

D I C U R S O S

PRONUNCIADOS EN EL ACTO DE
INVESTIDURA DE DOCTOR "HONORIS CAUSA"
DEL EXCELENTÍSIMO SEÑOR

D. LOFTI A. ZADEH

UNIVERSIDAD DE GRANADA
MCMXCVI

2 400 101 

MADE IN SPAIN



DISCURSOS

PRONUNCIADOS EN EL ACTO DE
INVESTIDURA DE DOCTOR "HONORIS CAUSA"
DEL EXCELENTÍSIMO SEÑOR

D. LOFTI A. ZADEH

UNIVERSIDAD DE GRANADA
MCMXCVI

BIBLIOTECA HOSPITAL REAL
GRANADA
Sala: C
Estante: 164
Numero: Caja 008(2)

DISCURSOS

PRONUNCIADOS EN EL ACTO DE
INVESTIDURA DE DOCTOR "HONORIS CAUSA"
DEL EXCELENTÍSIMO SEÑOR

D. LOFTI A. ZADEH



UNIVERSIDAD DE GRANADA
MCMXCVI

i15308285

B13366695

~~i13366695~~

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL DOCTOR
DON MIGUEL DELGADO CALVO-FLORES
CON MOTIVO DE LA INVESTIDURA
DEL DOCTOR DON LOFTI A. ZADEH

© UNIVERSIDAD DE GRANADA
DISCURSOS ACTO INVESTIDURA DOCTOR "HONORIS
CAUSA". Depósito legal: GR/ 696-96.
Edita e imprime: Servicio de Publicaciones de la Universidad de
Granada. Campus Universitario de Cartuja. Granada.
Printed in Spain *Impreso en España*

Excmo. Sr. Rector Magnífico,
Ilmos. Sres. Vicerrectores y Decanos,
Claustro de Doctores de la Universidad de Granada,
Excmas. e Ilmas. Autoridades,
Señoras y Señores:

La generosidad de mis compañeros del Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, a cuyo director actual quiero por ello expresar mi más sincero agradecimiento, me ha brindado la oportunidad de hacer la “Laudatio” y solicitar la venia del Claustro de Doctores de esta Universidad para que se conceda la investidura de Doctor “Honoris Causa” al profesor L. A. Zadeh. Tengo que confesar no obstante, que desde el mismo momento en que se me encomendó esta grata tarea he sentido la dificultad que supone glosar la figura de L. A. Zadeh, en cuya persona se aúnan cualidades humanas y capacidades científicas en tal cantidad y calidad que desafían cualquier intento de síntesis. Es por ello que pido disculpas “a priori” por la limitación de la imagen que dibujaré en esta necesariamente corta “Laudatio”.

De tiempo en tiempo (pero no muy frecuentemente) en el panorama de la Ciencia aparecen investigadores que, partiendo de cero (“inventando” un paradigma) consiguen ver en treinta años escasos que la obra que ellos comenzaron ha alcanzado la madurez y el crecimiento necesarios como para que su impacto constituya una auténtica revolución. Uno de estos personajes históricos es L. A. Zadeh, actualmente profesor emérito del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de California en Berkeley, maestro de maestros y “alma mater” indiscutible e indiscutida de la Teoría de Subconjuntos Difusos

L. A. Zadeh nació en Bakú (república de Azerbaydzhan), en 1921. Hijo de un corresponsal de prensa iraní, recibió, según sus propias palabras, una educación “muy buena pero tradicional”. Cursó los estudios de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Teherán y en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, pasando después a la Universidad de Columbia, donde, en 1949, obtendría el título de Doctor.

De 1950 a 1959 fue profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Columbia, pasando después al Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de California en Berkeley, donde continúa actualmente.

Sus aportaciones al campo de la Ingeniería Eléctrica y la Teoría de Sistemas, le valdrían ya el reconocimiento internacional como un investigador cualificado dentro de su área, si sus investigaciones posteriores no hubiesen superado con creces lo conseguido en sus primeros años.

En su Tesis Doctoral, Zadeh realizaba un análisis de frecuencias de redes no estacionarias, donde introducía el concepto de “*función de transferencia no estacionaria*”, que pronto sería considerado como una herramienta clave para el análisis de los sistemas lineales dependientes del tiempo y que le valdría su primer reconocimiento internacional.

En 1950, en un trabajo conjunto con J. R. Ragazzini, que apareció en el *Journal of Applied Physics*, presentó una generalización importante del Teorema de la Predicción de Wiener, resultado que encontraría numerosas aplicaciones en el diseño de filtros de memoria finita y que actualmente es considerado como clásico en su ámbito.

En 1952, de nuevo en colaboración con J. R. Ragazzini, inició el desarrollo de las técnicas de análisis de sistemas por medio de la transformada-Z, enfoque que hoy es un método standard y que se emplea ampliamente en el diseño de sistemas de control y de filtros digitales.

En 1953, presentó y desarrolló un nuevo enfoque para el diseño de filtros lineales y construyó una jerarquía de sistemas no lineales basada en la representación de Volterra-Wiener. Este enfoque ha proporcionado una base para el diseño de procesadores no lineales óptimos empleados para la detección y filtrado de señales contaminadas por ruido.

En 1963, Zadeh, conjuntamente con C. Desoer, publica un texto sobre Teoría de Sistemas, que actualmente es un clásico en la materia. En él se presenta el denominado

Enfoque del Espacio de Estados y Sus Aplicaciones al Análisis y Control de Sistemas. Los desarrollos contenidos en esta obra son considerados actualmente herramientas standard en control óptimo y en el análisis de una amplia variedad de sistemas que incluyen desde los robots industriales al control de los cohetes espaciales.

En el curso de sus estudios sobre Sistemas Lineales, Zadeh llega a la conclusión de que “la precisión formal tiene límites y si estos se sobrepasan en la construcción de un modelo, inmediatamente las conclusiones que se derivan de él resultan de escasa relevancia”. Esta idea se plasmaría años después en lo que se conoce como *Principio de Incompatibilidad*, que constituye la base del *Enfoque Lingüístico de los Problemas y del Calculo con Palabras*, dos de las criaturas más vigorosas nacidas del intelecto de este autor.

Como ya hemos apuntado anteriormente, en 1965 L. A. Zadeh era ya internacionalmente reconocido como una figura en el campo de la Teoría de Sistemas y sus aplicaciones en Ingeniería Eléctrica. Ese año, no obstante, tiene que señalarse como el comienzo de una nueva era, no solo en la trayectoria profesional de L. A. Zadeh, sino en el panorama de la ciencia mundial.

En 1965, Zadeh publica en la revista *Information and Control* el trabajo titulado *Fuzzy Sets*, donde introduce el concepto de *Conjunto Borroso o Difuso* que no es otra cosa que la modelización de clases con fronteras no bien determinadas, donde el paso del SER al NO-SER es gra-

dual y no brusco (como consideraba la Teoría de Conjuntos clásica basada en el modelo de lógica booleana de dos estados). Esta idea había ido tomando forma en la mente de este investigador en el curso de sus estudios sobre clasificación de objetos, al observar que en muchos casos la realidad muestra categorías y clases poco precisas y con fronteras mal definidas.

Con la introducción de la Teoría de Subconjuntos Difusos, Zadeh proporcionó una base para el enfoque cualitativo del análisis de sistemas complejos, en donde hay que emplear variables lingüísticas en lugar de variables numéricas. De este modo se consigue una mejor comprensión de como abordar la incertidumbre y la imprecisión y mejores modelos para el razonamiento y pensamiento humanos. Estas ideas han encontrado numerosas aplicaciones que van desde el reconocimiento de patrones hasta el diseño de sistemas de control para procesos industriales.

La aparición del trabajo antes mencionado dio lugar a que un conjunto de investigadores de diferentes nacionalidades y de distintos campos de la Matemática, Ingeniería e Informática comenzasen a investigar en la nueva disciplina, aunque es forzado señalar que como ha ocurrido con casi todas las innovaciones, estas ideas fueron inicialmente acogidas con cierto escepticismo por algunos sectores del mundo científico. Pronto este sentimiento inicial fue superado por el reconocimiento del valor de la herramienta y en escasamente diez años, el impacto de la Teoría de Subconjuntos Difusos (en un mundo científico para el que la única alternativa a lo puramente determinístico y pre-

ciso era lo aleatorio, igualmente preciso) fue tan notable que marca el comienzo de un nuevo “ismo” en el campo del análisis de sistemas. El Fuzzy-ismo alcanza actualmente su máximo exponente en Japón, donde se comercializan desde hace ya algún tiempo infinidad de productos contruidos empleando Tecnologías basadas en la Lógica Difusa.

Desde el principio se vio que, por su propia naturaleza, esta nueva herramienta iba a ser de gran utilidad para describir los conceptos vagos e imprecisos que subyacen en el razonamiento humano. Como apuntaba el propio Zadeh en 1965 “...donde la fuente de la imprecisión es más la falta de fronteras bien definidas entre conceptos que la presencia de variables aleatorias”. Por otra parte, también se intuiría que los subconjuntos difusos iban a ser la herramienta que permitiese describir y resolver problemas de planteamiento mal conocido y que por tanto no tenían solución dentro de las Teorías clásicas.

Desde 1965 el prof. Zadeh ha ido marcando las pautas de la investigación en este campo y señalando los caminos por los que ha discurrido posteriormente la investigación de los que nos dedicamos a esta parcela de la Ciencia. Algo más tarde y en respuesta a las necesidades planteadas por el desarrollo de la Inteligencia Artificial y más concretamente por la necesidad de disponer de herramientas más potentes para la construcción de Sistemas Expertos, a partir de 1971, Zadeh introduce la idea de Razonamiento Aproximado y los elementos formales que acabarían componiendo el cuerpo de doctrina de la Lógica Difusa

y sus aplicaciones tal como se conoce en la actualidad. Como puede comprobarse consultando su currículum, el enorme número de trabajos publicados por el prof. Zadeh hace imposible reseñar siquiera brevemente cada uno de ellos. Por este motivo nos limitaremos a comentar las líneas de mayor importancia por su contenido y por sus repercusiones posteriores.

En 1968, Zadeh introduce el concepto de medida de probabilidad en subconjunto difuso, que posteriormente conduciría a los conceptos de cardinalidad y cuantificación difusa.

Dos años más tarde, en 1970, publica un trabajo conjunto con R. E. Bellman (el “padre” de la Programación Dinámica), en donde se establecen los fundamentos para el análisis de decisiones en presencia de metas y restricciones difusas. Este trabajo constituye la base donde se sustentan multitud de trabajos de otros autores relacionados con la modelización y resolución de problemas bajo la incertidumbre.

En 1971 Zadeh comienza una línea de investigación sobre el empleo de los subconjuntos difusos para manejar cuantitativamente conceptos básicamente cualitativos, dotando de semántica a proposiciones tales como *Juan es joven o el edificio es alto o las ganancias son reducidas*. Posteriormente, en 1972, consideraría proposiciones más complejas conteniendo lo que a partir de entonces se conocen genéricamente como modificadores lingüísticos (*muy, algo, regular, la mayor parte, pocos,...*) que se emplean en len-

guaje natural para matizar los calificativos. El tema, básico para la representación y manejo del conocimiento impreciso, ha sido muy estudiado por el propio Zadeh y otros muchos autores.

Un hito clave en el desarrollo de la Lógica Difusa y sus aplicaciones lo marca el llamado **Principio de Incompatibilidad**, (enunciado formalmente entre 1972 y 1973) según el cual precisión y complejidad son propiedades incompatibles a la hora de describir la conducta de un determinado sistema (entendiendo sistema de un modo absolutamente general). Este principio justificaría la poca efectividad de los computadores y los programas convencionales para modelar el comportamiento y razonamiento humanos. Para obviar estos problemas Zadeh plantea la necesidad de desarrollar herramientas capaces de manejar de modo riguroso información imprecisa, lo que a su vez conlleva dos grandes tareas:

1. Representación de la información imprecisa. Como herramienta genérica propone emplear la Teoría de Subconjuntos Difusos, y más concretamente introduce el concepto de variable lingüística (es decir, una variable que toma valores en un conjunto de términos cualitativos). Adicionalmente propone describir las relaciones entrada-salida de sistemas complejos mediante proposiciones condicionales del tipo SI-ENTONCES, ligando las variables (lingüísticas) de entrada con las variables (lingüísticas) de salida mediante sentencias próximas a las del lenguaje natural empleado habitualmente por los expertos.

2. Inferencia sobre información imprecisa. Por extensión de la regla de deducción básica del Cálculo de Predicados, Zadeh había planteado previamente la necesidad de disponer de un **modus ponens generalizado**, un esquema de inferencia capaz de combinar hechos y conocimientos imprecisos para dar lugar a nuevos hechos (imprecisos). El problema, obviamente, consiste en caracterizar de un modo riguroso estos hechos deducidos. Para ello introduce lo que desde entonces se conoce como **Regla Composicional de Inferencia**.

En 1975, Zadeh publica una trilogía de artículos clave en el campo de la representación de conocimientos imprecisos, donde completa algunas ideas anteriores, desarrollando el concepto de variable lingüística y sus propiedades como herramienta para modelizar información imprecisa, incompleta o no totalmente fiable. En estos trabajos daría la forma definitiva a la Regla Composicional de Inferencia.

La Regla Composicional de Inferencia (como método básico de razonamiento difuso) ha recibido una considerable atención, especialmente desde que en 1974 E. H. Mamdani y S. Asilian (investigadores que desarrollaban su actividad en el Queen Mary College de Londres) demostrasen la aplicabilidad de la Lógica Difusa en el campo del control (de lo que nos ocuparemos con más detalle posteriormente). Hay que mencionar que a partir de este momento se observa un cambio sustancial en el enfoque de los trabajos dedicados a Lógica Difusa. Si hasta el momento se había prestado gran atención a los fundamentos formales, ahora comienza a ser objetivo prioritario que

las ideas puedan transformarse en sistemas de razonamiento automatizado implementables mediante computadora.

En 1978 comienza a editarse la revista *International Journal of Fuzzy Sets and Systems*, específicamente dedicada a la Teoría de Subconjuntos Difusos y sus aplicaciones. El primer artículo que aparece en el primer número de la revista es debido a Zadeh (como no podía ser menos) y lleva por título **Fuzzy Sets as a Basis for a Theory of Possibility**. Una tesis básica planteada en este trabajo es que si estamos interesados en el significado de la información más que en su medida, entonces la estructura es más posibilística que probabilística. De este modo una variable difusa (relativa al significado) está asociada con una medida de posibilidad, del mismo modo que una variable aleatoria (relativa a la medida) está asociada a una distribución de probabilidad y por tanto, una misma noción puede estar asociada simultáneamente con una medida de posibilidad y una de probabilidad.

Para comprender el papel de la Teoría de la Posibilidad en la Lógica Difusa hay que tener en cuenta que esta trata con proposiciones vagas en su significado, pudiendo haber incertidumbre o no en lo que se refiere a su cumplimiento, de tal manera que siempre existen distribuciones de posibilidad sobre los universos de discurso asociados a las variables que aparezcan en las proposiciones involucradas, pero no es obligatorio que las haya sobre la variable “valor de verdad” que podrá tomar valores 0 ó 1, dependiendo que las proposiciones se consideren como verdaderas o falsas. D. Dubois y H. Prade, entre otros, han

desarrollado la denominada Lógica Posibilística que trata con proposiciones no vagas pero sobre cuyo cumplimiento existe algún tipo de incertidumbre no aleatoria. En este caso para cada proposición hay certeza sobre el valor de las variables involucradas pero existe una distribución de posibilidad sobre su “valor de verdad”. Aunque relacionadas, la Lógica Difusa y la Posibilística son diferentes y no deben confundirse.

A partir de 1979, y en una línea de síntesis, Zadeh publica trabajos donde ya se describe una muy bien elaborada teoría del Razonamiento Aproximado reuniendo resultados de trabajos anteriores acerca de variables difusas, Lógica Difusa y distribuciones de posibilidad como herramientas para modelizar el proceso de obtener conclusiones imprecisas a partir de premisas imprecisas. Posteriormente (desde 1983), y continuando con las aplicaciones de la Lógica Difusa al Razonamiento Aproximado hay que citar los estudios acerca del “conocimiento de sentido común” (aquel en el que hay información sobreentendida) y los mecanismos de inferencia sobre este tipo de conocimiento, línea que finalmente proporciona las reglas de inferencia básicas a emplear para la combinación de la evidencia en Sistemas Expertos.

Los fundamentos del **razonamiento silogístico difuso** fueron establecidos por Zadeh en los años 1985 y 1986, introduciendo también los conceptos de **usualidad y disposición**, de gran importancia en el tratamiento de lenguajes naturales. Una idea clave del enfoque es considerar el significado de una proposición como una restricción sobre

una variable. De este modo, el problema de la inferencia se reduce a la solución de un programa no lineal. Mas recientemente, ha desarrollado una teoría de las disposiciones que proporciona un modelo realista para el razonamiento de sentido común y que se ha reputado como una herramienta de gran interés para el manejo de la incertidumbre en sistemas basados en el conocimiento y el diseño de controladores inteligentes para uso industrial.

La síntesis de todos los trabajos anteriores culmina a comienzo de los noventa en el cuerpo de doctrina bautizado por el propio Zadeh con el nombre de **Soft Computing**, de difícil traducción pero intuitivamente claro dentro del contexto que marca el Principio de Incompatibilidad. Mas modernamente y por evolución natural L. A. Zadeh ha introducido un nuevo paradigma denominado **Word Computing**, Cálculo con Palabras, cuyo mismo nombre hace ahora innecesario cualquier comentario.

Desde 1985 se observa un cambio sustancial en la orientación de las investigaciones que se dirigen básicamente a la consecución de productos efectivamente comerciales. Los responsables de este cambio son los investigadores japoneses, quienes desde la segunda mitad de la década de los ochenta se han colocado en la vanguardia de estos desarrollos. En la mayor parte de las aplicaciones actuales de la Lógica Difusa, se emplea el *software* para la implementación de los algoritmos difusos y las reglas de control. No obstante, y a partir de los trabajos pioneros de T. Yamakawa y M. Togai, donde se comienza el camino de las implementaciones *hardware*. En esta línea se han con-

seguido logros importantes, siendo de destacar el controlador de T. Yamakawa y el *chip* de Togai y Watanabe orientado a sistemas basados en reglas.

Podemos decir, sin temor a exagerar, que la Teoría de Subconjuntos Difusos es hoy día uno de los pilares donde se asienta la tecnología más vanguardista. Existen investigadores de este área en casi todos los países del mundo y los artículos y libros dedicados al tema se cuentan por millares. Puede encontrarse aplicaciones importantes al control de sistemas (una de cuyas muestras son los mecanismos de control inteligente para frenado de trenes o control de vuelo de helicópteros no tripulados), sistemas basados en el conocimiento, Investigación Operativa y Economía. Se están desarrollando implementaciones "*hardware*" de modelos de lógica difusa que prometen ser de vital importancia para la construcción de robots inteligentes con repercusión en campos tan alejados como la investigación espacial o las aplicaciones industriales. Las Redes Neuronales basadas en Lógica Difusa son un área de investigación muy prometedora que nuevamente apunta a la introducción de la inteligencia en el control de los procesos industriales. Finalmente destacaremos que los recientes desarrollos en optoelectrónica y electrónica molecular permitirán construir mecanismo de cálculo que ensancharán más, si cabe, el campo de las aplicaciones de la Teoría de Subconjuntos Difusos.

Sin entrar en justificaciones técnicas de porqué los Productos basados en Tecnologías Fuzzy (PBTF) son más adecuados, baratos y fáciles de producir y desarrollar que

sus paralelos sistemas convencionales, hay que reseñar que cualquier estadística sobre el número de productos de uso común y aplicaciones industriales de los PBTF, muestran la importancia que han alcanzado los mismos a nivel mundial, representando un volumen de negocio que actualmente supera los 15.000 millones de dólares anuales.

Aunque la mayor parte de los productos tienen origen en Japón, Corea, Estados Unidos o Europa en su conjunto, ha sido Japón el país que realmente ha actuado como locomotora de la producción y comercialización de bienes de gran consumo. La siguiente lista de productos de electrónica de consumo, es un buen ejemplo de esto.

- Videocámara de SANYO para el control del enfoque.
- Controlador del ABS y del cambio automático desarrollado por NISSAN.
- Videocámara de PANASONIC con control del enfoque y estabilizador de imagen.
- Aspiradora de NATIONAL con adaptación de la potencia según la cantidad de polvo.
- Controlador para aire acondicionado desarrollado por MITSUBISHI.
- Controlador del autofocus en la cámara fotográfica XI de MINOLTA.
- Videocámara de HITACHI con estabilización de la imagen y autofocus.
- Lavadora de la empresa MATUSHITA.
- Reconocimiento de caracteres manuscritos del "palm-top" computer de SONY.
- Otros electrodomésticos diversos como hornos microondas, secadoras, arroceras, ...

Pero también han desarrollado otras aplicaciones, quizás no tan populares como las anteriores, pero de una indudable importancia y trascendencia. Algunas de ellas se citan a continuación.

- Control del vuelo de helicópteros sin piloto (Laboratorio del Prof. Sugeno)
- Control de ascensores: TOSHIBA y FUJITEC.
- Control de incineradores de basura: MITSUBISHI
- Control de la ventilación en túneles largos: TOSHIBA
- Reconocimiento del habla: HITACHI.
- Control del metro de SENDAI.
- Control de robots (OMRON).
- "Electronic Eye" (FUJITSU).
- Sistema de control de tráfico (Dpto. de policía de Tokyo).
- Sistema de perforación de túneles desarrollado por OBA-YASHI GUMI.
- Fuzzy Logic Chip FC110 (Togai Infralogic).
- Fuzzy Inference Board FB-30AT (OMRON).
- Digital Fuzzy Processor FP-3000 (OMRON).
- Fuzzy Set Comparator Chip MD1210 (MICRO DEVICES).
- Fuzzy Inference Software FS-10AT (OMRON).
- Software NEUFUZ4 (NATIONAL SEMICONDUCTOR).

Aunque el desarrollo de PBTF esta teniendo un notable impacto social en todo el mundo, y en países alejados de nuestro más cercano entorno socio-cultural se han tomado importantes medidas encaminadas a potenciar este tipo de tecnologías (por ejemplo en EE.UU. se ha organizado la "Berkeley Initiative in Soft Computing", y en China se ha montado el "National Center for Fuzzy Mathematics, etc.), resulta evidente de la anterior lista que Japón esta a la

cabeza de los países que producen PBTF. Este papel protagonista lo han alcanzado, entre otras razones, gracias al decidido impulso gubernamental orientado a coordinar y aprovechar los esfuerzos de diferentes grupos investigadores, públicos y privados, así como los de empresas, industrias, etc., materializado en los centros LIFE (Laboratory for International Fuzzy Engineering Research, Yokohama) y FLSI (Fuzzy Logic Systems Institute, Iizuka), o en el programa "Real World Computing", recientemente iniciado.

En España existe un significativo número de investigadores que desarrollan su labor en el ámbito de la Lógica Difusa y sus aplicaciones. El desarrollo de la investigación en Teoría de Subconjuntos Difusos, Lógica Difusa etc. tiene una larga historia en la Universidad de Granada ya que fuimos, junto con la Universidad Politécnica de Cataluña, pioneros en iniciar el estudio de estos temas en España, a mediados de la década de los 70.

Salvo alguna excepción, la práctica totalidad de los investigadores de nuestra Universidad que trabajan en este campo se concentra en el Grupo de Trabajo sobre Razonamiento Aproximado e Inteligencia Artificial, cuya línea de trabajo maestra es el tratamiento de los problemas de imprecisión e incertidumbre en Inteligencia Artificial, empleando como modelos básicos de representación de estos fenómenos los proporcionados por la Lógica Difusa y la Teoría de Subconjuntos Difusos. Podemos, pues, identificar la historia y situación de las investigaciones en Lógica y Tecnologías Fuzzy en la Universidad de Granada con la historia y situación de dicho grupo.

Como hemos mencionado antes, el interés por estos temas arranca en nuestra Universidad a mediados de la década de los 70. Ya en 1977 se presentan comunicaciones en congresos nacionales e internacionales, y en 1980 se lee la primera tesis doctoral en este campo. Las primeras publicaciones sobre Lógica y Tecnología Fuzzy que aparecen en revistas internacionales datan del año 1982. A partir de entonces se inicia una fase de consolidación y desarrollo cuya cristalización es la constitución oficial del grupo como Grupo de Trabajo del Plan Andaluz de Investigación en 1988, estando situado hoy en día, por su producción y productividad, entre los primeros dentro del área de Tecnología de la Información y las Comunicaciones.

Para completar la revisión de los méritos científicos y profesionales de L. A. Zadeh sería necesario mencionar que es miembro de número de múltiples sociedades, que ha sido galardonado con gran cantidad de premios y distinciones, que pertenece al Comité Editorial de un sinnúmero de revistas especializadas, que ha sido y es Presidente y Conferenciante invitado en todo Congreso de la especialidad..., pero es tan extenso su currículum que resulta imposible hacer siquiera una descripción cualitativa de sus méritos sin olvidarse alguno de ellos.

Sería injusto que la ingente producción científica y tecnológica de L. A. Zadeh y su abultado currículum profesional nos hiciese olvidar sus enormes cualidades humanas. Por ello, tras repasar de forma obligadamente sucinta los hitos más importantes de su trayectoria profesional y de sus aportaciones a la Ciencia (con mayúscula), quiero

completar esta Laudatio destacando algunos rasgos de la faceta humana de L. A. Zadeh, quien destaca por ser un ejemplo vivo de aquel refrán español que sentencia “A mayor Grandeza mayor Llaneza”, como podemos atestiguar todos aquellos que hemos sido agraciados con el premio de su amistad. Permitaseme recordar una frase escrita por E. Trillas, introductor y pionero de la Teoría de Subconjuntos Difusos en España, acerca de L. A. Zadeh con motivo de los veinticinco años de la aparición del primer trabajo acerca de conjuntos difusos: “No olvidemos que por encima y tras del académico y el ingeniero está el hombre, a quien recordamos no solo por su excepcional amabilidad y cortesía, sino también, especialmente, por su sentido único de la amistad”.

Una característica de la personalidad de L. A. Zadeh, que además de hacerlo persona extremadamente grata para cualquiera que lo haya tratado, ha contribuido muy positivamente a su éxito científico, es su respeto hacia las ideas y posturas ajenas, junto con su capacidad para aceptar cualquier crítica a las propias. Gentes de muy diversas razas, religiones y tendencias han estudiado y han convivido con él sin que en ningún caso el peso de su enorme autoridad científica haya sido empleado como argumento en una discusión o una controversia. A esta amplitud de miras, y quizás como una consecuencia de ello, se une su enorme curiosidad, lo que hace que ninguna idea nueva haya sido desechada antes de ser analizada y evaluada como posible.

Como ejemplo de lo anterior quiero explicar una vivencia personal. Conocí a L. A. Zadeh en 1976 en un Congreso

Internacional en Barcelona. Yo presentaba uno de mis primeros trabajos sobre temas de la Teoría de Subconjuntos Difusos. La idea contenida en el trabajo no era del todo mala, creo que, al contrario, era aceptable, pero estaba fatalmente desarrollada y peor presentada. Yo era un perfecto principiante completamente desconocido en ese ámbito mientras que Zadeh era ya una autoridad mundialmente considerada como Padre de la Teoría en cuestión. Sin embargo dedicó una enorme cantidad de tiempo a enterarse de lo que se exponía (o se intentaba exponer) en mi trabajo, discutiendo conmigo en plano de igualdad acerca de algunos puntos dudosos e indicándome, finalmente, posibles caminos de desarrollo. Desde entonces le he visto hacer esto en multitud de ocasiones con otros investigadores principiantes y no tan principiantes y, para mi, desde aquel mismo momento, L. A. Zadeh pasó a la categoría de las personas a imitar a sabiendas de que nunca llegaría a igualarlo.

La trayectoria que se desprende de su currículum, la repercusión de sus investigaciones y desarrollos y sus cualidades personales lo hacen acreedor al nombramiento que aquí se propone, que no será sino el reconocimiento a su labor por parte de una Universidad, la de Granada, cuyo prestigio y el amparar en su seno a un activo grupo de investigación en los campos de trabajo del Prof. Zadeh, la hacen particularmente adecuada para otorgar tal reconocimiento.

Por todo ello pido al Claustro de Doctores la venia para que L. A. Zadeh sea investido Doctor “Honoris Causa” por la Universidad de Granada.

DISCURSO PRONUNCIADO
POR EL DOCTOR DON
LOFTI A. ZADEH
CON MOTIVO DE LA INVESTIDURA
“HONORIS CAUSA”

THE ROLES OF FUZZY LOGIC
AND SOFT COMPUTING IN THE CONCEPTION,
DESIGN AND DEPLOYMENT
OF INTELLIGENT SYSTEMS

LOTFI A. ZADEH¹

¹ Professor Emeritus and Director, Berkeley Initiative in Soft Computing (BISC), Computer Science Division, Department of EECS, University of California, Berkeley, CA 94720-1776. Tel: (510) 642-4959; fax: (510) 642-1712; email: zadeh@cs.berkeley.edu. This research was supported in part by the BISC Program, NASA Grant NCC 2-275, ONR Grant N00014-96-1-0556 and LLNL Grant B291525. Dedicated to Professor Enrique Trillas and the fuzzy logic community in Spain.

The Honorable Signor Rector, members of the administration, professors, students and researchers, Ladies and Gentlemen:

Firstly, I should like to thank all the people from the University of Granada the distinction that I am going to receive today. My special gratitude to the Rector, Professor Lorenzo Morillas, to the Members of the University School of Computer Engineering and its Head, Professor Rafael Molina, to the members of staff of the Computer Science Department and its Head, Professor Serafín Moral, to the Research Group into Approximate Reasoning from which the proposal arose and its Head, Professor Antonio González and, of course, last but not least, my Sponsor, Professor Miguel Delgado.

It is a great for me to stand here today as a recipient of the Doctorate Honoris Causa. The award of the Doctorate Honoris Causa has a special significance for me. First, because Spain is a country in which the theory of fuzzy sets and its concomitants have been embraced by many prominent mathematicians, scientists and engineers; and second, because Spain and Spanish people have always

occupied a very warm spot in my heart. One cannot but admire the richness of Spanish culture and its intellectual traditions. Spain has produced and it continuing to produce men and women who have contributed and are contributing so much to arts, music, literature, and science. But what touches me most is the warmth and generosity of the Spanish people. In today's world of turbulence and conflict, these are qualities that are in short supply.

In my lecture, I should like to sketch my perceptions of some of the recent trends which are shaping the evolution of fuzzy logic within the emerging discipline of soft computing.

To see the evolution of fuzzy logic in a proper perspective, it is important to note that we are in the throes of what is popularly called the *information revolution*. The artifacts of this revolutions are visible to all. The Internet, World Wide Web, cellular phones, fax machines and home computers with powerful information processing capabilities have become a part of everyday reality. The centrality of information in almost everything that we do is a fact that few would care to challenge.

Much less visible but potentially of equal or even greater importance is what might be called the *intelligent systems revolution*. The artifacts of this revolution are man-made systems which exhibit an ability to reason, learn from experience and make rational decisions without human intervention. I coined the term MIQ (Machine Intelligence Quotient) to describe a measure of intelligence of man-

made systems. In this perspective, an intelligent systems is a system which has a high MIQ.

I will have more to say about MIQ at a later point. A question that I should like to raise now is the following. We have been talking about artificial intelligence for over four decades. Why did it take AI so long to yield visible results?

Let me cite an example that bears on this questions. When I was an instructor at Columbia University I wrote an article titled "Thinking Machines –A New Field in Electrical Engineering" which was published in a student magazine. In the opening paragraph of this article, I quoted a number of headlines which appeared in the popular press of that time. One of the headlines read "An Electric Brain Capable of Translating Foreign Languages is Being Built". The point is that my article was published in January 1950, about six years before the term *artificial intelligence* was coined. What is obvious today is that a translation machine could not have been built in 1950 or earlier. The requisite technologies and methodologies were not in place.

We are much more humble today than we were at that time. The difficulty of building systems that could mimic human reasoning and cognitive ability turned out to be much greater than we thought at that time. Even today, with a vast array of powerful tools at our disposal, we are still incapable of building machines that can do what many children can do with ease, e.g., understand a fairy tale, peel an orange or eat food with a knife and a fork.



At this point, let me return to the concept of MIQ. A basic difference between IQ and MIQ is that IQ is more or less constant whereas MIQ changes with time and is machine-specific. Furthermore, the dimensions of MIQ and IQ are not the same. For example, speech recognition might be an important dimension of MIQ but in the case of IQ it is taken for granted.

At this juncture, we do not have as yet an agreed upon set of tests to measure the MIQ of a man-made system, e.g., a camcorder. But I believe that such tests will be devised at some point in the future and that eventually the concept of MIQ will play an important role in defining and measuring machine intelligence.

In realistic terms, we are just beginning to enter the age of intelligent systems. Why did it take so long for this to happen?

In my perception, there are three main reasons. In the first place, until recently the principal tools in AI's armamentarium were centered on symbol manipulation and predicate logic, while the use of numerical techniques was looked upon unfavorably. What is more obvious today than it was in the past is that symbol manipulation and predicate logic have serious limitations in dealing with real world problems in the realms of computer vision, speech recognition, handwriting recognition, image understanding, multimedia database search, motion planning, commonsense reasoning and management of uncertainty.

During the past several years, our ability to conceive, design and build machines with high MIQ has been greatly enhanced by the advent of what is now referred to as *soft computing*. Soft computing, or SC for short, is not a single methodology. Rather, it is a consortium of computing methodologies which collectively provide a foundation for the conception, design and deployment of intelligent systems. At this juncture, the principal members of SC are fuzzy logic (FL); neurocomputing (NC); genetic computing (GC); and probabilistic reasoning (PR), with the latter subsuming evidential reasoning, belief networks, chaotic systems, and parts of machine learning theory. In contrast to the traditional, hard, computing, soft computing is tolerant of imprecision, uncertainty and partial truth. The guiding principle of soft computing is: Exploit the tolerance for imprecision, uncertainty and partial truth to achieve tractability, robustness, low solution cost and better rapport with reality.

What is important about soft computing is that its constituent methodologies are for the most part synergistic and complementary rather than competitive. Thus, in many cases, higher MIQ can be achieved by employing FL, NG, GC and PR in combination rather than singly. Furthermore, there are many problems which cannot be solved if the only tool is fuzzy logic, neurocomputing, genetic computing or probabilistic reasoning. This challenges the position of those who claim that their favorite tool, be it FL, NC, GC or PR, is capable of solving all problems. The proponents of such views will certainly shrink in number once a better understanding of soft computing becomes widespread.

Within SC, each of the constituent methodologies has a set of capabilities to offer. In the case of fuzzy logic, it is a body of concepts and techniques for dealing with imprecision, information granularity, approximate reasoning and, most importantly, computing with words. In the case of neurocomputing, it is the capability for learning, adaptation and identification. In the case of genetic computing, it is the capability to employ systematized random search and achieve optimal performance. And in the case of probabilistic reasoning, it is a body of concepts and techniques for uncertainty management and evidential reasoning.

System in which FL, NC, GC and PR are used in some combination are called *hybrid systems*. Among the most visible systems of this type are so-called neuro-fuzzy systems. We are beginning to see fuzzy-genetic systems, neuro-genetic systems and neuro-fuzzy-genetic systems. In my view, eventually, most high MIQ systems will be hybrid systems. In the future, the ubiquity of hybrid systems will have a profound impact on the ways in which intelligent systems are designed, built and interacted with.

What is the place of fuzzy logic in soft computing? First, I should like to clarify a common misconception about what fuzzy logic is and what it has to offer.

A source of confusion is that the label fuzzy logic is used in two different senses. In a narrow sense, fuzzy logic is a logical system which is an extension of multivalued logic. However, even in its narrow sense the agenda of

fuzzy logic is very different both in spirit and in substance from the agendas of multivalued logical systems.

In its wide sense –which is the sense in predominant use today– fuzzy logic is co-extensive with the theory of fuzzy sets, that is, classes with unsharp boundaries. In this perspective, fuzzy logic in its narrow sense is a branch of fuzzy logic in its wide sense, or FL for short.

What is important about FL is that any theory, T, can be fuzzified –and hence generalized– by replacing the concept of a crisp set in T with that of a fuzzy set. In this way, one is led to fuzzy T, e.g., fuzzy arithmetic, fuzzy topology, fuzzy probability theory, fuzzy control and fuzzy decision analysis. What is gained from fuzzification is greater generality and better rapport with reality. However, fuzzy numbers are more difficult to compute with than crisp numbers. Furthermore, the meanings of most fuzzy concepts are context and/or application-dependent. This is the price that has to be paid for a better rapport with reality.

There is a point of fundamental importance which lies at the base of ways in which humans deal with fuzzy concepts. The point in question has to do with *information granularity* and its role in human reasoning, communication and concept formation. In what follows, I will attempt to explain why information granularity plays an essential role in dealing with fuzzy concepts and, in particular, in reasoning and computing with words rather than numbers.

The concept of information granularity motivated most of my early work on fuzzy sets and fuzzy logic. Basically, the point that I stressed is that most human concepts are fuzzy because they are the result of clumping of points or objects which are drawn together by similarity. The fuzziness of such clumps, then, is a direct consequence of the fuzziness of the concept of similarity. Simple example of clumps are the concepts of middle-aged, downtown, partially cloudy, obtuse, etc. To underscore its role, a clump will be referred to as a *granule*.

In a natural language, words play the role of labels of granules. In this role, words serve to achieve data compression. The achievement of data compression through the use of words is a key facet of human reasoning and concept formation.

In fuzzy logic, information granularity underlies the concepts of linguistic variable and fuzzy if-then rules. These concepts were formally introduced in my 1973 paper «Outline of a New Approach to the Analysis of Complete Systems and Decision Processes». Today, almost all applications of fuzzy logic employ these concepts.

It is of historical interest to note that my introduction of these concepts was met with skepticism and hospitality by many eminent members of the scientific establishment. To cite just two examples, my good friend Professor R. Kalman had this to say in 1972.

“I would like to comment briefly on Professor Zadeh’s presentation. His proposals could be seve-

rely, ferociously, even brutally criticized from a technical point view. This would be out of place here. But a blunt question remains: Is Professor Zadeh presenting important ideas or is he indulging in wishful thinking?

No doubt Professor Zadeh’s enthusiasm for fuzziness has been reinforced by the prevailing political climate in the U.S. —one of unprecedented permissiveness. ‘Fuzzification’ is a kind of scientific permissiveness; it tends to result in socially appealing slogans unaccompanied by the discipline of hard scientific work and patient observation.

Let me say quite categorically that there is no such thing as a fuzzy scientific concept, in my opinion”.

In a similar vein, a colleague of mine, Professor William Kahan, commented in 1975:

“Fuzzy theory is wrong, and pernicious. I can not think of any problem that could not be solved better by ordinary logic. What Zadeh is saying is the same sort of things ‘Technology got us into this mess and now it can’t get us out’. Well, technology did not get us into this mess. Greed and weakness and ambivalence got us into this mess. What we need is more logical thinking, not less. The danger of fuzzy theory is that it will encourage the sort of imprecise thinking that has brought us so much trouble”.

Today, more than two decades later, what these examples show is that eminence is not always a guarantee of correctness.

The importance of fuzzy rules stems from the fact that such rules are close to human intuitions. In fuzzy logic, fuzzy rules play a central role in what is called *Fuzzy Dependency and Command Language* (FDCL). In an informal way, it is this language that is used in most of the applications of fuzzy logic.

In comparing fuzzy logic with other methodologies, a point that is frequently unrecognized is that, typically, the point of departure in a fuzzy logic solution is a human solution. Thus, a fuzzy logic solution is usually a human solution expressed in FDCL.

An easily understood example of this point is the parking problem. A fuzzy logic solution of the parking problem would be a collection of fuzzy if-then rules which describe how a human parks a car. The parking problem is hard to solve in the context of classical control. In this context, the point of departure is not a human solution but a description of the final state, the initial state, the constraints and the equations of motion.

A further example which illustrates the essentiality of information granularity is the following.

Consider a situation in which a person A is talking over the phone to a person B whom A does not know. After a

short time, say 10-20 seconds, A can form a rough estimate of the age of B expressed as

- the probability that B is very young is very low
- the probability that B is young is low
- the probability that B is middle-aged is high
- the probability that B is old is low
- the probability that B is very old is very low

These estimates may be interpreted as a granular representation of the probability distribution, P, of B's age. In a symbolic form, P may be represented as a *fuzzy graph*:

$$P = \text{very_low} \setminus \text{very_young} + \text{low} \setminus \text{young} + \text{high} \setminus \text{middle-aged} + \text{low} \setminus \text{old} + \text{very_low} \setminus \text{very_old}$$

In this expression, + is the disjunction and a term such as *low* \ *old* means that *low* is the linguistic probability that B is *old*.

The important point is that humans can form such estimates using linguistic, i.e., granulated, values of age and probabilities. However, humans could not come up with numerical estimates of the form "the probability that B is 25 is 0.012"

It should be observed that in many cases a human would estimate the age of B as *middle-aged* omitting the associated probability. The omission of probabilities may be justified if there exists what might be called a *p-dominant* value in a probability distribution, that is, a value whose

probability dominates the probabilities of other values. The omission of probabilities plays a key role in approximate reasoning.

A question which arises is: Could the use of a methodology within soft computing provide an estimate of the age of B without human intervention. In my view, the answer is in the negative. More specifically, neurocomputing and genetic computing techniques would fail because of the complexity of input-output pairs, while fuzzy logic would fail—even though a human solution exists—because humans would not be able to articulate the rules by which the age estimate is arrived at.

In sum, information granularity lies at the center of human reasoning, communication and concept formation. Within fuzzy logic, it plays a pivotal role in what might be called *computing with words*, or CW for short. CW may be viewed as one of the most important contributions of fuzzy logic.

What is computing with words? As its name suggest, in computing with words the objects of computing are words rather than numbers, with words playing the role of labels of granules. Very simple examples of CW are:

Dana is young

Tandy is a few years older than Dana

Tandy is (young + few) years old

most students are young

most young students are single

most² students are single

In these examples, *young*, *few* and *most* are fuzzy numbers; + is the operation of addition in fuzzy arithmetic and *most*² is the square of *most* in fuzzy arithmetic.

In Western cultures, there is a deep-seated tradition of according more respect to numbers than to words. But as is true of any tradition, a time comes when the rationale for a tradition ceases to be beyond question. In my view, the times has come for questioning the validity of the tradition of according more respect to numbers than to words.

What we need at this juncture is a system which allows the data be expressed as propositions in a natural language. This is what CW attempts to provide.

The point of departure in CW is a collection of propositions expressed in a natural language. This collection is referred to as the *initial data set*, or IDS for short. The desired answers or conclusions are likewise expressed as a collection of propositions expressed in a natural language. This collection is referred to as the *terminal data set*, or TDS for short. The problem is to arrive at TDS starting with IDS. A very simple example is one where the initial data set is the proposition: *most Swedes are tall*, and the terminal data set is the answer to the query: *What is the*

average height of Swedes?. The answer is expected to be of the form: *The average height of Swedes is A*, where A is a linguistic value of height. In this example, the aim of CW is to compute A from the information provided by the initial data set.

In CW, words play the role of fuzzy constraints and a proposition is interpreted as a fuzzy constraint on variable. For example, the proposition *Mary is young* is interpreted as a fuzzy constraint on Mary's age. In symbols

Mary is young \rightarrow Age (Mary) is young

In this expression \rightarrow represents the operation of *explicitation*; *Age (Mary)* is the constrained variable; and *young* is a fuzzy relation which constrains *Age (Mary)*.

More generally, if *o* is a proposition in a natural language, the result of explicitation of *p* is what is called the *canonical form* of *p*. Basically, the canonical form of a proposition, *p*, makes explicit the implicit fuzzy constraint in *p* and thus serves to define the meaning of *p* as a constraint on a variable.

In a more general setting, the canonical form of *p* is represented as

$X \text{ irs } R$

where *X* is the constrained variable, *R* is the constraining fuzzy relation and *irs* is a variable copula in which *r* is a

discrete variable whose values define the role of *R* in relation to *X*. In particular, if $r = d$, *isd* is abbreviated to *is* and the constraint *X is R* is said to *disjunctive*. In this case, *R* defines the possibility distribution of *X*.

What is the reason for treating *r* as a variable? The richness of natural languages necessitates the use of a wide variety of constraints to represent the meaning of a proposition expressed in natural language. In CW, the principal types of constraints that are employed –in addition to the disjunctive type– are: conjunctive, probabilistic, usuality, random set, rough set, fuzzy graph and functional types. Each of these types corresponds to a particular value of *r*.

In CW, the first step in computing the terminal data set is that of explicitation, that is, the representation of propositions in IDS in their canonical forms. The second step involves constraint propagation, which is carried out through the use of the rules of inference in fuzzy logic. In effect, the rules of inference in fuzzy logic may be interpreted as the rules of constraint propagation.

One of the principal rules of inference in fuzzy logic is the *generalized extension principle*, which may be expressed as

$$\frac{f(x) \text{ is } A}{g(x) \text{ is } f^{-1}(g(A))}$$

In this expression, *f* and *g* are given functions; f^{-1} is the inverse of *f*; and *f(X) is A* is the canonical form of a

functional constraint which is in the initial data set. The induced constraint on X which is represented by the canonical form $g(X)$ is $f^{-1}(f(A))$ is of functional type. In general, the computation of induced constraints reduces to the solution of a nonlinear program which involves a constrained maximization of a membership function.

The third and final step in the computation of the terminal data set involves a retranslation of induced constraints into propositions expressed in a natural languages. In fuzzy logic, this require the use of what is referred to as *linguistic approximation*.

What is importante to recognize is that the steps sketched above may require an extensive use of computing with numbers. However, as a stage of CW, computing with numbers takes place behind a curtain, hidden from the view of a user.

So what is it that CW has to offer? The ability to infer from initial data sets in which information is conveyed by propositions expressed in a natural language, opens the door to the formulation and solutions of many problem in which the available information is not precise enough to justify the use of conventional techniques. To illustrate, suppose that the problem is that of maximizing a function which is described in words through the fuzzy if-then rules.

- if X is small then Y is small
- if X is medium than Y is large
- if X is large then Y is small

in which small, medium and large are defined thorough their membership functions. Another problem is this vein is the following. Assume that a box contains ten ball of various sizes of which several are large and a few are small. What is the probability that a ball drawn at random is neither small nor large?

In these examples, the propositions in the initial data ser are quite simple. The real challenge is to develop CW to a point where it could cope with propositions of much greater complexity which express real-world knowledge.

At this juncture, computing with words is a branch of fuzzy logic. In my perceptions, in coming years computing with words is likely to evolve into an important methodology in its own right, providing a way of coping with the pervasive imprecision and uncertainty of the real world. In this perspective, the role model for computing with words, fuzzy logic and soft computing is the human mind.

The conception, desing and deployment of intelligent systems presents a great challenge to those of us who are engaged in the development and aplications of fuzzy logic and soft computing. Hopefully, our efforts will contribute to the creation of a society in which intelligent systems will serve to enhance human welfare and intellectual freedom.

LOS PAPELES DE LA LÓGICA DIFUSA
Y SOFT COMPUTING EN LA CONCEPCIÓN,
DISEÑO Y UTILIZACIÓN DE
LOS SISTEMAS INTELIGENTES

LOFTI A. ZADEH¹

¹ Profesor emérito y Director. Berkeley Initiative in Soft Computing (BISC). Dedicado al Profesor Enrique Trillas y la comunidad de lógica difusa en España.



Excelentísimo y Magnífico Señor Rector, dignísimas autoridades, queridos profesores, investigadores y estudiantes, Señoras y Señores:

Quiero, en primer lugar, agradecer a todas las personas de la Universidad de Granada la distinción que hoy voy a recibir. Mi agradecimiento especial al Rector, Profesor D. Lorenzo Morillas, a los miembros de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática y su Director, Profesor D. Rafael Molina, a los miembros del Departamento de Ciencias de la Computación y su Director, Profesor D. Serafín Moral, al Grupo de Investigación de Razonamiento Aproximado de la que surgió la propuesta y su Director, Profesor D. Antonio González y, desde luego, a mi Padrino, el Profesor D. Miguel Delgado.

Es un gran honor para mí estar aquí hoy como receptor del Doctorado Honoris Causa. El otorgamiento del Doctorado Honoris Causa tiene un significado especial para mí. Primero, porque España es un país donde la teoría de Conjuntos Difusos y sus concomitantes han sido abrazados por muchos matemáticos, científicos e ingenieros destacados; y segundo, porque España y el pueblo español

siempre han ocupado un lugar privilegiado en mi corazón. No se puede más que admirar la riqueza de la cultura española y sus tradiciones intelectuales. España ha dado y sigue dando hombres y mujeres que han contribuido y contribuyen tanto a las artes, la música, la literatura y la ciencia. No obstante, lo que más me impresionan son el calor y la generosidad del pueblo español. En el mundo actual lleno de turbulencia y conflicto, hacen falta dichas calidades.

En mi discurso, me complace esbozar mis percepciones sobre las tendencias recientes que forman la evolución de la Lógica Difusa dentro de la disciplina emergente de soft computing.

Para considerar la evolución de la lógica desde una perspectiva adecuada, es importante tener en cuenta que nos encontramos en la época de lo que se denomina popularmente la revolución de la información. Los artefactos de dicha revolución son visibles por todas partes. La Internet, la World Wide Web, los teléfonos celulares (portátiles), las máquinas de fax y los ordenadores en casa con capacidades potentes de proceso de datos, todo ello se ha convertido en una parte de nuestra realidad cotidiana. La centralidad de la información en casi todo lo que hacemos es un hecho consumado que pocos se atreven a refutar.

Lo que es mucho menos visible, pero de una importancia igual o aún más crucial es lo que se podría denominar la revolución de los sistemas inteligentes. Los artefactos de esta revolución son sistemas creados por hombres, que

demuestran la capacidad de razonar, aprender de la experiencia y tomar decisiones racionales sin la intervención humana. Yo mismo acuñé el término MIQ (Cociente Intelectual de Máquina). A partir de esta perspectiva un sistema inteligente es un sistema que tenga un MIQ superior.

Más adelante volveré a mencionar más detalles acerca del MIQ. Una pregunta que quisiera plantear ahora es la siguiente, Ya llevamos más de cuatro decenios hablando de la inteligencia artificial. ¿Por qué ha tardado tanto tiempo en producir resultados tangibles la IA?

Déjenme citar un ejemplo que tiene que ver con esta pregunta. Cuando yo era profesor en la Universidad de Columbia, escribí un artículo titulado “Las Máquinas que Piensan. Un Nuevo Campo de la Ingeniería Electrónica”, que se publicó en una revista estudiantil. En el primer apartado de dicho artículo, cité determinados titulares que aparecían en la prensa popular en aquel entonces. Uno de los titulares decía: “Se Construye una Mente Electrónica Capaz de Traducir Idiomas Extranjeros”. El punto importante radica en el hecho de que mi artículo apareció en el mes de Enero del año 1950, unos seis años antes de acuñarse el término de la inteligencia artificial. Lo que sí está claro hoy en día es que no se podía haber construido una máquina traductora en el año 1950 o antes. Las tecnologías y metodologías imprescindibles no existían.

Ahora somos mucho más humildes que lo éramos entonces. La dificultad de construir sistemas capaces de imitar el razonamiento humano y la capacidad cognitiva resultó ser

mucho mayor de lo que creíamos en aquella época. Incluso hoy, con una gama enorme de herramientas potentes a nuestra disposición, seguimos siendo incapaces de construir máquinas que puedan realizar lo que los niños hacen con facilidad, por ej., comprender un cuento de hadas, pelar una naranja o comer con un tenedor y un cuchillo.

En este punto, déjeme volver al concepto del MIQ. Una diferencia fundamental entre el IQ (Cociente Intelectual Humano) y el MIQ es el hecho de que el IQ es más o menos constante, mientras que el MIQ cambia a través del tiempo y es específico a la máquina. Además, las dimensiones del MIQ y del IQ no son las mismas. Por ejemplo, el reconocimiento del habla puede ser una dimensión importante del MIQ, pero en el caso del IQ está dado por sentado.

En este momento, no disponemos hasta ahora de un conjunto de pruebas consensuado para medir el MIQ de un sistema construido por el hombre, p.ej., una videocámara personal. Pero creo que dichas pruebas serán creadas en algún momento, en el futuro y que a la larga el concepto del MIQ desempeñará un papel importante en la definición y la medición de la inteligencia de las máquinas.

En términos realistas, acabamos de entrar en la época de los sistemas inteligentes. ¿Por qué ha tardado tanto tiempo en producirse?

A mi juicio, existen tres motivos. En primer lugar, hasta hace poco las herramientas principales del arsenal de la IA

se centraban en la manipulación simbólica y la lógica de predicados, mientras que se consideraba la utilización de las técnicas numéricas con cierto desdén. Lo que hoy está más claro que en el pasado es que la manipulación simbólica y la lógica de predicados tienen graves limitaciones a la hora de tratar con los problemas del mundo real en los reinos de la visión por ordenador, el reconocimiento de la voz, el reconocimiento de la letra, la comprensión de imágenes, la búsqueda de bases de datos de multimedia, la planificación del movimiento, el razonamiento con sentido común y la gestión de la incertidumbre.

Durante los últimos años, nuestra capacidad de concebir, diseñar y construir las máquinas con un alto MIQ se ha visto enormemente mejorada por la llegada de lo que actualmente se denomina "soft computing". Soft computing, o SC en abreviatura, no representa una metodología única. Más bien, es un consorcio de metodologías de computación que, de forma conjunta, proporcionan la base de la concepción, diseño y utilización de los sistemas inteligentes. En este momento, los miembros principales de SC son la lógica difusa (FL); la neurocomputación (NC); la computación genética (GC); y el razonamiento probabilístico (PR), y éste último abarca el razonamiento evidencial, las redes de creencia, los sistemas caóticos, y partes de la teoría de aprendizaje por máquinas. Al contrario a la computación tradicional y dura, soft computing tolera la imprecisión, la incertidumbre y la verdad parcial. El principio rector de soft computing es: Aproveche la tolerancia de la imprecisión, la incertidumbre y la verdad parcial para conseguir la maleabilidad, la robustez, el bajo coste de solución y una mejor relación con la realidad.

Lo que es importante en cuanto a soft computing es que sus metodologías constituyentes son, en la mayor parte, sinérgicas y complementarias en vez de competitivas. Así, en muchos casos, se puede conseguir un MIQ superior empleando FL, NG, GC y PR de forma conjunta en vez de forma independiente. Además, existen muchos problemas que no pueden resolverse si la única herramienta es la Lógica Difusa, la neurocomputación, la computación genética o el razonamiento probabilístico. Este hecho reta la posición de aquellos que afirman que su herramienta, sea cuál sea, la FL, La NC, la GC o el PR, pueda resolver todos los problemas. Los defensores de tales puntos de vista seguramente dejarán de existir en cuanto se difunda una mejor comprensión de soft computing.

Dentro de SC, cada una de las metodologías constituyentes dispone de un conjunto de capacidades que ofrece. En el caso de la Lógica Difusa, es un cuerpo de conceptos y técnicas para tratar con la imprecisión, la granularidad de la información, el razonamiento aproximado y, sobre todo, la computación con palabras. En el caso de la neurocomputación, es la capacidad de aprender, adaptar e identificar. En el caso de la computación genética, es la capacidad de emplear una búsqueda aleatoria sistematizada y conseguir un rendimiento óptimo. Y en el caso del razonamiento probabilístico, es un cuerpo de conceptos y técnicas para la gestión de la incertidumbre y el razonamiento evidencial.

Los sistemas en los que se emplean FL, NC, GC y PR en algunas combinaciones se denomina sistemas híbridos.

Entre los sistemas más visibles de estos tipos se encuentran los denominados sistemas neurales difusos. Ya empezamos a ver los sistemas genéticos difusos, los sistemas genéticos neurales y los sistemas genéticos difusos neurales. A mi juicio, a la larga, la mayoría de los sistemas de MIQ superior serán sistemas híbridos. En el futuro, la ubicuidad de los sistemas híbridos tendrá un impacto profundo en las maneras en las que se diseñan y construyen los sistemas inteligentes además de la manera de interactuar con ellos.

¿Cuál es el lugar de la Lógica Difusa en soft computing? En primer lugar, quisiera aclarar un malentendido común acerca de lo es la Lógica Difusa y lo que puede ofrecer.

Una fuente de confusión es que la etiqueta de la lógica difusa se emplea con dos sentidos distintos. En el sentido restringido, la Lógica Difusa es un sistema lógico que es una ampliación de la lógica polivalente. Sin embargo, aún en su sentido más restringido, la agenda de la lógica difusa es muy distinta tanto del espíritu como de la sustancia de la agenda de los sistemas lógicos polivalentes.

En su sentido más amplio —el cual es el sentido más utilizado hoy en día— la lógica difusa es coextensiva con la teoría de conjuntos difusos, es decir, las clases con límites no agudos. Desde esta perspectiva, la lógica difusa en su sentido estrecho es una rama de la lógica difusa en su sentido amplio, o FL abreviadamente.

Lo que importa de FL es que cualquier teoría, T, puede difuminarse —y por tanto generalizarse— sustituyendo al

concepto de un conjunto “crisp” en T por él de un conjunto difuso. De este modo, se llega a la T difusa, p.ej., la aritmética difusa, la topología difusa, la teoría de probabilidad difusa, el control difuso y el análisis de decisión difusa. Lo que se gana con la “difuminación” es, principalmente, mayor generalidad y una relación más estrecha con la realidad. No obstante, los números difusos son más difíciles para computar que los números “crisp”. Además, los significados de la mayoría de los conceptos difusos son dependientes del contexto y/o la aplicación. Este es el precio que hay que pagar para conseguir una mejor relación con la realidad.

Hay un punto de una importancia fundamental que reside en la base de las formas en las que los humanos tratan los conceptos difusos. El punto en cuestión tiene que ver con la granularidad de la información y su papel en el razonamiento, las comunicaciones y la formación de los conceptos del ser humano. A continuación, intentaré explicar por qué la granularidad de la información desempeña un papel imprescindible a la hora de tratar los conceptos difusos y, sobre todo, en el razonamiento y la computación con palabras en vez de números.

El concepto de la granularidad de la información motivó la mayoría de mis primeros trabajos sobre los conjuntos difusos y la lógica difusa. Básicamente, el punto que subrayé es que la mayoría de los conceptos humanos son difusos, porque son el resultado de amontonar puntos u objetos que se atraen por su similitud. La calidad difusa de tales grupos, entonces, es una consecuencia directa de

la calidad difusa del concepto de similitud. Unos ejemplos sencillos de grupos son los conceptos de “personas de mediana edad”, “en el centro”, “parcialmente nublado”, “obtuso”, etc. Para subrayar su papel, se referirá a un grupo como un gránulo.

En un lenguaje natural, las palabras desempeñan el papel de etiquetas de los gránulos. Dentro de dicho papel, las palabras sirven para conseguir una comprensión de los datos. La consecución de la comprensión de datos mediante el uso de palabras es una característica clave del razonamiento humano y la formación de conceptos.

Dentro de la lógica difusa, la granularidad de información subyace los conceptos de variables lingüísticas y las reglas if-then difusas. Dichos conceptos fueron introducidos en mi artículo del año 1.973 “Outline of a New approach to the Analysis of Complete Systems and Processes”. Hoy en día, casi todas las aplicaciones de la lógica difusa emplean estos conceptos.

Es de interés histórico tener en cuenta que mi introducción de estos conceptos fue acogida por escepticismo y hostilidad por parte del mundo científico. Para citar tan sólo dos ejemplos, mi buen amigo el Profesor R. Kalman dijo lo siguiente en el año 1972:

“Me gustaría comentar brevemente lo expuesto por el Profesor Zadeh. Sus propuestas podrían criticarse severamente, ferozmente, e incluso brutalmente, desde un punto de vista técnico. Esto estaría fuera

de lugar aquí. Pero, hay una cuestión que plantear sin aspereza: ¿El Profesor Zadeh, presenta ideas importantes o está sufriendo un espejismo?

Sin duda, el entusiasmo del Profesor Zadeh por la lógica difusa se ha visto favorecida por el clima político que impera en los Estados Unidos, de una permisividad sin precedentes. La “difuminización” es un tipo de permisividad científico; tiende a dar lugar a slogans socialmente atractivos, que no van acompañados por la disciplina del trabajo científico sólido y la observación paciente.

Déjenme decir, de forma bastante categórica que, en mi opinión, no existe algo como un concepto científico difuso”.

En una línea similar; un compañero mío, el Profesor William Kahan, comentaba en 1975:

“La teoría difusa es errónea, errónea y perniciosa. No puedo pensar en ningún tipo de problema que no pudiera resolverse mejor mediante lógica clásica. Zadeh está diciendo el mismo tipo de cosas “La Tecnología nos llevó a esta confusión, y ahora no es capaz de sacarnos de ella”. Bien, la tecnología no nos llevó a esta conclusión. La ambición y la debilidad y la ambivalencia nos llevaron a esta confusión. Lo que necesitamos es más pensamiento lógico, no menos. El peligro de la teoría difusa es que fomentará ese tipo de pensamiento impreciso que nos ha traído tantos problemas”.

Hoy, más de dos decenios más tarde, lo que demuestran estos ejemplos es que el renombre no siempre es garantía de exactitud.

La importancia de la reglas difusas surge del hecho de que dichas reglas se aproximan a la intuición humana. En la lógica difusa, las reglas difusas desempeñan un papel central en los que se denomina Dependencia Difusa y Lenguaje de Comando (FDCL). De una manera informal, este es el lenguaje que se utiliza en la mayoría de las aplicaciones de la lógica difusa.

Al comparar la lógica difusa con otras metodologías, hay un punto que no se suele reconocer que es, típicamente, el hecho de que el punto de partida de una solución de lógica difusa es una solución humana. Así, un solución de lógica difusa suele ser una solución humana expresada en FDCL.

Un ejemplo fácil de entender de este punto es el problema de aparcar. Una solución de la lógica difusa para el problema de aparcar sería una colección de reglas if-then difusas que describen cómo aparca un coche un ser humano. El problema de aparcar es difícil de resolver en el contexto del control clásico. En este contexto, el punto de partida no es una solución humana, sino una descripción del estado final, el estado inicial, las restricciones y las ecuaciones de movimiento.

Otro ejemplo que ilustra la naturaleza imprescindible de la granularidad de la información es el siguiente:

Consideremos una situación en la que una persona A está hablando por teléfono con una persona, B, a quién A no conoce. Después de poco tiempo, digamos 10 a 20 segundos, A puede formular una estimación aproximada de la edad de B expresada como:

- la probabilidad de que B sea muy joven es muy baja
- la probabilidad de que B sea joven es baja
- la probabilidad de que B sea de mediana edad es alta
- la probabilidad de que B sea viejo es baja
- la probabilidad de que B sea muy viejo es muy baja

Estas estimaciones pueden interpretarse como una representación granular de la distribución de la probabilidad, P, acerca de la edad de B. De forma simbólica, P puede representarse como un grafo difuso:

$$P = \text{muy_baja} \setminus \text{muy_joven} + \text{baja} \setminus \text{joven} * \text{alta} \setminus \text{de mediana edad} + \text{baja} \setminus \text{viejo} + \text{muy_baja} \setminus \text{muy_viejo}$$

En esta expresión, + es la disyunción y un término como $\text{baja} \setminus \text{viejo}$ significa que baja es la probabilidad lingüística de que B sea viejo.

El punto importante es que los seres humanos pueden formar tales estimaciones mediante los valores lingüísticos, es decir, granulados, los valores de edad y probabilidades. Sin embargo, los humanos no llegarían a conseguir estimaciones del tipo “la probabilidad de que Bes de mediana edad sea de 0,012”.

Hay que decir que en muchos casos un ser humano estimaría la edad de B como de edad mediana omitiendo la probabilidad asociada. La omisión de las probabilidades puede justificarse si existe lo que se puede denominar un valor de p-dominante en una distribución de probabilidad, es decir, un valor cuya probabilidad domina las probabilidades de los demás valores. La omisión de las probabilidades desempeña un papel clave en el razonamiento aproximado.

Surge una pregunta: ¿Podría la utilización de una metodología dentro de soft computing proporcionar una estimación de la edad de B sin la intervención humana? A mi juicio, la respuesta es negativa. Más específicamente, las técnicas de neurocomputación y de computación genética no lo lograrían, debido a la complejidad de los pares de entrada-salida, mientras que la lógica difusa no lo lograría —aunque hubiera una solución humana— porque los seres humanos no pudrían articular las reglas mediante las cuales se llegase a la edad estimada.

En resumen, la granularidad de la información reside en el centro del razonamiento, de las comunicaciones y de la formación de conceptos de los seres humanos. Dentro de la lógica difusa, desempeña un papel fundamental en lo que se puede denominar la computación con palabras, o la CW en su forma abreviada. La CW puede considerarse como una de las contribuciones más importantes de la lógica difusa.

¿En que consiste la computación con palabras? Como sugiere su nombre, en la computación con palabras los

objetos de la computación son palabras en vez de números, y las palabras desempeñan el papel de etiquetas de gránulos. Unos ejemplos muy sencillos de la CW son:

Diana es joven

Tandy tiene unos años más que Diana

Tandy es (joven + unos pocos) años de edad

la mayoría de los estudiantes son jóvenes

la mayoría de los estudiantes jóvenes son solteros

la mayoría de los estudiantes son solteros

En estos ejemplos, joven, unos pocos, y la mayoría representan números difusos; + es la operación de suma en la aritmética difusa y la mayoría es el cuadrado de la mayoría en la aritmética difusa.

En las culturas occidentales, existe una tradición muy arraigada de otorgar más respeto a los números que a las palabras. Pero lo que es cierto para en cualquier tradición, es que llega un momento en el cual la razón de ser de una tradición deja de ser incuestionable. A mi juicio, ha llegado el momento de cuestionar la validez de la tradición según la cual hay que otorgar más respeto a los números que a las palabras.

Lo que hace falta en este momento es un sistema que permita expresar los datos como proposiciones en un lenguaje natural. Esto es lo que intenta proporcionar la CW.

El punto de partida en CW es una colección de proposiciones expresadas en un lenguaje natural. Se refiere a dicha colección como el conjunto de datos iniciales, o IDS de forma abreviada. Las respuestas o conclusiones deseadas se expresan igualmente como una colección de proposiciones expresadas en un lenguaje natural. Se refiere a dicha colección como el conjunto de datos terminal, o el TDS de forma abreviada. El problema radica en llegar al TDS partiendo del IDS: Un ejemplo muy sencillo es uno donde el conjunto de datos iniciales es la proposición: “la mayoría de los suecos son altos”, y el conjunto de datos terminales es la respuesta a la pregunta: ¿Cuál es la altura media de los suecos? Se espera que la respuesta sea de la forma: La altura media de los suecos es A, donde A es un valor lingüístico de altura. En este ejemplo, el propósito de CW es él de computar A mediante la información proporcionada por el conjunto de datos iniciales.

En CW, las palabras desempeñan el papel de restricciones difusas y una proposición es interpretada como una restricción difusa sobre una variable. Por ejemplo, la proposición de Mary es joven se interpreta como una restricción difusa sobre la edad de Mary. En símbolos:

Mary es joven \rightarrow Edad(Mary) es joven

En esta expresión, \rightarrow representa la operación de explicitación; Edad(Mary) es la variable restringida; y joven es una relación difusa que restringe Edad(Mary).

Más generalmente, si p es una proposición en un lenguaje natural, el resultado de la explicitación de p es lo que se

denomina la forma canónica de p. Básicamente, la forma canónica de una proposición, p, hace que la restricción difusa implícita en p sea explícita y así sirve para definir el significado de p como una restricción sobre una variable.

En un escenario más general, la forma canónica de p se representa como:

$$X \text{ isr } R$$

donde X es la variable restringida, R es la relación difusa restrictora e isr es una variable cópula en la que r es una variable discreta cuyos valores definen el papel de R en relación con X. En particular, si $r = d$, isd se abrevia como es y se dice que la restricción X es R es disyuntiva. En este caso, R define la distribución de la posibilidad de X.

¿Cuál es el motivo de tratar r como una variable? La riqueza de los lenguajes naturales exige la utilización de una amplia gama de restricciones para representar el significado de una proposición expresada en un lenguaje natural. En CW, los principales tipos de restricciones que se emplean —además del tipo disyuntivo— son los tipos siguientes: coyuntivo, probabilístico, de usualidad, conjunto aleatorio, conjunto aproximado, grafo difuso y el tipo funcional. Cada uno de dichos tipos corresponde a un valor particular de r.

En CW, el primer paso en la computación del conjunto de datos terminales es el de la explicitación, es decir, de la representación de las proposiciones de IDS en sus formas

canónicas. El segundo paso incluye la propagación de restricciones, que se lleva a cabo mediante la utilización de las reglas de inferencia de la lógica difusa. De hecho, las reglas de inferencia de la lógica difusa pueden interpretarse como las reglas de la propagación de restricciones.

Una de las principales reglas de inferencia de la lógica difusa es el principio de extensión generalizada, que se puede expresar como:

$$\frac{f(x) \text{ es } A}{g(x) \text{ es } f^{-1}(g(A))}$$

En dicha expresión, f y g son funciones dadas; f^{-1} es la inversa de f; y $f(X)$ es A es la forma canónica de una restricción funcional que está en el conjunto de datos iniciales. La restricción inducida sobre X, que se representa mediante la forma canónica $g(X)$ es $f^{-1}(f(A))$, es de tipo funcional. En general, la computación de las restricciones inducidas se reduce a la solución de un programa no lineal que trata de la maximización restringida de una función de pertenencia.

El tercer y último paso de la computación del conjunto de datos terminales implica una nueva traslación de las restricciones inducidas a las proposiciones expresadas en un lenguaje natural. En la lógica difusa, esto exige la utilización de lo que se denomina la aproximación lingüística.

Lo que hace falta reconocer es el hecho de que los pasos esbozados antes puedan requerir la utilización extensiva de la computación con números. Sin embargo, como eta-



pa de CW, la computación con números tiene lugar detrás de una cortina, escondida a la vista del usuario.

¿Entonces qué es lo que ofrece la CW? La capacidad de inferir de los conjuntos de datos iniciales en los cuales se envían los datos mediante proposiciones expresadas en un lenguaje natural, abre la puerta a la formulación y la resolución de muchos problemas en los que los datos disponibles no son suficientemente precisos como para justificar la utilización de las técnicas convencionales. Para ilustrarlo, supongamos que el problema sea el de maximizar una función que está descrita en palabras mediante las reglas if-then difusas:

- si X es pequeño entonces Y es pequeño
- si X es mediano entonces Y es grande
- si X es grande entonces Y es pequeño

donde pequeño, mediano y grande se definen mediante sus funciones de pertenencia. Otro problema parecido es el siguiente. Supongamos que una caja contiene diez bolas de distintos tamaños de las cuales algunas son grandes y unas pocas son pequeñas. ¿Cuál es la probabilidad de que una bola retirada al azar no sea ni pequeña ni grande?

En estos ejemplos, las proposiciones del conjunto de datos iniciales son bastante sencillas. El verdadero reto reside en desarrollar la CW hasta el punto en que pudiera soportar las proposiciones de una complejidad mucho mayor que expresasen el conocimiento del mundo real.

En este momento, la computación con palabras es una rama de la lógica difusa. Tengo la impresión de que, en los años venideros, es probable que la computación con palabras llegue a ser una metodología importante por derecho propio, proporcionando así una manera de soportar la imprecisión omnipresente y la incertidumbre del mundo real. Desde esta perspectiva, el modelo de papel para la computación con palabras, la lógica difusa y soft computing es la mente humana.

La concepción, diseño y utilización de los sistemas inteligentes presentan un gran reto a los que estamos comprometidos con el desarrollo y las aplicaciones de la lógica difusa y soft computing. Es de esperar que nuestros esfuerzos contribuyan a la creación de una sociedad donde los sistemas inteligentes sirvan para mejorar el bienestar humano y la libertad intelectual.



Biblioteca Universitaria de Granada



01042425