hace que nuestro diagnóstico y el esperado discrepen, aunque sea de manera muy ligera.

De nuevo vemos este mismo margen dando problemas en la situación 11, donde nuestra situación respiratoria se queda muy cerca de indicar un caso severo en lugar de uno moderado, dando lugar a un diagnóstico de compensación total en lugar del esperado, una compensación parcial de la alcalosis respiratoria. Este problema se repite también en la situación 16.

En general, todos los casos que discrepan con la salida esperada se caracterizan por diagnosticar una acidosis o alcalosis moderada en lugar de una severa. Además de los casos ya mencionados, otros casos de esta situación son las situaciones 14, 15, 18, y 23.

Este pequeño problema de los límites concretos de los conjuntos difusos se podría solucionar, por ejemplo, suavizando más las salidas que indicarían los valores severos.

Además, podemos ver que, en aquellos casos en los que tenemos una alcalosis moderada y una acidosis moderada, el diagnóstico resultante debería de ser el de una compensación parcial (puesto que el PH está descompensado ligeramente hacia un valor ácido o básico). Esto nos lleva a pensar que otra manera de solucionarlo sería añadiendo una serie de reglas que hagan a la salida indicar severidad de la situación dominante entre ambas, como, por ejemplo:

- Si PH es Ácido y PaCO_2 es Hipocapnia moderada y HCO_3^- es Hipobicarbonatemia moderada entonces Situación respiratoria es Alcalosis moderada y Situación metabólica es Acidosis severa.

Fuera de este pequeño error, los resultados son los esperados, lo que indica que nuestro sistema no se aleja en gran medida de las interpretaciones manuales que haría un doctor.

Entre los casos de prueba, se encuentran 4 correspondientes a un caso real reportado por los servicios de medicina interna y endocrinología del Hospital Virgen de las Nieves de Granada [4]. Estos son los casos 26, 27, 28, y 29. Se corresponden a la situación del paciente al ingreso y a las 16, 38, y 72 horas respectivamente. Decidimos destacar estas mediciones porque muestran la evolución a lo largo del tiempo de un caso de alcalosis metabólica muy severo que fue compensando por una acidosis respiratoria.

El paciente fue ingresado tras consumir una cantidad excesiva de bicarbonato oral. Su concentración de HCO_3^- estaba alrededor de 60 miliequivalentes por litro. Como queda recogido en el informe de los profesionales, esta cantidad está completamente fuera de los rangos normales y, de hecho, hizo que cuestionásemos el límite superior que habíamos establecido para esta variable.

Sin embargo, su pH no se encontraba en valores tan altos como serían esperados normalmente para esta situación. Esto se debe a su alta presión parcial de dióxido de carbono, resultante de una insuficiencia respiratoria derivada de la intoxicación.

Podemos observar como los valores se estabilizan a lo largo del tiempo, y el sistema pasa de diagnosticar una alcalosis metabólica severa parcialmente compensada por una acidosis respiratoria moderada a una alcalosis de menor severidad compensada casi en su totalidad. El hecho de que nuestro sistema sea capaz de tratar con una situación tan extrema como esta nos aporta información valiosa sobre su capacidad de diagnosticar incluso los casos más extremos.

6. Conclusiones

Tras investigar sobre las gasometrías arteriales y los conjuntos difusos, hemos sido capaces de implementar un sistema que automatizase los diagnósticos de dicha prueba. Tras terminar el proceso de desarrollo y prueba, pudimos extraer una serie de conclusiones que trataremos a lo largo de esta sección.

En primer lugar, llegamos a la conclusión de que la dificultad, eficacia, y valor de este sistema radica en la selección de los distintos valores que forman los conjuntos difusos. Una buena selección de dichos valores llevará en última instancia a un buen diagnóstico.

Es cierto que no es el único elemento relevante a la hora de la elaboración de un sistema de conjuntos difusos, pues también tenemos las reglas, pero en este caso en concreto donde las reglas son sencillas, no son un elemento tan relevante. Las reglas utilizadas en este sistema son suficientes para funcionar correctamente siempre que definamos los conjuntos y sus límites a partir de valores verificados, y la formación necesaria para escribirlas fue mínima.

Por otra parte, haciendo eco a la discusión sobre los resultados obtenidos, concluimos que nuestro sistema es útil y fiable a falta de las leves modificaciones allí indicadas. Esto nos lleva a pensar que, una vez implementados dichos cambios, nuestro sistema podría ser utilizado para la automatización del proceso o, como mínimo, como asistente en el proceso (por ejemplo, para estudiantes en sus primeros intentos).

En cuanto a la técnica utilizada, la lógica difusa es una técnica muy adecuada para este tipo de situaciones. Cumple con todos los requisitos necesarios para resolver este problema; destacando su capacidad de lidiar con la incertidumbre en los valores intermedios. Esto lo convierte en una técnica extremadamente eficaz y eficiente una vez aplicada, y que representa muchas ventajas frente a otras técnicas de automatización.

En el ámbito del trabajo futuro, el próximo paso del sistema debería ser una validación más profunda y supervisada por profesionales especializados. Esto nos permitiría comprobar el verdadero estado del sistema, así como pulir las últimas imperfecciones que pueda llegar a tener. Una vez realizado esto, podríamos dar paso a una fase de desarrollo que facilitase su uso. Esto se debe a que esta automatización carece de sentido si el personal especializado tuviese que introducir los datos manualmente, pues ellos con un simple vistazo serían capaces de obtener conclusiones tan certeras como las del sistema. El objetivo en última instancia debe ser que el sistema forme parte de la prueba directamente, y que su diagnóstico se ofrezca prácticamente al mismo tiempo que los resultados.

También concluimos que el hecho de construir salidas que vayan de 0 a 1 indicando la severidad de la situación nos aporta beneficios que a lo largo de esta práctica no hemos explotado por completo. Estos números de gravedad pueden ser útiles tanto en el cálculo de compensaciones como para establecer métodos de análisis de gravedad entre distintos casos considerados idénticos por etiqueta. Por ejemplo, para la aplicación en un triaje, donde cada segundo cuenta, el uso de un proceso automático de análisis de gasometrías que indique la gravedad de cada uno de los casos puede llegar a suponer la vida o la muerte de una persona.

Otro planteamiento a nivel futuro sería la implementación conjunta del sistema con otros mecanismos de análisis y diagnóstico, como por ejemplo un motor de inferencias que sugiera, en base a los resultados de la gasometría, las siguientes pruebas a realizar. De esta manera podríamos reducir considerablemente la interacción del médico en fases intermedias del proceso de diagnóstico, donde la mayor parte del tiempo que ocurre se debe a la espera de un profesional que dictamine el siguiente paso a seguir. De esta manera transformaríamos el proceso de:

1. Médico solicita gasometría
2. Resultados de la gasometría
3. Médico interpreta gasometría
4. Médico solicita siguiente prueba a realizar

que pasaría a ser:

1. Médico solicita gasometría
2. Resultados de la gasometría
3. Sistema determina siguiente prueba a realizar

Esto reduce considerablemente el elemento más lento de la cadena de diagnóstico: el humano. También reduce la carga de trabajo de los profesionales, que pueden poner más énfasis en las etapas finales del diagnóstico donde ya cuentan con las evidencias necesarias.

La automatización de procesos sanitarios es compleja de realizar por numerosos factores. Entre estos tenemos la interpretación del lenguaje natural para la entrevista con el paciente, la incertidumbre que hemos visto a la hora de comprobar valores o, como comentábamos en la introducción, los numerosos cambios constantes y no relevantes en el cuerpo humano. Si a esto le sumamos la clara desconfianza que supondría para la mayoría de las personas que les diagnosticase una máquina, veremos que la medicina es un campo donde la automatización es escasa y queda mucho por hacer.

A lo largo de esta práctica hemos visto los beneficios de la implementación tanto de este sistema como de otros de características similares en el ámbito sanitario. La automatización de procesos simples de los que poseemos el conocimiento como para hablar de, prácticamente, un 100 % de precisión es perfectamente viable. Y no solo es realizable, sino que su impacto sería notorio al instante en todas las tareas sanitarias que incluyan dicho proceso. No solo el personal sería liberado de cargas innecesarias, sino que, en general, todo sería más rápido.

Por ello, concluimos que nuestro sistema es útil, aplicable y puede, potencialmente, mejorar la vida de las personas.

Referencias

- [1] J. X. Lian, "La gasometría en sangre arterial como método de optimación de la ventilación mecánica." <https://www.elsevier.es/es-revista-nursing-20-pdf-S0212538214000533>, marzo 2014.
- [2] "Gasometría arterial: Enciclopedia médica a.d.a.m. [internet]." <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003855.htm>, marzo 2020.
- [3] G. Ramírez, "ph de la sangre: valores normales y cómo se mide." <https://www.tuasaude.com/es/ph-de-la-sangre/>, julio 2021.
- [4] L. León-Ruiz, C. H. Tenorio, N. Díaz-Ricomá, G. P. Maroto, and M. L. Gómez, "Alcalosis metabólica severa por ingesta de bicarbonato." https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-71992002000700019, julio 2002.
- [5] E. Arismendi and J. A. Barberà, "Valoración del intercambio gaseoso." https://www.neumomadrid.org/wp-content/uploads/monogxviii_5._valoracion_del_intercambio.pdf, 2011.
- [6] G. Wayne, "Arterial blood gas interpretation for nclex quiz (40 questions)." <https://nurseslabs.com/arterial-blood-gas-abgs-nclex-quiz/>, marzo 2022.
- [7] B. Pruitt, "Interpretación de la gasometría en sangre arterial: Un vistazo al equilibrio interior del paciente." <https://www.elsevier.es/es-revista-nursing-20-pdf-S0212538210704763>, diciembre 2010.
- [8] J. Lewis, "Introducción al equilibrio ácido-básico." <https://www.msmanuals.com/es-es/hogar/trastornos-hormonales-y-metabólicos/equilibrio-ácido-básico/introducción-al-equilibrio-ácido-básico>, julio 2021.
- [9] M. Lemos, "Gasometría arterial: qué es, valores normales e interpretación." <https://www.tuasaude.com/es/gasometria-arterial/>, mayo 2021.
- [10] V. M. Bonillo, "Apuntes representación del conocimiento y razonamiento automático."
- [11] L. Zadeh, "Fuzzy logic." http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_login, 2008.