

DESARROLLO DE UN SISTEMA DIFUSO PARA LA INTERPRETACIÓN DE GASOMETRÍAS ARTERIALES

Bermo Taibo, Alejandra
Fandiño Dovalo, David
García Fernández, Alejandro
Hermo González, Jorge
Rodríguez Bacelar, David

13 de mayo de 2022

Índice

1. Resumen	3
2. Introducción	3
2.1. Lógica difusa y conjuntos difusos	3
2.2. Gasometría arterial	5
3. Materia y Métodos	7
3.1. Fuzzy Logic Toolbox	7
3.2. Arquitectura del Sistema	8
3.3. Método de Diagnóstico	9
3.3.1. Variables de entrada	9
3.3.2. Variables de salida	9
3.3.3. Reglas del sistema	10
4. Implementación	11
4.1. Implementación de las variables de entrada	12
4.2. Implementación de las variables de salida	14
4.3. Implementación de las reglas del sistema	15
5. Resultados	17
6. Discusión	27
7. Conclusiones	28
8. Bibliografía	28

1. Resumen

En este proyecto trataremos, a partir del resultado de una gasometría arterial, el diagnóstico de la situación metabólica y respiratoria en lo referente a trastornos del equilibrio ácido-base de un paciente desde el punto de vista de la lógica difusa. Aplicaremos métodos difusos para poder dar solución a un problema de compleja interpretación como este.

Utilizaremos los parámetros resultantes de la gasometría arterial (pH, HCO_3 , PaCO_2) para desarrollar un sistema capaz de diagnosticar trastornos del equilibrio ácido-base en la respiración y en el metabolismo del paciente en cuestión.

A su vez, nos apoyaremos en la literatura científica de los respectivos campos para adquirir la información del proceso a realizar, además de obtener el conocimiento concreto del dominio, pudiendo robustecer así nuestra implementación y lograr un sistema funcional y efectivo.

En cuanto a las herramientas utilizadas, emplearemos el software *Fuzzy Logic ToolBox* en la plataforma *Matlab*.

2. Introducción

2.1. Lógica difusa y conjuntos difusos

El término de **conjuntos difusos** fue empleado por primera vez en 1965, con la propuesta de la Teoría de Conjuntos Difusos, de Lofti A. Zadeh (véase L. Zadeh, 1965) . Los conjuntos difusos son conjuntos en los que los elementos de dicho conjunto tienen cierto grado de pertenencia al mismo, siendo así una generalización de la definición clásica de conjuntos.

Un **conjunto difuso** A es un par (U, m) donde U es el conjunto universal de elementos y $m : U \rightarrow [0, 1]$ una **función de pertenencia al conjunto** A . Para cada $x \in U$, $m(x)$ denota el grado de pertenencia de x al conjunto A . Se denota como μ_A a la función de pertenencia al conjunto difuso $A = (U, m)$.

Entonces, sea U el conjunto universal, A un conjunto difuso y $x \in U$, sobre x se dice que:

- x no está incluido en A si $\mu_A(x) = 0$
- x está totalmente incluido en A si $\mu_A(x) = 1$
- x está parcialmente incluido en A si $0 < \mu_A(x) < 1$

A partir de estas definiciones de conjuntos difusos, se pueden aplicar las operaciones típicas de los conjuntos clásicos, como pueden ser la unión, intersección, complementario, inclusión...

Algunas definiciones de dichas operaciones son:

- **Complementario:** sea A un conjunto difuso, se denota $\neg A$ como el complementario de A , definido por la siguiente función de pertenencia:

$$\forall x \in U : \mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

- **Inclusión:** sean A y B dos conjuntos difusos, $A \subseteq B$ si y solo si

$$\forall x \in U : \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

- **Intersección:** sea t una t-norma, A y B dos conjuntos difusos, $A \cap B$ se define como:

$$\forall x \in U : \mu_{A \cap B}(x) = t(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

- **Union:** sea s una t-conorma, A y B dos conjuntos difusos, $A \cup B$ se define como:

$$\forall x \in U : \mu_{A \cup B}(x) = s(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Una **t-norma** es una operación binaria que generaliza la intersección de conjuntos y la conjunción de la lógica, además de ser utilizada como generalización de la desigualdad triangular en espacios métricos.

Ejemplos de t-normas pueden ser una **t-norma mínima** ($\top_{min}(a, b) = \min\{a, b\}$) o una **t-norma de producto** ($\top_{prod}(a, b) = a \cdot b$)

Las **t-conormas** (o s-normas) son duales a las t-normas, se obtienen generalizando las leyes de De Morgan que se utilizan en la lógica clásica. La relación que tienen con las t-normas es que dada una t-norma \top , se puede expresar su t-conorma complementaria \perp de la siguiente manera:

$$\perp(a, b) = 1 - \top(1 - a, 1 - b)$$

Es decir, una t-conorma sobre dos elementos equivale al complementario de aplicar su t-norma asociada sobre el complementario de cada uno de los elementos.

Ejemplos de t-conormas pueden ser una **t-conorma máxima** ($\perp_{max}(a, b) = \max\{a, b\}$), que es dual a la t-norma mínima, una **t-norma de suma probabilística** ($\perp_{sum}(a, b) = a + b - a \cdot b = 1 - (1 - a) \cdot (1 - b)$), que es dual a la t-norma de producto, o una **t-conorma de suma acotada** ($\perp_{Luk}(a, b) = \min\{a + b, 1\}$)

Las t-normas y las t-conormas están muy relacionadas, de forma que dada una t-norma t ,

La **lógica difusa** o *Fuzzy Logic* en inglés, es una forma de lógica plurivalente (o *multi-valued* en inglés) en la que los valores de verdad de las variables pueden ser cualquier número real comprendido entre 0 y 1. Esta lógica es una generalización de la lógica clásica, en la cual los valores de verdad que se pueden tomar son sólo verdadero (1) o falso (0).

Los conjuntos difusos anteriormente explicados y la lógica difusa están altamente relacionados, ya que las evaluaciones de las variables proposicionales (V_p) a valores de verdad, pueden ser pensadas como una función de pertenencia a un conjunto difuso, de la forma: $\mu : V_p \rightarrow [0, 1]$. De esta forma, se permite obtener conclusiones graduales a partir de premisas difusas.

Esta lógica nos da la posibilidad de utilizar el concepto de verdad parcial, lo que permite abstraer de mejor manera el lenguaje natural que utilizamos las personas, formando así un mejor

modelo que la lógica clásica para dar soluciones a problemas complejos del mundo real, donde no todo es totalmente cierto o totalmente falso.

Un ejemplo de esto sería la subjetividad que empleamos los humanos. Cuando decimos que una persona es alta, ¿Cómo de alta es? Podría ser un poco alta, muy alta... Se pueden hacer múltiples ejemplos de esto mismo con las cualidades de muchos elementos del mundo real. No podemos tener una respuesta absoluta en muchas situaciones, pero sí que podemos establecer la mayoría de veces comparaciones entre distintos elementos. Por ejemplo, se podría decir sin ninguna duda que una persona es más alta que otra, o que es más joven que otra.

Parece ser que la lógica difusa se adapta muy bien a la forma en la que pensamos y observamos el mundo, por lo que es un punto de partida muy bueno para que podamos formular problemas complejos del mundo real y modelarlos siguiendo los principios de la lógica difusa.

2.2. Gasometría arterial

La gasometría arterial consiste en la medición de los gases disueltos en la sangre, que se realiza mediante la cuantificación de pH, presión parcial de dióxido de carbono (PaCO_2) y bicarbonato (HCO_3). Se requiere de una muestra de sangre que se recoge de una arteria, normalmente de la arteria radial de la muñeca, aunque también se utiliza la arteria femoral o con menos frecuencia la arteria branquial. Es útil para llevar a cabo un diagnóstico, complementar la etiología y establecer tratamiento en el paciente enfermo. En primer lugar, debemos obtener los valores de pH, PaCO_2 y HCO_3 para luego poder obtener el diagnóstico correspondiente de cada caso. Tras esto, debemos interpretar si se trata de un componente metabólico (regulado por los riñones) o respiratorio (regulado por los pulmones) y si está o no compensado.

Los mecanismos compensadores son una respuesta fisiológica de nuestro organismo para mantener el pH normal. El sistema respiratorio controla la concentración del dióxido de carbono (CO_2) y el sistema renal controla el valor del bicarbonato (HCO_3). El organismo utiliza estos dos sistemas opuestos para mantener el pH normal. Por ejemplo, si uno de los sistemas se modifica en dirección a la acidosis, el otro lleva a cabo la compensación en la dirección a la alcalosis.

Se muestra un diagrama que ilustra todas las posibles casuísticas en la Figura 1.

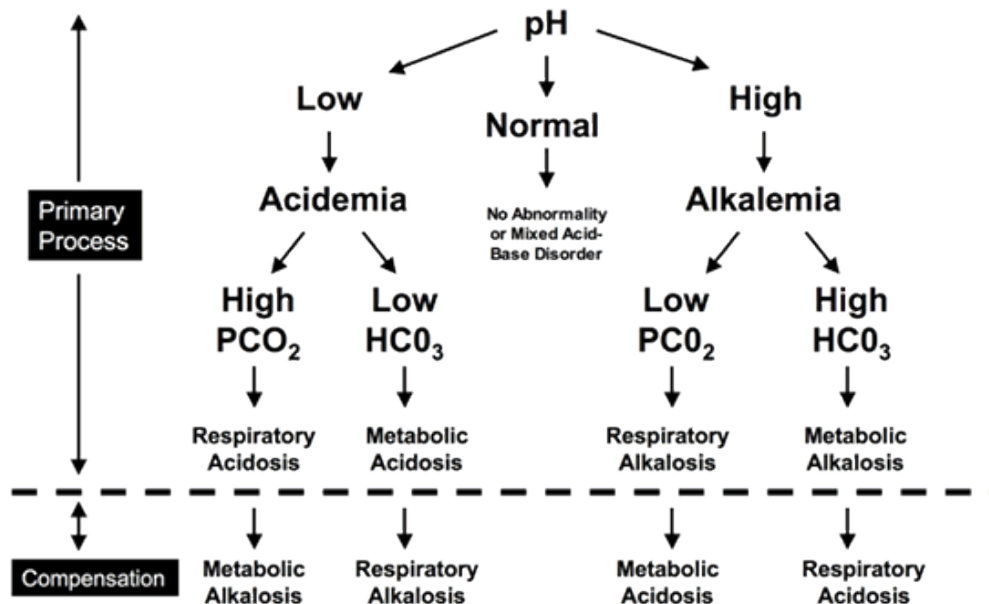


Figura 1: Interpretación de la gasometría arterial

Entonces, los posibles diagnósticos son:

■ Situación respiratoria

- **Acidosis respiratoria:** Es el aumento primario de la presión parcial de dióxido de carbono (PCO_2) con un incremento compensador, o no, de la concentración de bicarbonato (HCO_3). La principal causa es una disminución de la frecuencia respiratoria y/o el volumen (hipoventilación). Dicho diagnóstico lo podemos encontrar de dos tipos: Aguda o Crónica. En primer lugar, la *crónica* no presenta síntomas, es decir, es asintomática. Para continuar, la *aguda* presenta los siguientes síntomas: temblores, contracciones mioclónicas y *asterixis*.

También debemos destacar las posibles causas de la hipoventilación:

- Trastornos que afectan la generación de estímulos respiratorios en el sistema nervioso central.
 - Trastornos que comprometen la transmisión neuromuscular y otras entidades que producen debilidad muscular.
 - Trastornos pulmonares obstructivos, restrictivos y parenquimatosos.
- **Alcalosis respiratoria:** Es una reducción primaria de la presión parcial de dióxido de carbono (PaCO_2) con, o sin, disminución compensadora de la concentración de bicarbonato (HCO_3). El valor de pH puede ser elevado o casi normal. La alcalosis respiratoria puede ser de dos tipos: Aguda o Crónica. La alcalosis respiratoria *crónica* es asintomática, pero la *aguda* puede presentar los siguientes síntomas: mareo, confusión, parestesias, calambres y síncope.

Esta condición es el resultado de hiperventilación, expulsando el exceso de dióxido de carbono (CO_2), ante esta situación los riñones responden disminuyendo el bicarbonato (HCO_3^-) mediante el aumento de la excreción de HCO_3^- o por la disminución de la expulsión de H^+ .

■ Situación metabólica

- **Acidosis metabólica:** Es un trastorno del equilibrio ácido-base que tiene como posibles causas la pérdida excesiva de bicarbonato (HCO_3^-) o un fallo al excretar los iones de hidrógeno que consumen las reservas de bicarbonato. Además, presenta un pH en sangre bastante bajo. Típicamente se considera un descenso compensador de la presión parcial de dióxido de carbono (PCO_2). Este diagnóstico se clasifica como una brecha *aniónica* normal o elevada de acuerdo con la presencia, o ausencia, de aniones no medidos en el suero.

Sus causas son la acumulación de cetonas y ácido láctico, la insuficiencia renal y la ingestión de fármacos o toxinas y la pérdida de HCO_3^- por el tubo digestivo o por el riñón. En los casos más graves, los signos y los síntomas son los siguientes: náuseas y vómitos, letargo e hiperpnea.

- **Alcalosis metabólica:** Consiste en un incremento de la concentración de bicarbonato (HCO_3^-) que conlleva a unos niveles altos del pH en sangre. Además, la presión parcial de dióxido de carbono puede aumentar para retornar el equilibrio ácido-básico. Independientemente de la causa inicial, la persistencia de la alcalosis metabólica indica un aumento de la reabsorción renal de HCO_3^- porque, en condiciones normales, el HCO_3^- se filtra con libertad en los riñones y se excreta.

Para más información en lo referente a la interpretación de las gasometrías arteriales, véase Pruitt, 2010.

3. Materia y Métodos

3.1. Fuzzy Logic Toolbox

La herramienta “Fuzzy logic toolbox”, 2022, provee una serie de funciones, aplicaciones y un entorno gráfico para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos basados en la lógica difusa o *fuzzy logic*. El modelado de un sistema basado en inferencias difusas con este conjunto de herramientas vendría definido por los siguientes pasos:

- Construcción del conjunto de reglas
- Definición de las funciones de pertenencia de entradas a los conjuntos difusos
- Análisis del comportamiento del sistema de inferencias difusas

Durante este proyecto utilizaremos principalmente la herramienta *Fuzzy Logic Designer* para facilitar el desarrollo del modelo siguiendo la estructura ya mencionada.

3.2. Arquitectura del Sistema

En los comienzos de la aplicación de lógica difusa a problemas mediante la computación surge la metodología basada en la idea *Computing with Words* (véase L. A. Zadeh, 1999), donde, modificando el esquema computacional visto hasta el momento, se hace uso de palabras como átomos de información para realizar diversos razonamientos y cálculos.

La toma de decisiones en este tipo de sistemas está implementada mediante el uso de reglas 'IF...THEN' (SI...ENTONCES) con conectores 'OR' (O) o 'AND' (Y).

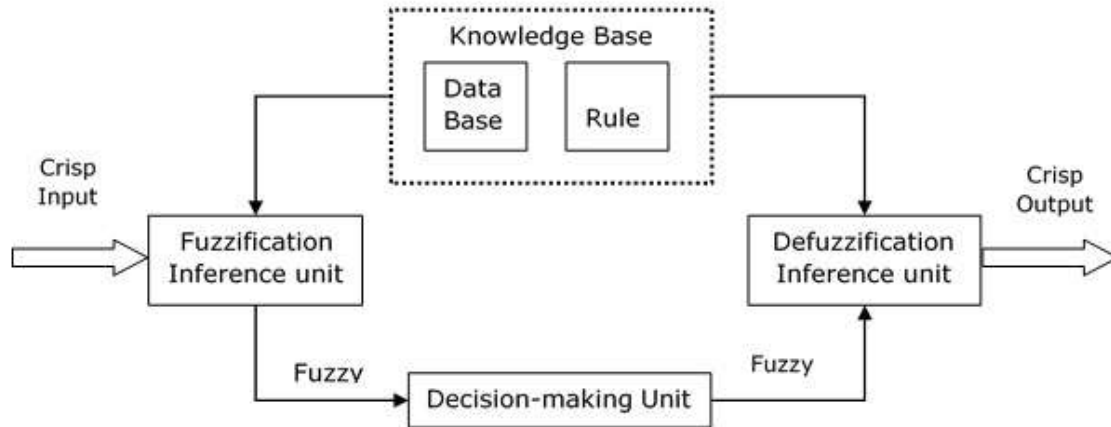


Figura 2: Representación de una posible arquitectura de un sistema de inferencias difusas

Podemos definir la arquitectura de nuestro sistema en cinco principales bloques funcionales:

- **Base de reglas:** Almacenamiento de las reglas difusas 'IF-THEN' mencionadas previamente.
- **Base de datos:** En este apartado se almacenan las definiciones de las funciones de pertenencia a conjuntos difusos con el uso de reglas difusas.
- **Unidad de toma de decisión:** Dedicada a la aplicación de operaciones de los valores sobre las reglas.
- **Unidad de codificación:** Realiza la transformación de valores cuantitativos a valores difusos
- **Unidad de decodificación:** Encargada de realizar la conversión de valores difusos a valores cuantitativos, no siempre será de interés implementar esta unidad.

Se puede ver la representación gráfica de estos bloques funcionales en la Figura 2.

3.3. Método de Diagnóstico

3.3.1. Variables de entrada

Utilizaremos diferentes medidas proporcionadas por la gasometría arterial como son:

- **PaCO₂**: Indica la presión parcial de dióxido de carbono (CO₂) en sangre. Es un buen indicador del correcto funcionamiento de las funciones respiratorias, así como uno de los factores más relevantes en la regulación homeostática del pH del líquido extracelular del cuerpo (ECF). Los valores normales oscilan entre 35-45 mmHg (**normocapnia**). Si las medidas se encontrasen por debajo de dicho rango, estaríamos ante un caso de **hipocapnia**. Si, por el contrario, los valores se situasen por encima, nos encontraríamos ante **hipercapnia**. Como valores críticos para el paciente de mínimo y máximo establecimos 10 mmHg y 80 mmHg, respectivamente.
- **pH sanguíneo**: Indica el porcentaje de hidrógeno que se encuentra en la sangre, midiendo la cantidad de iones ácidos (H⁺). El nivel normal se establece entre 7.35-7.45. Si los valores obtenidos reflejasen una mayor basicidad de la sangre, es decir, superasen 7.45, estaríamos hablando de **alcalemia**. En cambio, si los valores se situasen por debajo de 7.35, estaríamos ante **acidemia**. Los valores mínimo y máximo para esta medida son 6.8 y 7.8, respectivamente.
- **HCO₃**: Indica los niveles de bicarbonato en la sangre. Es, al igual que el PaCO₂, un factor clave en la regulación del pH corporal y el balance ácido-base. Los valores normales se sitúan en el rango de 22-26 mEq/L (**normobicarbonatemia**). Medidas por debajo de dichos valores indicarían **hipobicarbonatemia** y por encima **hiperbicarbonatemia**. El valor mínimo para esta medida es de 10 mEq/L y el máximo de 40 mEq/L.

3.3.2. Variables de salida

Como variables de salida del sistema, **nos centraremos en la causa principal** del trastorno del equilibrio ácido-base. Si, por ejemplo, la salida indica que la causa principal es una acidosis respiratoria parcialmente compensada, es implícito que la compensación es producida por una alcalosis metabólica. Esto es así también en el resto de casos.

- **Situación respiratoria:**

- **Acidosis sin compensación**: El pH de la sangre es ácido y se obtienen valores elevados de PaCO₂. No existe compensación metabólica.
- **Acidosis parcialmente compensada**: Se da cuando, existiendo una acidosis respiratoria, el cuerpo trata de compensarla metabólicamente. Esto se ve reflejado en valores elevados del HCO₃.
- **Normal**: Los niveles de pH, PaCO₂ y HCO₃ son normales.
- **Alcalosis parcialmente compensada**: Existe una alcalosis respiratoria con una compensación metabólica, es decir, una disminución de la cantidad de HCO₃ en sangre por debajo de los niveles normales.

- **Alcalosis sin compensación:** De forma inversa al primer caso, el pH de la sangre es básico y se obtienen valores bajos de PaCO_2 . No existe tampoco compensación metabólica.

■ **Situación metabólica:**

- **Acidosis sin compensación:** El pH de la sangre es ácido y los valores del HCO_3 son bajos. No existe compensación respiratoria.
- **Acidosis parcialmente compensada:** El pH de la sangre sigue siendo ácido y los bicarbonatos siguen estando bajos, pero existe una compensación respiratoria que disminuye los valores de PaCO_2 en sangre.
- **Normal:** Los niveles de pH, PaCO_2 y HCO_3 son normales.
- **Alcalosis parcialmente compensada:** Los niveles de HCO_3 son elevados y el pH supera los rangos normales, además, los valores del PaCO_2 son de igual manera altos, existiendo una compensación respiratoria.
- **Alcalosis sin compensación:** El pH de la sangre es alcalino y los valores del HCO_3 son altos. No existe compensación respiratoria.

3.3.3. Reglas del sistema

Para la elaboración de las reglas que conformarán nuestro sistema, nos basaremos en toda la información comentada hasta este punto y nos guiaremos utilizando el diagrama de la Figura 1.

Cabe mencionar que puede que esta base de conocimiento no esté totalmente completa, pero no supone un problema ya que los métodos difusos siguen funcionando correctamente sin la necesidad de tener un conocimiento absoluto.

1. Si el pH es bajo (acidemia), el PaCO_2 es alto (hipercapnia) y el HCO_3 es normal (normobicarbonatemia), entonces el paciente sufre una **acidosis respiratoria sin compensación metabólica**.
2. Si el pH es bajo (acidemia), el PaCO_2 es alto (hipercapnia) y el HCO_3 es también alto (hiperbicarbonatemia), entonces estamos ante una **acidosis respiratoria parcialmente compensada con una alcalosis metabólica**.
3. Si el pH es bajo (acidemia), el PaCO_2 es alto (hipercapnia) y el HCO_3 es bajo (hipobicarbonatemia), entonces estamos ante una **acidosis respiratoria y una acidosis metabólica**, obviamente ambas sin compensación.
4. Si el pH es bajo (acidemia), el PaCO_2 es bajo (hipocapnia) y el HCO_3 también es bajo (hipobicarbonatemia), entonces estamos ante un caso de **acidosis metabólica parcialmente compensada con una alcalosis respiratoria**.
5. Si el pH es bajo (acidemia), el PaCO_2 es normal (normocapnia) y el HCO_3 es bajo (hipobicarbonatemia), entonces el paciente sufre una **acidosis metabólica sin compensación respiratoria**.

6. Si el pH es normal, el PaCO_2 es normal (normocapnia) y el HCO_3 es también normal (normobicarbonatemia), entonces **la situación respiratoria y metabólica son ambas normales**.
7. Si el pH es alto (alcalemia), el PaCO_2 es bajo (hipocapnia) y el HCO_3 es normal (normobicarbonatemia), entonces estamos ante una **alcalosis respiratoria sin compensación metabólica**.
8. Si el pH es alto (alcalemia), el PaCO_2 es bajo (hipocapnia) y el HCO_3 es alto (hiperbicarbonatemia), entonces estamos ante una **alcalosis respiratoria y una alcalosis metabólica**, ambas, de nuevo, sin compensación.
9. Si el pH es alto (alcalemia), el PaCO_2 es bajo (hipocapnia) y el HCO_3 es bajo (hipobicarbonatemia), entonces estamos ante una **alcalosis respiratoria parcialmente compensada con una acidosis metabólica**.
10. Si el pH es alto (alcalemia), el PaCO_2 es normal (normocapnia) y el HCO_3 es alto (hiperbicarbonatemia), entonces el paciente sufre una **alcalosis metabólica sin compensación respiratoria**.
11. Si el pH es alto (alcalemia), el PaCO_2 es alto (hipercapnia) y el HCO_3 también es alto (hiperbicarbonatemia), entonces estamos ante un caso de **alcalosis metabólica parcialmente compensada con una acidosis respiratoria**.

4. Implementación

Para la implementación, utilizaremos la herramienta *Fuzzy Logic Toolbox*, explicada anteriormente. La estructura general que tendrá nuestro sistema está representada en la Figura 3.

El sistema de inferencia difusa que emplearemos será el **Mamdani**, siendo este uno de los sistemas más conocidos. Los pasos que realiza este método son:

- Difuminar (*fuzzificar*) todos los valores de entrada en funciones de pertenencia difusas.
- Ejecutar todas las reglas aplicables en la base de reglas para computar la salida de las funciones difusas.
- *Defuzzificar* las salidas de las funciones difusas para obtener los valores reales de salida.

Lo más notable a destacar de estos pasos es el de computar las salidas de las funciones difusas. Para esto, necesitamos poder aplicar ciertos operadores a las salidas de las funciones. Los operadores que necesitamos son los equivalentes a *AND*, *OR* y *NOT* en la lógica clásica. La sustitución más común de estos son los que se conocen como los *operadores de Zadeh*: $AND(x, y) = MIN(x, y)$, $OR(x, y) = MAX(x, y)$ y $NOT(x) = 1 - x$, que son los que emplearemos. Además de emplear como método de *defuzzificación* el centroide.

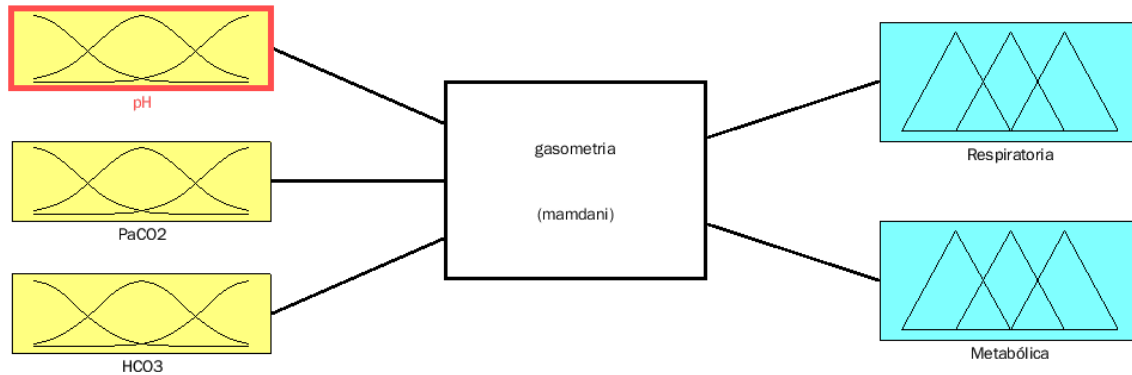


Figura 3: Arquitectura general del sistema de inferencia difuso

4.1. Implementación de las variables de entrada

A continuación, se detallará la implementación en la herramienta de *Matlab* de cada una de las variables de entrada de nuestro sistema.

- **pH:** Indica el valor del pH obtenido tras la gasometría arterial. Sus valores se sitúan en el intervalo $[6,8, 7,8]$, por lo que el universo referencial de esta variable será también dicho intervalo. Los conjuntos difusos que emplearemos para categorizar esta entrada y cuyas funciones de trasfencia tienen todas forma trapezoidal, son:
 - **Acidemia:** Toma el valor 1 entre 6,8 y 7,2, decrece de forma lineal entre 7,2 y 7,35, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros $[6,8 \ 6,8 \ 7,2 \ 7,35]$.
 - **pH_Normal:** En valores menores que 7,2 toma el valor 0, crece de forma lineal entre 7,2 y 7,35, toma el valor 1 entre 7,35 y 7,45, decrece de forma lineal entre 7,45 y 7,6, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros $[7,2 \ 7,35 \ 7,45 \ 7,6]$.
 - **Alcalosis:** En valores menores que 7,45 toma el valor 0 y crece de forma lineal entre 7,45 y 7,6, y toma el valor 1 entre 7,6 y 7,8. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros $[7,45 \ 7,6 \ 7,8 \ 7,8]$.

En la Figura 4 se muestran las funciones descritas anteriormente para el pH, implementadas en el software *Fuzzy Logic ToolBox*.

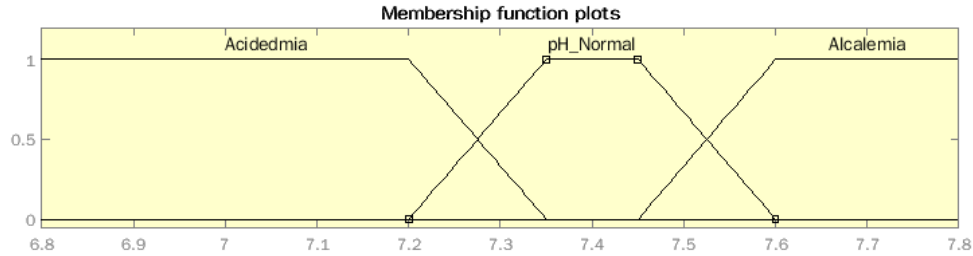


Figura 4: Funciones de transferencia de la variable pH

- **PaCO₂**: Indica el valor de la PaCO₂ obtenida tras la gasometría. Sus valores se sitúan en el intervalo [10, 80], por lo que el universo referencial de esta variable será también dicho intervalo. Los conjuntos difusos que emplearemos para categorizar esta entrada y cuyas funciones de transferencia tienen todas forma trapezoidal, son:

- **Hipocapnia**: Toma el valor 1 entre 10 y 20, decrece de forma lineal entre 20 y 35, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [10 10 20 35].
- **Normocapnia**: En valores menores que 20 toma el valor 0, crece de forma lineal entre 20 y 35, toma el valor 1 entre 35 y 45, decrece de forma lineal entre 45 y 60, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [20 35 45 60].
- **Hipercapnia**: En valores menores que 45 toma el valor 0 y crece de forma lineal entre 45 y 60, y toma el valor 1 entre 60 y 80. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [45 60 80 80].

En la Figura 5 se muestran las funciones descritas anteriormente para el PaCO₂, implementadas en el software *Fuzzy Logic Toolbox*.

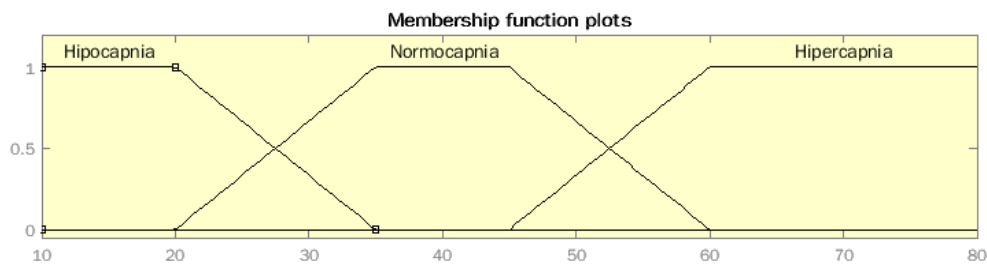


Figura 5: Funciones de transferencia de la variable PaCO₂

- **HCO₃**: Indica el valor del HCO₃ obtenido en la gasometría. Sus valores se sitúan en el intervalo [10, 40], y, de nuevo, el universo referencial de esta variable será también dicho intervalo. Los conjuntos difusos que emplearemos para categorizar esta entrada y cuyas funciones de transferencia tienen todas forma trapezoidal, son:

- **Hipobicarbonatemia:** Toma el valor 1 entre 10 y 18, decrece de forma lineal entre 18 y 22, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [10 10 18 2].
- **Normobicarbonatemia:** En valores menores que 18 toma el valor 0, crece de forma lineal entre 18 y 22, toma el valor 1 entre 22 y 26, decrece de forma lineal entre 26 y 30, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [18 22 26 30].
- **Hiperbicarbonatemia:** En valores menores que 26 toma el valor 0, crece de forma lineal entre 26 y 30, y toma el valor 1 entre 30 y 40. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [26 30 40 40].

En la Figura 6 se muestran las funciones descritas anteriormente para el HCO_3 , implementadas en el software *Fuzzy Logic ToolBox*.

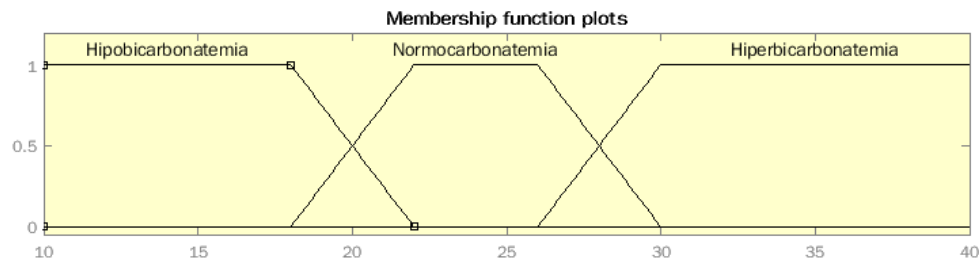


Figura 6: Funciones de transferencia de la variable HCO_3

4.2. Implementación de las variables de salida

- **Situacion_respiratoria:** Esta variable será la que refleje el diagnóstico respiratorio del paciente, utilizando cuatro conjuntos difusos cuyos valores se sitúan entre 0 y 100. Las funciones de transferencia de dichos conjuntos (todas con forma trapezoidal) son:
 - **Acidosis_sin_compensacion:** Toma el valor 1 entre 0 y 5, decrece de forma lineal entre 5 y 20, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [0 0 5 20].
 - **Acidosis_parcialmente_compensada:** En valores menores que 5 toma el valor 0, crece de forma lineal entre 5 y 20, toma el valor 1 entre 20 y 30, decrece de forma lineal entre 30 y 45, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [5 20 30 45].
 - **Normal:** En valores menores que 30 toma el valor 0, crece de forma lineal entre 30 y 45, toma el valor 1 entre 45 y 55, decrece de forma lineal entre 55 y 70, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [30 45 55 70].
 - **Alcalosis_parcialmente_compensada:** En valores menores que 55 toma el valor 0, crece de forma lineal entre 55 y 70, toma el valor 1 entre 70 y 80, decrece de forma lineal entre 80 y 95, y después toma siempre el valor 0. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [55 70 80 95].

- **Alcalosis_sin_compensacion:** En valores menores que 80 toma el valor 0 y crece de forma lineal entre 80 y 95, y toma el valor 1 entre 95 y 100. Codificado en Matlab con los siguientes parámetros [80 95 100 100].

En la Figura 7 se representan las funciones detalladas anteriormente en el software *Fuzzy Logic ToolBox*.

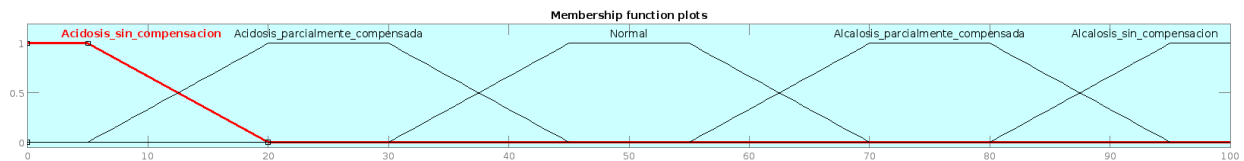


Figura 7: Funciones de trasferencia de las variables Situacion_respiratoria y Situacion_metabolica

- **Situacion_metabolica:** Esta variable toma valores iguales a la situación respiratoria ya que conceptualmente estamos modelando lo mismo, por lo que la implementación es idéntica (véase Figura 7).

4.3. Implementación de las reglas del sistema

En este apartado veremos cómo se codifican en Matlab las reglas vistas en la sección 3.3.3

1. SI pH ES **Acidemia** Y PaCO_2 ES **Hipercapnia** Y HCO_3 ES **Normobicarbonatemia** ENTONCES Situacion_respiratoria ES **Acidosis_sin_compensacion**
2. SI pH ES **Acidemia** Y PaCO_2 ES **Hipercapnia** Y HCO_3 ES **Hiperbicarbonatemia** ENTONCES Situacion_respiratoria ES **Acidosis_parcialmente_compensada**
3. SI pH ES **Acidemia** Y PaCO_2 ES **Hipercapnia** Y HCO_3 ES **Hipobicarbonatemia** ENTONCES Situacion_respiratoria ES **Acidosis_sin_compensacion** Y Situacion_metabolica ES **Acidosis_sin_compensacion**
4. SI pH ES **Acidemia** Y PaCO_2 ES **Hipocapnia** Y HCO_3 ES **Hipobicarbonatemia** ENTONCES Situacion_metabolica ES **Acidosis_parcialmente_compensada**
5. SI pH ES **Acidemia** Y PaCO_2 ES **Normocapnia** Y HCO_3 ES **Hipobicarbonatemia** ENTONCES Situacion_metabolica ES **Acidosis_sin_compensacion**
6. SI pH ES **Normal** Y PaCO_2 ES **Normocapnia** Y HCO_3 ES **Normobicarbonatemia** ENTONCES Situacion_respiratoria ES **Normal** Y Situacion_metabolica ES **Normal**
7. SI pH ES **Alcalemia** Y PaCO_2 ES **Hipocapnia** Y HCO_3 ES **Normobicarbonatemia** ENTONCES Situacion_respiratoria ES **Alcalosis_sin_compensacion**
8. SI pH ES **Alcalemia** Y PaCO_2 ES **Hipocapnia** Y HCO_3 ES **Hiperbicarbonatemia** ENTONCES Situacion_respiratoria ES **Alcalosis_sin_compensacion** Y Situacion_metabolica ES **Alcalosis_sin_compensacion**

9. SI pH ES **Alcalemia** Y PaCO₂ ES **Hipocapnia** Y HCO₃ ES **Hipobicarbonatemia** ENTONCES Situacion_respiratoria ES **Alcalosis_parcialmente_compensada**
10. SI pH ES **Alcalemia** Y PaCO₂ ES **Normocapnia** Y HCO₃ ES **Hiperbicarbonatemia** ENTONCES Situacion_metabolica ES **Alcalosis_sin_compensacion**
11. SI pH ES **Alcalemia** Y PaCO₂ ES **hipercapnia** Y HCO₃ ES **Hiperbicarbonatemia** ENTONCES Situacion_metabolica ES **Alcalosis_parcialmente_compensada**

Podemos ver en la Figura 8 las reglas implementadas en el software *Fuzzy Logic ToolBox*.

The screenshot displays the Fuzzy Logic ToolBox interface. The top section contains 11 rules in Spanish, numbered 1 through 11. The bottom section shows the graphical representation of the first rule, which is selected. The rule is: "If (ph is Acidemia) and (PaCO2 is Hipercapnia) and (HCO3 is Normobicarbonatemia) then (Situacion_respiratoria is Acidosis_sin_compensacion) (1)".

The graphical representation shows the following structure:

- If** section:
 - ph is**: A list box containing "Acidemia", "Normal", "Alcalemia", and "none". "Acidemia" is selected.
 - and** connector.
 - PaCO2 is**: A list box containing "Hipocapnia", "Normocapnia", "Hipercapnia", and "none". "Hipercapnia" is selected.
 - and** connector.
 - HCO3 is**: A list box containing "Hipobicarbonatemia", "Normobicarbonatemia", "Hiperbicarbonatemia", and "none". "Normobicarbonatemia" is selected.
- Then** section:
 - Situacion_respiratoria is**: A list box containing "Acidosis_sin_compensacion", "Acidosis_parcialmente_compensada", "Normal", "Alcalosis_sin_compensacion", "Alcalosis_parcialmente_compensada", and "none". "Acidosis_sin_compensacion" is selected.
 - and** connector.
 - Situacion_metabolica is**: A list box containing "Acidosis_sin_compensacion", "Acidosis_parcialmente_compensada", "Normal", "Alcalosis_sin_compensacion", "Alcalosis_parcialmente_compensada", and "none". "Acidosis_sin_compensacion" is selected.
- Weight**: A text box containing the value "1".
- Connection**: Radio buttons for "or" and "and". "and" is selected.
- Buttons**: "Delete rule", "Add rule", "Change rule", "<<", ">>", and "Close".
- FIS Name**: A text box containing "gasometria".

Figura 8: Implementación de las reglas

5. Resultados

Para probar el funcionamiento del sistema, emplearemos distintos escenarios de prueba para ver cómo se comporta.

1. En este caso, obtenemos los siguientes valores tras la gasometría arterial:

- pH = 7.2
- PaCO₂ = 55 mmHg
- HCO₃ = 25 mEq/L

El experto nos indica que este paciente presenta una **acidosis respiratoria sin compensación**. Veamos cómo se comporta nuestro sistema:

Se pueden ver las reglas que se activan en la Figura 9. En la salida, vemos que el valor de la situación respiratoria es de 7.52, indicando que la causa principal es, efectivamente, una **acidosis respiratoria sin compensación**, ya que la salida indica una pertenencia total al conjunto difuso de acidosis respiratoria sin compensación. De la situación metabólica no se puede decir nada, ya que no se activa ninguna regla que determine cómo. En este caso no tenemos dudas sobre el diagnóstico y podemos decir que el sistema está de acuerdo con el experto y que funciona correctamente.

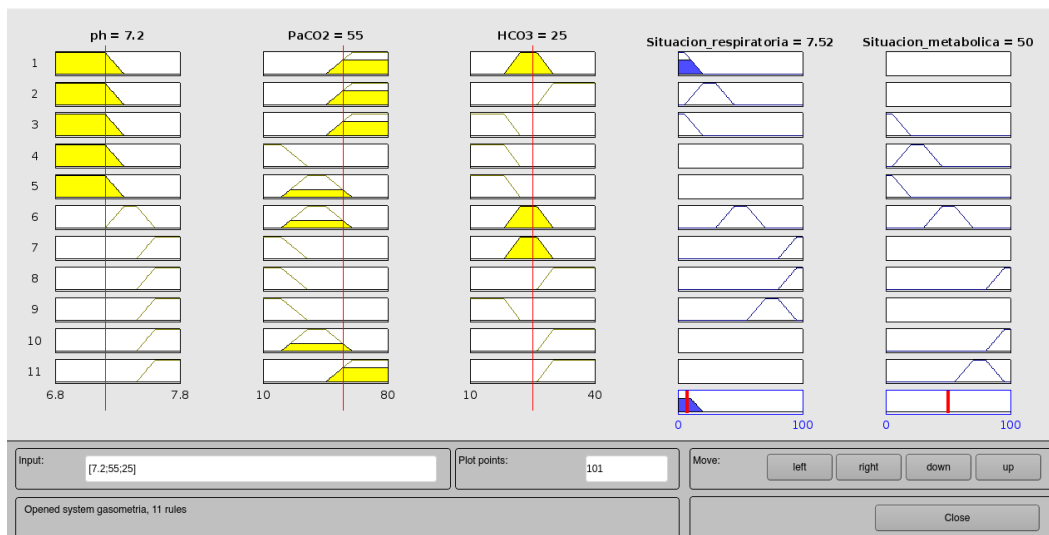


Figura 9: Escenario de prueba 1

2. Los valores que se obtienen del paciente tras la gasometría en este caso son:

- pH = 7.1
- PaCO₂ = 55 mmHg
- HCO₃ = 27 mEq/L

El experto en este caso tiene dudas; sabe que se produce una acidosis respiratoria, pero no sabe seguro si está compensada o no. Veamos cómo se comporta nuestro sistema:

Se pueden ver las reglas que se activan en la Figura 10. Vemos que ahora se activan más de una regla, y que la salida es que la causa principal es una acidosis respiratoria, pero el sistema nos dice que puede ser tanto acidosis respiratoria sin compensar como acidosis respiratoria parcialmente compensada. El valor de salida es 16.2, que efectivamente, se corresponde con una pertenencia parcial tanto al conjunto difuso de acidosis respiratoria sin compensar como al conjunto difuso de acidosis respiratoria parcialmente compensada, por lo que no podemos estar totalmente seguros de cuál diagnosticar. Si tenemos que decidirnos por una, nos decidiremos por el conjunto difuso con una mayor asignación, en este caso, nos decidiremos por una **acidosis respiratoria parcialmente compensada**. El sistema en este caso puede dar una conclusión fundamentada en qué conjunto tiene una mayor pertenencia de la salida, mientras que el médico seguramente basaría su diagnóstico en heurísticas y conocimientos de casos pasados, pero eso podría conducir a veces a diagnósticos acertados, y otras veces a diagnósticos erróneos. En este caso, el diagnóstico de nuestro sistema es más explicable y fiable.

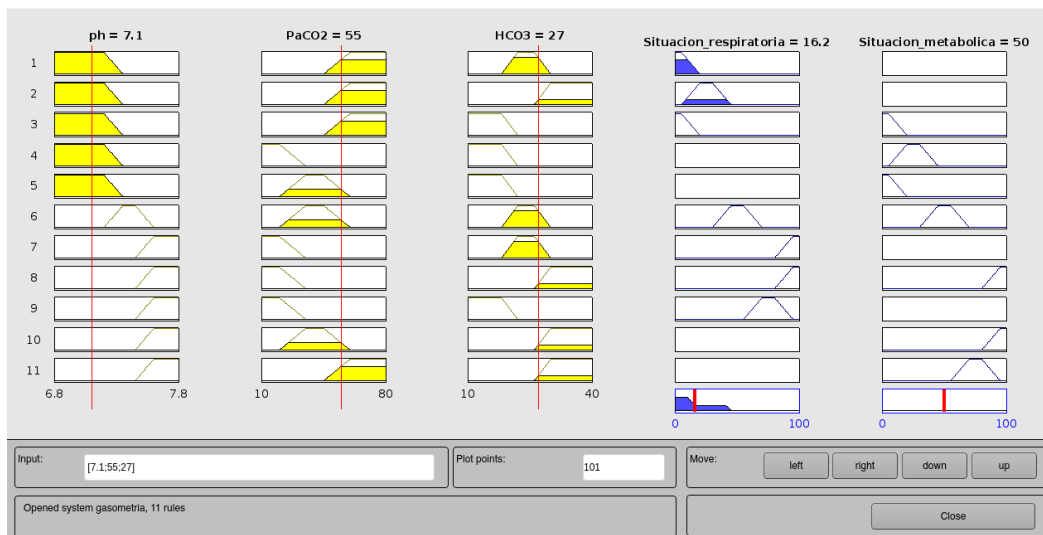


Figura 10: Escenario de prueba 2

3. Tras la gasometría, obtenemos los siguientes valores:

- pH = 7
- PaCO₂ = 60 mmHg
- HCO₃ = 15 mEq/L

El experto nos indica que este paciente está muy fastidiado y que tiene un pH extremadamente alto, presentando una **acidosis respiratoria** y una **acidosis metabólica**, ambas sin compensación.

Se pueden ver las reglas que se activan en la Figura 10. En este caso, nuestro sistema indica claramente que se produce una **acidosis respiratoria sin compensación** y una **acidosis metabólica sin compensación**, estando en total acuerdo con el experto.

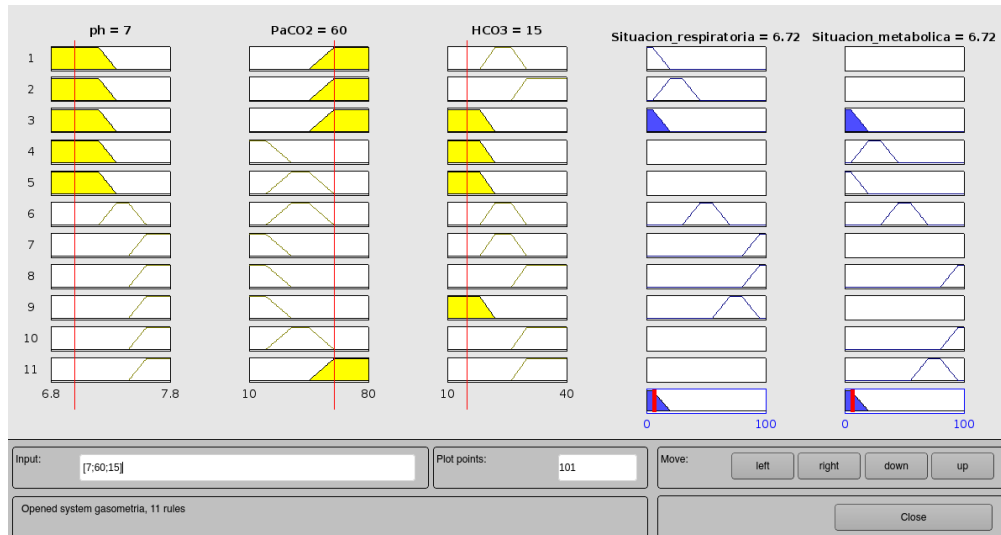


Figura 11: Escenario de prueba 3

4. Tras realizar la gasometría arterial del paciente hemos obtenido los siguientes datos:

- pH = 7.3
- PaCO₂ = 15 mmHg
- HCO₃ = 15 mEq/L

Tras el estudio de los datos recibidos, el experto nos indica que el paciente padece **acidosis metabólica parcialmente compensada por una alcalosis respiratoria**. A continuación, comprobaremos qué salida obtenemos con nuestro sistema:

En la Figura 12 podemos observar como sólo se activa la salida de la regla 4, dando como diagnóstico una **acidosis metabólica parcialmente compensada por una alcalosis respiratoria**, por ende, en este caso, el sistema coincide con el experto.

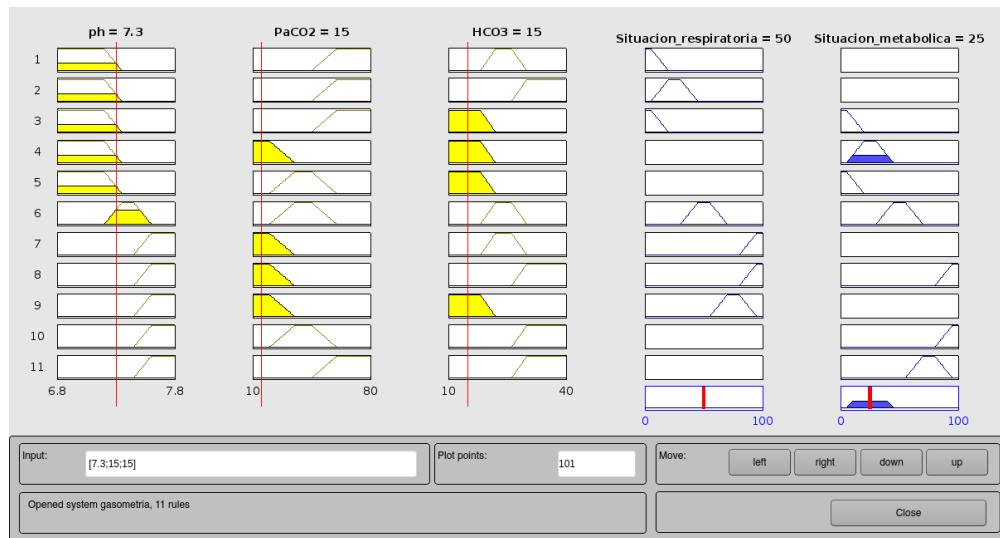


Figura 12: Escenario de prueba 4

5. Los valores obtenidos del paciente tras la gasometría en este caso son:

- pH = 7.2
- PaCO₂ = 41 mmHg
- HCO₃ = 16 mEq/L

Tras el estudio de los datos obtenidos, el experto llegó a la conclusión de que el diagnóstico se corresponde a una **acidosis metabólica sin compensación**.

Vemos como, en la Figura 13, nuestro sistema denota, al igual que el experto, que este caso se corresponde a una **acidosis metabólica sin compensación**.

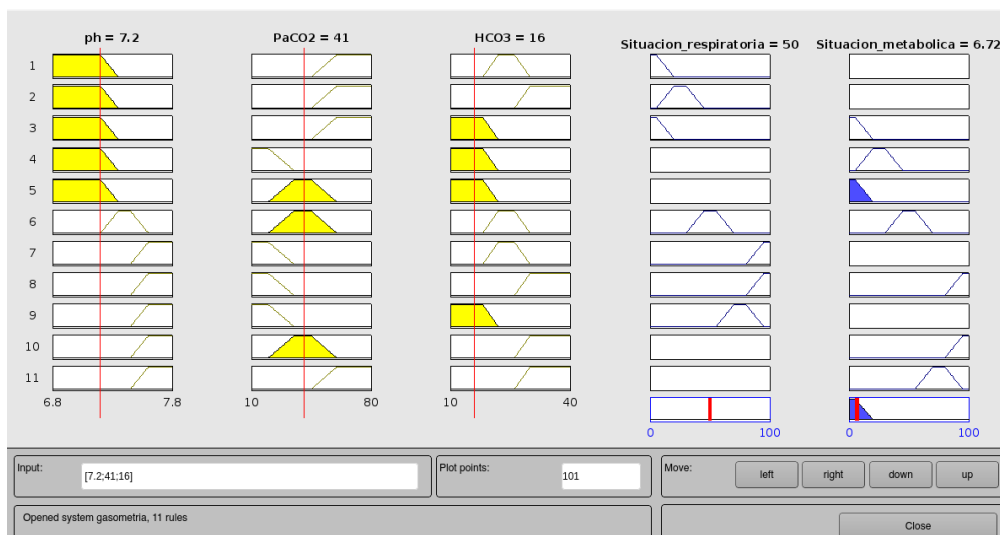


Figura 13: Escenario de prueba 5

6. ■ pH = 7.42
- PaCO₂ = 43 mmHg
- HCO₃ = 24.5 mEq/L

Con estos datos de entrada el experto afirma que la situación de nuestro paciente es completamente **normal**.

Observemos la Figura 14 que se ha obtenido el mismo diagnóstico que el experto: **una situación respiratoria y metabólica estables**.

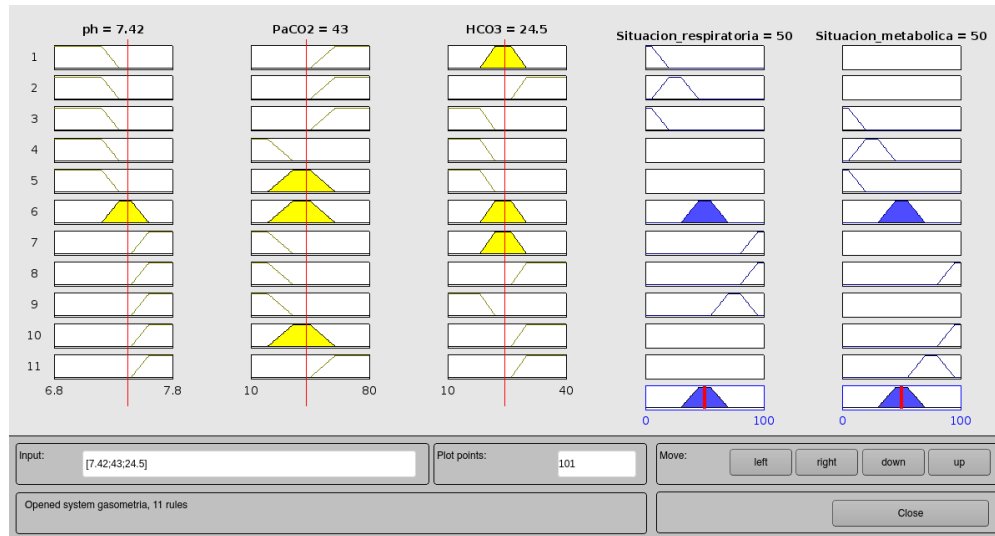


Figura 14: Escenario de prueba 6

7. Una vez realizada la gasometría arterial en el paciente en cuestión, obtenemos los siguientes valores:
- pH = 7.55
- PaCO₂ = 20 mmHg
- HCO₃ = 26 mEq/L

Nuestro experto afirma que el paciente padece una **alcalosis respiratoria sin rasgos de compensación metabólica**.

Estudiemos la salida de nuestro sistema mostrada en la Figura 15. El sistema indica como causa única el decrementado valor de PaCO₂ mostrando un resultado de **alcalosis respiratoria sin compensación**. Por lo tanto podemos afirmar que para este ejemplo, nuestro sistema consigue modelar correctamente la situación y ofrecer un diagnóstico acertado y acorde con el dado por el experto.

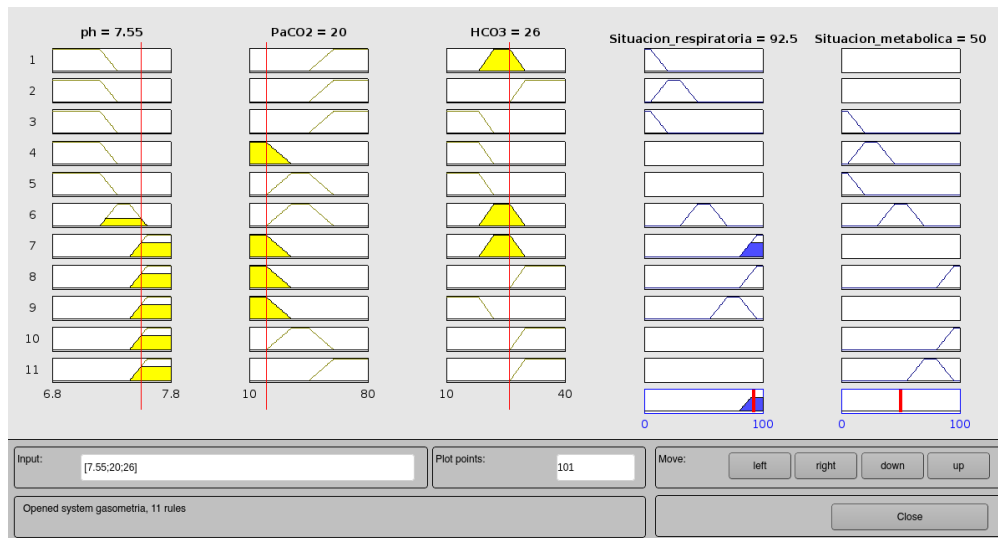


Figura 15: Escenario de prueba 7

8. Tras realizar la prueba de gasometría arterial a este paciente en cuestión obtenemos:

- pH = 7.6
- PaCO₂ = 20 mmHg
- HCO₃ = 35 mEq/L

Una vez tomados dichos valores se los trasladamos a nuestro experto para recibir el siguiente diagnóstico: **alcalosis respiratoria y metabólica**. Una vez obtenidos los valores de la prueba y el diagnóstico de referencia aportado por nuestro experto, podemos proceder a introducir los valores en el sistema e interpretar los resultados.

Observando la Figura 16, podemos ver que el sistema atribuye una pertenencia total a los conjuntos de **alcalosis respiratoria sin compensación** y **alcalosis metabólica sin compensación**. Por lo tanto el sistema genera un diagnóstico correcto ante los valores introducidos, siendo así alcalosis respiratoria y alcalosis metabólica el resultado final de nuestro sistema.

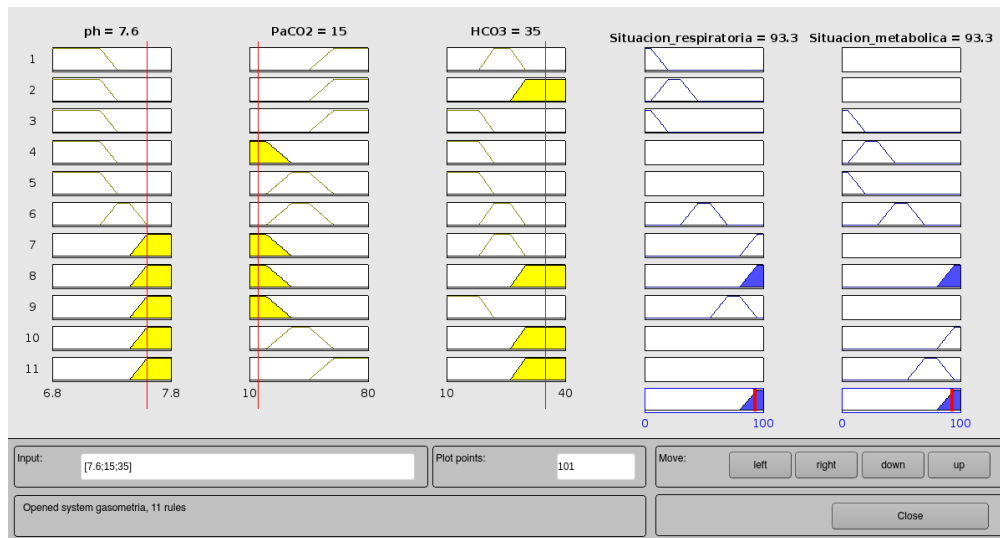


Figura 16: Escenario de prueba 8

9. En este caso, tras realizar la gasometría, obtenemos los siguientes valores:

- pH = 7.6
- PaCO₂ = 22 mmHg
- HCO₃ = 19 mEq/L.

Nuestro experto nos dice que el paciente sufre una **alcalosis respiratoria parcialmente compensada**; la compensación se da por una acidosis metabólica que, aunque leve, ayuda en la normalización de los niveles de pH.

Así, nuestro sistema nos indica que, efectivamente, el conjunto difuso con mayor asignación es el de **alcalosis respiratoria parcialmente compensada**. Sin embargo, vemos también como el sistema asigna una pertenencia (menor) al conjunto de alcalosis respiratoria sin compensación, ya que los niveles de HCO₃ no son excesivamente bajos.

La salida del sistema se muestra en la Figura 17.

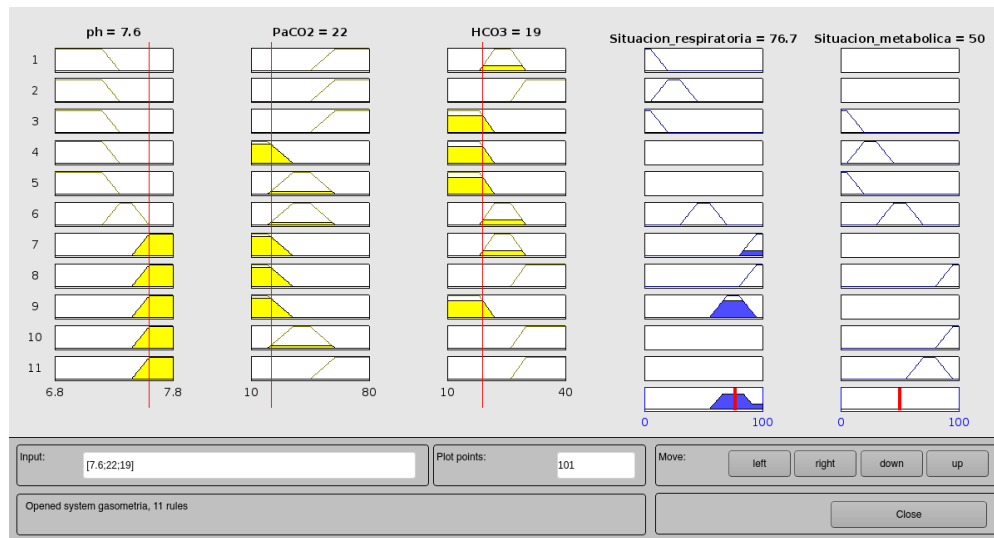


Figura 17: Escenario de prueba 9

10. Una vez realizada la gasometría arterial al paciente hemos obtenido los siguientes valores:

- pH = 7.55
- PaCO₂ = 40 mmHg
- HCO₃ = 35 mEq/L.

Ante los valores dados consultamos a nuestro correspondiente experto en busca de un diagnóstico de referencia. Tras un pequeño instante de contemplación, el experto diagnostica una **alcalosis metabólica sin compensación**.

Obtenido el resultado esperado para el sistema introducimos los datos de entrada y observamos su comportamiento: Como podemos ver en la Figura 18, no se puede aportar información fiable sobre la situación respiratoria del paciente, sin embargo, si podemos ver una clara pertenencia al conjunto difuso de alcalosis metabólica sin compensación.

Dicho esto podemos concluir que nuestro sistema diagnostica una **alcalosis metabólica sin compensación** y que, una vez más, esto concuerda con el diagnóstico del experto.

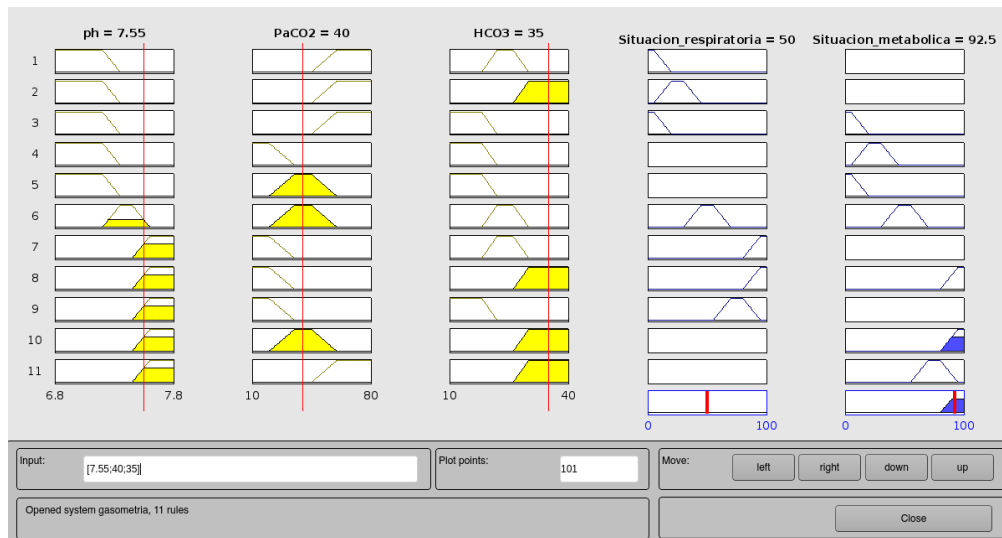


Figura 18: Escenario de prueba 10

11. En este caso, obtenemos los siguientes valores del paciente:

- pH = 7.65
- PaCO₂ = 58 mmHg
- HCO₃ = 32 mEq/L.

Tras consultar con nuestro experto, este nos dice que estamos ante un claro caso de **alcalosis metabólica parcialmente compensada**.

Se muestran en la Figura 19 los resultados obtenidos por el sistema.

Como observamos, el grado de pertenencia al conjunto difuso de la **alcalosis metabólica parcialmente compensada** es muy alto, por lo que podemos decir que el sistema coincide con el diagnóstico del experto. En cambio, podemos ver también como el sistema asigna una pertenencia, aunque mucho menor, al conjunto de alcalosis sin compensación. Esto se debe a que los valores del PaCO₂ no son tan altos como para determinar claramente una hipercapnia. En este sentido, nuestro sistema ofrece una mayor información acerca del estado del paciente que el experto.

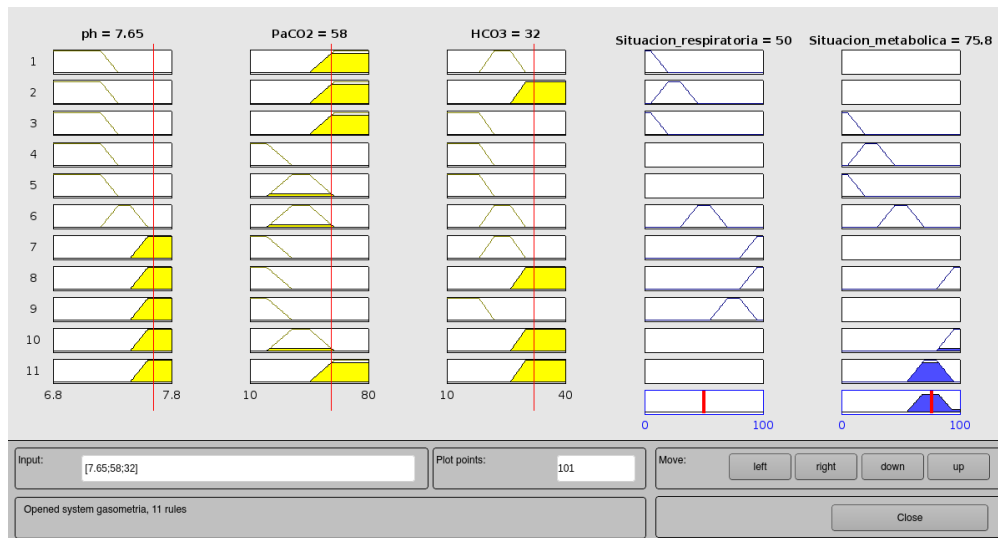


Figura 19: Escenario de prueba 11

12. En este caso, obtenemos los siguientes valores del paciente:

- pH = 7.35
- PaCO₂ = 60 mmHg
- HCO₃ = 15 mEq/L.

Tras mostrarle los datos al experto, el experto se queda perplejo; no entiende como pueden darse esos datos. No tiene sentido que el paciente tenga hipercapnia y hipobicarbonatemia, pero presenta un pH normal. Pero el experto, que no quiere quedar como que no sabe que está pasando, indica que el paciente está en condiciones normales, puesto que el pH es normal.

Se muestran en la Figura 20 los resultados obtenidos por el sistema.

Podemos observar que no se consigue salida alguna; Ninguna regla del sistema se puede activar con las condiciones dadas. ¿Qué está pasando? Podría ser que a nuestro sistema le falten reglas, que es una suposición que podría ser cierta, pero lo que en realidad está pasando es que esta es una situación imposible (al menos, con estas únicas variables de entrada. Podría ser que el pH lo regule otro proceso del cuerpo, pero nos centraremos a nuestro problema), no puede ser que el pH esté en un valor normal, si el paciente presenta hipercapnia y hipobicarbonatemia. Ante esto, podemos concluir que se trata de un error de las variables de entrada, posiblemente porque se haya realizado mal la gasometría.

El sistema funciona correctamente, avisando de un error, mientras que el experto se dejaría llevar por sus inquietudes y daría un resultado erróneo, al no darse de cuenta de que algo va mal.

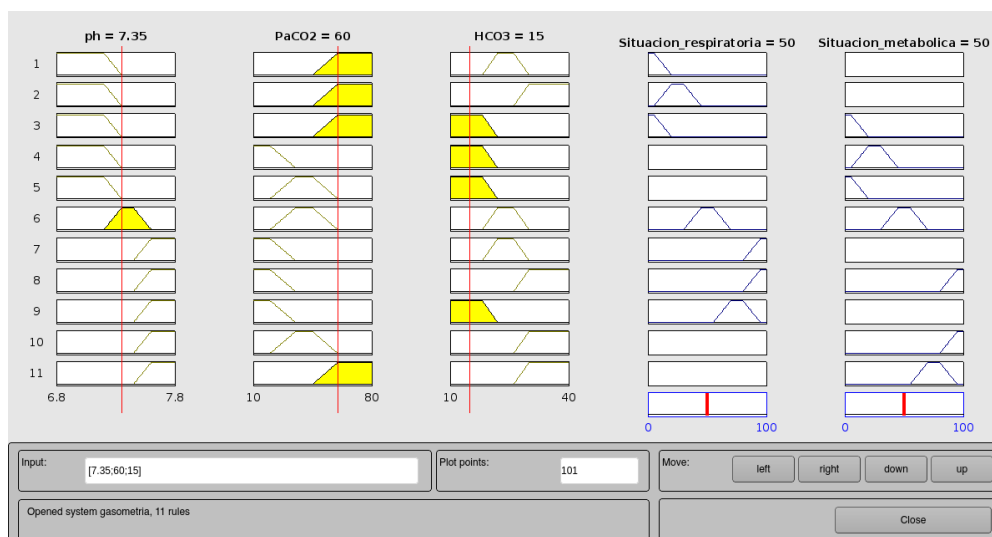


Figura 20: Escenario de prueba 12

6. Discusión

A la vista de los resultados, podemos concluir que nuestro sistema funciona correctamente, en todos los casos de prueba que hemos propuesto. Además, funciona incluso mejor que si el diagnóstico fuese el del experto que utilizamos en nuestro escenario, ya que este último no avisaría del caso de error (caso 12), en el que se avisaría de que los datos de la entrada son imposibles.

Hemos visto que aunque la base de conocimientos no esté totalmente completa, el sistema puede dar un diagnóstico correcto en muchos casos, mostrando así la robustez que nos ofrece el uso de los conjuntos difusos junto al lenguaje natural y el sentido común. También destacar la importancia de la ausencia de subjetividad en los diagnósticos, característica que convencionalmente es imposible de conseguir.

El sistema muestra una gran potencia de diagnóstico, pero es algo tosco e incómodo en la introducción de las entradas y la interpretación de las salidas. Sin embargo, al no ser un error en el modelado en sí del problema, es un defecto que puede ser fácilmente mejorado.

Por último, cabe mencionar la ventaja de poder tener un sistema experto (basado en este caso en lógica difusa) frente a un experto humano, ya que el sistema experto no tiene las necesidades de un humano y puede trabajar sin las restricciones de las personas, ofreciendo un servicio el cual estaría disponible en todo momento y no se vería afectado por el cansancio propio de una jornada laboral.

7. Conclusiones

El propósito del proyecto es claro: generar un sistema difuso capaz de generalizar el problema de la diagnosticación de trastornos de equilibrios ácido-base mediante el uso de un sistema de lógica difusa, implementado utilizando lenguaje natural.

Por una parte, y como se pudo ver en la discusión, hemos obtenido resultados muy satisfactorios, por lo que podemos considerar que el proyecto ha sido un éxito.

Por otra parte, como trabajo futuro, se debería refinar la implementación del sistema añadiendo más entradas que nos ayuden a obtener un diagnóstico más preciso. Por esta razón, en algunos de los casos de test que hemos realizado, los resultados no eran exactos o se producía un error por una situación imposible. La literatura previa (Amer, 2011) refleja resultados positivos con el uso de un número mayor de datos de entrada, por lo cual podríamos añadir los siguiente parámetros:

- Presión parcial de oxígeno (PaO_2).
- Saturación arterial de oxígeno (SaO_2).
- Concentración de metahemoglobina (MetHb).
- Concentración de carboxihemoglobina (COHb).

También sería interesante tener en cuenta las características del contexto de cada paciente que, en consecuencia, pueden influir drásticamente en obtener el diagnóstico correcto o no. Unos simples ejemplos de características a destacar pueden ser: si es fumador o no, la edad, si sigue una dieta específica, alguna enfermedad crónica, uso continuado de algún tratamiento, etc.

En conclusión, hemos podido aprender sobre conjuntos difusos y lógica difusa, y de cómo se podrían aplicar estos métodos a problemas del mundo real. Además, hemos podido realizar todo esto sin un gran fondo matemático, lo que refleja la facilidad del uso de los métodos difusos. Pero que sean fáciles de usar no significa que sean poco potentes, sino que presentan una gran potencia para generar resultados, lo que hace que estos métodos sean muy buena opción a tener en cuenta.

8. Bibliografía

Referencias

- Amer, M. B. (2011). Fuzzy-based framework for diagnosis of acid-base disorders. *Computers in Biology and Medicine*, 41(9), 737-741.
- Fuzzy logic toolbox. (2022). <https://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>
- Pruitt, B. (2010). Interpretación de la gasometría en sangre arterial: Un vistazo al equilibrio interior del paciente. *Nursing (Ed. española)*, 28(10), 33-37. [https://doi.org/10.1016/S0212-5382\(10\)70476-3](https://doi.org/10.1016/S0212-5382(10)70476-3)
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

Zadeh, L. A. (1999). Fuzzy logic= computing with words. *Computing with Words in Information/Intelligent Systems 1* (pp. 3-23). Springer.