



TIES Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior

Lógica difusa y redes ina Lámblicas

<https://doi.org/10.22201/dgtic.26832968e.2022.5.3>

Miguel Pérez Gaspar
Javier Gómez Castellanos
Everardo Bárcenas Patiño
Luis Francisco García Jiménez

<http://www.ties.unam.mx/>

Fecha de recepción: marzo 18, 2022 • Fecha de publicación: junio, 2022

Junio 2021 | número de revista 5 • ISSN 2683-2968

Acervos Digitales, Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, UNAM

Esta obra está bajo licencia de Creative Commons
Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

Lógica difusa y redes inalámbricas

Resumen

La lógica en general se encarga del estudio de los procesos de razonamiento. Los contextos filosóficos y matemáticos de esta disciplina son posiblemente los más tradicionales. En el área del cómputo, la lógica juega actualmente un papel fundamental. La creciente necesidad de la automatización del razonamiento ha sido uno de los principales motivos del desarrollo de la lógica en la era moderna. El campo de las telecomunicaciones no es la excepción, donde existen diversas tareas de razonamiento que requieren automatización. En este artículo, se describe la aplicación de métodos lógicos para la automatización de estas tareas. Más concretamente, se explica cómo algunos problemas de razonamiento propios de las redes inalámbricas requieren métodos lógicos no-clásicos como la lógica difusa.

Palabras clave:

Lógica Difusa, Lógica Clásica, Redes Inalámbricas, Fusión de datos, Autómata Celular.

fuzzy Logic and wireless networks

Abstract

Logic can be conceived as the study of reasoning methods. In computing, logic plays a fundamental role, and the mathematical and philosophical settings are arguably the most traditional for the logic discipline. The increasing need for automation of reasoning tasks has triggered the development of modern logic, where telecommunication networks are not the exception. This article describes the application of logic-based methods in these reasoning tasks. More precisely, we describe how wireless network reasoning problems require the use of non-classical logic, such as fuzzy logic.

Keywords:

Fuzzy Logic, Classical Logic, Wireless Networks, Data Fusion, Cellular Automata.

Lógica difusa y redes inalámbricas

Introducción

En el razonamiento lógico clásico, existen tres principios fundamentales que datan de por lo menos 2300 años. Estos principios fueron propuestos por Aristóteles y son los siguientes:

Principio de identidad. Afirma que toda entidad es igual a sí misma: de P siempre se infiere P .

Principio del tercero excluido. Una proposición puede ser o no ser, no hay una tercera opción: P es verdadera, o bien su negación $\neg P$ lo es.

Principio de no-contradicción. Ninguna cosa puede ser y no ser: P y $\neg P$ no pueden ser ambas verdaderas. Típicamente, una lógica consiste en un lenguaje formal junto con un sistema deductivo y/o una semántica. El lenguaje tiene componentes que corresponden a una parte de un lenguaje natural como el inglés o el griego. El sistema deductivo captura, codifica o simplemente registra argumentos que son válidos para el lenguaje dado, mientras que la semántica además de los conceptos anteriores registra los significados o las condiciones de verdad para al menos una parte del lenguaje.

Las expresiones en el lenguaje lógico clásico se interpretan como verdaderas o falsas (principio del tercer excluido). Son construidas a partir de variables atómicas y ciertos operadores lógicos, tales como conjunción, disyunción, negación e implicación. Por ejemplo, con los operadores de conjunción y negación

podemos expresar el principio de la no-contradicción: P y $\neg P$. Esta expresión es interpretada siempre como falsa en el contexto del razonamiento clásico.

De manera análoga al desarrollo de la geometría, que desde la época de Euclides se consideró como el enfoque único hasta a la aparición de las geometrías no-euclidianas con Lobachevski, la lógica aristotélica se consideró por mucho tiempo el único enfoque para los procesos de razonamiento y deducción. Aunque la lógica no-clásica también tiene orígenes tan antiguos como la clásica, con el inicio de la era del cómputo en el siglo XX su desarrollo se ha incrementado aceleradamente.

El razonamiento no-clásico surge de la generalización de los principios clásicos. Particularmente, la lógica paraconsistente surge de la relajación del principio de no-contradicción: la expresión P y $\neg P$ no siempre es interpretada como falsa. Este tipo de razonamiento es particularmente útil cuando se requieren hacer inferencias partiendo de información considerada clásicamente contradictoria. En los sistemas de cómputo encargados de procesar la información proveniente de una red de sensores, es común contar con este tipo de información contradictoria. Los sensores, aunque del mismo tipo, normalmente perciben información diferente, esto puede suceder por una multitud de causas: ruido en la transmisión de información, errores de *hardware*, entre otros. Aunque dos de ellos nos provean de información contradictoria, un sistema

basado en razonamiento paraconsistente puede realizar inferencias: si la temperatura es alta (un sensor puede percibir que es alta y otro que es baja) entonces se prende el aire acondicionado.

Otro ejemplo de razonamiento no-clásico es el que se puede modelar a través de la lógica difusa. En este tipo de lógica, el principio del tercero excluido es generalizado: las proposiciones lógicas pueden ser interpretadas no solamente por verdadero o falso, sino que pueden tomar una cantidad infinita de valores. Este tipo de razonamientos es particularmente útil cuando se requieren modelar propiedades donde existen diversos niveles de verdad o falsedad. Como muestra, para modelar intensidades: la sensación térmica es muy fría o un poco calurosa.

Aplicaciones

Aplicaciones de la lógica clásica

La noción de computabilidad está definida en términos de la Máquina de Turing (MT). La MT es un concepto abstracto de una computadora física. Entonces se dice que todo aquel problema o tarea que puede ser resuelto por una MT es computable. La motivación de Turing en la propuesta de este concepto tan influyente tiene sus orígenes en los fundamentos de las Matemáticas. Este debate fundacional se dio entre quienes consideraban que el quehacer matemático es un proceso mecánico y quienes pensaban que lo era más bien intuitivo, como el artístico. A través de métodos de razonamiento lógico, Kurt Gödel demostró que hay conceptos en Matemáticas que no pueden ser demostrados en los mismos términos en que estos fueron planteados, resultaron equivalentes al concepto de MT; es decir, el proceso mecánico al que se referían los matemáticos es precisamente el concepto que hoy conocemos como computabilidad.

A partir de esta relación fundacional entre la lógica y el cómputo, una gran variedad de métodos lógicos se han beneficiado. Uno de los primeros conceptos es el de la Inteligencia Artificial (IA). *El Cálculo de Situaciones* es un lenguaje, propuesto por John McCarthy, que usa la IA para modelar el conocimiento requerido por sistemas de cómputo inteligentes, como sucede en un sistema auxiliar en el diagnóstico de enfermedades. Este lenguaje está basado en el razonamiento lógico clásico [1]. Otra instancia emblemática de la relación entre la lógica y el cómputo es la correspondencia que existe entre los programas de cómputo y las pruebas [2]. Las pruebas son

estructuras que representan demostraciones matemáticas, y que son caracterizadas a través de métodos lógicos. Esta correspondencia ha permitido estudiar propiedades de los programas de cómputo como la terminación, es decir, el contexto en el que un programa termina o no su ejecución.

Aplicaciones de la lógica no-clásica

La Lógica Modal (LM) es una lógica no-clásica que considera una generalización del principio del tercer excluido. Este lenguaje lógico cuenta con operadores de necesidad y posibilidad; en donde: P es necesariamente (posiblemente) verdadera. Aunque los orígenes de la lógica modal datan también de tiempos aristotélicos, no fue sino hasta mediados el siglo XX que Prior, Hintikka y Kripke desarrollaron una semántica llamada de múltiples mundos: el estado de verdad de las proposiciones lógicas depende del mundo donde son interpretadas [3]. En cómputo, el dominio de aplicación de la LM es muy amplio. En el área de Verificación de Sistemas, la LM es utilizada como un lenguaje para modelar sistemas, ya sea de *Software* o *Hardware* [4]. En este contexto, el estado de verdad de una expresión de este lenguaje modal representa la satisfacción de cierta propiedad del sistema: si la expresión es verdadera, entonces, el sistema está libre de errores, de lo contrario, el sistema puede no funcionar correctamente.

La Lógica Difusa (LD) es una lógica multi-valuada cuyos enunciados pueden tomar valores de verdad asociados al intervalo infinito de números reales que hay entre 0 y 1 [5]. La LD cuenta también con una gran variedad de aplicaciones en el campo del cómputo. En el área de Bases de Datos, es útil considerar un grado de pertenencia difuso de la información a ciertas categorías [6]. Considere, un sistema manejador de una base de datos de canciones donde estas pueden pertenecer a varios géneros musicales. Un ordenamiento difuso permite desplegar con cierto orden de prioridad una consulta sobre algún género musical, es decir, si se buscan canciones de *Rock* en la base de datos, se despliegan primero las más cercanas a este género que las que se encuentran entre el *Rock* y el *Pop*.

Lógica clásica vs. Lógica difusa

En la lógica deductiva las inferencias tienen la siguiente estructura:

Si P_1, P_2, \dots, P_n entonces C

A partir de las premisas P_1, P_2, \dots, P_n se llega a la conclusión C. Considere las siguientes inferencias en lógica clásica:

P1: Todos los hombres son mortales.

P2: Sócrates es un hombre.

C: Sócrates es mortal.

P1: A todos los gatos les gusta el pescado.

P2: Silvy es un gato.

C: a Silvy le gusta el pescado.

Observe que en estos ejemplos, los grados de pertenencia son booleanos (principio del tercer excluido): Sócrates es un hombre, Silvy es un gato, etcétera. Sin embargo, en muchos contextos los grados de pertenencia no son booleanos: la ruta al aeropuerto se encuentra con *mucho* tráfico, la sensación térmica es un *poco* calurosa, entre otros. En la lógica difusa, la estructura de las inferencias se mantiene con respecto al razonamiento clásico. Los grados de pertenencia son los que se consideran difusos. Considere los siguientes ejemplos:

P1: La ruta actual a cierto destino se encuentra con mucho tráfico.

P2: Hay un ruta alternativa a cierto destino que no es mucho más larga que la actual.

Cp: Tomar la ruta alternativa a cierto destino.

P1: La temperatura es muy alta.

P2: La humedad no es poca.

Cp: Encender el aire acondicionado a velocidad media.

La lógica difusa encontró en el área de la Inteligencia Artificial (IA) un nicho de aplicación inmediato. Con el fin de hacer más inteligentes a los sistemas de cómputo, sin embargo, pronto se utilizaron modelos difusos para una gran variedad de áreas como las siguientes:

- Sistemas de foco automático en cámaras fotográficas [7].
- Control y optimización de procesos y sistemas industriales [8].
- Mejora en la eficiencia del uso de combustible en motores [9].
- Mejora del medio ambiente [10].
- Sistemas expertos del conocimiento (emular el comportamiento de un experto humano, véase la figura 1) [11].

- Robótica [12].

- Vehículos y conducción autónoma [13].

- Tecnología informática [14].

- Bases de datos difusas: almacenar y consultar información imprecisa [15].

- Inteligencia Artificial: sistemas de control de acondicionadores de aire [16], electrodomésticos familiares (frigoríficos, lavadoras, etcétera) [17], [18].

- Redes inalámbricas: redes de sensores [19], [20], [21], [22] autómatas celulares [23], [24], [25].

Aplicaciones de la lógica difusa en las redes inalámbricas

Las redes de sensores se refieren a una colección de nodos que tienen la capacidad de monitorizar algún fenómeno físico como: humedad, oxígeno, salinidad, concentración de humo, entre muchos otros. Estos son en realidad microcomputadoras que tienen capacidades de procesamiento, almacenamiento y comunicación limitadas. Para el caso de las redes de sensores inalámbricas (WSN, *Wireless Sensor Networks* por sus siglas en inglés), su comunicación puede establecerse bajo diferentes protocolos como el IEEE 802.11, IEEE 802.15, LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) usados en los dispositivos LoRa. En este tipo de redes, el consumo de energía en los nodos participantes resulta de gran importancia debido a que trabajan con pequeñas baterías que en muchas ocasiones no es fácil reemplazarlas o cargarlas una vez desplegada la red. Debido a esta limitación de energía, este tipo de redes operan con radios de corto alcance o con protocolos que dan preferencia a que el dispositivo esté la mayor cantidad de tiempo dormido, como es el caso de los dispositivos LoRa [26], [27]. Esta característica impide que la información enviada por un sensor pueda llegar a su destino de manera directa. Para ello, las WSN suelen usar otros nodos como repetidores donde los mensajes van viajando de salto en salto. Este tipo de redes presentan varias ventajas frente a las redes cableadas tradicionales, por ejemplo, la facilidad de despliegue, el bajo costo de los dispositivos, la movilidad, entre otras. Por otro lado, el Internet de las Cosas o IoT es una extensión de las WSN donde todas las “cosas” que nos rodean tienen una interfaz inalámbrica que permite que estas se interconecten unas con otras. Últimamente, el paradigma IoT se está aplicando en diferentes áreas como son ciudades inteligentes, salud, monitorización de electrodomésticos, consumo energético en hogares, por mencionar algunos [28].

Una gran ventaja de la lógica difusa sobre la lógica tradicional es que la primera puede llegar a conclusiones precisas basadas en argumentos vagos, imprecisos, ruidosos o incluso inexistentes que son comunes en este tipo de redes, ya que muchas veces los mensajes se pierden por su misma naturaleza. Por ello, la lógica difusa se ha aplicado en varias áreas de las redes de sensores y el Internet de las cosas, tal es el caso, en el ahorro de energía, encaminamiento de paquetes, localización, e interfaz humano-sensor, entre otros. Estas áreas representan un abanico del uso de la lógica difusa sobre las principales funcionalidades de las redes de sensores.

Fusión de datos

Una de las principales aplicaciones de las redes inalámbricas (RI) es el sensado en ambientes inteligentes: edificios, aulas, automóviles, entre otros. Las RI están equipadas con múltiples sensores que se encargan de registrar información relevante para la toma de decisiones de los correspondientes sistemas inteligentes. Considere de manera ilustrativa un sistema inteligente encargado del control de la ventilación de cierto espacio. El sistema debe estar equipado con una RI de sensores de humedad y temperatura para determinar de manera autónoma cuando es pertinente y a que temperatura encender el aire acondicionado. Más sensores en la RI pueden ayudar a este sistema a ser más inteligente, por ejemplo, con sensores de agentes contaminantes. A menudo los sistemas no solo están encargados de una sola función, considere la luminosidad y la ventilación, que pueden ser controladas por el mismo sistema inteligente para el correcto desarrollo de actividades en un laboratorio.

A continuación ilustraremos algunos problemas de razonamiento en las RI que requieren modelos difusos. Recapitulemos el sistema de control de ventilación con sensores de temperatura, humedad y algunos agentes contaminantes. El tipo de decisiones que el sistema debe de tomar tiene la siguiente forma:

Si la temperatura ambiental, la humedad y la contaminación, se encuentran en cierto intervalo, respectivamente, entonces los parámetros de velocidad de caudal y temperatura del aire acondicionado se establecen en ciertos valores.

Este tipo de inferencia es claramente clásica. Sin embargo, para determinar el valor de las variables descritas

(temperatura, humedad, contaminación), normalmente se cuentan con varios sensores colocados en diversos puntos. Por lo que la determinación de la temperatura debe tomar en cuenta todos los sensores de temperatura, cuyos valores normalmente no coinciden por diversas causas: diferencias reales de temperatura en el ambiente, errores de *hardware*, errores de comunicación, y demás. Es aquí cuando la lógica difusa nos ayuda a razonar y modelar estas inconsistencias, como en el siguiente apartado:

Si la mayoría de los sensores marcan una temperatura en cierto intervalo de valores I , y algunos otros sensores marcan una temperatura no muy lejana al mismo intervalo I , entonces la temperatura se encuentra en I .

Las nociones “la mayoría de los sensores”, “algunos otros sensores”, “temperatura no muy lejana al mismo intervalo I ”, requieren de un modelo difuso de razonamiento. En [22], se describe a detalle un modelo difuso para una RI con sensores de múltiples modalidades.

Ahorro de energía (asociación o *clustering*)

El consumo de energía en las redes de sensores es probablemente el elemento más importante a considerar. Esto es debido a la complejidad que implica cambiar o recargar las baterías de los dispositivos, por lo que incrementar el tiempo de vida de la red se vuelve un objetivo primordial. La forma tradicional en que se ha abordado este problema es por medio de una jerarquía en la red. En la parte superior de la jerarquía existen nodos especiales llamados *cluster head* (CH) que se encargan de la comunicación con otros nodos cercanos o vecinos. Estos son responsables de recolectar la información, procesarla, y encaminarla a través de otros CH hacia su destino final. El punto medular de esta estrategia está en identificar a los mejores nodos para ocupar el rol de CH, criterio que normalmente considera la energía restante de cada uno, sus capacidades de transmisión, procesamiento o su posición relativa con respecto a sus vecinos.

Recientemente, la lógica difusa ha mostrado su potencial en las redes inalámbricas. En particular, al seleccionar el conjunto de nodos CH en un sistema multivariable. En los sistemas que usan lógica clásica, un nodo se encuentra asociado a un nodo CH con una función binaria; es decir, tiene un valor de 1 cuando está asociado o un valor de 0 cuando no está asociado. En la lógica difusa, la asociación de un nodo a un CH está en función de una membresía

que toma valores continuos en el intervalo [0-1]. Estas funciones, que determinan la membresía de los nodos a los diferentes CH, generalmente usan funciones gaussianas, triangulares, trapezoidales [27], [29], [30]. Mediante membresías difusas, los nodos pueden estar conectados a diferentes CH en diferentes tiempos, o pueden estar conectados a varios CH con diferentes grados de membresía al mismo tiempo. En este sentido, un nodo puede enviar un paquete a un CH, y el siguiente paquete enviarlo a un CH diferente del anterior, dependiendo de los valores que toma la función de membresía [31].

Encaminamiento

Debido al corto alcance de los radios en este tipo de redes, es necesario que algunos nodos participen en el rol de encaminar información propia y de otros nodos hacia los nodos concentradores. Esto provoca que los nodos encargados de reenviar los mensajes gasten sus recursos energéticos de manera acelerada. Una manera de evitar este problema es cambiar las rutas periódicamente para balancear el gasto energético entre los nodos de la red. Sin embargo, el proceso de cambiar las rutas es, en sí mismo, oneroso desde el punto de vista energético. Existen en la literatura un sin número de algoritmos de encaminamiento para este tipo de redes. Sin embargo, la gran mayoría de ellos consideran una métrica o costo asociado a la ruta de cualquier nodo hacia el nodo concentrador [32], [33]. Por ejemplo, las métricas tradicionales consideran el número de saltos en la ruta, la distancia hacia el concentrador, el retardo, la batería restante, la congestión de la red, etcétera. Aquí, una vez más, la lógica difusa puede presentar formas novedosas de enfrentar este problema mediante el uso de una métrica difusa (con valores en el rango [0-1]), donde los nodos podrían no solo realizar el cambio dinámico de rutas de manera eficiente energéticamente, sino además, podrían generar múltiples rutas paralelas que mejoren la resistencia de la red a ataques, congestión y otros problemas presentes en el encaminamiento [34], [35].

Localización

La localización del IoT y redes de sensores es un área de suma importancia, ya que muchas aplicaciones dependen de la estimación de la posición para ejecutar alguna acción. Por ejemplo, activar un área de riego en un viñedo cuando la salinidad del área haya sobrepasado un nivel máximo. Sin embargo, las señales que se usan para alimentar los algoritmos de localización son señales ruidosas (señales

GPS o señales RF). En este sentido, nuevamente es posible utilizar el dominio difuso, donde la presencia de un nodo en un lugar se puede representar en el intervalo [0-1]; con un valor de 1 cuando se tiene un 100% de seguridad de encontrarse, y un 0 que representa no estar en ese lugar con 100% de certidumbre [36], [37]. Si bien, ya hemos aprendido a convivir con la imprecisión de sistemas GPS (5-50 metros), dichos sistemas no operan adecuadamente en espacios interiores. Es en estos espacios donde otro tipo de técnicas de localización son usadas (triangulación de señales o detección de huellas de propagación de señales RF) [38]. Un aspecto novedoso de usar lógica difusa en los sistemas de localización es que abre la puerta a nuevas técnicas basadas en lenguaje natural. Imaginemos a una persona que menciona a través de su dispositivo inalámbrico “nos vemos enfrente de la tienda ABC” o “nos vemos en el mismo lugar de la semana pasada”, etcétera. Estas referencias de localización son claramente vagas e imprecisas, sin embargo, resultan perfectamente manejables para un sistema de localización difuso.

Interacción humano-dispositivo

Con el nacimiento del IoT se ha multiplicado exponencialmente el número de dispositivos que se encuentran a nuestro alrededor tienen una conexión inalámbrica a un punto de acceso (AP). Lo anterior crea la necesidad de contar con una interfaz simple e intuitiva que permita a las personas interactuar con ellos, cambiando inclusive su comportamiento de acuerdo con nuevas necesidades de los usuarios [39], [40]. Es importante mencionar que la gran mayoría de las personas que interactúan con este tipo de dispositivos son personas que no están familiarizadas con la tecnología, por lo que se hace necesario contar con una manera natural en la que los usuarios puedan interactuar y en algunos casos modificar el funcionamiento de estos dispositivos. A lo largo de la historia, se ha demostrado que no existe mejor canal de comunicación para los humanos que el habla. Actualmente, existen algunos compiladores que traducen en tiempo real el lenguaje natural a instrucciones que pueden entender y ejecutar dispositivos IoT. Sin embargo, dichos sistemas son muy limitados, ya que solo admiten un número reducido de instrucciones precisas (por ejemplo: enciende el aire acondicionado si la temperatura excede 30 grados centígrados). Sin embargo, la instrucción del ejemplo anterior no caracteriza al lenguaje cotidiano que usamos los humanos regularmente, donde una frase más común sería algo como “enfía el cuarto cuando haga

calor”. Nuevamente, la idea de tener un compilador difuso capaz de traducir lenguaje natural cotidiano a instrucciones para dispositivos IoT sería altamente relevante, ya que ayudaría a acelerar la adopción de estas tecnologías [35].

Modelos de cómputo no-clásicos

Los modelos de cómputo tradicional o clásico se definen como máquinas de estados finitos. La máquina de Turing es el modelo que de hecho define el término de computabilidad, sin embargo, existen una gran variedad de estos con distintas características: expresividad, complejidad computacional, etcétera. Algunos ejemplos de los modelos de cómputo basados en máquinas de estados son: autómatas de árbol, autómatas de pila, transductor, entre otros. Los modelos de cómputo clásicos están relacionados directamente con los métodos de razonamiento clásicos [41]. Para los métodos de razonamiento no-clásicos, han surgido diversos modelos de cómputo. A continuación describimos con mayor detalle algunos de ellos.

Autómatas celulares

Los autómatas celulares (AC) son sistemas computacionales discreto-abstractos útiles como modelos generales de complejidad y como representaciones más específicas de dinámicas no lineales en una variedad de áreas científicas. En primer lugar, los AC son espaciales y temporalmente discretos: están conformados por un conjunto finito o numerable de unidades del tipo simple y homogéneo, llamando a estas unidades átomos o células. Dada una unidad de tiempo, las celdas describen un estado de un conjunto finito de estados. AC evolucionan en paralelo en pasos de tiempo discretos, apoyándose de las funciones de actualización de estado, también denotadas reglas de transición dinámica. La actualización de un celda, se obtiene al considerar los estados de las celdas en su vecindad local (no hay, por lo tanto, acciones a distancia). En segundo lugar, los AC son abstractos: pueden especificarse en términos puramente matemáticos y las estructuras físicas pueden implementarse. En tercer lugar, los AC son sistemas computacionales: pueden computar funciones y resolver cuestiones algorítmicas.

Autómata celular tradicional

Un ejemplo sencillo de autómata celular se presenta en [41]. Piense en un autómata como una cuadrícula unidimensional de elementos simples (celdas). Cada uno de ellos solo puede instanciar uno de dos estados; digamos que cada

una se puede encender o apagar. La evolución del sistema está determinada por una regla de transición, que se debe considerar implementada en ellas. En cada paso de tiempo, se actualiza su estado en respuesta a lo que sucede con sus celdas vecinas, siguiendo la regla.

Figura 1. Autómatas Celulares, "Clase inicial del sistema: salón de clases," 2022. [Imagen]. Disponible en: Stanford Encyclopedia of Philosophy, <https://plato.stanford.edu/entries/cellular-automata/> [Consultado en junio 04, 2022].

Así que piense en la figura 1 como si representara la primera fila de un salón de clases de secundaria. Cada cuadro representa a un estudiante que usa (negro) o no (blanco) un sombrero. Hagamos las dos suposiciones siguientes:

Regla del sombrero: un estudiante usará el sombrero en la siguiente clase, si uno u otro, pero no ambos, de los dos compañeros de clase sentados inmediatamente a su izquierda y a su derecha, tiene el sombrero en la clase actual (si nadie usa sombrero, un sombrero está pasado de moda; pero si ambos vecinos lo usan, un sombrero ahora es demasiado popular para estar de moda).

Clase inicial: durante la primera clase de la mañana, solo un estudiante del medio se presenta con un sombrero (ver figura 2).

Figura 2. Autómatas Celulares, "Evolución del sistema: salón de clases," 2022. [Imagen]. Disponible en: Stanford Encyclopedia of Philosophy, <https://plato.stanford.edu/entries/cellular-automata/> [Consultado en junio 04, 2022].

La figura 3 muestra lo que sucede a medida que pasa el tiempo. Las filas consecutivas representan la evolución en el tiempo a través de clases posteriores.

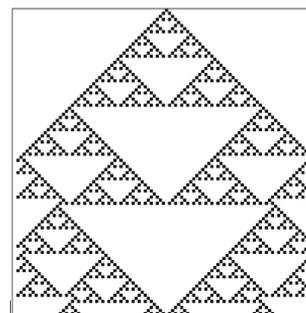


Figura 3. Autómatas Celulares, "Patrón evolutivo del sistema: salón de clases," 2022. [Imagen]. Disponible en: Stanford Encyclopedia of Philosophy, <https://plato.stanford.edu/entries/cellular-automata/> [Consultado en junio 04, 2022].

La figura 3 puede resultar sorprendente. El patrón evolutivo mostrado contrasta con la simplicidad de la ley subyacente (la “regla del sombrero”) y la ontología (ya que La figura 3 puede resultar sorprendente. El patrón evolutivo mostrado contrasta con la simplicidad de la ley subyacente (la “regla del sombrero”) y la ontología (ya que en términos de objeto y propiedades, solo necesitamos tener en cuenta celdas simples y dos estados). El comportamiento emergente global del sistema sobreviene sobre sus características simples locales, al menos en el siguiente sentido: la escala en la que se toma la decisión de llevar el sombrero (vecinos inmediatos) no es la escala en la que se manifiestan los patrones interesantes. Este ejemplo es una ilustración de lo que hace que los AC sean atractivos para una amplia gama de investigadores.

Definimos formalmente un autómata celular como una cuádrupla que tiene la siguiente estructura:

R: Retícula, región espacial donde se define al autómata.

Σ : Conjunto finito de estados $\{1, 2, 3, \dots, \alpha\}$.

V: Vecindad, con un radio $r \in \{1, 2, 3, \dots\}$.

C: Función de transición, que son las reglas de evolución del autómata.

De este modo, la cuádrupla $AC = \{R, \Sigma, V, C\}$ es denominada autómata celular.

En [42], se presenta un modelo basado en autómatas celulares para el estudio de la propagación temporal de gusanos *bluetooth* en teléfonos inteligentes.

Autómata celular difuso

El autómata celular difuso se define como una quintupla cuya estructura es similar a la de un autómata celular ordinario. Se compone de una matriz rectangular, con un número de filas y columnas finitos que será la región espacial en la que el evolucionará durante su ciclo de existencia; donde cada celda será identificada por un estado definido y una vecindad determinada, además de una función de pertenencia difusa para las reglas de evolución de la función de transición del autómata.

Se puede definir también como un modelo matemático de tipo discreto, a continuación se describe su estructura.

Un autómata celular difuso como una quintupla tiene la siguiente estructura: R: Retícula, región espacial donde se define al autómata.

Σ : Conjunto finito de estados. $\{1, 2, 3, \dots, n\}$

V: Vecindad, con un radio $r \in \{1, 2, 3, \dots\}$

U: Función de pertenencia difusa, que utiliza la función de transición para la evolución del autómata.

C: Función de transición, que son las reglas de evolución del autómata. De este modo, la quintupla $ACD = \{R, \Sigma, V, U, C\}$ es denominada autómata celular difuso.

En [43], propusieron el esquema de clasificación y gestión de nodos defectuosos basados en reglas difusas (FNCM) para redes de sensores inalámbricos (WSN). En [44], los autores explican un esquema de gestión y clasificación de nodos defectuosos de autómatas de aprendizaje celular distribuido para WSN que puede detectar y reutilizar nodos sensores defectuosos de acuerdo con su estado de falla. El método utiliza autómatas de aprendizaje celular para asignar un estado a cada nodo en función de las condiciones del hardware, lo que hace que los nodos realicen una de las operaciones de la red.

Conclusiones

En el presente artículo, se describieron algunas aplicaciones de la lógica difusa en el campo de las redes inalámbricas. Para esto, se contrastaron los métodos de razonamiento lógico clásicos con respecto al no-clásico, dentro de los que se encuentra la lógica difusa. Continuamos con la ilustración de algunas problemáticas en las redes inalámbricas que pueden ser abordadas desde la perspectiva del razonamiento difuso. Finalmente, se presentaron algunos modelos de cómputo no-clásicos que pueden aplicarse en la implementación de métodos de razonamiento no-clásicos, en particular, se expuso el modelo de autómatas celulares difusos.

Agradecimientos

Investigación realizada gracias al programa UNAM-PAPIIT IA104122, IA105420, IA105520, IN119820, IA102822, CONACyT CB 0320403 y al Programa de Becas Posdoctorales en la UNAM.

bibliografía

- [1] J. McCarthy, "Situations, actions and causal laws," *Stanford University Technical Report*.
- [2] H. B. Curry, "Functionality in Combinatory Logic," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 20, no. 11.
- [3] S. Kripke, "A Completeness Theorem in Modal Logic," *J. Symb. Log.*, vol. 24, no. 1.
- [4] J. P. Queille y J. Sifakis, "Specification and verification of concurrent systems in CESAR," *International Symposium on Programming, Lecture Notes in Computer Science*, 137.
- [5] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353. doi:10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [6] M. Zemankova-Leech, "Fuzzy Relational Data Bases," *Tesis en Florida State University*.
- [7] W. R. Yang, Y.-S. Shiao, D.-T. Su, C.-S. Wang, "Design and implementation of fuzzy controllers for auto focus, auto exposure and zoom tracking," *Journal Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 11, pp. 305-312.
- [8] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller," *I. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 20, no. 2, pp. 404-418.
- [9] S. H. Lee, R. J. Howlett y S. D. Walters, "Engine fuel injection control using fuzzy logic," *Intelligent Systems and Signal Processing Laboratories, Engineering Research Centre, University of Brighton, Moulsecoomb, Brighton, BN2 4GJ, UK*.
- [10] A. D. S. C. Boclin y R. de Mello, "A decision support method for environmental impact assessment using a fuzzy logic approach," *Ecological economics*, vol. 58, no. 1, pp.170-181.
- [11] R. R. Yager y L. A. Zadeh, "An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems," *Springer Science & Business Media*, vol. 165.
- [12] G. Antonelli, S. Chiaverini y G. Fusco, "A fuzzy-logic-based approach for mobile robot path tracking," *IEEE transactions on fuzzy systems*, vol.15, no.2, pp. 211-221.
- [13] X. Wang, M. Fu, H. Ma, Y. Yang, "Lateral control of autonomous vehicles based on fuzzy logic," *Control Engineering Practice*, vol. 34, pp. 1-17.
- [14] E. Trillas y L. Eciolaza, "Fuzzy logic," *Springer International Publishing*, DOI, 10, 978-3.
- [15] J. Galindo (Ed.), "Handbook of research on fuzzy information processing in databases," *IGI Global*.
- [16] A. Abdel-Hamid, S. F. Rezeká y A. M. Saleh, "Fuzzy logic control of air-conditioning system in residential buildings," en *Alexandria Engineering Journal*, vol. 54, no. 3, pp. 395-403, ISSN 1110-0168, [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S111001681500040X>. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.023>, [Consultado en abril 27, 2022].
- [17] L. Ciabattoni, M. Grisostomi, G. Ippoliti, S. Longhi, "A Fuzzy Logic tool for household electrical consumption modeling," *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 8022-8027, doi: 10.1109/IECON.2013.6700474.

- [18] D. Kolokotsa, "Artificial intelligence in buildings: A review of the application of fuzzy logic," *Advances in Building Energy Research*, vol. 1, no. 1, pp. 29-54.
- [19] P. Ampriri, S. Ohara, E. Qafzezi, M. Ikeda, L. Barolli, M. Takizawa, "Integration of software-defined network and fuzzy logic approaches for admission control in 5G wireless networks: a fuzzy-based scheme for QoS evaluation," *International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, pp. 386-396. Springer, Cham.
- [20] A. Khalifeh, K. Rajendiran, K. A. Darabkh, A. M. Khasawneh, O. AlMomani Z. Zinonos, "On the potential of fuzzy logic for solving the challenges of cooperative multi-robotic wireless sensor networks," *Electronics*, vol. 8, no. 12, pp. 1513.
- [21] M. Maksimović, V. Vujović y V. Milošević, "Fuzzy logic and wireless sensor networks—a survey," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 27, no. 2, 8 pp.77-890.
- [22] P. Manjunatha, A. K. Verma y A. Srividya, "Multi-sensor data fusion in cluster based wireless sensor networks using fuzzy logic method," *2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems, 2008*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIINFS.2008.4798453.
- [23] S. Jaberri, A. M. Rahmani y A. K. Zadeh, "Trusted data fusion by using cellular automata in wireless sensor networks," *Proceedings of the 8th Annual Collaboration, Electronic messaging, Anti-Abuse and Spam Conference*, pp. 145-151.
- [24]] A. Safari, "An Ant-Colony Optimization Clustering Model for Cellular Automata Routing in Wireless Sensor Networks," *Iranian Journal of Optimization*, vol. 12, no. 2, pp. 139-147.
- [25] M. A. I. Tsompanas, N. I. Dourvas, K. Ioannidis, G. C. Sirakoulis, R. Hoffmann A. Adamatzky, "Cellular automata applications in shortest path problem," *Shortest Path Solvers. From Software to Wetware*, pp. 199-237. Springer, Cham.
- [26] M. Capuzzo, D. Magrin y A. Zanella, "Confirmed traffic in LoRaWAN: Pitfalls and countermeasures," *17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, Capri, pp. 1-7.
- [27] Y. Yuan, C. Li, Y. Yang, X. Zhang, L. Li, "CAF: Cluster Algorithm and A-Star with Fuzzy Approach for Life-time Enhancement in Wireless Sensor Networks," *Abstract and Applied Analysis*, 2014.
- [28] A. Zúñiga, G. Sierra, G. Bel-Enguix J. Gomez, "SiCIoT: A simple instruction compiler for the Internet of Things," *Internet of Things*, vol. 12, no. 2020, 100304, ISSN 2542-6605, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100304>.
- [29] I. S. AlShawi, L. Yan, W. Pan, B. Luo, "Lifetime Enhancement in Wireless Sensor Networks Using Fuzzy Approach and A-Star Algorithm," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 10 pp. 3010–3018.
- [30] Y. Yuan, C. Li, Y. Yang, X. Zhang, L. Li, "CAF: Cluster Algorithm and A-Star with Fuzzy Approach for Life-time Enhancement in Wireless Sensor Networks," *Abstract and Applied Analysis*, 2014.
- [31] S. Ashutosh Kumar, N. Purohit y S. Varma, "Fuzzy logic based clustering in wireless sensor networks: a survey," *International Journal of Electronics*, pp.126-141.
- [32] A. Ghaffari, "An Energy Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks using A-star Algorithm," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 12, no. 4.
- [33] K. Rana y M. A. Zaveri, "ASEER: A Routing Method to Extend Life of Two-Tiered Wireless Sensor Network," *International Journal of Advanced Smart Sensor Network Systems*, vol. 1, no. 2.

- [34] S. Jaber, A. M. Rahmani y A. K. Zadeh, "Trusted data fusion by using cellular automata in wireless sensor networks," *Proceedings of the 8th Annual Collaboration, Electronic messaging, Anti-Abuse and Spam Conference*, pp. 145-151.
- [35] S. Sojjoyo y R. Wardoyo, "Wireless Sensor Network Energy Efficiency with Fuzzy Improved Heuristic A-Star Method," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 8, no. 4.
- [36] A. Alomari, W. Phillips, N. Aslam, F. Comeau, "Dynamic Fuzzy-Logic Based Path Planning for Mobility-Assisted Localization in Wireless Sensor Networks," *Sensors*, 2017, vol. 17, no.1904. <https://doi.org/10.3390/s17081904>.
- [37] P. Songyut, S. Chakchai, T. N. Dusit, "A hybrid model using fuzzy logic and an extreme learning machine with vector particle swarm optimization for wireless sensor network localization," *Applied Soft Computing*, vol. 65.
- [38] M. Alakhras, M. Oussalah y M. Hussein, "A Survey of fuzzy logic in wireless localization," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01703-7>.
- [39] Z. Dajun *et al.*, "Use of human gestures for controlling a mobile robot via adaptive CMAC network and fuzzy logic controller," *Neurocomputing*, vol. 282, 2018.
- [40] J.E. Naranjo, M. A. Sotelo, C. Gonzalez, R. Garcia, T. D. Pedro, "Using Fuzzy Logic in Automated Vehicle Control," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 36-45, Jan.-Feb. 2007, doi: 10.1109/MIS.2007.18.
- [41] F. Berto y T. Jacopo, "Cellular Automata," *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), [En línea]. Disponible en: <https://plato.stanford.edu/archives/spr2022/entries/cellular-automata>. [Consultado en abril 27, 2022].
- [42] G. González, "Bluetooth Worm Propagation in Smartphones: Modeling and Analyzing Spatio-Temporal Dynamics," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 75265-75282, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3081482.
- [43] P. Chanak y I. Banerjee, "Fuzzy rule-based faulty node classification and management scheme for large scale wireless sensor networks," *Expert Systems with Applications*, 45, pp. 307-321.
- [44] R. Yarinezhad y S.N. Hashemi, "Distributed faulty node detection and recovery scheme for wireless sensor networks using cellular learning automata," *Wireless Netw* 25, pp. 2901-2917. <https://doi.org/10.1007/s11276-019-02005-7>.

Fecha de recepción: marzo 18, 2022

Fecha de publicación: junio, 2022

Cómo se cita

M. Pérez, J. Gómez, E. Bárcenas y L. F. García, "Lógica difusa y redes inalámbricas," *TIES, Revista de Tecnología e Innovación en Educación Superior*, no. 5, junio, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://ties.unam.mx/> [Consultado en mes día, año].