

Universidad Nacional de Educación a Distancia
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática



Arquitectura software para aplicaciones de IA de aproximación conexionista, bajo el enfoque de “tecnología apropiada” para el desarrollo humano y sostenible

Trabajo Fin de Máster

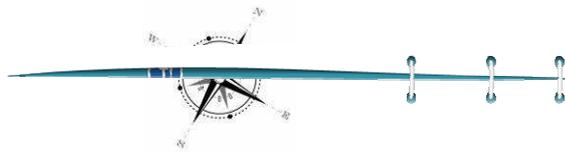
Máster Universitario en Inteligencia Artificial Avanzada:
Fundamentos, métodos y aplicaciones

Alumno: *Joaquín González Gigos*

Tutora: *Dra. Ángeles Manjarres Riesco*

“Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.”

Albert Einstein



“La ciencia y la tecnología, en la sociedad revolucionaria, deben estar al servicio de la liberación permanente de la humanización del hombre.”

Paulo Freire

TABLA DE CONTENIDO

PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO	V
RESUMEN	IX
CAPÍTULO 1 – TECNOLOGÍA Y DESARROLLO HUMANO Y SOSTENIBLE	1
RESUMEN	1
TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO HUMANO.....	2
PAPEL DE LA TECNOLOGÍA EN EL DESARROLLO HUMANO	7
PAPEL DE LAS TIC EN EL DESARROLLO HUMANO.....	8
TECNOLOGÍA APROPIADA	9
SOSTENIBILIDAD Y DESARROLLO SOSTENIBLE	13
<i>El modelo sostenible</i>	13
<i>Green Computing</i>	14
<i>Software Libre</i>	15
CONCLUSIONES	16
CAPÍTULO 2 – MARCO TECNOLÓGICO: LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL DE APROXIMACIÓN CONEXIONISTA COMO TECNOLOGÍA APROPIADA	19
RESUMEN	19
CONCEPTO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	21
APROXIMACIONES SIMBÓLICA Y CONEXIONISTA.....	23
<i>Comparación entre los enfoques simbólico y conexionista</i>	26
REDES NEURONALES	27
<i>Funciones de cálculo local</i>	29
<i>Modelos de Aprendizaje</i>	31
COMPUTACIÓN EVOLUTIVA	34
<i>Algoritmos genéticos</i>	35
OTRAS TÉCNICAS	36
<i>Sistemas de agentes</i>	36
<i>Inteligencia basada en enjambres</i>	36
<i>Sistemas emergentes</i>	37
CAPÍTULO 3 – INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y DESARROLLO HUMANO Y SOSTENIBLE	39
RESUMEN	39
REVISIÓN POR TÉCNICAS.....	40
<i>Redes Neuronales</i>	40
<i>Simulación</i>	43
<i>Técnicas estadísticas y minería de datos</i>	44
UN CAMPO DE APLICACIÓN RELEVANTE: LA GENERACIÓN DE ENERGÍA	44

CAPÍTULO 4 – ARQUITECTURA Y PLATAFORMA SOFTWARE PARA APLICACIONES DE IA DE APROXIMACIÓN CONEXIONISTA PARA EL DESARROLLO HUMANO Y SOSTENIBLE	47
RESUMEN	47
INTRODUCCIÓN	48
COMPORTAMIENTO ORIENTADO A EVENTOS	50
REFLEXIÓN COMPUTACIONAL.....	52
APRENDIZAJE	55
CARÁCTER EVOLUTIVO DEL APRENDIZAJE	56
OTROS MECANISMOS PARA EL APRENDIZAJE AUTOMÁTICO	57
CARÁCTER DISTRIBUIDO: ORIENTACIÓN A SERVICIOS	59
CONCLUSIONES	62
CAPÍTULO 5 – EVALUACIÓN PRÁCTICA DEL MODELO PROPUESTO.....	65
RESUMEN	65
ROBÓTICA MÓVIL.....	66
<i>Robótica autónoma reactiva.....</i>	<i>67</i>
<i>Arquitectura basada en comportamientos.....</i>	<i>67</i>
APLICACIÓN EN ROBÓTICA MÓVIL: APRENDIZAJE DE TRAYECTORIAS	69
<i>Simulador de robot.....</i>	<i>69</i>
<i>Adquisición de los patrones para el entrenamiento</i>	<i>70</i>
<i>Red neuronal para el aprendizaje de trayectorias</i>	<i>79</i>
<i>Algoritmo genético</i>	<i>82</i>
<i>Máquina de estados.....</i>	<i>84</i>
<i>El robot como servicio de acceso remoto.....</i>	<i>85</i>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>86</i>
FÍSICA EXPERIMENTAL: FUSIÓN NUCLEAR	88
APLICACIÓN EN FUSIÓN NUCLEAR: EVENTOS EN ESPECTROGRAMAS.....	89
CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES Y PRINCIPALES APORTACIONES.....	95
RESUMEN	95
CONCLUSIONES	96
PRINCIPALES APORTACIONES.....	97
LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.....	99
PUBLICACIONES	100
REFERENCIAS	101

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVOLUCIÓN IDH POR PAÍSES.....	2
FIGURA 2 – ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO (HDI).....	4
FIGURA 3 – ÍNDICE DE POBREZA HUMANA 1 (HPI 1).....	5
FIGURA 4 – ÍNDICE DE POBREZA HUMANA 2 (HPI 2).....	5
FIGURA 5 – ÍNDICE DE DESARROLLO RELATIVO A GÉNERO (GDI).....	6
FIGURA 6 – MEDIDA DE AUTONOMÍA DE GÉNERO (GEM).....	6
FIGURA 7 – RELACIÓN ENTRE ÁMBITOS Y TIPOS DE DESARROLLO	14
FIGURA 8 – CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN DE LAS DEFINICIONES	21
FIGURA 9 – ALGUNAS DEFINICIONES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	21
FIGURA 10 – ALGUNAS APLICACIONES DE LAS REDES NEURONALES	28
FIGURA 11 – ESTUDIOS PARA LA PREVISIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA	45
FIGURA 12 – DIAGRAMA DE COMPONENTES DE LA ARQUITECTURA.....	49
FIGURA 13 – HERRAMIENTAS, FRAMEWORKS Y TECNOLOGÍAS UTILIZADAS.....	50
FIGURA 14 – CICLO DE TRABAJO CON APACHE COMMONS SCXML	52
FIGURA 15 – ESTRUCTURA DE UNA APLICACIÓN CON CONTROL DE FLUJO DECLARATIVO.....	54
FIGURA 16 – DIAGRAMA DE BLOQUES DEL FRAMEWORK Y FLUJO DE TRABAJO CON NEUROPH	56
FIGURA 17 – DESPLIEGUE DE UN SERVICIO JINI	61
FIGURA 18 – ELABORACIÓN DEL MAPA DEL ENTORNO	76
FIGURA 19 – RESULTADO DE LA BÚSQUDA DE LA RUTA HASTA EL OBJETIVO	76
FIGURA 20 – TRAMA DE DATOS SIN NORMALIZAR PARA EL ENTRENAMIENTO	77
FIGURA 21 – SITUACIÓN DE PARTIDA EN MODO TELEOPERADO.....	77
FIGURA 22 – TRAYECTORIA DE ENTRENAMIENTO I	77
FIGURA 23 – TRAYECTORIA DE ENTRENAMIENTO II	78
FIGURA 24 – TRAYECTORIA DE ENTRENAMIENTO III.....	78
FIGURA 25 – TRAYECTORIA DE ENTRENAMIENTO IV	78
FIGURA 26 – TRAYECTORIA DE ENTRENAMIENTO V	79
FIGURA 27 – TOPOLOGÍA DE LA RED Y FUNCIÓN DE ERROR.....	80
FIGURA 28 – NAVEGACIÓN DIRIGIDA POR LA RED NEURONAL	80
FIGURA 29 – EJECUCIONES Y RESULTADOS DEL ALGORITMO GENÉTICO	83
FIGURA 30 – TRAYECTORIAS DEL ROBOT SIGUIENDO INDICACIONES DE LA RED NEURONAL	83
FIGURA 31 – TRAYECTORIA EN LA QUE SE OBSERVA COMPORTAMIENTO DUBITATIVO	83
FIGURA 32 – AUTÓMATA QUE ORQUESTA EL COMPORTAMIENTO DEL ROBOT	85
FIGURA 33 – DESPLIEGUE DE LAS FUNCIONALIDADES DEL ROBOT COMO SERVICIO JINI	86
FIGURA 34 – DESPLIEGUE DEL SISTEMA EN UN EXPERIMENTO DE CARACTERIZACIÓN DE SEÑALES.....	90
FIGURA 35 – SEÑAL, ESPECTOGRAMA, UMBRALIZACIÓN Y ESQUELITIZACIÓN.....	92
FIGURA 36 – DESPLIEGUE JINI DEL SISTEMA CLASIFICADOR BASADO EN RED NEURONAL.....	93

Planteamiento del trabajo

La tecnología al servicio del desarrollo humano incrementa la capacidad de las personas de forma relevante en sectores clave como la salud, la educación, la justicia y la democracia. Las propuestas que parten de los movimientos que impulsan y defienden el auténtico desarrollo centrado en el ser humano proponen alterar el modelo actual, cuya vulnerabilidad e ineficacia ha quedado demostrada, haciendo que la tecnología pase directamente al servicio del desarrollo humano y social, antagónico en términos de resultados de la pobreza humana y social. Pero para que la tecnología pueda ser aplicada en cualquier contexto ha de responder principalmente a la idea de tecnología apropiada, entendida esta como aquella cuyo diseño incorpora entre sus fines los aspectos medioambientales, éticos, culturales y sociales del contexto al que se dirige.

En el ámbito de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), la inteligencia artificial (IA) es una disciplina que permite resolver problemas para los cuales no existe una solución algorítmica factible o la misma es ineficiente o inaplicable. En la actualidad, las soluciones tecnológicas y los proyectos que aprovechan los conocimientos y las técnicas de la inteligencia artificial para resolver problemas de diversa naturaleza y fin son numerosas y arrojan resultados muy positivos. Pero cuando estas técnicas y herramientas son aplicadas en proyectos para el desarrollo humano y sostenible es muy importante atender no solo a la idea de que la tecnología sea apropiada sino que el *know-how* esté al alcance de los destinatarios de la acción. El software libre, las plataformas abiertas y el *green computing* juegan un papel crucial bajo el concepto de tecnología apropiada en el ámbito de las TIC.

En este trabajo se reflexiona sobre la importancia de poner la tecnología al servicio del desarrollo humano y se analizan algunas de las formas para llevarlo a cabo en el ámbito de las TIC. Así mismo se analiza el papel de la inteligencia artificial en

este contexto, se propone un modelo de arquitectura software y se construye una plataforma para el desarrollo de aplicaciones en base a herramientas de libre distribución.

El objetivo de la arquitectura que se propone y de la plataforma que se desarrolla es precisamente dar respuesta a las premisas asociadas al concepto de tecnología apropiada, prestando especial atención a los aspectos de sencillez y flexibilidad por lo que se recurre a un modelo basado en componentes software. La plataforma software integra un conjunto de herramientas y *frameworks* procedentes del ámbito del software libre, que permiten desarrollar aplicaciones IA de aproximación conexionista incorporando diversas técnicas como las redes neuronales, los algoritmos genéticos, los agentes distribuidos y las máquinas de estados bajo un enfoque que combina los beneficios de integrar el paradigma orientado a eventos junto con el paradigma orientado a servicios. Todo ello atendiendo al enfoque de tecnología apropiada y con el objeto de ser destinada al desarrollo de proyectos en el ámbito de la inteligencia artificial bajo un enfoque de desarrollo humano. La plataforma se evalúa a través de la implementación de dos aplicaciones para el desarrollo humano y sostenible de interés en contextos de subdesarrollo como son el aprendizaje de trayectorias en el ámbito de la robótica móvil y de cara a la cooperación internacional, la extracción de eventos en el espectrograma de las señales en el ámbito de la investigación en generación de energía por fusión nuclear.

En definitiva, este trabajo se trata de un proyecto multidisciplinar que tiene una componente de investigación en el ámbito de la tecnología para el desarrollo humano y sostenible y una componente de investigación de carácter más puramente técnico en el ámbito de la IA. La primera se refiere al papel y el potencial de la IA como ingeniería al servicio del desarrollo humano y sostenible y la singularidad de sus aportaciones en el contexto general de las TICs, y supone una reflexión sobre el estado actual y potencial de las aplicaciones de la IA para el desarrollo humano y sostenible en ámbitos clásicos de aplicación de la IA como salud y educación, y también en áreas emergentes de particular relevancia para el desarrollo humano y sostenible tales como la gestión medioambiental, el gobierno electrónico, e-agricultura, los sistemas de información

geográfica o la gestión de recursos hídricos. La segunda componente de investigación se centra en una propuesta de una arquitectura y una plataforma software para aplicaciones de IA de aproximación conexionista en coherencia con el concepto de “tecnología apropiada”.

La memoria de este trabajo está estructurada en seis capítulos que se completan con la bibliografía utilizada en su desarrollo. En el **capítulo 1** se presenta en primer lugar el marco de referencia en el que se inscribe el trabajo. Para ello se realiza una introducción al concepto de desarrollo humano junto con el papel de la tecnología y en particular de las TIC. Se analiza el concepto de tecnología apropiada y se abordan algunas tecnologías susceptibles de ser apropiadas en proyectos de desarrollo humano y sostenible en contextos de subdesarrollo. El capítulo se cierra realizando una reflexión a modo de conclusiones que permitirán centrar las líneas de trabajo que se desarrollan en los capítulos posteriores. El **capítulo 2** tiene como objetivo centrar el marco tecnológico y presentar brevemente algunas de las técnicas que posteriormente serán utilizadas. En primer lugar se abordan el enfoque simbólico y el enfoque conexionista como pilares de las estrategias en el ámbito de la inteligencia artificial. A continuación se exponen los conceptos básicos asociados a las redes neuronales y se continúa con otro campo de enorme interés y relevancia como es el de la computación evolutiva. Finalmente el capítulo termina con una breve presentación de otras técnicas que aparecen en algunos de los proyectos analizados durante la investigación. El **capítulo 3** realiza una revisión de la presencia de la inteligencia artificial en proyectos de desarrollo humano y sostenible en contextos de subdesarrollo destacando los objetivos, los resultados, las técnicas que se han utilizado, el enfoque y por supuesto el contexto en el que han sido aplicadas. El **capítulo 4** se centra en describir el modelo de la arquitectura y la plataforma que se propone y que tiene como base el concepto de tecnología apropiada. Para ello se describen un conjunto de herramientas de software libre y un modelo de interconexión de las mismas. En el **capítulo 5** se realiza la evaluación del modelo propuesto con el desarrollo de dos aplicaciones, una destinada al aprendizaje de trayectorias en el ámbito de la robótica móvil autónoma y otra procedente de la investigación sobre generación de energía a través de la fusión nuclear. Por último en el

capítulo 6 se exponen las conclusiones, las principales aportaciones y se proponen líneas de investigación futuras.

Resumen

Este trabajo tiene una componente de investigación en el ámbito de la tecnología para el desarrollo humano y sostenible y una componente de investigación de carácter más puramente técnico en el ámbito de la inteligencia artificial.

En primer lugar se analiza el papel de la IA como disciplina al servicio del desarrollo humano y sostenible bajo el enfoque de tecnología apropiada, es decir, aquella cuyo diseño incorpora entre sus fines los aspectos medioambientales, éticos, culturales y sociales del contexto al que se dirige, y en concreto la inteligencia artificial de aproximación conexionista. Las soluciones y técnicas basadas en inteligencia artificial y en particular aquellas de aproximación conexionista, incorporan estrategias de aprendizaje y adaptación que permiten resolver problemas sin conocer con precisión y exactitud todos y cada uno de los factores o parámetros que intervienen en el mismo. Esta característica es especialmente relevante en los proyectos para el desarrollo humano y sostenible en contextos de subdesarrollo debido a la potencialidad de la misma ya que los sistemas inteligentes podrían aportar el conocimiento y la habilidad que puede faltar en países en vías de desarrollo. Además, el carácter adaptativo de los sistemas facilita la transferencia tecnológica, ya que estos se pueden adaptar automáticamente a la idiosincrasia de los contextos de subdesarrollo, de casuística peculiar y compleja sin establecer dependencias con heurísticas que quizás pueden no ser aplicables. Todo ello sin olvidar que los sistemas inteligentes incorporan más fácilmente el conocimiento local no formalizado o sistematizado.

La segunda componente de la investigación se centra en una propuesta de una arquitectura y el desarrollo de una plataforma software para aplicaciones de IA de aproximación conexionista bajo el enfoque de “tecnología apropiada” para el desarrollo humano y sostenible que simplifique la implementación de aplicaciones que requieran el uso de técnicas procedentes de la inteligencia artificial.

La investigación y el desarrollo de soluciones software utilizando técnicas de inteligencia artificial bajo el concepto de tecnología apropiada requiere seleccionar e integrar diversas herramientas que implementan algunas de estas técnicas entre las que destacan las redes neuronales, los algoritmos genéticos, los agentes distribuidos y las máquinas de estados. Para ello se han desarrollado los componentes necesarios que permiten integrarlas de forma coherente y flexible, dado que inicialmente no están diseñadas para trabajar de forma conjunta. Estas herramientas, pertenecientes en general a la categoría de software libre, deben ser orquestadas adecuadamente para facilitar su interacción y aprovechar al máximo sus prestaciones.

La plataforma desarrollada, la cual se organiza en torno a una arquitectura basada en componentes, utiliza además el paradigma orientado a servicios para desplegar la funcionalidad de los desarrollos pudiendo implementar de forma transparente sistemas distribuidos e interconectar sistemas remotos como si de sistemas locales se tratase. Así mismo, incorpora herramientas que permiten establecer de forma declarativa el control de flujo a través de un paradigma orientado a eventos proporcionando flexibilidad y capacidad reflexiva al sistema. El resultado es una arquitectura distribuida y una plataforma software con la que se podrán desplegar servicios adaptativos e inteligentes.

La evaluación de la plataforma propuesta se realiza con el desarrollo de dos aplicaciones, una destinada al aprendizaje de trayectorias en el ámbito de la robótica móvil autónoma y otra procedente de la investigación sobre generación de energía a través de la fusión nuclear.

Capítulo 1 – Tecnología y desarrollo humano y sostenible

Resumen

El objetivo del desarrollo humano como concepto es incrementar las opciones de las personas tanto a nivel individual como colectivo en todos los ámbitos de la vida. Para ello es necesario crear las condiciones más adecuadas que permitan que las personas disfruten de una buena calidad de vida. Pero para que el desarrollo humano no tenga consecuencias irreparables en el entorno es imprescindible asegurar la sostenibilidad del mismo, es decir incorporar al modelo las premisas que promulgue una actuación respetuosa con el entorno en toda su expresión. La suma de los objetivos de ambos modelos da lugar a lo que se denomina desarrollo humano y sostenible.

La tecnología ha estado tradicionalmente al servicio del desarrollo económico bajo la falacia de que el desarrollo económico favorece el desarrollo humano. Sin embargo, el desarrollo humano y sostenible promulga un modelo en el que la tecnología debe ponerse directamente al servicio del desarrollo humano bajo el paradigma de la sostenibilidad. Los fundamentos residen en que la tecnología eleva directamente la capacidad humana y lo hace de forma especialmente relevante en sectores clave entre los que destacan la salud, la educación, la justicia y la democracia. El aumento en el bienestar produce el crecimiento económico con equidad e igualdad de oportunidades. Pero para que la tecnología sea respetuosa y acorde con el contexto en el que se utiliza abandonando el mero objetivo instrumental de la misma, es necesario que esté diseñada con especial atención a los aspectos medioambientales, éticos, culturales, sociales y económicos de la comunidad a la que se dirigen. Esta tecnología se conoce como tecnología apropiada.

Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) tienen un papel relevante en el desarrollo humano por lo que es fundamental que respondan tanto a la idea de sostenibilidad como a la de tecnología apropiada.

Tecnología para el desarrollo humano

La tecnología para el desarrollo humano es un concepto que surge a finales de los años 90 y consiste básicamente en replantearse el hecho cultural tecnológico en función de su relación con el desarrollo humano. Este nuevo paradigma abandona la concepción utilitaria del desarrollo en los términos de producción y crecimiento y se centra en la objetivo de contribuir a la ampliación y mejora de las oportunidades del ser humano [Prats01].

En palabras de Mahbub ul Haq, creador del informe sobre Desarrollo Humano elaborado en el ámbito del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD): *“El objetivo principal del desarrollo es ampliar las opciones de las personas. En principio, estas opciones pueden ser infinitas y cambiar con el tiempo. A menudo las personas valoran los logros que no se reflejan, o al menos no en forma inmediata, en las cifras de crecimiento o ingresos: mayor acceso al conocimiento, mejores servicios de nutrición y salud, medios de vida más seguros, protección contra el crimen y la violencia física, una adecuada cantidad de tiempo libre, libertades políticas y culturales y un sentido de participación en las actividades comunitarias. El objetivo del desarrollo es crear un ambiente propicio para que la gente disfrute de una vida larga, saludable y creativa”*. En definitiva, el desarrollo humano consiste en ampliar las opciones que tiene la gente para llevar una vida que valoran, los recursos para hacer que esas opciones tengan sentido y la seguridad para garantizar que estas opciones se pueden ejercer en paz.

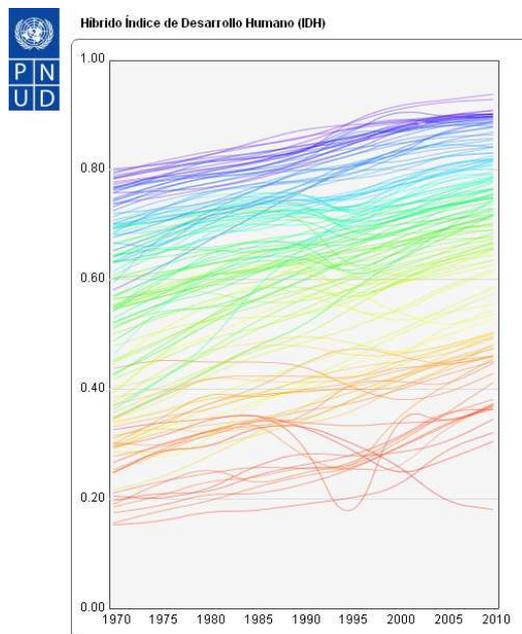


Figura 1 – Evolución IDH por países¹

¹ Consulte <http://hdr.undp.org/es/datos/tendencias/> para información detallada e interactiva.

Tras veinte años de informes y trabajos sobre desarrollo humano, la perspectiva general del informe general mundial correspondiente al 2010 comienza recordando “*La verdadera riqueza de una nación está en su gente*”, palabras con las que comenzaba en 1990 el informe sobre Desarrollo Humano [PNUD90]. A lo largo de estos veinte años se han ido introduciendo nuevos indicadores en el cálculo del índice de desarrollo humano (IDH) (la evolución del índice aparece en la Figura 1). Estos nuevos indicadores permiten reflejar de forma más precisa el verdadero estado de bienestar de la población mundial. En el ámbito del desarrollo humano las infraestructuras sociales (educación, salud, agua, gobierno y sociedad civil y alojamiento) conforman uno de los pilares básicos junto a las infraestructuras económicas (transporte, almacenamiento, comunicaciones y energía), los sectores productivos (agricultura, silvicultura, pesca, industria y construcción) y multisectorial (protección del medio ambiente, acciones integrales para el desarrollo urbano y rural). No obstante, con objeto de poder atender otras magnitudes no evaluables a través del IDH, el PNUD ha generado otros índices que miden las desigualdades entre los hombres y las mujeres (el IDG), la potenciación de las mujeres (IPG) y la pobreza humana (IPH) y el índice de adelanto tecnológico (IAT) [Boni05]. De manera esquemática, las cinco dimensiones que incorpora el desarrollo humano sostenible son el crecimiento económico socialmente equilibrado, la promoción de la equidad social, la sostenibilidad ambiental, la defensa de los derechos humanos, la consolidación de la democracia y la participación social y el respeto a la multiculturalidad.

La acción técnica debe tener como finalidad la obtención de satisfactores para las necesidades del ser humano pero no de forma independiente sino globalmente, es decir garantizando siempre todas las necesidades. De esta forma la acción técnica nunca será perjudicial para el propio ser humano ni para el universo en el que este se encuentra. En esta búsqueda por satisfacer las necesidades juega un papel primordial el concepto de tecnología apropiada y la idea del empoderamiento de los seres humanos en el contexto de su realidad cotidiana. Y es en esta realidad cotidiana en la que hay que centrar todas las acciones para asegurar por un lado las necesidades básicas individuales: vivir una vida larga y saludable, tener una educación libre y con posibilidad de elegir entre

diferentes oportunidades vitales y disponer de recursos económicos mínimos que permitan satisfacer las necesidades materiales más apremiantes; Y las necesidades básicas colectivas: Libertad de pensamiento, expresión y desplazamiento, no discriminación por sexo o raza, seguridad y justicia equitativas, posibilidad de participación libre en la vida pública de la comunidad. Estas necesidades se identifican mejor a través de los servicios básicos que permiten satisfacer las necesidades individuales:

- Nutrición básica
- Abastecimiento y saneamiento de agua
- Educación primaria
- Atención sanitaria básica
- Atención a la salud reproductiva
- Control de enfermedades y epidemias
- Acceso a la energía
- Acceso al conocimiento (información)

Con objeto de valorar el grado de avance en materia de Desarrollo Humano, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) presentó en 1990 varios índices cuyo grado de aceptación es hoy mundialmente reconocido [PNUD90]. A continuación se reproduce la explicación que de los cinco más importantes y extendidos aparece en la *Guía para el análisis del impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en el desarrollo humano* [Crespo08]:

Índice de Desarrollo Humano - *Human Development Index (HDI)* –

Medida más general del Desarrollo Humano de un país. Se define como la media de logros alcanzados por un país en tres dimensiones básicas:

- Una vida larga y saludable, que se mide con el índice Esperanza de vida al nacer.
- Educación y conocimiento medido con la combinación de dos tercios de peso el índice de alfabetización y con un tercio de peso la proporción bruta de matriculados en educación terciaria, secundaria y primaria.
- Calidad de vida digna, que se mide con el Producto Interior Bruto per Cápita.

Figura 2 – Índice de Desarrollo Humano (HDI)

Índice de Pobreza Humana 1 -Human Poverty Index 1 (HPI 1) –

Diseñado para países en desarrollo, mide lo contrario que el anterior índice. Es decir, mide la media de las privaciones (fracasos) en un país en las mismas tres dimensiones básicas:

- Una vida larga y saludable, expresado negativamente mediante la vulnerabilidad a morir a una edad relativamente temprana, medido cuantitativamente mediante la probabilidad al nacer de no vivir hasta los 40 años.
- Educación y conocimiento, medido sólo con el índice de alfabetización, ya que puede ser interpretado positiva o negativamente.
- Calidad de vida digna, expresado negativamente como la falta de acceso al aprovisionamiento económico total, medido como la media aritmética de: porcentaje de población sin acceso sostenible a una fuente de agua y el porcentaje de niños por debajo del peso estándar por edad.

Figura 3 – Índice de Pobreza Humana 1 (HPI 1)

Índice de Pobreza Humana 2 - Human Poverty Index 2 (HPI 2) -

Considerado para países desarrollados seleccionados por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), mide también las privaciones de un país en las tres dimensiones básicas de los dos índices anteriores y una cuarta dimensión más, la exclusión social.

- Una vida larga y saludable, expresado negativamente mediante la vulnerabilidad a morir a una edad relativamente temprana, medido cuantitativamente mediante la probabilidad al nacer de no vivir hasta los 60 años.
- Educación y conocimiento, medido sólo con el índice de alfabetización, ya que puede ser interpretado positiva o negativamente.
- Calidad de vida digna, expresado negativamente como la falta de acceso al aprovisionamiento económico total, medido con el índice porcentaje de población viviendo por debajo del umbral de la pobreza, considerando este umbral el 50% de la media ajustada de ingresos de un hogar.
- Exclusión social, expresada negativamente a través de la tasa de paro a largo plazo, considerando el largo plazo como 12 meses o más.

Figura 4 – Índice de Pobreza Humana 2 (HPI 2)

Índice de Desarrollo relativo a Género - Gender related development index (GDI)

Hace referencia a la media de logros alcanzados en las tres dimensiones definidas en el Índice de Desarrollo Humano, pero reflejando la desigualdades entre hombre y mujer.

- Una vida larga y saludable, que se mide con el índice Esperanza de vida al nacer.
- Educación y conocimiento, medido con la combinación de: con dos tercios de peso el índice de alfabetización, y con un tercio de peso la proporción bruta de matriculados en educación terciaria, secundaria y primaria.
- Calidad de vida digna, que se mide con el Producto Interior Bruto per Cápita.

Figura 5 – Índice de desarrollo relativo a género (GDI)

Medida de Autonomía de Género - Gender Empowerment Measure (GEM) -

Enfoca más a las oportunidades de las mujeres que a las capacidades de las mujeres, reflejando desigualdades entre géneros en los núcleos de poder siguientes:

- Participación política, medido con el porcentaje de mujeres y hombres que ocupan un escaño en el parlamento.
- Participación económica, expresado como la media de dos índices: número de mujeres y hombres que ocupan puestos de poder (legisladores, alto funcionariado y alta dirección de empresa) y el número de hombres y mujeres que ocupan puestos de trabajo profesionales y técnicos.
- Medios económicos, medido a través de el sueldo promedio estimado de mujeres y hombres.

Figura 6 – Medida de Autonomía de género (GEM)

Papel de la tecnología en el desarrollo humano

Es casi una obviedad afirmar que la tecnología está directamente ligada al modelo de desarrollo. Por lo tanto, poner en marcha los mecanismos para que este desarrollo se realice bajo el modelo de Desarrollo Humano es prácticamente una cuestión de intención. La experiencia ha demostrado que el crecimiento económico no implica desarrollo social. Incluso en mitad de una crisis financiera de ámbito mundial habría que afirmar que el crecimiento económico desordenado es la causa que provoca un aumento de la pobreza y de la desigualdad. De hecho, las propias empresas y corporaciones responsables de los mayores despropósitos y conscientes del potencial que encierra acogerse a una estrategia publicitaria en pro del desarrollo humano, se han apresurado a poner en sus canales de difusión el compromiso con la sociedad y la naturaleza en forma de responsabilidad social corporativa. El problema es que estas grandes empresas lo hacen para intentar aprovechar la buena imagen y la sensibilidad actual, manifestada como un fenómeno global y emergente a través de los movimientos reivindicativos de índole social que comenzaron en los países árabes y que se han extendido en forma de indignación a Europa Occidental. A pesar de que la economía y el sector financiero originalmente están concebidos para mejorar el desarrollo, la realidad comprobable es que cuando el sector financiero adquiere poder frente al sector industrial y los gobiernos, desaparece cualquier planificación del desarrollo tecnológico, y por supuesto al servicio del bienestar social, del desarrollo humano y sostenible. El sector financiero poderoso dirige la economía con el único propósito de hacer dinero rápido, de especular, en su lógica no está la inversión con mirada a largo plazo para apoyar ninguna dirección de desarrollo tecnológico particular.

La realidad subyacente es que el modelo liberal basado exclusivamente en el desarrollo económico ha fracasado. La crisis financiera mundial está poniendo en peligro los logros alcanzados por las sociedades occidentales y los ciudadanos, que hasta hace poco se consideraban a salvo, hoy miran con verdadero miedo el riesgo de verse reflejados y padecer la miseria de los países pobres. Así mismo, las potencias emergentes están repitiendo el modelo económico sustentado en la premisa de que siempre ganan mucho unos pocos a costa de que muchos otros lo pierdan todo, pero

disfrazando el fenómeno como desarrollo económico que proporcionará a sus ciudadanos logros sociales y calidad de vida. Pero si ese modelo ha fallado, el verdadero peligro es que es que las consecuencias del mismo en países cuyas poblaciones superan con creces las occidentales, el modelo occidental de aparente equilibrio que se ha vivido en los últimos tiempos será completamente inviable en ellos. Es fácil prever que si no se hace algo el caos mundial será irremediable y tal vez incluso hasta catastrófico.

La propuesta que parte de los movimientos que se centran en el auténtico desarrollo humano propone alterar el modelo haciendo que la tecnología pase directamente al servicio del desarrollo social. Para ello se apoyan en que la tecnología eleva directamente la capacidad humana y lo hace de forma especialmente relevante en sectores clave: salud, educación, justicia, democracia. Y como consecuencia del aumento del bienestar en estos sectores se produce el crecimiento económico pero con equidad e igualdad de oportunidades.

Papel de las TIC en el Desarrollo Humano

Las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) tienen un papel clave en el desarrollo ya que constituyen en la actualidad el soporte al sector productivo, conforman una nueva puerta a la universalización de la salud con especial atención al subsector de las emergencias sanitarias, constituyen una nuevo soporte para los procesos educativos y en concreto al paradigma del aprendizaje a lo largo de la vida y constituyen un refuerzo a las administraciones y a las organizaciones mejorando los mecanismos democráticos, de justicia y equidad.

El principal escollo que es necesario superar es la denominada brecha digital que no es más que una consecuencia de la brecha tecnológica producida por el acceso insuficiente, el alto coste, la falta de capacidad local, la propiedad del conocimiento y las prioridades mercantilistas de los que poseen el know-how. Además, a la hora de acudir a las estadísticas, no es suficiente con determinar el grado de tecnificación de las diferentes comunidades humanas, ni mucho menos utilizar los indicadores tradicionales que miden el número de sistemas, equipos e infraestructuras de comunicación y procesamiento de datos. Es primordial analizar con detalle la calidad de servicio de

estos equipos sin perder de vista las limitaciones derivadas de los suministros de energía así como de los repuestos y coste de los servicios asociados a los mismos.

Según señala la *Guía para el análisis del impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en el desarrollo humano* [Crespo08], es abundante la literatura que reflexiona y analiza el impacto de las TIC en la eficiencia de la actividad productiva. La conclusión que arroja establece que las TIC tiene un impacto positivo significativo en la mejora de la productividad y de la eficiencia aunque a nivel macroeconómico no queda tan claro dicho impacto. Sin embargo sí defiende y justifica la tesis de que las TIC aportan grandes beneficios al Desarrollo Humano y lo justifica con los siguientes argumentos:

- Mejoran el acceso a la información de mercado en políticas de precios y demanda reduciendo el número de intermediarios necesarios en las operaciones.
- Proporcionan acceso a información de carácter especializado con fiabilidad, reduciendo costes y tiempos.
- Permiten el teletrabajo y con ello la deslocalización sin pérdida de eficiencia.
- Reducen los tiempos de despliegue de productos y servicios.
- Mejora las oportunidades de financiación.
- Incrementa la difusión y la expansión, extendiendo el alcance y haciendo del mercado un ente global.

Ahora bien, para que la tecnología esté al servicio del Desarrollo Humano y no al revés es primordial que esta sea tecnología apropiada.

Tecnología apropiada

La tecnología se podría definir desde una concepción intelectualista como la aplicación práctica de los conocimientos obtenidos por la ciencia. El fin de la tecnología debería ser contribuir a la mejora de la calidad de vida. Sin embargo muchas veces esa mejora se traduce lamentablemente en un empeoramiento de la calidad de vida de otros o incluso indirectamente del empobrecimiento de la calidad de vida de los propios

beneficiarios por los efectos secundarios de la misma. Pensemos por ejemplo en el desarrollo del motor de explosión. Sin duda ha sido una contribución tecnológica revolucionaria que ha permitido, entre otras cosas, que las personas se desplacen con comodidad y libertad de unos lugares a otros. Pero a su vez este desarrollo tecnológico perjudica, tal y como lo conocemos actualmente, el medioambiente y a la postre ha terminado desencadenando grandes desigualdades sociales e incluso conflictos y guerras entorno a los combustibles necesarios para su explotación. En resumen, un sencillo análisis permite concluir que la tecnología no es buena por si misma y debe someterse a otros criterios que vayan más allá de la mera utilidad propia de una concepción instrumentalista de la misma. Entre estos criterios destacan como fundamentales los medioambientales, éticos, culturales, sociales y económicos. La correcta adecuación del valor de cada uno de los parámetros de cara a los criterios señalados conduce al concepto tan en boga de sostenibilidad tecnológica.

Muy lejos aún de alcanzar la idea señalada, es necesario ir todavía más allá y observar que incluso una sostenibilidad tecnológica puede serlo en un entorno con unas características concretas y sin embargo no serlo en otro. Con objeto de universalizar una tecnología respetuosa y acorde a las circunstancias surge el concepto de tecnología apropiada. La tecnología apropiada, también conocida como tecnología adecuada, es aquella tecnología que está diseñada con especial atención a los aspectos medioambientales, éticos, culturales, sociales y económicos de la comunidad a la que se dirigen [Hegoa11]. No obstante no existe un consenso muy claro en cuanto a la definición de este concepto pero sin embargo se aceptan como representativas de la misma las características siguientes, extraídas de [Tharaka08] y enunciadas en [OMPI09]:

- La tecnología apropiada debe necesitar sólo pequeñas cantidades de capital.
- La tecnología apropiada debe dar prioridad, siempre que sea posible, a la utilización de materiales locales.

- La aplicación de las tecnologías apropiadas debe centrarse en soluciones tecnológicas que utilicen mucha mano de obra para que las personas de las comunidades puedan participar.
- La solución tecnológica que se ponga en práctica debe poder ser comprendida, controlada y mantenida por personas que no tengan un alto nivel de formación y de educación y debe poder adaptarse para incluir a las comunidades locales en los esfuerzos de innovación y de ejecución.
- Los efectos negativos sobre el medio ambiente deben evitarse y la solución tecnológica deberá ser sostenible.

Como se puede observar, algunas de las características señaladas entran en conflicto directo con algunos de los objetivos que el diseño tecnológico tiene en el denominado primer mundo. En concreto destaca la tercera ya que en el primer mundo la aplicación de la tecnología suele estar directamente ligada a una automatización de los procesos y por ende a la sustitución de mano de obra por máquinas. Y aunque entorno a la aparición de las máquinas surge la necesidad de mano de obra que las fabrique, las mantenga y las utilice, esta suele ser de mayor nivel y exigencia que la sobrante por efecto de la sustitución.

La idea de la tecnología apropiada en los países más desfavorecidos atiende al hecho de que los problemas y los recursos disponibles no son iguales en todos los lugares. Además las formas de hacer las cosas varían mucho entre culturas. Por este motivo, las tecnologías apropiadas se centran en la idea de que la tecnología no es neutra y que la diversidad y la diferencia es un factor primordial a tener en cuenta. Es necesario por tanto que la tecnología, para ser apropiada, tenga en cuenta la necesidad de la auto-determinación, de reconocer que hay modelos de desarrollo diversos y del ambiente propio [CEUTA07]

En palabras de Gerardo Honty, director de CEUTA (Centro Uruguayo de Tecnologías Apropriadas), *“las tecnologías apropiadas son instrumentos de suma utilidad para el logro del desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente y la erradicación de la pobreza”*. Así mismo, Eduardo Gudynas, de CLAES (Centro Latino Americano de Ecología Social), señala que *“las tecnologías apropiadas permiten llevar*

a la práctica los preceptos del desarrollo sostenible y abren las puertas a experiencias concretas que demuestran que las alternativas son posibles”².

La integración profunda del concepto de tecnología apropiada nos conduce a reformular la definición de tecnología como la intervención responsable del hombre sobre el entorno natural con el fin de aumentar su bienestar y satisfacer sus necesidades; esencialmente mediante la utilización de conocimientos teóricos y prácticos que le permiten comprender, utilizar, evaluar, transformar y producir artefactos, sistemas y procesos [EDUTECNO08]. El hecho de realizar esta intervención atendiendo a las características concretas del entorno a todos los niveles permite hablar de tecnología apropiada.

El término se atribuye al economista británico E. F. Schumacher que lo incluyó en su libro titulado *Lo pequeño es hermoso, la economía como si la gente importara* [Schumacher73], publicado en 1973 y en el que realiza una crítica del modelo económico occidental en los albores de la globalización y en plena crisis energética. En este libro propone un desarrollo tecnológico centrado en las personas y catalogando la tecnología adecuada como una tecnología simple, de pequeña escala, bajo coste y por supuesto no violenta.

Hoy en día con el término *empoderamiento* tan en boga es crucial proporcionar a cada colectivo y especialmente a aquellos más desfavorecidos socioeconómicamente, la capacidad de autogestionarse y para ello es imprescindible plantear propuestas que se hagan pensando en la autodeterminación y la independencia. En definitiva y parafraseando al propio Schumacher “*Buscar lo que la gente hace y ayudarles a hacerlo mejor, estudiar sus necesidades y ayudarlos para que ellos se ayuden mutuamente.*”³

² CEUTA y CLAES son organizaciones no gubernamentales, sin fines de lucro, independientes y plurales, dedicadas a promover el desarrollo sostenible. Los dos centros están localizados en Montevideo (Uruguay) y mantienen entre sí una "Asociación para la Sustentabilidad" desarrollando actividades conjuntas en varios frentes.

³ Traducción de A. Pérez-Foguet, Notas de Tecnología, Ingeniería y Desarrollo Humano, Máster en Desarrollo Internacional, Ingeniería sense fronteras

Sostenibilidad y desarrollo sostenible

El modelo sostenible

El concepto de sostenibilidad surge como respuesta a las alteraciones que el ser humano realiza en el entorno transformando este de forma directa y con especial atención a la forma indirecta. Con el paso del tiempo y en consecuencia directa con los modelos de desarrollo económico y tecnológico que se han venido aplicando, las actuaciones y modificaciones se han ido volviendo cada vez más importantes y lo peor de todo con efectos nocivos y consecuencias irreparables. Esta situación ha provocado que numerosos sectores de la población entre los que destacan profesionales y científicos de diversas ramas de conocimiento, asociaciones, entidades de naturaleza múltiple y por supuesto ciudadanos en general, hayan advertido y señalado el verdadero peligro de un desarrollo insensible a los efectos del mismo sobre el planeta y por ende sobre la vida. Esos esfuerzos por advertir y alertar sobre el cada vez más constatable irremediable camino hacia la perdición, han venido acompañados de un nuevo modelo de desarrollo que promulga una actuación respetuosa con el entorno en toda su expresión, dando lugar al denominado paradigma sostenibilista [Cano11] cuyo objetivo es transformar de fondo la sociedad para conseguir una nueva forma de relación con el planeta y con todo tipo de vida, tanto en el presente como en el futuro.

Tras las aportaciones de diferentes personas y eventos de ámbito internacional (la sostenibilidad es un tema que afecta a toda la humanidad) entre los que destacan la Cumbre de la tierra en 1992 [UN92] y la cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible en 2002 [UN02] han permitido incorporar al menos la sostenibilidad como objetivo en los planes de acción con mayor o menor grado de compromiso aunque quizás con escaso desarrollo actualmente.

El desarrollo sostenible, también denominado perdurable o sustentable es un término que se aplica al desarrollo socio-económico y consiste en aquel que *“satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras*

para satisfacer sus propias necesidades”⁴. El desarrollo sostenible se centra en tres ámbitos: ecológico, económico y social con objeto de satisfacerse las necesidades de la sociedad. Sin duda, este desarrollo está limitado por el nivel tecnológico, los recursos naturales y la capacidad del medio ambiente para absorber los efectos de la actividad humana [UN87]. Con este panorama resulta imprescindible centrar el desarrollo sostenible en el desarrollo humano bajo el modelo ya señalado en apartados anteriores. En la Figura 7 (extraída de [Wikipedia11]) se observa los tipos de desarrollo que se obtienen como consecuencia de atender los ámbitos señalados, ámbitos que constituyen los pilares del desarrollo sostenible.

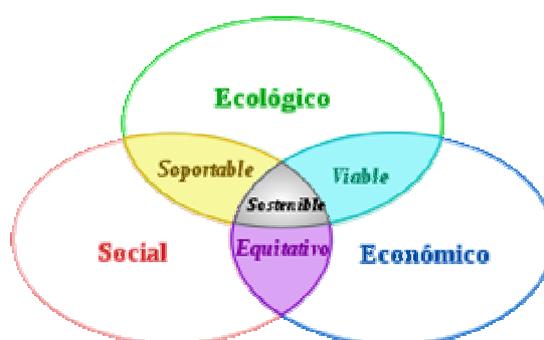


Figura 7 – Relación entre ámbitos y tipos de desarrollo

Green Computing

En el año 1992, la Agencia de Protección Ambiental - *Environmental Protection Agency*⁵ (EPA) – de los Estados Unidos, puso en marcha un programa dirigido a la promoción de la eficiencia energética de los sistemas electrónicos de consumo. Esta iniciativa es considerada como el punto de partida del término *Green Computing*, *Green IT* o en castellano Tecnologías Verdes [Culler11]. El objetivo de este concepto es promover el uso eficiente de todos los recursos computacionales. Pero al hablar de uso eficiente se contempla un amplio espectro de aspectos que incluyen la protección medioambiental a todos los niveles: ahorro energético, reciclaje, desarrollo y explotación ecológica, minimización de la obsolescencia y erradicación de la

⁴ Informe Brundtland, Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente, Naciones Unidas. Disponible en: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>

⁵ <http://www.epa.gov/>

obsolescencia programada así como la maximización de la viabilidad económica y el aseguramiento del compromiso social.

Entre las tecnologías consideradas como verdes destacan aquellas que buscan en mayor medida aprovechar al máximo los recursos, aumentando la eficiencia de los mismos y reduciendo el impacto medioambiental. Modelos como la computación en la nube⁶, la computación en grid⁷, la virtualización⁸ de los sistemas y el teletrabajo son sólo algunos de los ejemplos.

Software Libre

El software libre es aquel software que respeta la libertad del usuario que lo adquiere proporcionándole la posibilidad de usarlo, copiarlo, estudiarlo, modificarlo y redistribuirlo libremente [FSF11]. Con objeto de poder asegurar íntegramente las libertades señaladas es imprescindible que el usuario tenga acceso al código fuente del mismo. La libertad, sin embargo, no está reñida con el posible carácter comercial del mismo ya que es posible respetar las libertades señaladas y comercializar el software. Si bien es cierto que el software libre comercializado, para que tenga posibilidades reales y pueda resultar de interés su adquisición, suele llevar aparejado servicios de valor añadido. Ahora bien, no todo es positivo en el software libre por lo que conviene presentar junto a las ventajas los inconvenientes:

Ventajas

- Costes de adquisición posiblemente nulos.
- Capacidad de adaptación a las necesidades específicas.
- Fomenta la aparición de industrias locales de desarrollo de software y servicios.
- Reduce la obsolescencia del software.
- Evita en gran medida la dependencia de terceros.

⁶ La computación en la nube o *cloud computing*, es un paradigma basado en ofrecer servicios de computación a través de Internet.

⁷ La computación grid o *grid computing* es una tecnología de computación distribuida que permite que recursos heterogéneos se encuentren conectados mediante redes de área extensa.

⁸ La virtualización es una abstracción de los recursos de una computadora a través de una capa software de manera que estos puedan ser ofrecidos a los sistemas operativos de las máquinas virtuales fruto del despliegue de uno varios entornos de ejecución.

Inconvenientes

- Es necesario disponer de acceso a Internet para su ágil localización.
- No abunda el personal especializado en el mismo.
- Al estar disponible desde las fases más prematuras de su desarrollo es frecuente encontrar productos de software libre menos elaborados que sus competidores propietario.
- El concepto “*estándar de facto*” aún tiene mayor presencia en el ámbito propietario, lo cual ralentiza su presencia en los procesos productivos.

Además de estos inconvenientes, la falta de una conciencia profunda y generalizada del concepto de delito en la copia y uso de software propietario sin licencia y el fácil acceso a copias ilegales del mismo entorpecen la proliferación, desarrollo y uso del software libre. Sin olvidar que los intereses comerciales de las empresas que desarrollan software comercial provocan una presión mediática y política de gran calado y difícil competencia. Pero sin duda, dónde mayor posibilidad de éxito tiene el software libre es cuando se buscan soluciones basadas en la combinación de tecnologías y por ende en el aprovechamiento de las tecnologías abiertas por lo que es aquí cuando de nuevo hay que insistir en el concepto ya explicado de tecnología apropiada.

Conclusiones

El desarrollo humano se percibe como la satisfacción de las aspiraciones y necesidades de acuerdo a los valores del entorno social. Debe ser percibido para que tenga sentido tanto por el propio individuo como por la sociedad que lo rodea. Esta percepción está ligada a la sensación del individuo de que tiene control sobre su vida y sobre la seguridad entendida esta en el sentido más amplio posible: empleo, educación, salud, justicia y democracia. *“Todos estos elementos son el marco de la libertad de desarrollarse y la satisfacción con la vida es su expresión más clara. La conciencia acerca de las oportunidades que se tienen probablemente hace que las personas se sientan más satisfechas con su vida, o en otras palabras, más desarrolladas”* [Liliana06].

De cara a plantear proyectos tecnológicos diseñados para ser aplicados en el ámbito del desarrollo humano y sostenible en contextos de subdesarrollo, es crucial que

las tecnologías sean apropiadas. El *green computing*, el software libre y las tecnologías abiertas constituyen aspectos y recursos clave a tener en cuenta a la hora de analizar el enfoque y el papel de las tecnologías de la información y la comunicación en este contexto. Por último la sencillez y el carácter asequible son propiedades cruciales para que la implantación y la sostenibilidad a todos los niveles puede ser garantizada.

Capítulo 2 – Marco Tecnológico: La Inteligencia artificial de aproximación conexionista como tecnología apropiada

Resumen

El marco tecnológico del presente trabajo es la inteligencia artificial y en concreto la inteligencia artificial de aproximación conexionista. Por este motivo es crucial comenzar por acercarse a la definición del concepto de inteligencia artificial destacando que las soluciones y técnicas basadas en este concepto incorporan estrategias de aprendizaje y adaptación que permiten resolver problemas sin conocer con precisión y exactitud todos y cada uno de los factores o parámetros que intervienen en dicho problema. Esta característica es especialmente relevante en los proyectos para el desarrollo humano y sostenible en contextos de subdesarrollo bajo el enfoque de tecnología apropiada debido a la potencialidad de la misma ya que los sistemas inteligentes podrían aportar el conocimiento y la pericia que falta en países en desarrollo. Además, el carácter adaptativo de los sistemas facilita la transferencia tecnológica, ya que los sistemas se adaptan automáticamente a la idiosincrasia de los contextos de subdesarrollo, de casuística peculiar y compleja. Y todo ello sin olvidar que los sistemas inteligentes incorporan más fácilmente el conocimiento local no formalizado o sistematizado (por ejemplo, en prácticas médicas o agrícolas). No obstante es importante reconocer que hay aspectos complejos y controvertidos en los que no se entra en esta memoria, que constituye sólo una primera aproximación al problema.

El enfoque conexionista, cuya principal diferencia con el enfoque simbólico es la sustitución de la programación por el aprendizaje [Mira95], permite evitar la dificultad que podría tener utilizar ciertos sistemas de IA desarrollados fuera del contexto en que se implantan ya que las heurísticas pueden no ser aplicables. Además, los procedimientos de aprendizaje automático se desarrollan con mayor facilidad y potencial que en el enfoque simbólico. El paradigma conexionista está sustentando en

la idea de mecanismos adaptativos capaces de proporcionar el soporte computacional necesario para facilitar la aparición de un comportamiento emergente.

En este trabajo se emplean técnicas concretas como las redes neuronales en las que las neuronas se interconectan entre si constituyendo un sistema masivamente paralelo de procesadores sencillos junto con sus mecanismos de aprendizaje en los que la función de cálculo local representa la operación que concurrentemente realiza cada neurona de forma individual con los datos. Además la topología de las redes se determinará como resultado de emplear técnicas de computación evolutiva como son los algoritmos genéticos. Finalmente se recogen otras técnicas asociadas a la existencia de múltiples sistemas como son los sistemas de agentes y la inteligencia basada en enjambres en la que los agentes interactúan entre ellos y por supuesto con el contexto. Estas técnicas tienen su potencial en el hecho de que su capacidad para intercambiar información les proporciona capacidad de procesamiento al conjunto visto como un todo muy superior a la que se derivaría de la suma de las capacidades de procesamiento de cada agente de forma independiente

Concepto de Inteligencia artificial

Definir es limitar y por lo tanto definir algo tan amplio y complejo como el concepto de Inteligencia Artificial (IA) roza la discusión filosófica. No obstante en la Figura 9 aparecen varias definiciones⁹ de este concepto clasificadas en virtud de los criterios señalados en la Figura 8:

Sistemas que piensan como personas	Sistemas que piensan racionalmente
Sistemas que actúan como personas	Sistemas que actúan racionalmente

Figura 8 – Criterios de clasificación de las definiciones

<p>“El nuevo y excitante esfuerzo de hacer que los computadores piensen ... maquinas con mente, en el más amplio sentido literal”.</p> <p>Haugeland, 1985.</p> <p>“[La automatización de] actividades que vinculamos con procesos de pensamiento humano, actividades como la toma de decisión, resolución de problemas, aprendizaje ...”</p> <p>Bellman, 1978.</p>	<p>“El estudio de las facultades mentales mediante el uso de modelos computacionales”.</p> <p>Charniak y McDermott, 1985.</p> <p>“El estudio de los cálculos que hace posible percibir, razonar y actuar”.</p> <p>Winston, 1992.</p>
<p>“El arte de desarrollar máquinas con capacidad para realizar funciones que cuando son realizadas por personas requieren de inteligencia”.</p> <p>Kurzweill, 1990.</p> <p>“El estudio de cómo lograr que los computadores realicen tareas que, por el momento, las personas hacen mejor”</p> <p>Rich y Knight, 1991.</p>	<p>“La Inteligencia Computacional es el estudio del diseño de agentes inteligentes”.</p> <p>Pool y col., 1988</p> <p>“IA... está relacionada con conductas inteligentes en artefactos”.</p> <p>Nilsson, 1998.</p>

Figura 9 – Algunas definiciones de Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial es un campo del saber cuyo objetivo es el diseño de modelos capaces de resolver problemas a partir de la información procedente de sus

⁹ Extraído de <http://www.infor.uva.es/~calonso/IAI/Tema1-introduccionIAI/DefinicionesIA.pdf>

sistemas de percepción en combinación con la asociación de la información ya aprehendida, bajo una premisa de intencionalidad y sometidos a un proceso de continuo aprendizaje. Esta definición que seguramente esté cargada de imprecisiones y/o simplificaciones no pretende delimitar el concepto ya que hay aspectos como la idea de inteligencia entendida como conducta adaptativa y parcialmente autónoma sin referencia a conceptos cognitivos de alto nivel (propósito, intención, conciencia...) que son también tratados y explorados por los investigadores de IA. Todo ello sin olvidar el concepto de comportamiento emergente a partir de la observación e interpretación procedente de un sujeto externo.

La inteligencia artificial como disciplina de conocimiento ha buscado desde sus inicios métodos alternativos a los meramente algorítmicos para la resolución de problemas. La presencia de heurísticos, el papel del azar convenientemente delimitado y la observación de los procesos naturales con intención de imitarlos son sólo algunas de las características que distinguen las soluciones basadas en esta disciplina frente a otros enfoques meramente matemáticos o incluso lógicos. Ahora bien, lo que sin duda distingue a un enfoque IA de otros enfoques es la presencia de estrategias de aprendizaje y adaptación que permiten resolver problemas sin conocer con precisión y exactitud todos y cada uno de los factores o parámetros que intervienen en dicho problema. Vivimos en un mundo físico de naturaleza cuantitativa continua, pero el ser humano aparentemente¹⁰ resuelve los problemas cotidianos con un enfoque bastante cualitativo. Este enfoque está presente exclusivamente en las técnicas propias de la IA, lo que induce a pensar que intentar resolver problemas con técnicas de IA permitirá encontrar soluciones en aquellos problemas que no puedan ser modelados con precisión a través de fórmulas o ecuaciones por complejas que estas sean. Además, muchos problemas que admiten soluciones abordadas desde diferentes enfoques, encuentran en la IA soluciones de planteamiento más sencillo y respuesta más ajustada a la realidad.

¹⁰ Se utiliza el adverbio de modo “aparentemente” ya que aún no se conoce con precisión la forma en la que el cerebro humano trabaja pero se intuye que la componente cualitativa y la aproximación sucesiva está presente en numerosas tareas.

La IA es por tanto la herramienta que debemos utilizar cuando el dominio del problema y/o el conocimiento necesario para su resolución hagan imposible su modelización matemática o bien esta sea excesivamente compleja. Por este motivo y atendiendo en primer lugar a criterios de sencillez tan importantes, si consideramos la relevancia de aplicar tecnología apropiada en contextos de desarrollo, la IA ofrece recursos muy interesantes en proyectos en los que el desarrollo humano sea factor clave. Tal y como se ha justificado previamente, los proyectos en contextos de subdesarrollo entran dentro de este enfoque.

Las perspectivas, enfoques y técnicas empleadas en el ámbito de la inteligencia artificial son numerosos y se encuentran en permanente desarrollo al ser un campo de investigación muy activo. Así mismo, la relación e interdependencia con otros campos de conocimiento hace que llevar a cabo una clasificación formal sea algo complejo. Mientras que los problemas de percepción, razonamiento, aprendizaje, planificación y decisión constituyen un primer nivel de problemas abordables por la IA, la clasificación, la representación y la búsqueda constituyen un segundo nivel, de manera que cualquiera de ellas puede aparecer en la resolución de las primeras. No es intención de este trabajo hacer una exhaustiva descripción de todos ellos, motivo por el cual se recogen los más destacados teniendo en cuenta que se analizan con el objetivo de aplicarlos o evaluarlos en el ámbito de la tecnología apropiada y de cara al desarrollo de aportaciones en el ámbito del desarrollo humano. Si bien el punto de partida a la hora de describir, aunque sea brevemente las más relevantes, debe ser comenzar hablando de las aproximaciones simbólica y conexionista.

Aproximaciones simbólica y conexionista

El término paradigma, cuyo significado es ejemplo o ejemplar según la primera acepción del diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, fue redefinido y aplicado al ámbito científico por Kuhn [Kuhn62] “*Considero a éstos como realizaciones científicas universalmente reconocidas que, durante cierto tiempo, proporcionan modelos de problemas y soluciones a una comunidad científica*”. En el ámbito de las ciencias de la computación, un paradigma es toda una filosofía a la hora

de abordar un problema y por tanto reúne un conjunto de conceptos, métodos y técnicas que permiten modelar, formalizar y construir conocimiento.

En el ámbito de la psicología, mucho antes de que apareciera la teoría de la computación, la diferencia entre cerebro y mente era rigurosa. De hecho, tal y como aparece en [Rivière91] el cerebro, al ser un órgano físico, constituía un tema de investigación respetable, mientras que la mente era una entidad irreal. Con la aparición de los ordenadores programables resultó fácil asociar el cerebro con la máquina y la mente con el programa que gobierna dicha máquina. Sin embargo el propio Turing en [Turing37] propone una máquina, entendida esta como un modelo matemático abstracto, diseñado en torno a un concepto simbólico completamente independiente del soporte físico que la implementa y capaz de ejecutar un algoritmo.

A lo largo del tiempo, tanto desde la perspectiva psicológica como desde la inteligencia artificial, el enfoque ha sido dual. Por un lado las ideas simbólicas de la mente humana (o artificial) se centran en la relación existente entre el comportamiento de las personas (o las máquinas) y el conocimiento que tienen estas a través de un conjunto de representaciones internas que asocian desde el punto de vista semántico una visión del mundo real. Y por otro lado, los fundamentos neurobiológicos (o neuroartificiales) que sustentan la idea de una mente basada en un modelo conexionista que conforma un sistema de cómputo. En ambos casos, el carácter tan estrecho que relaciona ambas perspectivas (psicológica e inteligencia artificial) permiten aplicar un enfoque computacional al estudio de la ciencia cognitiva y de la neurociencia.

Las aproximaciones, tanto al estudio de la psicología como de la inteligencia artificial, se agrupan fundamentalmente en dos enfoques: uno basado en la representación del conocimiento (aproximación simbólica) y otro en los mecanismos sobre los que sustenta y a través de los cuales emerge el conocimiento (aproximación conexionista). De las combinaciones de ambas aproximaciones surgen los paradigmas básicos: simbólico, reactivo, conexionista e híbrido.

El paradigma simbólico pertenece a la aproximación basada en representaciones ya que lo importante es cómo representar el conocimiento con independencia de sobre

qué sistema se sustente. Gracias a una definición a través del lenguaje natural, el conocimiento se representa con hechos y reglas que permiten obtener nuevos hechos a través de mecanismos de inferencia. En general se trata de manipular símbolos para obtener otros símbolos y por tanto conocimiento. Este paradigma resulta muy intuitivo en aquellas aplicaciones en las que se dispone de información suficiente en el ámbito del problema como para poder especificar las reglas de inferencia y los motores de encadenamiento (incluyendo meta-reglas) que lo resuelven. Dado que la aplicación de los mecanismos de inferencia asociados no suele ser inmediata en el tiempo, el paradigma tiene asociada una fuerte componente deliberativa que le resta la inmediatez necesaria en el contexto de algunos problemas. En este último caso es habitual recurrir al paradigma reactivo, ligado directamente al acoplamiento entre percepción y acción. Este paradigma reactivo es un enfoque basado en conductas en el que existe una fuerte componente “acción-reacción”. Este paradigma también es conocido como situado por el hecho de que el conocimiento está asociado directamente a las capacidades que ofrecen el conjunto de sensores y actuadores del sujeto “inteligente”. Las conductas o modelos de comportamiento constituyen el carácter adaptativo y se asocian a autómatas finitos que recogen la función de decisión.

El paradigma conexionista está sustentado en la idea de mecanismos adaptativos capaces de proporcionar el soporte computacional necesario para facilitar la aparición de un comportamiento emergente. Las líneas de trabajo están basadas en dos mecanismos neuronales: redes de neuronas artificiales RNAs y redes bio-inspiradas. Las redes de neuronas artificiales son una arquitectura fija multicapa que permite llevar a cabo tareas de clasificación. La red está formada por procesadores elementales llamados neuronas capaces de proporcionar una salida en función de los parámetros aplicados a su entrada y del resultado de una regla de activación. El proceso de inferencia de la red hace de esta un clasificador numérico ajustable a través de un mecanismo de aprendizaje. Dicho aprendizaje se realiza a través del cambio del valor asociado a las conexiones de la neuronas gracias a un proceso de entrenamiento que puede ser supervisado (cuando se realiza en virtud de un conjunto de ejemplos conocidos) o no supervisado (cuando se utilizan, por ejemplo correlaciones). La redes bio-inspiradas

son circuitos de propósito especial planteados para resolver los problemas de la inteligencia en términos de la anatomía y la fisiología de las redes neuronales de las que emerge. La inteligencia se apoya sobre la capacidad de adaptación y la autonomía. En definitiva sobre una interacción entre sistemas dinámicos. Las funciones elementales de las que emerge la conducta gracias a la arquitectura funcional son la sensación-percepción, la planificación y control, la asociación/decisión y el aprendizaje. Se trata por tanto de un sistema adaptativo que interactúa con su medio interno y con su medio externo y cierra múltiples lazos de realimentación.

Comparación entre los enfoques simbólico y conexionista

El paradigma simbólico trabaja en los niveles conceptuales obviando en gran medida el nivel físico. De cara a la implementación sólo falta seleccionar los formalismos de representación y aplicar los mecanismos de inferencia. La cognición se obtiene a partir de una combinación de representaciones o símbolos regulados por reglas perfectamente definidas con independencia del soporte del sistema cognitivo y centrándose en la función. Las representaciones son configuraciones de símbolos discretos que se manipulan según reglas secuenciales. Tanto los hechos como las reglas (o sistemas equivalentes) utilizan una especificación muy próxima al lenguaje natural.

El conexionismo no es un modelo de procesamiento de símbolos discretos sino que es el procesamiento de una red de elementos o redes formales que en un principio emulaban lo que se conocía de las estructuras cerebrales humanas. En los sistemas conexionistas los procesos son distribuidos, la codificación es a escala microcósmica y de grano pequeño (función local relativamente sencilla) y todo el sistema es autoprogramable por aprendizaje gracias a la sencillez de las funciones que caracterizan cada nodo de la red y a su carácter paramétrico. La principal diferencia entre paradigma simbólico y conexionista es la sustitución de la programación por el aprendizaje [Mira95]. La comunicación interna consiste en un paso de mensajes en el paradigma simbólico mientras que se trata de un paso de números en el paradigma conexionista.

Concluyendo, el paradigma simbólico trabaja con descripciones declarativas en lenguaje natural de conceptos y relaciones entre ellos conformando reglas de inferencia.

El razonamiento consiste en manipular esos conceptos con esas relaciones. El paradigma situado es el esquema reactivo típico de la robótica en el que se programan esquemas básicos fundamentalmente basados en patrones estímulo-respuesta pero de los que emerge un comportamiento de alto nivel si se analizan desde un observador externo al sistema. El conexionismo parte de establecer una arquitectura o esquema de conexiones de elementos de cara a implementar un conjunto de funciones. El ascenso de niveles se consigue anidando e incrementando la complejidad de las redes. El paradigma simbólico se centra en los conceptos, olvidando la existencia de un soporte estructural, es decir un “cuerpo” que soporta la inteligencia. En el otro lado, el paradigma conexionista se centra en el “cuerpo” sobre el que emerge el comportamiento inteligente. Este paradigma sin duda se centra en la cooperación y competición de mecanismos adaptativos. En definitiva los enfoques son dos: aquellos centrados en representar el conocimiento a través símbolos y aquellos en basados en el cómputo y en los mecanismos para llevarlo a cabo.

Redes neuronales

Las redes neuronales son una estrategia computacional que aplica modelos inspirados en la estructura cerebral para la resolución de problemas. Cada neurona es un sistema de procesamiento muy sencillo que es capaz de activar o inhibir su salida en función de las entradas que reciba. Las neuronas se interconectan entre si constituyendo un sistema masivamente paralelo de procesadores sencillos. Los algoritmos de actualización de los pesos de las conexiones entre neuronas establecen el mecanismo de aprendizaje de la red. A pesar de ser eficaces como clasificadores y que surgen inspirados por el cerebro humano, hoy en día se sabe que este debe tener procedimientos de aprendizaje muy distintos (sobre todo en aquellos casos en los que se aplican algoritmos que exijan conocimiento global). A pesar de ello son utilizadas para resolver principalmente problemas de clasificación en multitud de campos de conocimiento. El principal inconveniente que presentan aparece cuando una red es incapaz de clasificar adecuadamente un caso concreto ya que no se puede analizar de forma fácil que parte de la red habría que ajustar para obtener un comportamiento correcto. La única solución consiste en volver a entrenar de nuevo la red incluyendo el

nuevo caso. En definitiva, el conocimiento de la red se configura en una estructura conexionista compleja de descifrar. En la Figura 10, extraída de [Neurtools11] aparecen algunas aplicaciones de las redes neuronales.

Industria	Aplicación
Arqueología	Identificación y fechado de huesos y artefactos
Banca	Suscripción de préstamos Calificación crediticia
Comercio	Detección de transacciones fraudulentas Prospección precisa de objetivos Calificación y comparación de métodos campañas de mercadeo
Defensa	Identificación de objetivos
Ciencias ambientales	Predicción de corrientes aéreas y marítimas Calidad del aire y del agua
Finanzas e inversiones	Predicción de inversiones Fluctuación de monedas
Sabores y fragancias	Predicción de sabores de cervezas y vinos
Defensa civil	Identificación de terroristas potenciales
Seguros/reaseguros	Suscripción de pólizas Estimación de reservas por pérdidas
Manufactura	Control de calidad y Six Sigma
Medicina	Diagnóstico de tumores y tejidos Diagnóstico de ataques cardíacos
Petróleo/gas/energía	Análisis de cenizas de plantas carboníferas Predicción del precio de la energía Estimación de reservas petrolíferas
Farmacéutica	Efectividad de nuevos fármacos
Psicología	Predicción de comportamientos criminales y sicótico
Bienes raíces	Valuación de bienes inmuebles
Investigación científica	Identificación de especímenes Secuenciación de proteínas
Telecomunicaciones	Detección de fallas en líneas de redes
Transporte	Mantenimiento de carreteras
Energía	Detección de fallas en redes de energía

Figura 10 – Algunas aplicaciones de las redes neuronales

Hay, sin perjuicio del relevante modelo de interconexión, dos aspectos fundamentales en las redes de neuronas artificiales (RNAs). Por un lado la función de cálculo local que realiza cada neurona individual y por otro la forma en la que esta red aprende a través de un proceso de entrenamiento. La primera sorprende a los que se inician porque generalmente esa función de cálculo local puede ser extremadamente sencilla y sin embargo la red en su conjunto presenta una capacidad de clasificación que

resultaría muy compleja llevar a cabo mediante métodos algorítmicos. La segunda porque en ella reside tal vez el concepto clave de la inteligencia artificial: capacidad para aprender. Estamos por tanto ante un modelo sencillo en su concepto que es capaz de poner de manifiesto un comportamiento emergente complejo a partir de un grupo de elementos simples interconectados entre si y simultáneamente ese modelo es capaz de organizarse internamente de cara a seguir una línea evolutiva que le permita mejorar su comportamiento.

Los criterios para clasificar las RNAs son numerosos aunque en este apartado se abordarán los aspectos relacionados con la función de cálculo local y los mecanismos de aprendizaje. No obstante, si se atiende a la arquitectura básica de las interconexiones, las redes puede ser convergentes-divergentes hacia adelante sin realimentación o bien con realimentación (la función de cálculo local de cada neurona recibe como parámetro de entrada el valor que la propia neurona o alguna de su misma capa ha producido en la iteración anterior). Además si la conexión entre todas neuronas es completa incluyendo los datos de entrada a la red se habla de conectividad total. Frente a ella la conectividad local que puede llevar asociada una función más o menos compleja que determine el grado de influencia de cada entrada en virtud de su ubicación topológica en la red.

Funciones de cálculo local

Tal y como aparece en [Mira07b], el modelo formal subyacente de una red neuronal es un grafo dirigido en el que los nodos representan la función de cálculo local y las transiciones y el esquema de interconexión representan el conocimiento aprendido. Como se ha señalado en la introducción, la función de cálculo local representa la operación que concurrentemente realiza cada neurona de forma individual con los datos existentes a su entrada y con los pesos asociados a los arcos que desembocan en ella. Atendiendo a la función de cálculo local, las RNAs se clasifican en analógicas, lógicas e inferenciales. Las primeras representan el modelo que trabajan con funciones matemáticas y por tanto tiene grandes aplicaciones. Cuando la función local no depende del tiempo se denominan modelos analógicos estáticos. En estos modelos el cálculo de la respuesta en un instante determinado sólo depende de los valores presentes en sus

entradas así como de los pesos asociados a las transiciones de entrada a cada neurona. En virtud de la linealidad de la expresión que constituye la función local y de los valores que presenten las variables a su entrada se subdividen en lineales y no lineales. Los modelos analógicos dinámicos son aquellos en los que interviene el tiempo como un factor relevante. Es decir, el instante de tiempo participa en el cálculo ya que el modelo recurre a una ecuación diferencial y por lo tanto la respuesta depende también de los valores que haya tomado en los instantes anteriores. Además es muy habitual que en estos modelos se recurra a un esquema de conectividad total con realimentación. Esto permite por ejemplo representar ciclos de oscilación al igual que sucede en el campo de la electrónica cuando se recurre a topologías similares para implementar multivibradores.

Los modelos lógicos de RNAs albergan en su naturaleza los orígenes de la computación neuronal. Tanto las variables de entrada de estas redes como las funciones son de naturaleza lógica. Las redes neuronales lógicas tienen un modelo subyacente basado en un autómata finito de dos estados para cada una de sus N neuronas por lo que toda la red constituye una autómata finito de 2^N estados. Estas redes son deterministas cuando el aprendizaje establece qué términos mínimos deben aparecer por cada función asociada a una neurona, mientras que se habla de modelos probabilísticos cuando los términos mínimos están afectados por un valor de probabilidad que representa la probabilidad de disparo de la neurona si aparece el término mínimo como configuración a su entrada. En definitiva cada uno de los términos mínimos que participan en la función de cálculo local, están multiplicados por un valor de probabilidad. Estos modelos son especialmente interesantes en los sistemas de aprendizaje por refuerzo ya que se ajustan perfectamente a un proceso de aprendizaje en el que partiendo de una especificación muy ligera la red va reforzando las transiciones más ventajosas. Además este modelo está muy relacionado en su origen con el problema de la estabilidad funcional que se puede resumir a que la red neuronal constituye un sistema distribuido y redundante capaz de proporcionar respuestas correctas incluso si parte de la red está dañada.

Finalmente los modelos inferenciales se aproximan al paradigma simbólico en cuanto a su capacidad para manipular desde el enfoque conexionista representaciones simbólicas. El paradigma conexionista destaca por la modularidad, el cálculo distribuido y paralelo y la sustitución de programación por aprendizaje [Mira07b], por lo que la propia naturaleza de este modelo constituye el mecanismo de inferencia que es necesario programar en el paradigma simbólico (básicamente las metareglas). Si se recurre a reglas de inferencia en lugar de operadores la red neuronal se convierte en una red de reglas con esquema de conectividad determinado por la topología de la red. Estos modelos suelen aplicarse para la generación de reglas y en los sistemas neurofuzzy en los cuales se entremezclan con diferentes estrategias el modelo de la RNA y las funciones difusas (en las entradas y/o en los operadores) o bien en las distintas fases de desarrollo de la aplicación.

Modelos de Aprendizaje

Si no fuera por la capacidad de aprendizaje que tiene la red neuronal, los modelos analógicos estáticos o de forma más ajustada los modelos lógicos representarían sistemas combinacionales, mientras que los dinámicos se corresponderían con sistemas secuenciales. En definitiva los segundos tendrían memoria pero los primeros no. Sin embargo hay otro aspecto clave en las RNAs denominado aprendizaje. El aprendizaje es posible porque el modelo de cálculo no solo depende del valor que tomen las variables de entrada y las salidas de las neuronas que alimentan a una dada sino que en él intervienen los valores asignados a los arcos que interconectan neuronas (y variables de entrada en el caso de la primera capa). Estos valores conocidos como pesos (pesos sinápticos en algunas referencias) encierran la capacidad de aprender de la red neuronal. Los algoritmos de aprendizaje son los responsables de actualizar dichos pesos en virtud de los resultados obtenidos.

Se denomina aprendizaje supervisado aquel método en el que el valor de los pesos se determina en base a un cálculo más o menos complejo siguiendo un procedimiento más o menos laborioso que toma como referencia en cada entrenamiento el valor esperado y el valor obtenido en la salida. Este tipo de aprendizaje, por su

naturaleza, requiere la existencia de un conjunto de entrenamiento del que se conozca el valor esperado para cada uno de los ejemplos. El fundamento básico del aprendizaje para el caso más sencillo de una red de capa única consiste en calcular la suma de cuadrados de los errores existentes teniendo que cuenta que el error para cada par de entrenamiento se define como la diferencia entre el valor esperado y el obtenido. Con este error se calcula los nuevos pesos en base a la derivada del cuadrado del error en la dirección del peso. Cuando hay más de una capa se recurre a métodos de actualización de pesos como el método de backpropagation o retropropagación [Mira07c] del gradiente que consiste en propagar la parte del error que les corresponde a las capas ocultas en función de la contribución a la respuesta que han tenido en la última capa. Con este modelo de aprendizaje se sigue un algoritmo sencillo que consiste en inicializar aleatoriamente los pesos, calcular la salida de la red en función de las variables de entrada aplicando las funciones de cálculo local y una vez obtenida la salida llevar a cabo la retropropagación del error recalculando los nuevos pesos para proceder de nuevo a calcular la salida de la red repitiendo el proceso. Este algoritmo se aplica hasta que el error cuadrático medio de las salidas de la red sea menor que un valor dado para todos los ejemplos del entrenamiento. La propia naturaleza de este algoritmo permite concluir que es muy poco probable que los sistemas biológicos trabajen así.

El aprendizaje no supervisado trabaja con reglas correlacionales a la hora de ajustar los parámetros de los pesos. Está basado en la propuesta de Hebb que puede resumirse señalando que cuando existe una cierta persistencia en la capacidad de una neurona para excitar a otra, hay procesos metabólicos en una o ambas neuronas que favorecen la eficiencia para que esa correlación se intensifique. En términos más prácticos consiste en incrementar los pesos de manera proporcional al grado de correlación que se observe entre las entradas y las salidas estableciendo por tanto una realimentación positiva. El peso que se conceda a ese grado de correlación constituye un parámetro denominado velocidad de aprendizaje. Con objeto de reducir la inestabilidad provocada por la realimentación positiva se introducen criterios de corrección basados en los datos de toda la red para establecer una realimentación negativa.

El aprendizaje por refuerzo se fundamenta en buscar la reducción de una medida global sobre la respuesta. Se trata por tanto de un proceso con un alto enfoque iterativo en el que partiendo de una especificación muy ligera se van reforzando las transiciones más ventajosas. Las funciones de cálculo local que mejor se adaptan a este modelo son las probabilísticas.

En conclusión, las RNAs son una solución extremadamente interesante cuando no se dispone de información detallada y precisa sobre la forma de resolver un problema de clasificación. En definitiva son procedimientos de cálculo en los que la capacidad de aprendizaje constituye una vía para alcanzar la solución a un problema sin necesidad de tener un algoritmo específico diseñado para su resolución. Sin embargo es importante disponer de todo el conocimiento del problema posible de cara a tomar las decisiones más ventajosas en materia de arquitectura, conectividad, tipo de neurona y algoritmo de aprendizaje [Mira95]

La aproximación supervisada requiere datos etiquetados durante el proceso de entrenamiento. Es decir, es necesario disponer de suficientes ejemplos perfectamente identificados, clasificados y cuya representatividad sea lo más universal posible en el dominio del problema ya que la bondad y calidad de la red entrenada dependerá directamente de ellos. Utiliza mecanismos de aprendizaje cuya naturaleza hace dudar de su existencia como modelo en el ámbito biológico. Entre los modelos de computación local parece que tanto los analógicos como los lógicos en todas sus variantes tienen una buena adecuación. En relación a las estructuras hay que señalar que las realimentaciones en la topología hacen aún más recurrente el método de retropropagación.

La aproximación no supervisada no requiere de datos etiquetados aunque es importante disponer de ejemplos representativos (de los que no es necesario conocer la salida) de cara a que la red, a través de los mecanismos de realimentación positiva, establezca las correlaciones entre parámetros que permitan resolver el problema de clasificación. No requiere tampoco disponer de conocimiento declarativo explícito sobre el dominio del problema de cara a su resolución. Los fundamentos matemáticos se acercan algo más a los posibles modelos biológicos en relación a modelar mecanismos

como la sensibilización, o la habituación. En el aprendizaje no supervisado parece que el modelo analógico se adapta perfectamente mientras que el modelo lógico al reducir el rango de valores posibles a los dígitos binarios, limitará en exceso el proceso aprendizaje (o incluso lo puede hacer inviable). El modelo probabilístico se podrá utilizar aunque está mucho más ligado al aprendizaje por refuerzo.

Computación evolutiva

La computación evolutiva es un área de investigación perteneciente a las ciencias de la computación que se inspira en los principios de la evolución natural. Sobre esta idea tan simple en su concepción se logran resolver problemas muy complejos. La computación evolutiva hace que el problema a resolver haga las veces del medio natural, cada uno de las potenciales soluciones representen los individuos, la calidad o fitness de la solución sea el grado de adaptación y los operadores de cruce y mutación sean los procedimientos genéticos de la naturaleza. En el ámbito de la computación evolutiva hay muchas técnicas aunque la más conocida pertenece al grupo de los algoritmos evolutivos y es la propuesta por Holland denominada algoritmos genéticos [Holland75]. Dentro del mismo grupo de algoritmos evolutivos hay otras variantes, tal vez menos conocidas pero no por ello menos interesantes: las estrategias evolutivas, la programación evolutiva, la programación genética, los algoritmos meméticos, la coevolución, la evolución interactiva y la evolución en problemas no estacionarios. Dentro de la computación evolutiva, los sistemas clasificadores son otra variante muy relacionada con los sistemas basados en reglas y el aprendizaje por refuerzo.

El carácter estocástico de los algoritmos evolutivos hace pensar al que se acerca por primera vez a su estudio que el éxito en la resolución de un problema y por lo tanto en la localización de una solución óptima se debe principalmente al mero azar ayudado por dos elementos clave: el tamaño de la población que supone la evaluación de numerosos individuos antes de proporcionar un resultado y la adecuada definición de los elementos que intervienen en el proceso evolutivo ya que ellos son los que permite conducir en cierta manera la exploración sobre el espacio de búsqueda: representación, operadores de reproducción y mutación, métodos de selección de padres y de selección

de descendencia. No obstante han sido numerosos los estudios e investigaciones que han buscado métodos para analizar el comportamiento de los algoritmos evolutivos con el ánimo de establecer mecanismos de predicción de su comportamiento a través de modelos que permitan describir y formular a priori la eficiencia de un algoritmo y proporcionar a partir de ellos mecanismos de optimización. Sin duda es importante asegurar que la convergencia del algoritmo no depende exclusivamente del azar.

Sin embargo como consecuencia de que los algoritmos evolutivos son sistemas conceptualmente sencillos pero de enorme complejidad en su fundamento matemático sobretodo por la gran presencia de factores aleatorios, los objetivos de predicción y modelado resultan excesivamente ambiciosos. Las bases teóricas para el análisis del comportamiento de la selección y de los operadores genéticos presentado por Holland [Holland92] se basa en el teorema del esquema que fundamentalmente es el resultado de formalizar las observaciones realizadas por su autor en el que se puede comprobar que los mejores cromosomas persisten en la población mientras que aquellos que se mantienen en la media mantienen su presencia estable y los peores desaparecen gradualmente.

Algoritmos genéticos

Inspirados en las teorías evolucionistas, los algoritmos genéticos aplican a través de repetidas iteraciones llamadas generaciones, operadores de cruce y mutación a un conjunto de individuos que conformar soluciones posibles de un problema a resolver. Partiendo de un grupo de estas soluciones elegido habitualmente al azar, el algoritmo simula con altas dosis de aleatoriedad el devenir temporal de los seres vivos (nacer, crecer, reproducirse y morir) recurriendo a multitud de recursos y estrategias algunas de marcado carácter artificial como el elitismo (históricamente aplicado en humanos bajo la denominación “*aktion T4*”) y otras más próximas a la naturaleza como el grado de adaptación al contexto. Los algoritmos genéticos sin duda han demostrado su capacidad para resolver problemas. Sin embargo la importante componente aleatoria de la mayor parte de sus procedimientos hacen de ellos poco adecuados en contextos en los la calidad de la solución sea un factor importante. La componente temporal puede ser

también una limitación importante. Los algoritmos genéticos son en realidad un subcampo dentro de la computación evolutiva.

Otras técnicas

Sistemas de agentes

Según Russell [Russell96] un agente es una entidad que percibe y actúa sobre un entorno. Los agentes no son desarrollados para que trabajen de forma independiente sino como entidades que constituyen un sistema. A este sistema se le denomina multiagente [Huhns98]. En este caso los agentes deben o pueden interactuar entre ellos siendo las interacciones más habituales las que impliquen informar o consultar a otros agentes. Es precisamente esa capacidad de intercambiar información la que proporciona capacidad de procesamiento al sistema muy superior a la se derivaría de la suma de las capacidades de procesamiento de cada agente de forma independiente. Para [Wooldridge95], los agentes deben ser reactivos, el agente es capaz de responder a cambios en el entorno en que se encuentra situado, pro-activos, a su vez el agente debe ser capaz de intentar cumplir sus propios planes u objetivos y sociales, deben poder comunicarse con otros agentes mediante algún tipo de lenguaje de comunicación de agentes.

Inteligencia basada en enjambres

La inteligencia basada en enjambres conocida en inglés como *Swarm Intelligence* busca el desarrollo de comportamientos complejos a partir de la interacción de un conjunto de agentes que tienen unas reglas de actuación muy sencillas [UC3M10]. Es una rama de la inteligencia artificial que se basa en el comportamiento colectivo de sistemas descentralizados y auto-organizados [Beni05]. Típicamente están constituidos por agentes simples que siguen reglas sencillas sin que exista un elemento de control global sobre todos ellos. Los agentes interactúan entre ellos y por supuesto con el contexto. Desde el punto de vista de un observador externo se pueden interpretar comportamientos complejos emergentes asociados al enjambre en su conjunto. En definitiva son sistemas inspirados en el comportamiento de colonias de hormigas, bandadas de pájaros, rebaños, cardúmenes e incluso desarrollo bacteriano. Los agentes

se limitan a interacciones locales indirectas que reciben el nombre de estigmergía¹¹ (concepto introducido por Pierre-Paul Grassé, estudioso de las hormigas) y la autoorganización es la que los hace enjambres [Santamaria11]. Existen muchos trabajos centrados en este tipo de estrategias para la resolución de problemas y destacan a modo de ejemplo algunos algoritmos de optimización como: Optimización de la colonia de la hormiga *Ant Colony Optimization*, optimización del enjambre de la partícula *Particle Swarm Optimization*, búsqueda estocástica de la difusión *Stochastic diffusion search*, gravitacional algoritmo de búsqueda *Gravitational search algorithm*, gotas de agua inteligentes *Intelligent Water Drops*, río dinámico de formación *River formation dynamics*.

Sistemas emergentes

Para Steve Johnson, emergencia es lo que ocurre cuando un sistema de elementos relativamente simples se organiza espontáneamente y sin leyes explícitas hasta dar lugar a un comportamiento inteligente. En un sistema emergente aparecen comportamientos no programados previamente de forma explícita aunque sin duda esto no significa que la programación aparezca de manera subyacente o implícita al igual que se habla de componente aleatoria de una serie temporal a aquellos comportamientos que no pueden ser explicados por la tendencia, la periodicidad o la componente cíclica. La consideración de “inteligente” es una clasificación de marcado carácter semántico que puede proceder de un observador externo que añade rasgos de intencionalidad al comportamiento que observa. La inteligencia como propiedad “emergente” es característica de los sistemas masivamente paralelos no sometidos a ningún control global. En estos sistemas el comportamiento de los sistemas individuales puede estar programado de manera que los algoritmos utilicen las interacciones con el resto como variables de entrada. Por este motivo al actuar en conjunto aparece un comportamiento global aparentemente no previsto en cada individuo.

¹¹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Estigmergia>

Capítulo 3 – Inteligencia artificial y desarrollo humano y sostenible

Resumen

Las aplicaciones de la inteligencia artificial son especialmente fuente de dilemas éticos ya que a los inherentes a las tecnologías de la información y la comunicación convencionales se añaden los derivados de la palabra inteligente, del carácter evolutivo y en ocasiones aleatorio de muchas técnicas (pensemos, por ejemplo, en la aplicación de campos aleatorios en los algoritmos de visión artificial), de la capacidad para aprender y finalmente del hecho de que algún día un sistema desarrolle autoconciencia y pase a tener intenciones “propias”. Desde hace varios años, se vienen aplicando diferentes técnicas propias de la IA en la resolución de problemas y dado el enorme potencial de las mismas y su adecuación al concepto de tecnología apropiada, se vienen utilizando en multitud de proyectos para el desarrollo humano sostenible en contextos de subdesarrollo.

Resulta difícil establecer una organización de los mismos ya que esta podría realizarse en base a diversos criterios como son por ejemplo el campo de aplicación o los paradigmas, enfoques y técnicas empleadas. Los artículos, publicaciones y estudios consultados son sólo una reducida muestra de lo que la comunidad científica está produciendo por lo que no es intención ser exhaustivos sino más bien mostrar algunos enfoques que se están siguiendo. En primer lugar se agrupan algunos estudios entorno a la técnica empleada y posteriormente se analiza un campo concreto muy relevante en el contexto de la sostenibilidad y en el cual se inscribe una de las aplicaciones que se desarrollan en este trabajo posteriormente: la generación de energía.

Revisión por técnicas

Redes Neuronales

Las redes neuronales son una de las técnicas que aparece en multitud de proyectos dado que se trata de un campo de investigación en el que la comunidad científica tiene mucha experiencia y existen multitud de recursos disponibles para su ensayo y aplicación. Las redes neuronales de estos proyectos suelen venir acompañadas de técnicas procedentes de la computación evolutiva, las estrategias estadísticas o la lógica difusa principalmente e incorporados para mejorar el proceso de aprendizaje de la red y acelerar la convergencia de la misma. En [Azadeha06] se presenta una red neuronal artificial diseñada para evaluar el rendimiento de las plantas de generación de energía eléctrica en Irán con objeto de aumentar la eficiencia de las mismas. Previamente existían varios planteamientos de naturaleza matemática en forma de métodos centrados en estrategias que van desde la aplicación de teorías de regresión econométrica hasta modelado matemático de sistemas, pero que en todos los casos y con objeto de hacer viable la caracterización de los sistemas se deben asumir suposiciones muy restrictivas. En la investigación, los autores utilizan redes neuronales artificiales para estimar la función de producción y la evaluación del rendimiento. Los resultados se aproximan y predicen con bastante exactitud el comportamiento observado real de las centrales analizadas.

Otro de los temas de vital importancia son las estrategias de almacenamiento de recursos hídricos combinando criterios de cantidad con criterios de calidad. Las dificultades de ajustar los parámetros involucrados en estos procesos debido a su volumen, al carácter aleatorio de la naturaleza de algunas de ellas y la relevancia de la predicción son factores que se abordan en [Chaves06] en donde se presenta una técnica basada en una red neuronal difusa estocástica cuyos parámetros se ajustan a través de un algoritmo genético que permite alcanzar una solución muy próxima al óptimo. Este algoritmo ha sido aplicado a la reserva de Barra Bonita en el estado de Sao Paulo en Brasil.

La organización de los procesos de tratamiento de los residuos es vital en los países en vías de desarrollo. La influencia del poder calorífico de los residuos sólidos urbanos es muy importante de cara a mejorar la eficiencia de la combustión de los incineradores. El poder calorífico de los residuos sólidos urbanos está determinado por la composición química elemental de sus diversos componentes. Habitualmente técnicas como la medición calorimétrica y métodos empíricos son los mecanismos que se emplean para determinar el rendimiento. En [Dong02] se propone una red neuronal con propagación hacia delante para predecir el valor calorífico en base a la composición física de los residuos. Los resultados de este análisis muestran que la predicción con este sistema es mucho mejor que los modelos convencionales.

La auscultación cardiaca es un procedimiento muy utilizado por los médicos para evaluar la función cardiaca en los pacientes y detectar la presencia de anomalías. La fonocardiografía es una técnica que permite la grabación de las vibraciones sónicas de corazón y de la circulación de la sangre proporcionando información muy útil sobre la función cardiaca, en concreto sobre el funcionamiento de las válvulas y la hemodinámica del corazón. Esta técnica permite detectar diversas enfermedades del corazón. En [Gupta07] se propone un nuevo método para la segmentación de los sonidos producidos por el corazón, obtenidos mediante fonocardiografía, utilizando filtrado homomórfico, es decir un filtrado lineal de la imagen transformada para separar los componentes de iluminación y reflectancia, y el mecanismo de agrupamiento en clases denominado K-medias. Con objeto de reducir la información procedente de las señales filtradas se utiliza una extracción de vectores característicos mediante wavelets de Daubechies-2 [Jalali02] usando los coeficientes obtenidos como entrada de una red neuronal. En el estudio se analiza el comportamiento de dos tipos de redes distintas. Por un lado una red *Grown and Learn* (GAL) y una red perceptrón multicapa de aprendizaje por retropropagación (MLP-BP). La conclusión señala que la primera requiere menos tiempo de entrenamiento para obtener un rendimiento similar en la clasificación en tiempo real de los sonidos del corazón en un único ciclo cardiaco (sístole y diástole) en tres clases diferentes: normal, presencia de murmullo sistólico y presencia de murmullo diastólico. Estrategias similares aparecen descritas en [Sezgin01], en cuya investigación

utilizaron una red neuronal para la clasificación de sonidos respiratorios de pacientes con asma y sujetos normales. En esta ocasión, los sonidos se adquirieron con un estetoscopio electrónico, se aplicó la transformada wavelet a cada ventana de señal mediante el método de Daubechies-2 y se calcularon los valores eficaces de los seis coeficientes wavelet para formar el vector de características. Dicho vector eran los datos de entrada a una red neuronal tipo GAL obteniendo un porcentaje muy alto (entorno al 98%) de aciertos y con un tiempo de entrenamiento muy corto.

En el estudio y protección de la riqueza de las especies y la composición de los bosques [Foody05] es necesario acudir a un despliegue de sistemas de captación remota dada la dificultad para obtener los datos necesarios para comprender y manejar el fenómeno de la biodiversidad. Gracias a las redes de sensores la detección tiene un potencial considerable como fuente de datos sobre biodiversidad tanto a nivel espacial como temporal. Hasta este estudio, los estudios de detección se habían centrado en un solo aspecto de la biodiversidad como es la riqueza de especies, utilizando por lo general técnicas convencionales de análisis de imagen que puede no explotar la información de los datos. El estudio permitió estimar la biodiversidad medida con los datos procedentes de la teledetección gracias al empleo de redes neuronales. Para ello se utilizaron dos modelos de redes neuronales *feedforward*, diseñadas para calcular los índices básicos de la biodiversidad y redes de Kohonen para proporcionar información sobre la composición de especies. Se observó una gran correlación entre la diversidad de especies y la composición de los bosques.

En un ámbito bastante cercano, [Mas04] presenta un estudio realizado para establecer un modelo de predicción de la distribución espacial de la deforestación tropical tomando como punto de partida la información recogida por los LandSat¹² durante los años 1974, 1986 y 1991. Esta información permitió generar mapas digitales sobre la deforestación que fueron enriquecidos con información adicional (presencia de carreteras, asentamientos humanos, pendiente, elevación, tipo de suelo) de cara a establecer la relación existente entre deforestación y dichas variables. Para llevar a cabo

¹² Serie de satélites construidos y puestos en órbita por Estados Unidos de América para la observación en alta resolución de la superficie terrestre. Fuente: Wikipedia - <http://es.wikipedia.org/wiki/LandSat>

la clasificación y establecer un modelo de predicción se utilizó un perceptrón multicapa cuyo resultado de éxito alcanzó un porcentaje del 69%

En el ámbito de la explotación agrícola, la gestión de los recursos naturales debe realizarse bajo un enfoque sostenible. Las nuevas tecnologías aplicadas a este sector han dado lugar al concepto de agricultura de precisión que combina el conocimiento aportado por la agro-biología, la tecnología y la gestión económica. En el ámbito de la tecnología, el despliegue de redes de sensores, actuadores adaptativos, sistemas de información geográfica, sistemas software de adquisición de datos, procesamiento, transformación almacenamiento y transferencia así como sistemas avanzados de apoyo a la decisión (sistemas de predicción, clasificación y control automático) son la clave de la nueva agricultura. En [Maohua01] se hace una revisión de las ingentes posibilidades que se abren y se hace una reflexión sobre el caso concreto de China a través de los programas de desarrollo de las ciencias y las tecnologías agrícolas que permiten asegurar que la agricultura de precisión es una opción muy interesante para promover la agricultura sostenible. El objetivo es garantizar la seguridad alimentaria y el bienestar humano en todo el mundo.

Otro aspecto clave de cara en el ámbito de los países en vías de desarrollo es poder realizar un control de las cuencas hidrográficas a través de modelos de precipitación-escorrentía al no disponer de un registro histórico de datos suficientemente significativo como para aplicar técnicas estadísticas. En [Sajikumar99] se describe un modelo basado en redes neuronales que permite con un reducido número de datos trabajar de forma eficiente. El estudio, utilizando los datos del río Lee (en el Reino Unido) y el río Thuthapuzha (en Kerala - India) concluye que el modelo funciona con datos procedentes exclusivamente de los últimos seis años.

Simulación

En cuanto a las estrategias que permiten simplificar el planteamiento de un problema en el que intervienen gran cantidad de factores interrelacionados destaca la simulación. En [Schreinemachers06] se propone un método de simulación multiagente que permite observar las consecuencias de la interrelación de agentes que modelan los

diferentes actores que intervienen en un proceso. Esta simulación se aplica al análisis de la relevancia/irrelevancia de la relación entre rendimientos de los cultivos y la seguridad alimentaria en los sistemas agrícolas de Uganda. El enfoque multiagente permite representar la heterogeneidad típica de estos sistemas, la interacción entre ellos y la dinámica de los agentes involucrados. La combinación de este sistema con agentes concebidos individualmente mediante modelos matemáticos permite lanzar la ejecución de una simulación y observar los resultados que se producen y los comportamientos emergentes del conjunto.

Técnicas estadísticas y minería de datos

Un caso real tratado en [Sudhira03] mediante técnicas estadísticas ha sido el análisis y la predicción de los problemas derivados de la expansión urbana fruto del crecimiento de la población y de los procesos de migración dirigidos hacia las grandes ciudades en la región de Udipi, estado de Kamataka en la India. A través de tecnologías basadas en redes de sensores, imágenes de satélites, técnicas GIS y datos procedentes de censos, se analizan y comprenden los patrones de crecimiento urbano y se obtienen modelos que sirven para predecir el futuro de estos comportamientos con objeto de establecer la dirección más eficaz para emplear los recursos disponibles y las infraestructuras necesarias.

Un campo de aplicación relevante: La generación de energía

En el ámbito de la generación de energía es especialmente relevante disponer de un mecanismo de previsión de la demanda cuyos resultados se ajusten en la mayor medida posible a la realidad del futuro y permitan conocer lo antes posible las necesidades para poder tomar decisiones de carácter estructural y dirigir los esfuerzos a aumentar la eficiencia energética. Para llevar a cabo la previsión es imprescindible contar con el mayor número de datos que permitan conocer la evolución de la demanda desde el pasado hasta el presente. Las previsiones iniciales realizadas por las autoridades Turcas han arrojado una alta tendencia de las mismas ha sobreestimar la demanda y esto acarrea grandes gastos y una enorme pérdida de la eficiencia perseguida. En [Ünler08] se propone un método de previsión basado en el método de

optimización por enjambre de partículas [Melian03], metaheurística propuesta por J.Kennedy y Russell C. Eberhart y cuya inspiración procede de la observación del comportamiento social de grupos de organismos como son las bandadas de pájaros, los enjambres de abejas y los bancos de peces [Guerra06]. Este enfoque, denominado en inglés *Particle Swarm Optimization* (PSO) [Kennedy95] [Kennedy01], centra su estrategia en un proceso de búsqueda en el que las partículas sondan el espacio de búsqueda guiadas por aquella partícula cuya solución se considera mejor dentro de las encontradas hasta el momento y que por tanto ejerce de líder hasta que aparece otra que la desbanca [Kennedy98]. En el mecanismo de previsión de la demanda energética se utilizan diversos indicadores que permiten ajustar el proceso de búsqueda como son la evolución del producto interior bruto, la población y los indicadores asociados a las tasas de importación y exportación del país. Para completar la propuesta se compara la estrategia utilizada con una basada en la optimización por colonias de hormigas, en inglés *ant colony optimization* (ACO) [Colomi92][Dorigo97a][Dorigo97b][Dorigo96]. El documento concluye señalando que es clave la relación entre el desarrollo económico de un país y la demanda energética aunque no sigue un modelo lineal por lo que se recurre a mecanismos de búsqueda basada en heurísticos para alcanzar el valor óptimo de la función objetivo. Así mismo se observa en la Figura 11 (extraída de [Ünler08]) que han sido varios los métodos utilizados para realizar esta previsión. Existe una recopilación más exhaustiva en [Rueda11].

Método utilizado	Referencia
Algoritmos Genéticos	Ceylan y Ozturk (2004) [Ceylan04] Ozturk et al. (2005) [Ozturk05] Ceylan et al. (2005) [Ceylan05] Haldenbilen y Ceylan (2005) Haldenbile[05]
Redes Neuronales	Hobbs et al. (1998) [Hobbs98] Sozen et al. (2005) [Sozen05] Sozen and Arcaklioglu (2007) [Sozen07]
Colonias de hormigas	Toksari (2007) [Toksari07]
Modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) y modelo autorregresivo integrado de media móvil que, considera el efecto de la estacionalidad (SARIMA)	Ediger and Akar (2007) [Ediger07]
Predicción con teoría de Grey (GPRM)	Akay and Atak (2007) [Akay07]
Regresión lineal	Yumurtaci and Asmaz (2004) [Yumurtaci04]

Figura 11 – Estudios para la previsión de la demanda de energía

Otra aplicación relacionada con la generación de energía aparece en [Kandil02], en el que se propone un sistema experto basado en el conocimiento que permite establecer previsiones de la demanda energética a medio y largo plazo. El sistema utiliza tanto variables de naturaleza eléctrica como no eléctrica para realizar las previsiones y proporciona como resultado un conjunto de reglas de decisión.

Capítulo 4 – Arquitectura y plataforma software para aplicaciones de IA de aproximación conexionista para el desarrollo humano y sostenible

Resumen

Plantear una arquitectura software y desarrollar una plataforma para aplicaciones IA de aproximación conexionista para el desarrollo humano y sostenible en contextos de subdesarrollo exige centrar la atención en el concepto de tecnología apropiada y en la sostenibilidad. En concreto es especialmente importante emplear sistemas eficientes tanto computacional como energéticamente hablando (green computing), bajo tecnologías no dependientes de terceros (plataformas abiertas y software libre) y cuyo diseño permita ser empleadas, mantenidas y mejoradas por personal procedente del entorno y con formación modestamente cualificada. La propuesta que recoge este capítulo propone una arquitectura basada en componentes software bajo la cual se desarrolla una plataforma para construir aplicaciones IA de aproximación conexionista. La plataforma integra herramientas y frameworks todos ellos procedentes del ámbito del software libre que incorporan diversas técnicas como las redes neuronales, los algoritmos genéticos, los agentes distribuidos y las máquinas de estados con capacidad reflexiva bajo un enfoque que combina los beneficios de componer un modelo de comportamiento basado en el paradigma orientado a eventos junto con un modelo de agentes distribuido sustentado en el paradigma orientado a servicios, atendiendo todo ello al enfoque de tecnología apropiada.

Introducción

A la hora de proponer una arquitectura y desarrollar una plataforma software para aplicaciones de IA de aproximación conexionista para el desarrollo humano y sostenible en contextos, eufemísticamente hablando, de países en vías de desarrollo, el concepto explicado en el primer capítulo de este trabajo de tecnología apropiada se concreta en utilizar sistemas eficientes tanto computacional como energéticamente hablando (*green computing*), bajo tecnologías no dependientes de terceros (plataformas abiertas y software libre) y por último diseñadas para ser empleadas, mantenidas y mejoradas por personal cuya cualificación en términos generales dista de la que existe en los centros de investigación de los países desarrollados. Quizás este último aspecto es de los que pasa más desapercibido a la hora de llevar a cabo acciones de cooperación al desarrollo que requieran software. Sin embargo la sencillez es fundamental para que las aplicaciones y sistemas software dejen de ser cajas negras o lo que es lo mismo, responsabilidad de los investigadores cooperantes. De nada sirve que en un proyecto de ingeniería se diseñe por ejemplo un vehículo que utilice combustibles existentes en el país, respetuosos con el medio ambiente, con materiales sostenibles, diseñado para que sea factible su fabricación y reparación en el lugar de la acción, si al final lleva incorporada tecnología software cuyos algoritmos son indescifrables, incomprensibles y de gran complejidad conceptual para el personal autóctono. Sin embargo esta contradicción se pone de manifiesto permanentemente en muchos de los proyectos de desarrollo humano y sostenible en contextos de subdesarrollo. El objetivo de la arquitectura que se propone en este trabajo es precisamente dar respuesta a las premisas asociadas al concepto de tecnología apropiada por lo que sus características son o al menos se pretenden que sean las siguientes: simple y modular. El carácter simple persigue que sea sencillo interpretar, desarrollar y modificar. El carácter modular tiene como objetivo permitir la integración de componentes de forma sencilla y flexible utilizando *frameworks* y bibliotecas diseñadas para trabajar "*out of the box*". En la Figura 12 aparece el diagrama de componentes de la arquitectura en la que se puede observar los principales elementos que constituyen la misma: infraestructura para el despliegue de servicios, motor de máquinas de estado, frameworks para las redes neuronales y el algoritmo genético.

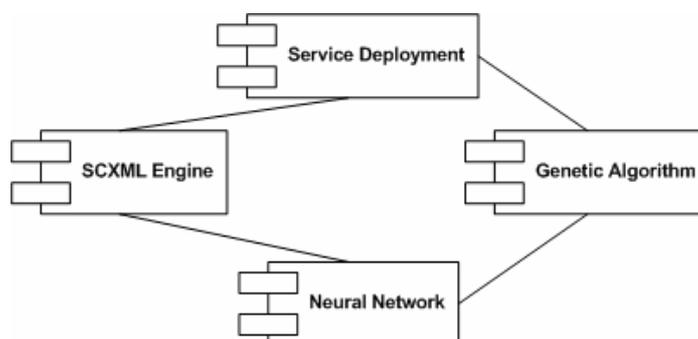


Figura 12 – Diagrama de componentes de la arquitectura

La plataforma que se propone en este trabajo y que responde a una arquitectura basada en componentes, integra diferentes herramientas de software libre destinadas al desarrollo de proyectos en el ámbito de la inteligencia artificial bajo un enfoque de desarrollo humano. Las diferentes herramientas disponibles como son las redes neuronales y los algoritmos genéticos son explotadas a través de un motor de máquinas de estado que coordina todo el proceso y que a su vez permite incorporar inteligencia adicional bien porque sea necesario para el contexto del problema bien porque los resultados de las redes neuronales o de los algoritmos genéticos deban ser matizadas, concretadas o incluso sustituidas por otros procedentes de información adicional no contemplada durante el proceso de entrenamiento o durante la evolución en su caso. El modelo además permite que el autómata finito que gobierna la máquina de estados y que determina el flujo de trabajo sea implantado de forma declarativa, permitiendo así que se incorporen procedimientos de reflexión computacional que puedan modificar dicho autómata durante la ejecución. Por último, se hace que todo el modelo pueda ser distribuido en base a un paradigma orientado a servicios pudiendo por tanto que cada implementación sea un agente software. Las herramientas, frameworks y tecnologías utilizadas en este trabajo aparecen en la Figura 13.



Figura 13 – Herramientas, frameworks y tecnologías utilizadas

Comportamiento orientado a eventos

Uno de los mecanismos más intuitivos a la hora de representar un comportamiento, entendido este como el conjunto de acciones y la forma en la que estas se desencadenan en un “agente”, es acudir a las máquinas de estados, dado que las mismas son capaces de incorporar de forma sencilla la dinámica de un sistema sometido a un conjunto de señales de entrada que evoluciona a través de diferentes estados generando un conjunto de señales de salida. Por lo tanto, las máquinas de estados son una herramienta natural en un entorno dirigido por eventos. La programación basada en este enfoque recibe el nombre de paradigma orientado a eventos. Los diagramas de estados, *statecharts* [Harel87] son una mejora sustancial de las máquinas de estados finitos (FSM) conocidas también como autómatas de estados finitos. Los *statecharts* constituyen una herramienta potente para describir e implementar la lógica de negocio que dirige el comportamiento de un sistema. Son empleados en multitud de aplicaciones dada su enorme versatilidad sirviendo tanto para describir un protocolo de comunicación como para implementar el comportamiento inteligente de un agente software. Desde el punto de vista funcional poseen gran capacidad para incluir contenido semántico a través de sencillos esquemas. Son capaces de incluir aspectos complejos como la jerarquía y la concurrencia utilizando un reducido conjunto de elementos: estados, transiciones, condiciones y eventos. Son fáciles de verificar y se han aplicado profusamente en la implementación de sistemas de control. Existen variantes no deterministas como son los que se basan en máquinas de estados probabilísticas y en máquinas de estados difusas que amplían aún más el abanico de posibilidades.

Actualmente, gracias al desarrollo de las tecnologías Web y la amplia difusión de las tecnologías XML para, entre otras cosas, el intercambio de información, se ha desarrollado el State Chart XML (SCXML) [SCXML09], lenguaje de máquinas de estado basadas en eventos de propósito general - *general-purpose event-based state machine language* -. SCXML es por tanto, además, un lenguaje de control de procesos con el que resulta muy sencillo definir el comportamiento de un sistema bajo un paradigma reactivo.

Para integrar una máquina de estados expresada en SCXML es necesario incorporar un procesador de lenguaje capaz de tratar un fichero SCXML y ejecutarlo. Este módulo recibe el nombre de motor de la máquina de estados - *statechart engine* -. El proyecto Apache Commons SCXML [ACSCXML10] desarrolla un motor de máquina de estados en lenguaje Java que se distribuye como una librería cuya integración resulta extremadamente sencilla. Otras implementaciones existentes son QT SCXML¹³ implementada en C++ con la tecnología Qt¹⁴, PySCXML¹⁵ implementada en Python, SCXML4Flex¹⁶ implementada en ActionScript/Flex y una interesante Web llamada *Synergy SCXML Web Laboratory*¹⁷ en la que se puede evaluar el comportamiento de una máquinas de estados a través de un motor implementado con el lenguaje de programación Oz¹⁸. En este trabajo se ha utilizado la implementación Apache Commons SCXML. En la Figura 14¹⁹ puede verse el flujo de diseño que permite definir gráficamente un modelo de máquina de estados, obtener la especificación SCXML y pasar el control de la ejecución al motor de máquinas de estados Commons SCXML.

¹³ <http://qt.gitorious.org/qt-labs/scxml>

¹⁴ <http://qt.nokia.com/products/>

¹⁵ <http://code.google.com/p/pyscxml/>

¹⁶ <http://code.google.com/p/scxml4flex/>

¹⁷ <http://www.ling.gu.se/~lager/Labs/SCXML-Lab/>

¹⁸ <http://www.mozart-oz.org/>

¹⁹ Extraída de <http://commons.apache.org/scxml/>

ejecución). En este trabajo, la reflexión se limita a la habilidad para que un programa en tiempo de ejecución modifique el flujo de ejecución de su propio código haciendo que este sea determinado de forma declarativa.

Cuando la máquina de estados que representa el comportamiento está prefijada con carácter previo, la capacidad de adaptación es nula y por lo tanto no existe posibilidad de que se produzca aprendizaje ninguno. En el modelo propuesto, la máquina de estados se describe en el lenguaje de marcas SCXML y está físicamente en un fichero de texto independiente de los módulos que implementan las posibles acciones. Este enfoque hace que el control del flujo sea declarativo y externo a los sistemas, facilitando que estos puedan modificar la propia máquina de estados de manera que se obtiene como resultado un cierto grado de reflexión si se analiza el sistema como un todo. Esta tímida aproximación al concepto de reflexibilidad (*reflection* en inglés) a través de la capacidad de automodificación, se acerca modestamente al concepto de implementación abierta y permite introducir el concepto de metasisistema como aquel dominio computacional cuyo dominio es otro sistema computacional. Atendiendo a este concepto, un sistema es reflexivo cuando se trata de un metasisistema conectado a si mismo, es decir que opera sobre si mismo. La reflexión puede definirse entonces como la capacidad de una entidad para representar, operar, y realizar cualquier transacción sobre si mismo. En definitiva, representa la capacidad para que un programa tenga acceso a si mismo para cambiarse. Los mecanismos reflexivos se denominan operadores reflexivos y se definen como las facilidades que ofrece el lenguaje para que los programas tengan acceso al metasisistema en el que son ejecutados. En definitiva, la habilidad de una programa para acceder a la representación dinámica de si mismo. En este sentido, el potencial de SCXML aún no ha sido completamente aprovechado. Pensemos simplemente en una aplicación, por ejemplo orientada a objetos en C++ o Java. El diseñador generará clases con capacidad de procesamiento a través de sus atributos y métodos. Lo habitual es que a través de la función principal, el desarrollador establezca un flujo de procesamiento más o menos complejo pero en definitiva previamente definido. Evidentemente estamos ante un modelo de programación orientado a objetos convencional. Ahora modifiquemos el

enfoque del planteamiento e identifiquemos métodos suficientemente cohesionados y poco acoplados como para que puedan utilizarse en diferentes secuencias. Si trasladamos la responsabilidad de dirigir el flujo de procesamiento a una máquina de estados expresada en SCXML estaremos ante un programa cuya secuencia de encadenamiento podrá ser fácilmente modificada y lo que es más espectacular, con capacidad para que el propio programa genere un nuevo SCXML que modifique en tiempo de ejecución su propia secuenciación. Estaríamos entonces ante un nuevo modelo de programación en la que los programas serían fácilmente secuenciados y además podrían llegar a tener con poco esfuerzo capacidad para generar secuencias nuevas, es decir “autosecuenciarse”.

En la Figura 15 puede verse el modelo en tiempo de ejecución de una aplicación que incorpora un motor Apache Commons SCXML de manera que la secuencia de invocación a los métodos de los objetos recaen en la máquina de estados.

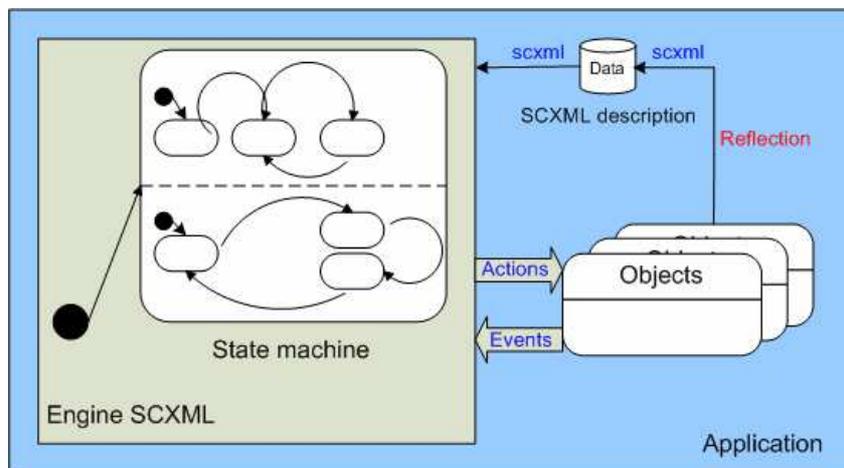


Figura 15 – Estructura de una aplicación con control de flujo declarativo

Aprendizaje

Un comportamiento expresado exclusivamente en términos de un autómata finito no tiene capacidad para aprender. Puede recoger la dinámica del sistema y evolucionar adaptándose al contexto, pero realmente mientras no modifique el autómata de partida, el comportamiento estará previsto inicialmente y por tanto no debería considerarse “inteligente”. Con objeto de incluir la capacidad para aprender en un comportamiento implementado con la propuesta anterior se puede complementar con otras técnicas que proporcionen esta capacidad. La idea es modificar el comportamiento con el objetivo de mejorarlo. Una de las técnicas disponible consiste en acudir al modelo conexionista y optar por incluir una red neuronal dada su capacidad para extraer conocimiento a través de un proceso de entrenamiento. En el mercado existen muchas herramientas software que permiten diseñar, evaluar e implementar redes neuronales. Existen soluciones basadas en software propietario y soluciones procedentes del software libre. No es objeto de este trabajo hacer un estudio detallado de todas ellas ni por supuesto establecer comparativas. La filosofía sigue siendo por un lado la flexibilidad de la propuesta, lo cual significa que cualquier herramienta que permita fácilmente interconectarse con otras sería válida, aunque por otro el concepto de tecnología apropiada en entornos de desarrollo humano aplicado en países pobres implica que el software propietario tal vez no sea adecuado por la dependencia que origina y la incapacidad para modificarlo si fuese necesario. Dentro de las propuestas de software libre existen diversas opciones, como por ejemplo Joone [Joone11] un framework para redes neuronales escrito en Java que constituye un motor neuronal orientado a objetos y basado en componentes que permiten desarrollar e implementar fácilmente nuevos módulos y aplicaciones y cuya evolución se denomina Encog [Encog11], disponible en versiones Java, .Net y Silverlight. Y Neuroph [Neuroph11] es un framework Java para el desarrollo de redes neuronales formado por una biblioteca de clases Java así como un entorno gráfico de usuario denominado easyNeurons que permite, sin necesidad de escribir ni una sola línea de código, diseñar, entrenar, evaluar y explotar redes neuronales y finalmente si se desea escribir programas Java que capturen la red diseñada con el entorno gráfico y la utilicen de forma independiente. Obviamente

también es posible escribir directamente el código asociado a la red neuronal y trabajar con ella sin recurrir al entorno gráfico. Además, Neuroph se puede descargar integrado en un entorno de desarrollo como NetBeans con lo que el desarrollo y depuración de las aplicaciones resulta muy sencillo y versátil. Hay un pequeño estudio comparativo y de eficiencia que compara estos tres frameworks en [Taheri10a] [Taheri10b]. En este trabajo se ha elegido Neuroph por su sencillez y flexibilidad, no sólo para el entrenamiento sino también para algo que otros paquetes suelen olvidar: el uso y explotación de la red una vez esta ha sido entrenada. En la Figura 16²⁰ se observa el diagrama de bloques del framework así como el flujo de trabajo de Neuroph.

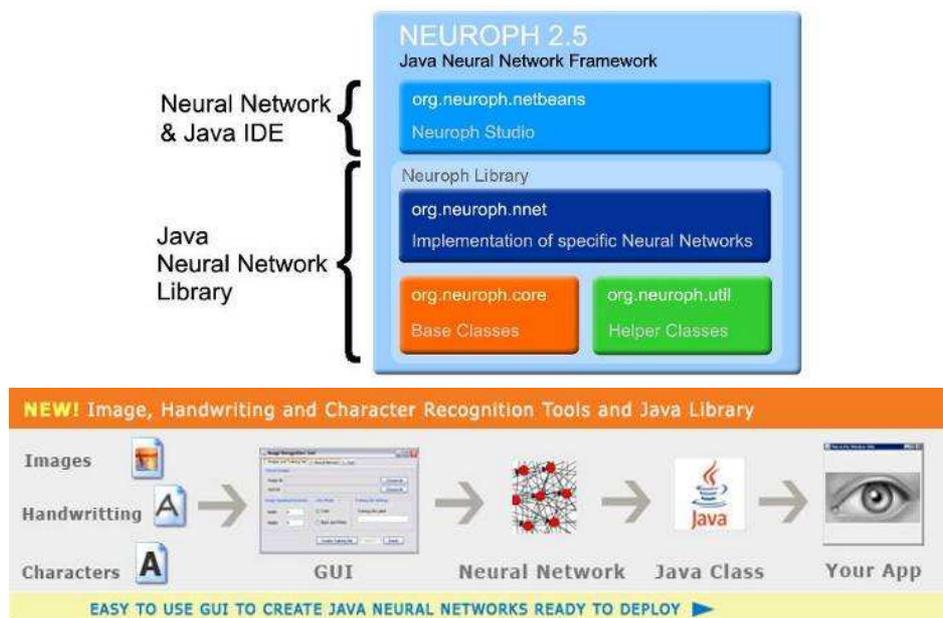


Figura 16 – Diagrama de bloques del framework y flujo de trabajo con Neuroph

Carácter evolutivo del aprendizaje

En la literatura sobre redes neuronales se plantea frecuentemente el problema de la influencia de los ajustes de los parámetros de la red neuronal sobre la solución. Este aspecto es crucial y debe ser analizado en detalle durante la fase de entrenamiento. El ajuste y sintonización de parámetros incluye además la decisión sobre la topología de la

²⁰ Extraída de <http://neuroph.sourceforge.net/index.html>

red (número de neuronas, capas y esquema de interconexión). Los algoritmos genéticos se han utilizado en varias investigaciones para diseñar estructuras neuronales [Mizuta01] así como la más conocida labor de sustituir el mecanismo de aprendizaje por ajuste de pesos sinápticos por un método evolutivo. Cuando el papel de los algoritmos genéticos se centra en la estructura es importante definir una función de fitness adecuada que no se limite exclusivamente a valorar la función de error sino que tenga en cuenta aspectos tan relevantes como la sencillez de la red en todos los aspectos. Además es cierto que el hecho de “automatizar” el proceso de ajustar parámetros en la red neuronal con un algoritmo genético lo que hace es trasladar el problema del ajuste de parámetros a la fase de diseño del propio algoritmo genéticos. Decisiones como el genotipo, el proceso de cruce, la mutación, el tamaño de la población, así como el resto de parámetros del algoritmo influyen de nuevo en la solución obtenida [Nolfi95].

Una de las propuestas existentes para el desarrollo de algoritmos genéticos y en general técnicas asociadas a la computación evolutiva es JGAP [JGAP11], un *framework* basado en componentes Java para este fin. JGAP proporciona los mecanismos básicos para aplicar los principios evolutivos en la resolución de problemas pero con un enfoque que permite fácilmente conectar nuevos operadores genéticos así como otros subcomponentes.

Otros mecanismos para el aprendizaje automático

Son numerosos los recursos, desarrollos e implementaciones existentes de herramientas para la inteligencia artificial elaboradas en lenguaje Java y muchas de ellas admiten un grado de integración razonablemente bueno y sencillo. En la Web [Aima11] asociada al conocido manual de inteligencia artificial de Russell y Norvig [Russell09] aparecen varios enlaces con recursos, manuales, bibliografía e incluso código asociado a los contenidos del mencionado compendio. Además hay recursos gratuitos dedicados a la IA con Java como [Watson11].

Otros desarrollos más completos, por ejemplo en el ámbito de la minería de datos es Weka [Weka3], actualmente en su versión 3. Se trata de una recopilación de algoritmos de aprendizaje automático para tareas de minería de datos impulsado por el

grupo de aprendizaje automático de la Universidad de Waikato (Nueva Zelanda). Weka está desarrollado en Java, constituye software de código abierto y es publicado bajo licencia GNU. Contiene herramientas para el preprocesado de datos, la clasificación, la regresión, el agrupamiento o clustering, las reglas de asociación y la visualización. También es muy adecuado para desarrollar nuevos sistemas de aprendizaje automático.

En el ámbito de las redes bayesianas, BNJ [BNJ11] es un conjunto de herramientas de software *open-source* para investigación y desarrollo usando modelos gráficos de probabilidad. Está implementado en Java y distribuido bajo la Licencia Pública General de GNU por el Laboratorio para Descubrimiento de Conocimiento en Bases de Datos (KDD por sus siglas en inglés) de la Universidad del Estado de Kansas.

Otra de las iniciativas más prometedoras en el ámbito del aprendizaje automático es la propuesta denominada Apache Mahout, proyecto para crear sistemas escalables de aprendizaje automático bajo un licencia Apache. Mahout incluye un nutrido grupo de algoritmos IA y estructuras de datos diseñadas para manipular grandes cantidades de información. El diseño de Mahout permite que la ejecución de los algoritmos se realice bajo un paradigma distribuido. Entre los algoritmos aparecen, tal y como señala [Mahout11] “*Classification: Logistic Regression (SGD), Bayesian, Support Vector Machines (SVM), Perceptron and Winnow, Neural Network, Random Forests, Restricted Boltzmann Machines, Online Passive Aggressive. Clustering: Canopy Clustering, K-Means Clustering, Fuzzy K-Means, Expectation Maximization (EM), Mean Shift Clustering, Hierarchical Clustering, Dirichlet Process Clustering, Latent Dirichlet Allocation, Spectral Clustering. Pattern Mining: Parallel FP Growth Algorithm (Also known as Frequent Itemset mining). Regression: Locally Weighted Linear Regression. Dimension reduction: Singular Value Decomposition and other Dimension Reduction Techniques, Principal Components Analysis (PCA), Independent Component Analysis, Gaussian Discriminative Analysis (GDA).*”

Por último, una iniciativa muy interesante es la denominada machine learning open source software [MLOSS11] cuyo objetivo es crear una comunidad de desarrolladores para construir software de código abierto para el aprendizaje máquina

bajo el modelo de herramientas que trabajan de forma colaborativa unas con otras sin necesidad de integrarlas en el mismo paquete. Si se filtra por lenguaje de programación y se selecciona Java se pueden obtener más de 40 proyectos entre los que aparecen como más recientes SSA Toolbox²¹ que implementa el algoritmo Stationary Subspace Analysis (SSA), Cognitive Foundry²² que desarrolla una biblioteca modular para el desarrollo de sistemas cognitivos, JSTACS²³ un marco de desarrollo para el análisis estadístico y la clasificación de secuencias biológicas o Mulan²⁴ una biblioteca java para la clasificación de conjuntos de datos “*multi-label*”.

Carácter distribuido: Orientación a servicios

Apache River [ApacheRiver11], antes conocido como Jini, es un entorno de computación distribuida que tiene como objetivo proporcionar un marco de referencia para desarrollar redes “*plug and play*”. En su concepción, un dispositivo (entendiendo como tal cualquier tipo de sistema capaz de procesar información) que es conectado a la red, anuncia su presencia en esta y pone sus servicios a disposición del resto de dispositivos compatibles Jini. El concepto base en Jini es el servicio concibiendo la arquitectura de red Jini como una federación de servicios [Papazoglou06]. Jini se define por lo tanto como la especificación de un conjunto de componentes que conforman un *middleware* y que permiten llevar a cabo el desarrollo de servicios junto con todas las operaciones necesarias para la publicación y la suscripción. Para su despliegue incluye una relación de servicios estándar implementados y listos para su ejecución.

Jini, dadas sus características, responde perfectamente a los requerimientos de la computación distribuida y por extensión de la computación ubicua. Lógicamente, Jini es una alternativa más en el ámbito de las soluciones orientadas a la computación distribuida y por supuesto tiene numerosas ventajas y algunas limitaciones. Obviamente se une a la nutrida oferta de otras tecnologías diseñadas para resolver problemas similares. El éxito como es natural no sólo depende de aspectos de naturaleza

²¹ <http://www.user.tu-berlin.de/paulbuenau/ssa/toolbox/>

²² <http://foundry.sandia.gov/>

²³ http://www.jstacs.de/index.php/Main_Page

²⁴ <http://mulan.sourceforge.net/>

exclusivamente técnica sino que intervienen otros factores externos como son el mercado y las decisiones de carácter extra-técnico que adopta la industria.

En un sistema Jini los elementos que intervienen son: los servicios, los clientes, los servicios de localización (*lookup services*) y los servidores de clases [Newmarch06].

- Los servicios constituyen mecanismos software que ponen a disposición del sistema los recursos que tienen a su alcance. Un servicio puede proporcionar acceso a un dispositivo hardware (una impresora, una máquina expendedora, un reloj, un sistema de adquisición de datos) o a un módulo software (la implementación del algoritmo FFT, el acceso a una base de datos, un sistema de encriptación o codificación).
- Los clientes son aquellos sistemas que necesitan utilizar dichos recursos para llevar a cabo otras tareas y por ello utilizan mecanismos que les permite localizar y suscribirse a ellos y tras la adecuada orquestación, completar sus objetivos integrando al servicio en su propia lógica de negocio.
- El *lookup service* o servicio de localización no es más que un servicio especial que permite la toma de contacto y por lo tanto participa en el proceso de “localización” entre servicios y clientes. El servicio de *lookup* permite por un lado que los servicios disponibles se “publiquen” y se oferten y por otro que los clientes puedan localizar y negociar la suscripción a dichos servicios. Es por tanto el *lookup service* uno de los puntales básicos en la flexibilidad del sistema sobre todo cuando se piensa en redes cuya topología pueda ser cambiante constantemente. Principalmente por este papel, constituyen el componente que más aporta en el concepto de computación ubicua basada en servicios.
- Los servidores de clases cumplen un papel fundamental en el intercambio de objetos entre diferentes máquinas virtuales Java ubicadas en equipos distintos. Cuando una aplicación cliente obtiene, gracias a la intermediación de un *lookup service*, un objeto remoto procedente de un servidor lo que realmente obtiene es una secuencia de bytes correspondiente a la “serialización” del

objeto (o del *proxy*). Para que el cliente pueda recomponer adecuadamente dicho objeto es necesario que el cliente conozca o tenga acceso a la interface que implementa la clase del objeto transmitido. La propiedad *java.rmi.server.codebase* establecida en la aplicación proveedora especifica el protocolo y la ubicación de las interfaces necesarias para que el cliente pueda recomponer el objeto remoto (o su *proxy*). Esta propiedad tiene un efecto comparable a la propiedad *CLASSPATH* para los objetos locales. Generalmente el protocolo utilizado es *http*, por lo que debe existir en algún lugar de la red un servidor *http* que tenga acceso a las interfaces implementadas por el objeto remoto.

En la Figura 17 se puede observar el despliegue de los sistemas que participan así como el flujo de procesos asociados a la creación, publicación, descubrimiento, suscripción y uso de un servicio Jini.

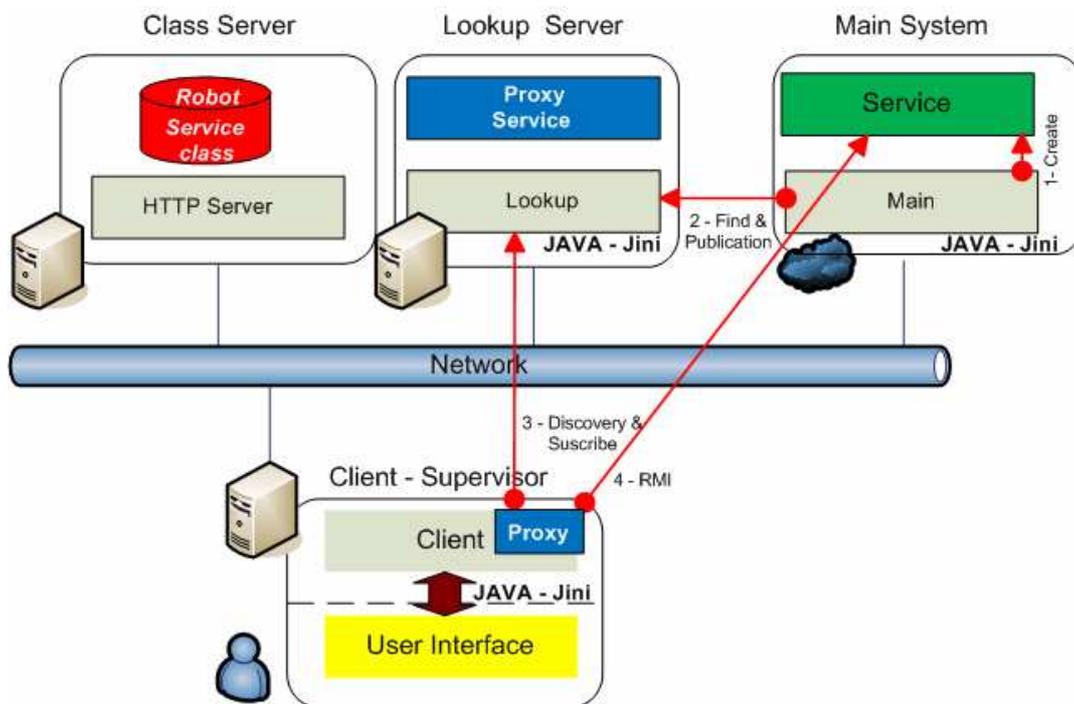


Figura 17 – Despliegue de un servicio Jini

Conclusiones

La plataforma software para el desarrollo de aplicaciones IA de aproximación conexionista desarrollada según una arquitectura basada en componentes tiene las siguientes características:

- Integra bajo un modelo de componentes diferentes herramientas y frameworks todos ellos procedentes del ámbito del software libre y que comparten el mismo lenguaje de programación por lo que su integración es natural y sencilla.
- Representa los comportamientos, entendidos estos como el conjunto de acciones y la forma en la que estas se desencadenan, a través de un paradigma orientado a eventos basado en un motor de máquinas de estados cuyos autómatas finitos se describen en SCXML.
- Dado el carácter declarativo del control de flujo del comportamiento, este dispone de capacidad de reflexión computacional
- La inteligencia principal responde al enfoque conexionista utilizando redes neuronales cuya topología se obtiene como resultado de aplicar un algoritmo genético.
- La funcionalidad del agente software desarrollado se transforma en un servicio software dando al conjunto el carácter distribuido bajo el paradigma de la orientación a servicios.
- Tiene vocación de atender al concepto de tecnología apropiada.

Las diferentes herramientas disponibles como son las redes neuronales y los algoritmos genéticos son explotadas a través de un motor de máquinas de estado que coordina todo el proceso y que a su vez permite incorporar inteligencia adicional bien porque sea necesario para el contexto del problema bien porque los resultados de las redes neuronales o de los algoritmos genéticos deban ser matizadas, concretadas o incluso sustituidas por otros procedentes de información adicional no contemplada durante el proceso de entrenamiento o durante la evolución en su caso. El modelo además permite que el autómata finito que gobierna la máquina de estados y que determina el flujo de trabajo sea implantado de forma declarativa, permitiendo así que se incorporen procedimientos de reflexión computacional que puedan modificar dicho

autómata durante la ejecución. Por último, se hace que todo el modelo pueda ser distribuido en base a un paradigma orientado a servicios pudiendo por tanto que cada implementación sea un agente software que despliega sus capacidad de proceso como servicios y los publica para que puedan ser descubiertos y suscritos a ellos por otros agentes.

Capítulo 5 – Evaluación práctica del modelo propuesto

Resumen

Una de las formas más eficaces para evaluar la validez de la plataforma software para aplicaciones de IA de aproximación conexionista para el desarrollo humano y sostenible que se ha presentado en el capítulo anterior es desarrollar soluciones y aplicarlas en problemas que representen situaciones lo más reales posibles y comprobar por un lado si la tecnología es apropiada, si se asegura la sostenibilidad y si se contribuye al desarrollo humano, todo ello sin olvidar evidentemente la detección de sus virtudes, sus defectos y limitaciones.

La plataforma propuesta se ha evaluado experimentalmente por un lado en el ámbito de la robótica móvil autónoma la cual tiene un potencial enorme en los contextos de subdesarrollo y por otro en el ámbito de la investigación de nuevas formas de producción de energía, dado que se trata de uno de los más relevantes y críticos en el desarrollo humano y sostenible.

En el primer caso se ha realizado una propuesta para desarrollar un sistema de navegación que permita a un robot aprender trayectorias que le capaciten para navegar evitando obstáculos en busca de un objetivo predeterminado. Las funcionalidades del robot son publicadas en forma de servicios para que otros robots las aprovechen haciendo del sistema un modelo distribuido.

En la segunda, y dado que este trabajo se ha realizado en paralelo a otra investigación en el ámbito de la física experimental aplicada a sistemas de adquisición de datos en entornos de fusión, se ha propuesto una solución para el desarrollo de experimentos capaces de dirigir su comportamiento en base a los eventos detectados en los espectogramas de las señales utilizando para ello sistemas clasificadores ya existentes y procedentes del ámbito de la IA.

Robótica móvil

La robótica ha jugado un papel muy relevante durante el desarrollo de la humanidad dado su enorme potencial de cara a mejorar la calidad de vida de las personas [Silva07]. Con el desarrollo de la inteligencia artificial apareció Shakey [Nilsson84] uno de los primeros robots móviles dotado de estrategias de navegación y aprendizaje. En [Sánchez07a] y [Sánchez07b] aparece una breve revisión histórica de los principales hitos en este campo de conocimiento. Las aplicaciones de los robots móviles autónomos son numerosas ya que permite sustituir la presencia humana en aquellos lugares y tareas más peligrosas, que resulten tediosas o bien que requieran una precisión elevada. Desde trabajos de explotación de recursos, misiones de búsqueda y rescate, limpieza, automatización de procesos, vigilancia, asistencia personal e incluso en la actualidad su presencia alcanza sectores como el del ocio y el entretenimiento. Todo ello sin olvidar su papel relevante en ámbitos estratégicos como son el educativo y la salud. El enorme desarrollo de los robots de bajo coste basados en plataformas abiertas como son los sistemas Arduino [Arduino11] y Pinguino [Pinguino11] permite desarrollar robots móviles para aplicación en el ámbito educativo y en proyectos sencillos de marcado carácter artesanal. Otras de las aplicaciones son los robots móviles para limpiar campos de minas, sillas autónomas de ruedas enmarcadas en la tecnología de la rehabilitación, robots de monitorización en labores de seguridad ciudadana y por supuesto contribuir al desarrollo agropecuario y la gestión del agua con objeto de favorecer la soberanía alimentaria.

En el ámbito de los proyectos para el desarrollo humano, la robótica móvil autónoma está transformando junto con otras tecnologías, las matrices productivas básicas provocando una revolución en las expectativas asociadas a la posibilidad de producir bienes y servicios. Este fenómeno, unido a la cada vez mayor extensión de sistemas de base democrática, augura un futuro en el que los países pobres y con menor desarrollo podrían comenzar a tener una participación activa y creciente en el mundo. No obstante aún no hay correspondencia entre este potencial y la mejora de las condiciones de vida de los sectores más desfavorecidos [Kilkberg98] [Moreno-Bid10].

Robótica autónoma reactiva

Un sistema robótico puede ser considerado inteligente cuando es capaz de funcionar de manera autónoma y flexible. El término “inteligente” hace referencia aquí al hecho de que el sistema no trabaja llevando a cabo tareas de manera repetitiva a espaldas del estado del sistema. El concepto autónomo implica la capacidad para adaptarse a las condiciones del contexto en cada instante sin que para ello sea necesario la intervención humana y hacer que esta adaptación no implique planes pre-establecidos. Las primitivas básicas en términos de operaciones que participan en un sistema robótico son fundamentalmente tres: percibir (*SENSE*) el entorno adquiriendo señales, planificar acciones (*PLAN*) y llevarlas a cabo (*ACT*). Sin embargo el paradigma reactivo capta y adapta las señales percibidas (*SENSE*) y estas son inmediatamente procesadas y convertidas en acciones (*ACT*), repitiendo dicho ciclo de manera indefinida. El comportamiento de estos sistemas reactivos puede ser modelado a través de una máquina de estados definida con un autómata finito de Moore en la que las salidas están asociadas a los estados y las transiciones están dirigidas por los eventos que se captan y/o producen en el entorno. En los sistemas robóticos reactivos los robots reaccionan con comportamientos simples para resolver problemas relativamente complejos. La falta de los estados internos dado que no existe planificación, simplifica la computación haciendo que estos sistemas reactivos sean más baratos y fáciles de construir. Además estos sistemas reactivos, al carecer de planes de actuación complejos y que requieran procesamiento elaborado son eficientes en entornos dinámicos en los que el contexto, siempre y cuando la velocidad de cambio sea superior a la velocidad de llevar a cabo estrategias de planificación en sistemas dotados de la primitiva *PLAN*. No obstante hay que tener en cuenta que dividir comportamientos esperados en conjuntos de comportamientos simples es difícil. Además no resulta obvio predecir comportamientos emergentes

Arquitectura basada en comportamientos

Los sistemas robóticos tradicionalmente han sido abordados desde tres enfoques: deliberativo, reactivo e híbrido. En un extremo y respondiendo a una estrategia “*bottom-top*”, el enfoque reactivo trabaja con el par acción-reacción sin la necesidad de trabajar

con modelos complejos internos del mundo “real” (habitualmente es suficiente una tabla, un conjunto de reglas, etc.). En el extremo opuesto, el enfoque deliberativo trabaja con una estrategia “*top-down*” en el que la información del entorno es percibida y sometida a un conjunto de procesamientos importantes (si se comparan con la simplicidad habitual del procesamiento reactivo) que generarán una secuencia de acciones planificada y que modelarán el mundo “real” en un modelo interno mucho más complejo y elaborado que en el reactivo. Ambos enfoques tienen ventajas e inconvenientes por lo que la tercera arquitectura se diseña con el objeto de aprovechar las ventajas de cada uno para intentar mitigar los defectos de ambas. Se trata de la arquitectura híbrida que combina un enfoque reactivo para los niveles más bajos y un enfoque deliberativo para las decisiones de alto nivel. Es común emplear el modelo reactivo para las acciones que estén dirigidas a garantizar la seguridad (tanto del propio robot como del entorno como consecuencia de la actividad del robot) mientras que la parte deliberativa se utiliza para llevar a cabo la planificación y la selección de las secuencias de acciones.

Las arquitecturas basadas en comportamientos para organizar sistemas robóticos autónomos fueron introducidas por [Mataric97] como una extensión innovadora de la arquitectura reactiva. Entre las principales características destaca que esta arquitectura no se limita a establecer un mapeo entre estímulos y respuestas sino que puede almacenar varias formas de estados e implementar varios tipos de representaciones. Y es precisamente esta circunstancia la que dificulta definir el significado de comportamiento que incluso muchas veces en la bibliografía aparece con definiciones contradictorias. En general, los sistemas basados en comportamientos no utilizan representaciones centralizadas sino que acuden a modelos distribuidos. Por otro lado el concepto de comportamiento se extiende en el tiempo mucho más allá que las acciones de los sistemas reactivos. Además es habitual observar desde un punto de vista más global la aparición de comportamientos emergentes fruto de la interacción entre comportamientos. Las arquitecturas basadas en comportamientos emplean el concepto de modularidad pero sin limitarse a un encadenamiento serializado de los mismos.

Aplicación en robótica móvil: Aprendizaje de trayectorias

Dada la relevancia de la robótica móvil autónoma en este ámbito se ha evaluado la arquitectura software propuesta a través del diseño de un sistema de control robótico capaz de comandar un robot por un ambiente desconocido evitando obstáculos para alcanzar un objetivo. En [Yongmin11] existe una revisión actualizada del estado del arte en este campo así como una propuesta innovadora utilizando una red celular neuronal. El modelo de conocimiento está basado en una red neuronal entrenada con los patrones de acción-reacción captados por el sistema en diferentes trayectorias comandas por un operador humano a través de varias ensayos con el fin de crear una base de conocimiento. Es decir, el sistema en primer lugar observa la manera de dirigir el robot por parte de una persona y obtiene los patrones formados por las entradas (valores procedentes de los sensores) y las salidas (acciones realizadas por el humano –avanzar, retroceder, girar -). La red neuronal tiene un conjunto de entradas y salidas determinado por los sensores (entradas) y por las acciones posibles (salidas), mientras que las conexiones y las neuronas de las capas ocultas son determinadas por un algoritmo genético que evalúa los individuos de la población atendiendo a la función de error de cada red neuronal y a otros factores como son la medida en términos de velocidad de convergencia y menor número de conexiones y neuronas, buscando la eficiencia gracias a la combinación de simplicidad y tasa de acierto. Existen numerosas investigaciones y propuestas relacionadas con este enfoque por lo que en este trabajo no se pretende mejorar los resultados obtenidos. El objetivo es mostrar la sencillez de su desarrollo con objeto de evaluar la arquitectura software planteada. Han servido de inspiración al planteamiento del diseño de la red los trabajos de [Marcos04] y [Téllez04] así como las propuestas de [Miller89] [Nolfi93] [Yao93] [Zhang93a] [Zhang93b] [Rooj96] y [Mizuta01].

Simulador de robot

De cara a evaluar y ensayar el modelo propuesto se ha utilizado el interface para aplicaciones de robótica móvil denominado ARIA²⁵ junto con el simulador

²⁵ <http://robots.mobilerobots.com/wiki/ARIA>

MobileSim²⁶ y el editor de planos Mapper3Basic²⁷. La programación se ha realizado íntegramente en lenguaje Java por lo que ha sido necesario instalar versiones menos actuales ya que se han detectado comportamientos extraños en las últimas versiones sobre sistema operativo Windows. En concreto, el MobileSim respondía bien en la primera simulación pero se quedaba bloqueado en las restantes (el problema se resolvía al reiniciar el simulador). En concreto las versiones empleadas con las que se obtiene un comportamiento correcto han sido: ARIA 2.5.0, MobileSim 0.3 y Mapper3Basic 1.3.10 todos ellos para sistema operativo Windows XP. Es importante tener en cuenta que las clases Java de Aria están almacenadas bajo un paquete denominado “*default package*” lo cual obliga a que todas las clases que hagan referencia a objetos de ARIA deben crearse en un “*default package*” del proyecto para tener la visibilidad necesaria. Como entorno de desarrollo se ha utilizado NetBeans IDE 7.0²⁸.

Adquisición de los patrones para el entrenamiento

La estructura de la red neuronal a nivel de interfaz (capas de entrada y salida) está perfectamente identificada en este punto del proyecto. Por este motivo es importante obtener un conjunto nutrido de patrones de entrenamiento. Estos patrones están formados por los valores normalizados procedentes de los sensores de proximidad basados en ultrasonidos así como el ángulo y la distancia euclídea entre la posición del robot y la posición del objetivo (se podría utilizar también, como sucede en otras propuestas de la bibliografía [Marcos04], una medida del ángulo entre la posición del robot y la ubicación del objetivo, o incluso otras métricas con datos procedentes de otros tipos de sensores). Para esta tarea es necesario elaborar una aplicación que permita teleoperar el robot de manera que se registren los valores instantáneos procedentes de los sensores junto con las consignas de control comandadas por el operador humano. Dado que los valores obtenidos por los sensores son muy amplios, la aplicación agrupará los mismos de cara a establecer los patrones de entrenamiento.

²⁶ <http://robots.mobilerobots.com/wiki/MobileSim>

²⁷ <http://robots.mobilerobots.com/wiki/Mapper3Basic>

²⁸ <http://netbeans.org/>

La aplicación señalada se organiza siguiendo el patrón MVC (Modelo Vista Controlador). La clase **Principal** constituye el controlador del sistema y su misión es dirigir todo el proceso. La clase **Vista** implementa la interface de usuario mientras que la clase **Modelo** recoge el modelo software tanto de la inteligencia del robot como del entorno en el que se mueve este. La clase **Principal** contiene como miembros los objetos vista y modelo y se suscribe en ambos como *listener* de los eventos *PropertyChangeSupport* que permite a estos objetos notificar cambios en aquellas propiedades que puedan ser de interés. Esta característica del lenguaje Java es la que permite implementar el modelo MVC puro, en el que Vista y Modelo no tienen interdependencia alguna. La clase **Vista** es la responsable de trazar una interface de usuario que permita comandar el funcionamiento de la aplicación. Las opciones disponibles permiten establecer dos comportamientos diferentes para el Robot. El primero consiste en vagar evitando obstáculos para construir un mapa, mientras que el segundo es el modo teleoperado que podrá ser gobernado por un operador humano durante las fase de captura de patrones y o bien por la máquina de estados en la fase de explotación a través de los resultados que arroje la red neuronal. En ambos casos se sondea la información percibida por el anillo de sonar instalado en el robot y se traza en pantalla un diagrama que representa todo aquello que se percibe. La interfaz de usuario dispone de controles para:

- **Comenzar:** Inicia los comportamientos iniciales del robot (vagar evitando obstáculos) o teleoperación. En ambos casos realiza el sondeo de la información percibida por el anillo de sonar instalado en el robot y traza un mapa en pantalla.
- **Botón Izquierdo del ratón:** Permite establecer la ubicación física del objetivo (representado por un cuadrado de color rojo) haciendo clic con el ratón sobre la nueva ubicación deseada.
- **Arriba, Abajo, Izquierda, Derecha, Espacio:** Avanza, retrocede, gira a la izquierda o derecha y detiene el robot en modo teleoperación. En cada acción registra los valores para elaborar los patrones de entrenamiento.

- **Evaluar:** El robot es guiado por la red neuronal entrenada.
- **Guardar Imagen:** Almacena en el disco (directorio de trabajo) un fichero denominado Mapa.jpg que refleja el estado actual del mapa elaborado.
- **Detener:** Elimina las acciones del robot y detiene este de cara a iniciar los procesos de tratamiento del mapa y la posterior localización del destino.
- **Enfocar:** Realiza un serie de tratamientos básicos al mapa detectado de cara a perfilar y definir mejor los obstáculos eliminando parcialmente el ruido percibido.
- **Frente de Onda:** Calcula la ruta de navegación desde la posición actual del robot hasta el objetivo utilizando el algoritmo del mismo nombre.
- **A*:** Calcula la ruta de navegación desde la posición actual del robot hasta el objetivo utilizando el algoritmo del mismo nombre.
- **Navegar:** Conduce el robot desde la posición actual hasta la posición del objetivo utilizando la ruta obtenida por el algoritmo A*.

Las opciones Enfocar, Frente de Onda, A* y Navegar están diseñadas para establecer comparativas entre el procedimiento basado en redes neuronales entrenadas con patrones de navegación teleoperada y el procedimiento de sondeo aleatorio del entorno, trazado de planos y algoritmos de búsqueda. Todas ellas son fruto de un trabajo previo realizado en el contexto de este Máster.

La clase Modelo incorpora por un lado la inteligencia que dirige el comportamiento del robot y por otro la representación del entorno. Inicialmente los comportamientos de partida incluyen acciones para vagar por el entorno evitando obstáculos y sondear el entorno con el anillo de sonar. Los comportamientos (acciones del robot) son objetos de las clases: *ExampleGoAction*, *ExampleTurnAction*, *ArActionStallRecover* y *ExampleProbeAction*. Las dos primeras han sido obtenidas íntegramente de los ejemplos Java que proporciona ARIA. La tercera es una clase

predefinida en el *wrapper* Java de ARIA y la última ha sido desarrollada específicamente para este trabajo (inspirada en el código de *ExampleGoAction*). El objetivo es conseguir que estas acciones puedan ser activadas y desactivadas dinámicamente en función de las decisiones del usuario y de la fase en la que se encuentre el robot. En el modo de funcionamiento teleoperado se programan exclusivamente dos comportamientos. Uno es el ya mencionado, inspirado en el ejemplo *ExampleProbeAction*, mientras que el otro es el responsable de gobernar el robot con el teclado y para ello utiliza la clase *ArActionKeydrive* de ARIA.

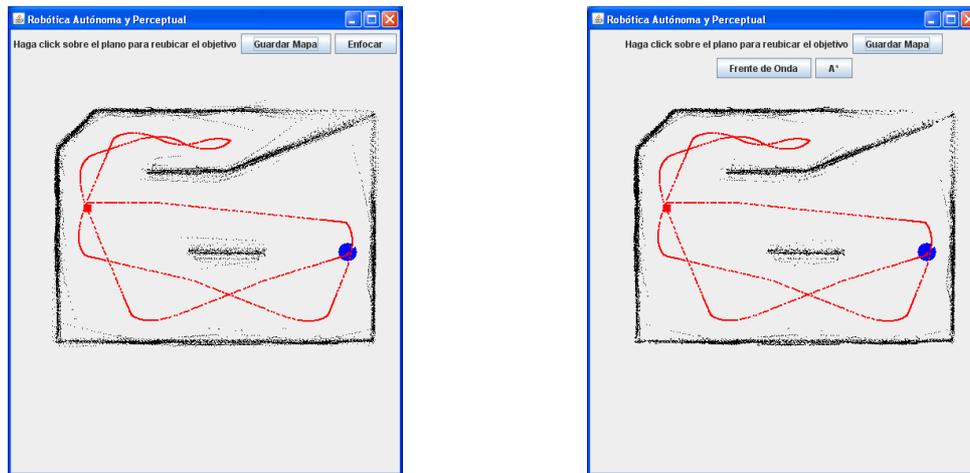
La ejecución del ciclo del robot se realiza de forma asíncrona en un hilo paralelo, para que no bloquee la ejecución del resto de la aplicación. Las acciones de partida tienen como misión hacer que el robot vague por el entorno evitando los obstáculos detectados con el sonar y registre la posición de estos elaborando un mapa o bien sea teleoperado registrando los patrones de entrenamiento. *ExampleGoAction* y *ExampleTurnAction* hacen que el robot avance evitando obstáculos de manera que el robot mientras pueda avanzará en línea recta y cuando detecte un obstáculo girará. *ArActionStallRecover* es una acción predefinida en ARIA que permite recuperar al robot de situaciones en las que no es suficiente con las acciones anteriores. Básicamente consiste en retroceder y girar. *ExampleProbeAction* es una acción que parte de la estructura general de la acción *ExampleGoAction* pero a la que se ha eliminado su funcionalidad básica. En lugar de esta, la acción realiza el sondeo de todos los sensores del anillo estableciendo por un lado la ubicación de los obstáculos y por otro la ubicación del margen adicional necesario para que el robot pueda bordear el obstáculo de forma segura ya que se trata de un cuerpo y no de un punto. Así mismo se aplica un algoritmo que permite eliminar obstáculos detectados en fases anteriores y que realmente no existen. Para ello se calcula la línea recta que une el robot y el borde de seguridad eliminando todos los puntos existentes entre ellos. Este método está inspirado en el algoritmo HMM [Borenstein91].

En el análisis de la información procedente de los sensores en cada instante se ha tenido en cuenta la orientación global del robot y el ángulo de cada sensor para situar lo más aproximadamente posible cada uno de los obstáculos percibidos. La lectura de un

rango de sensores permite ubicar un obstáculo y por otro establecer un margen de seguridad que se tendrá en cuenta en las fases de planificación para evitar consignas futuras que implique situar al robot en una zona tan próxima a un obstáculo que impida que las dimensiones del propio robot puedan alcanzarla. Además, con objeto de intentar reducir falsas medidas que sitúen obstáculos inexistentes, cada vez que se localiza un obstáculo se actualiza la información del plano para que sea visualizada en una ventana. Así mismo y con objeto de reducir al máximo los errores, una vez detectado un obstáculo y calculado el margen de seguridad en un punto (x_2, y_2) estando el robot en (x_1, y_1) se eliminan todos los obstáculos percibidos anteriormente y que se encuentren en la recta que una ambos puntos. Esto permite que algunos obstáculos inexistentes desaparezcan a medida que el robot se desplaza por el entorno y matiza la ubicación de las paredes. Además se marcan todas aquellas posiciones por las que pasa el robot como accesibles (dado que en este contexto y para el modo vagar no se han previsto obstáculos móviles). En el modo teleoperado, el robot sigue las indicaciones del operador y almacena en un fichero los patrones señalando los valores de entrada de los sensores, la distancia al objetivo y la acción comandada. Este método admite objetos móviles y no está asociado a ningún entorno concreto ya que no necesita elaborar un mapa del entorno.

Dado que esta aplicación permite establecer a efectos comparativos un método basado en elaboración de mapas, bajo el paquete cartografía se encuentran las clases que permiten representar internamente el entorno percibido y que son utilizadas para llevar a cabo la planificación de la ruta y la navegación guiada posterior. La clase *Mapa* representa el entorno como una array bidimensional de objetos de la clase *Punto*. Dispone de métodos para anotar obstáculos (*setBorde*), para anotar zonas de seguridad (*setReborde*), para matizar los espacios abiertos (*setBlancos*) y para anotar como libre “permanentemente” cada posición que forma parte de la trayectoria del robot (*setPuntoActual*). Así mismo y con objeto de simplificar y reducir el tiempo necesario para la visualización dinámica del mapa, se obtendrán sólo los puntos marcados como obstáculos, construyendo un vector de puntos a dibujar en cada iteración que será trasladado vía el controlador a la vista. Entre los métodos que conforman la clase *Mapa*

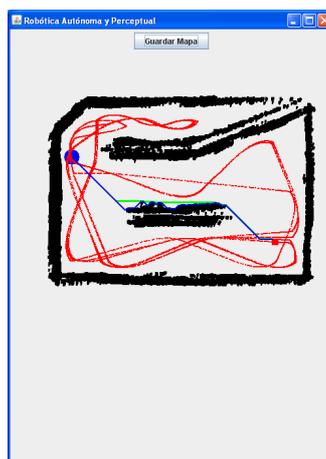
hay un método denominado *retocar_plano* que permite someter el mapa elaborado a un proceso dedicado a eliminar aquellos puntos aislados que simplemente constituyen ruido y aquellos huecos vacíos en zonas de alta concentración de puntos (poros). El resultado es un mapa en el que los obstáculos percibidos de forma reiterada se perfilan y matizan mientras que los puntos aislados se eliminan. Es importante tener en cuenta que para realizar este proceso el robot ha tenido que sondear el entorno durante cierto tiempo. El enfoque se aplica tanto a los obstáculos como a los puntos que constituyen los “márgenes de seguridad” que no son visibles. Este proceso se puede mejorar utilizando métodos de visión artificial como el detector de bordes de Canny [Canny86], la búsqueda de esquinas [Trucco&Verri98] y la transformada de Hough para detectar líneas rectas [Hough62], así como algoritmos de apertura y cierre. Trabajando en el método basado en el trazado de mapas, existen dos mecanismos de planificación programados. El primero utiliza la técnica de expansión por frente de onda y el segundo el algoritmo A* con el heurístico de distancia euclídea. En la Figura 18 se observan diferentes instantes del comportamiento denominado vagar. La primera imagen muestra en negro los obstáculos percibidos, en rojo la ruta seguida por el robot, en azul el robot que incorpora una marca blanca que señala la posición frontal del mismo. En la segunda imagen se ha detenido el comportamiento vagar ya que se observa que el mapa ha sido perfectamente construido y por tanto el robot está en condiciones de alcanzar el objetivo. La imagen refleja el resultado de aplicar un algoritmo de enfoque y matización de contornos. En la Figura 19 se observa en forma de cuadrado rojo el objetivo situado manualmente por el operador humano, en verde la ruta resultado de aplicar el algoritmo de frente de onda y en azul el resultado de aplicar el algoritmo A*. Se puede observar dada la naturaleza de los mismos, en ambos casos se tiene a bordear los obstáculos minimizando la distancia recorrida pero obligando a que el mapa tenga establecidos los ya mencionados bordes de seguridad que asegura que la ruta encontrada sea factible para un robot con dimensiones físicas (no puntual).



A - Construcción del mapa vagando

B - Enfoque y matiz de contornos

Figura 18 – Elaboración del mapa del entorno



Visualizando obstáculos y márgenes de seguridad. Rutas Frente de onda (verde) - A (azul)*

Figura 19 – Resultado de la búsqueda de la ruta hasta el objetivo

En el modo teleoperado el funcionamiento consiste básicamente en dirigir al robot para que alcance el objetivo. Este modo captura los valores procedentes de los sensores, el ángulo, la distancia euclídea al objetivo y las acciones del operador, creando tramas como la que aparece en la Figura 20 y cuya interpretación es la siguiente: Los 16 primeros datos corresponden a las entradas de los 14 sensores del sónar más el ángulo al y la distancia euclídea al objetivo. Los cuatro últimos valores son las salidas, es decir las acciones del teleoperador en este orden (avance, retroceso, giro izquierda, giro derecha). Los datos que aparecen están sin normalizar y corresponden a los valores

proporcionados por los sensores del robot.. Dado que el máximo rango que pueden detectar los sensores es de 5000 unidades, se establece ese valor para determinar los casos en los que los sensores no detectan obstáculo. Los valores del ángulo se codifican entre 0 y 1. La distancia euclídea utiliza las coordenadas del sistema de referencia de la aplicación y se normaliza con un valor máximo establecido experimentalmente.

Frontal (15 °) Izq	Frontal (15°) Dcho	Lateral Izq	Lateral Dcho	Trasero (15°) Izq	
3114.16733	9999	2398.89883	1690.36208	790.964808	
Trasero (15°) Dcho	Frontal (35 °) Izq	Frontal (35°) Dcho	Frontal (55°) Izq	Frontal (55°) Dcho	
827.959648	1348.18478	659.194639	2931.45553	2567.45792	
Trasero (135°) Izq	Trasero (135°) Dcho	Trasero (155 °) Izq	Trasero (155°) Dcho	Ángulo	Distancia euclídea
1115.9325	1175.83625	864.413327	1003.28409	0.3490	249.777901
Avance	Retroceso	Giro Izquierda	Giro Derecha	Detener	
1	0	0	0	0	

Figura 20 – Trama de datos sin normalizar para el entrenamiento

En la Figura 21 se observa el contexto real del robot y la percepción del mismo que tiene la aplicación. El objetivo es recuadro rojo y los puntos las lecturas del sónar.

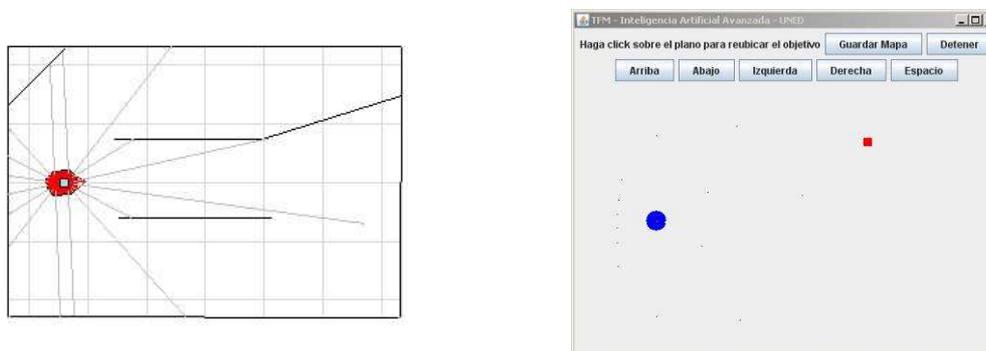


Figura 21 – Situación de partida en modo teleoperado

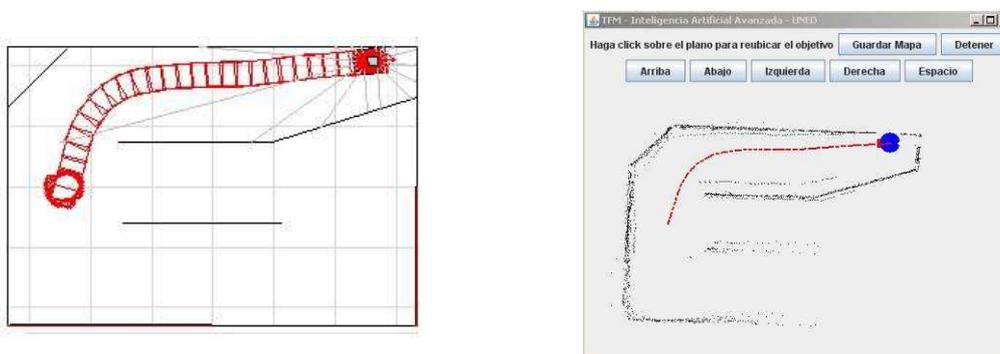


Figura 22 – Trayectoria de entrenamiento I

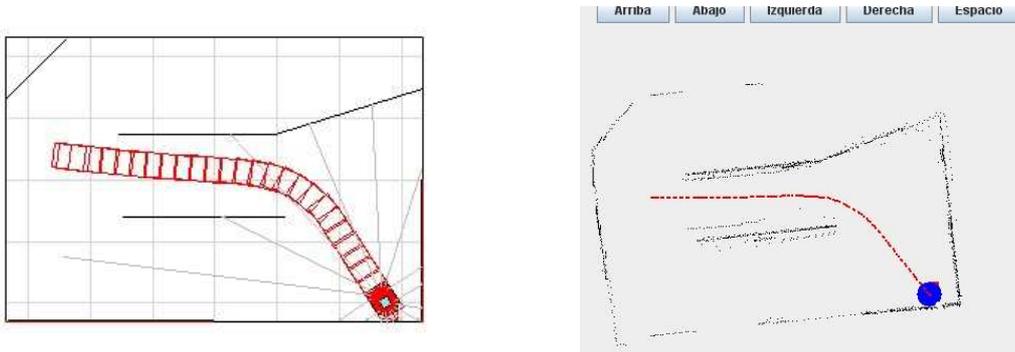


Figura 23 – Trayectoria de entrenamiento II

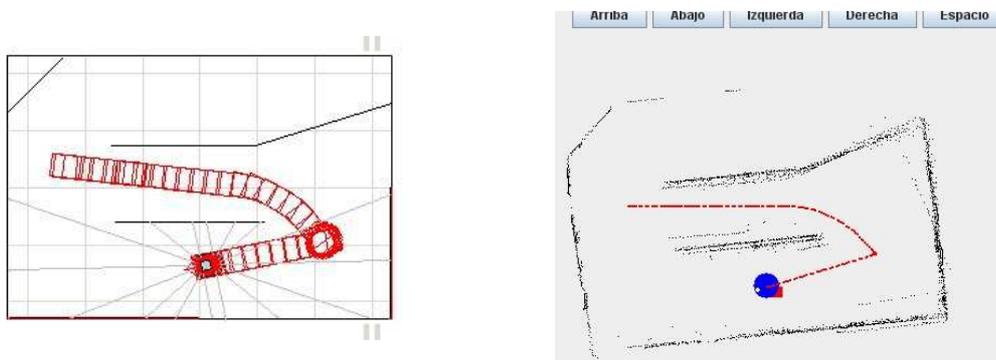


Figura 24 – Trayectoria de entrenamiento III

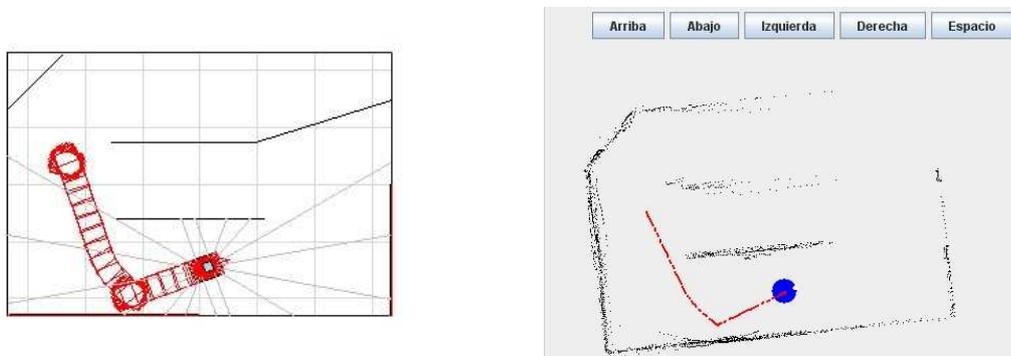


Figura 25 – Trayectoria de entrenamiento IV

La Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25 y Figura 26 constituyen algunas trayectorias empleadas para obtener patrones de entrenamiento para la red neuronal.

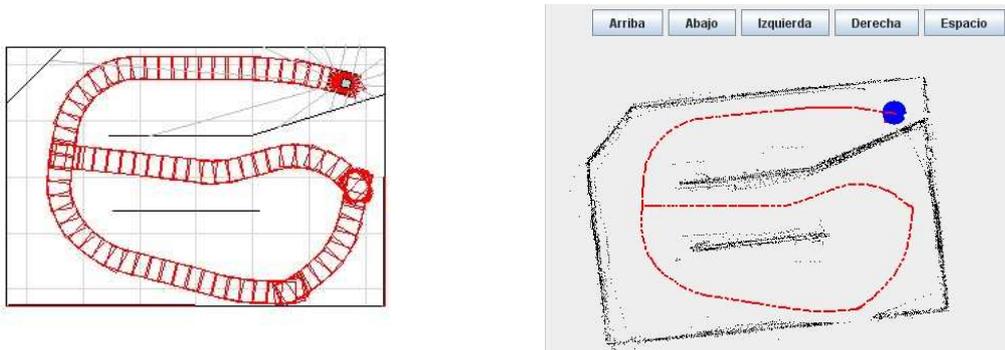


Figura 26 – Trayectoria de entrenamiento V

Red neuronal para el aprendizaje de trayectorias

Con carácter previo al uso de algoritmos genéticos para generar poblaciones de redes que evolucionen, se ensayaron diferentes redes para comprobar la validez de los patrones de entrenamiento y experimentar los ajustes necesarios para que las acciones del robot reflejen el mismo efecto que cuando fueron comandas por el operador humano. Es importante destacar que en esta fase se comprobó que no resulta sencillo determinar los patrones de entrenamiento ya que estos cuando son extraídos directamente de la observación del gobierno humano están sesgados con información adicional que tiene el operador y que no tendrá luego el robot, por ejemplo, la topología del plano. Los primeros experimentos se realizaron con diferentes redes de tipo perceptrón multicapa. En la Figura 27 aparece una de las primeras redes que se entrenaron, formada por una capa oculta con tantas neuronas como la etapa de entrada. En estos entrenamientos no se utilizaba la orientación del robot respecto al objetivo, motivo por el cual aparecen 15 neuronas en la capa de entrada en lugar de las 16 que posteriormente se han utilizado. Se puede observar que la función de error no alcanza resultado interesantes (por encima del 0.01) los cuales adelantan el fracaso.

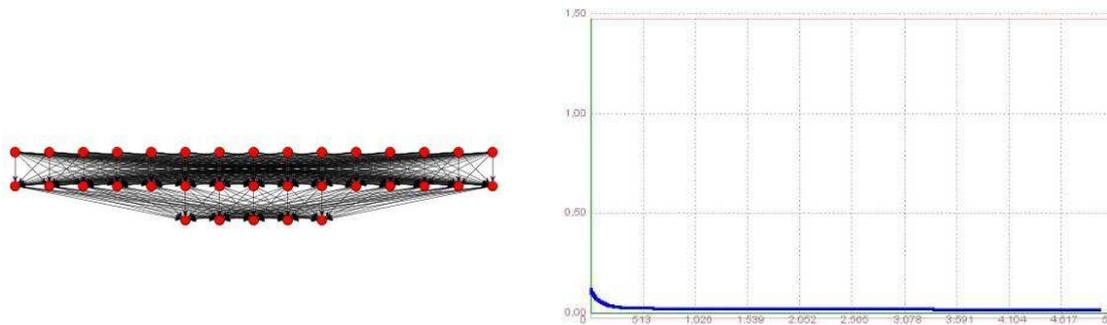


Figura 27 – Topología de la red y función de error

Para evaluar el comportamiento de la red no se han utilizado patrones de test ya que en realidad el objetivo es comprobar la capacidad de la red para generalizar un comportamiento que está de forma subyacente en los patrones pero que no son los patrones propiamente dichos. En definitiva la idea es comprobar con la experimentación el comportamiento que muestra el robot al navegar exclusivamente con la información procedente de la red. En la Figura 28 se puede observar un intento fallido de navegación.

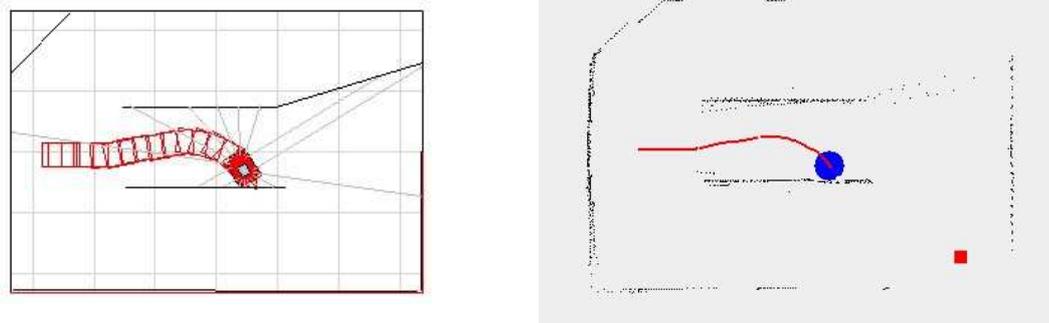


Figura 28 – Navegación dirigida por la red neuronal

A pesar de haber evaluado otras topologías los resultados no han mejorado y se plantea revisar completamente el modo de construir los patrones de entrenamiento. La primera medida consiste en realizar un agrupamiento de las medidas arrojadas por los sensores de proximidad en un conjunto definido de clases. Con este motivo se han establecido cuatro rangos de diferente magnitud de manera que las medidas del s3onar se reducen dr3asticamente. Esta decisi3on provoca que los m3argenes de seguridad de la

navegación tengan que cuidarse escrupulosamente durante los entrenamientos para que la captura de las trayectorias sea correcta, en concreto la más sensible es la que determina la presencia ineludible de un obstáculo. Con esta medida, la captura de los patrones de forma automática observando al operador humano pierde totalmente la efectividad ya que las decisiones deben ser acordes a los valores representativos de las clases y por lo tanto es necesario que el operador humano trabaje prestando especial atención a los valores de los sensores. En este punto y tras revisar los artículos más recientes sobre estrategias similares es importante señalar que se observa que en ellos nunca se detalla el procedimiento seguido para capturar los patrones del entrenamiento y resulta cuanto menos sorprendente porque en este estudio ha sido uno de los factores que más tiempo ha supuesto. Sirva a modo de ejemplo los casos de [Hachour11] [Hachour09] y [Janglová04].

Se vuelve de nuevo al planteamiento inicial sin incluir la distancia al objetivo ya que este dato en cada muestra no es significativo de cara a la toma de una decisión. Además se reprograman los procedimientos asociados a la teleoperación de forma que se dispone de más libertad a la hora de comandar el robot simplificando los movimientos asociados a los desplazamientos en línea recta y en los giros. En concreto, los giros se reducen a incrementos de 45 grados y el desplazamiento en línea recta (avance o retroceso) se realiza en pasos del tamaño proporcional al tamaño del robot. Con estas premisas se realizan nuevos entrenamientos planteando siempre un objetivo en posición fija y realizando diferentes trayectorias.

Otros de los asuntos complejos ha sido determinar el número de patrones más adecuado para el entrenamiento, dado que los datos se capturan directamente de las percepciones de los sensores del robot. Por este motivo se ha trabajado inicialmente combinando trayectorias de entrenamiento que están formadas entre 300 y 800 patrones y evaluando experimental tanto entrenamientos con trayectorias independientes como combinaciones de los patrones de varias hasta alcanzar conjuntos en torno a los 1400 patrones. Al modificar el modo teleoperado ha sido suficiente con capturar exclusivamente las órdenes del operador humano lo que permite en las trayectorias

experimentadas reducir el número de patrones de entrenamiento. La fase siguiente se ha realizado por lo tanto con 50 patrones correspondientes a una única trayectoria.

Algoritmo genético

Tradicionalmente los algoritmos genéticos se han utilizado para ajustar algunos parámetros de las redes neuronales. Los dos enfoques más utilizados consisten en ajustar los pesos, sustituyendo el algoritmo de aprendizaje de la red por un algoritmo genético o modificar la topología de la red (número de neuronas y número de capas ocultas). En esta aplicación se ha optado por desarrollar un algoritmo genético que modifique la topología de la red dejando que el ajuste de los pesos se realiza con los algoritmos de aprendizaje de la propia red neuronal. Las capas de entrada y salida están definidas por los sensores y por las acciones del robot así que la única posibilidad consiste en modificar el número de capas ocultas y el número de neuronas de cada una. Entre las operaciones genéticas, el cruce es el más complicado de afrontar ya que a la hora de construir el genotipo hay que tener en cuenta que los cruces en el mismo arrojen genotipos válidos. La mutación, sin embargo es mucho más sencilla ya que se puede programar en términos de alteración de capas o número de neuronas de una capa. Otro de los aspectos complejos es establecer los parámetros del algoritmo genético produciéndose un traslado de responsabilidades de manera que antes había que decidir la topología de la red pero ahora hay que decidir los parámetros del algoritmo genético. Dada la complejidad del problema no se puede establecer parámetros de forma justificada teóricamente por lo que se deja a la experimentación. Como función de fitness se busca un equilibrio entre el error arrojado por el entrenamiento de la red y la sencillez de la misma aunque la prioridad inicial siempre será el error de la red neuronal. Por tanto una vez capturadas los nuevos patrones de entrenamiento se diseña un algoritmo genético que permita evolucionar las topologías de las redes neuronales que constituyen los individuos de la población tomando como parte fija la capa de entrada compuesta de 15 neuronas (14 sensores y orientación al objetivo) y la capa de salida formada por 3 (avance, giro derecha y giro izquierda). Cada genotipo codifica el número de neuronas de como máximo dos capas ocultas. El algoritmo genético se lanza en tres ocasiones con los parámetros y resultados que se observan en la Figura 29:

Generaciones	Tamaño población	Iteraciones entrenamiento	Neuronas capas ocultas	Error total red
500	20	1000	9 y 6	0.05140289
500	100	2000	15 y 9	0.03546223
500	50	3000	6 y 4	0.02619044

Figura 29 – Ejecuciones y resultados del algoritmo genético

Con cada una de las redes se realizaron pruebas de evaluación de trayectorias reduciendo el parámetro que determina la longitud de desplazamiento en línea recta para disminuir más la probabilidad de que el robot pudiese repetir los mismos casos del entrenamiento. Así mismo se modificaron los escenarios y la ubicación del objetivo. En la Figura 30 y Figura 31 se observan algunas rutas procedentes de diversos test de evaluación. No obstante es importante señalar que existe tasa de fallo significativa por lo que el papel del autómatas que pueda analizar el resultado arrojado por la red neuronal es crucial tanto para la seguridad del robot y del entorno como para aumentar la probabilidad de alcanzar el objetivo.

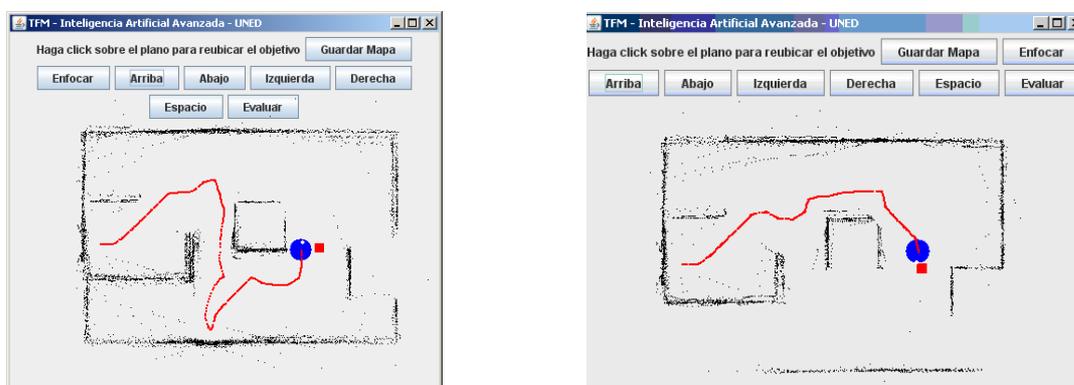


Figura 30 – Trayectorias del robot siguiendo indicaciones de la red neuronal

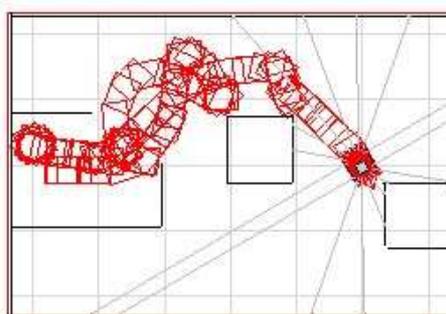


Figura 31 – Trayectoria en la que se observa comportamiento dubitativo

Máquina de estados

El control declarativo del flujo en una aplicación es una de las posibilidades que ofrece la integración de Apache Commons scxml. Su capacidad para trabajar con estados en paralelo facilita enormemente el desarrollo de aplicaciones concurrentes y por tanto la descomposición vertical haciendo que sea factible modelar diferentes comportamientos que puedan trabajar simultáneamente o bajo una jerarquía de prioridades. Por otro lado, la organización modular y basada en frameworks y herramientas variadas requiere un elemento central que orqueste adecuadamente la invocación de cada una de ellas. Por último, el hecho de que existan dos fases perfectamente diferenciadas en este contexto: entrenamiento y explotación, hace necesario que el proceso de funcionamiento pueda ser encadenado a través de una coreografía flexible y establecida de forma declarativa. En definitiva, contar con una máquina de estados permite incorporar el paradigma modular respetando las conocidas premisas de alta cohesión y bajo acoplamiento facilitando que herramientas que no han sido diseñadas para trabajar en conjunto puedan hacerlo.

Entre las numerosas posibilidades se ha optado por diseñar una máquina de estados que analice el resultado arrojado por la red neuronal y que someta la acción propuesta a un control de seguridad adicional que evite colisiones, movimientos en círculo y que aproveche la información del mapa que se construye paulatinamente con la información procedente de los sensores. En la Figura 32 aparece el modelo gráfico del autómata que modela el comportamiento y en el que se observa que una vez obtenido el resultado proporcionado por la red neuronal, el estado denominado Evaluar Resultado se encarga de someter la acción propuesta y los datos del entorno a una valoración. En las pruebas esta valoración han sido evitar obstáculos y seguir trayectorias que se acerquen al objetivo.

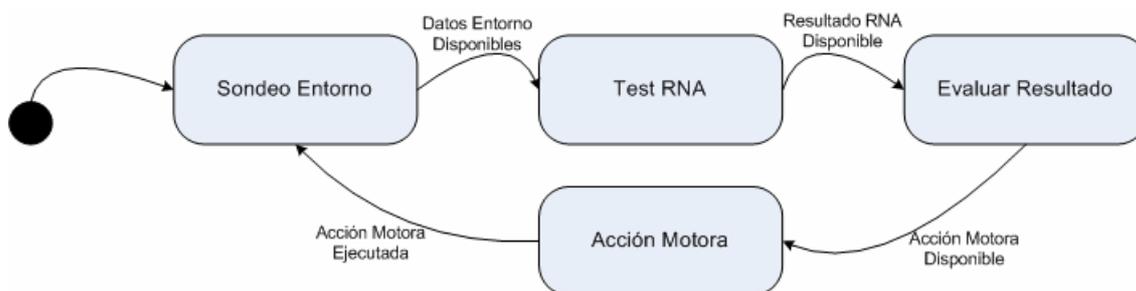


Figura 32 – Autómata que orquesta el comportamiento del robot

El robot como servicio de acceso remoto

El paradigma orientado a servicios permite que las funcionalidades del robot sean publicadas como servicios de acceso remoto. Esta característica permite que otros sistemas puedan supervisar al robot e intercambiar información con el mismo de cara a diseñar un sistema colaborativo basado en el intercambio de información. Por lo tanto el abanico de posibilidades es muy amplio. En la Figura 33 se representa el caso de supervisión remota representando por un operador humano que desde una interface de usuario interactúa con una aplicación cliente. Dicha aplicación está diseñada para utilizar las funciones que el robot despliega como servicios y que ha publicado en un servidor de lookup. Dado que el servicio desplegado por el robot está íntimamente ligado a su hardware, la ejecución del código que constituye el servicio debe realizarse en el hardware del propio robot, motivo por el cual se publica en el servicio de lookup un proxy del servicio. Este proxy es el que la aplicación cliente recibe cuando tras el descubrimiento del servicio se suscribe a él. El papel del servidor de clases es suministrar la última versión del código que constituye los objetos que conforman el servicio. Por lo tanto todas las operaciones son transparentes para el programador de la aplicación cliente que se limita a desarrollar su programa considerando que el objeto del servicio robot es un objeto local más. Por lo tanto invocará a sus métodos como si de métodos de otros objetos normales se tratase. Internamente, las clases Jini se encargan de convertir esas llamadas a invocaciones de métodos remotos (RMI).

El modelo puede ser utilizado no sólo a efectos de supervisión sino que permite que cada robot utilice los servicios de otros robots disponibles en el entorno de la red. En el diseño de las funcionalidades que pueden ser ofrecidas bajo este modelo hay que tener en cuenta que se trata de redes de alto dinamismo ya que los nodos (robots)

pueden entrar y salir de la misma sin aviso previo. Entre las tareas que podrían ser ofrecidas destaca el intercambio de los mapas elaborados durante el proceso de navegación de cara a establecer con mayor concreción los obstáculos inmóviles así como facilitar la identificación de los obstáculos móviles detectados cuando estos son en realidad otros robots.

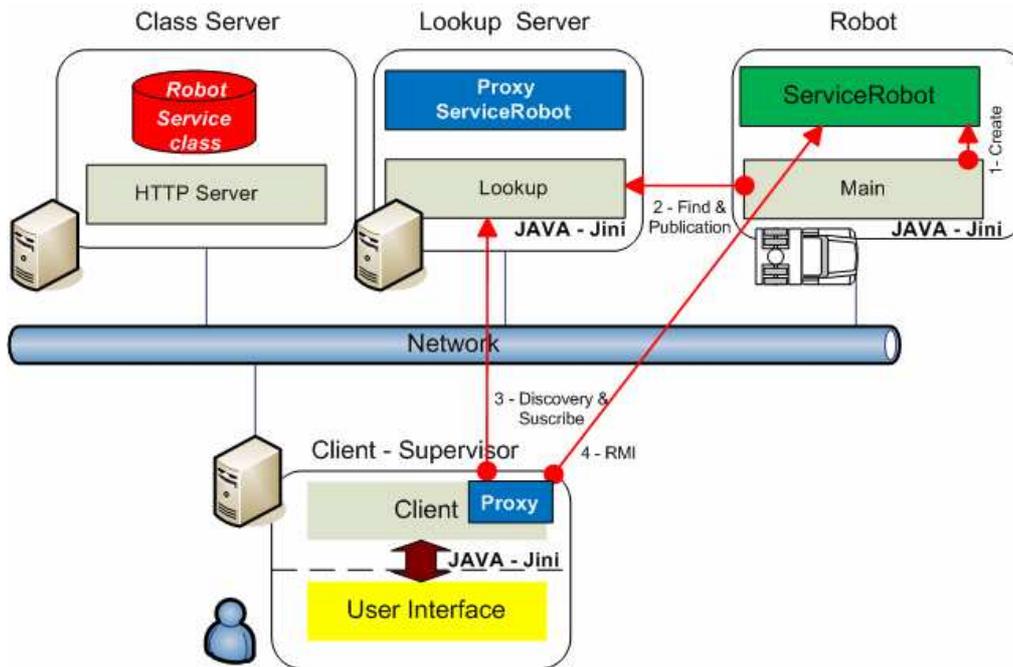


Figura 33 – Despliegue de las funcionalidades del robot como servicio Jini

Conclusiones

El modelo reactivo basado en comportamiento e inspirado en las propuestas de [Brooks85] parte de un concepto muy sencillo: SENSE – ACT, que podría considerarse “estimulo-respuesta”. Los sensores proporcionan información que se modela internamente a través del esquema de percepción y que a través del esquema motor da lugar a las consignas de actuación que se dirigen a los actuadores. Cuando la naturaleza del problema lo requiere se pueden añadir cierto grado de persistencia que permita, en ausencia del estímulo, continuar con la consigna. Este modelo constituye en si mismo un comportamiento. Los comportamientos se integran en un proceso acumulativo en capas de competencia en el que las capas altas pueden suprimir o inhibir a los comportamientos de las capas bajas pero nunca los sobrescribirán o los sustituirán. La

percepción es por lo tanto distribuida. Los comportamientos pueden ser asociaciones predeterminadas o estar dirigidas por modelos conexionistas como son las redes neuronales previamente entrenadas para realizar la tarea e incluso obtenida su estructura a través de un algoritmo evolutivo. Así mismo, el propio comportamiento puede modificarse a si mismo gracias a que el control de flujo se realizar siguiendo un paradigma declarativo.

Mientras que en la descomposición horizontal se establece un proceso secuencial en el que las diferentes unidades funcionales del robot: percepción, modelado, planificación, ejecución de tareas y control de motores se ejecutan unas a continuación de las otras, tomando cada una de ellas la información generada por la anterior, estableciendo una jerarquía y un proceso secuencial entre las tareas que determina el flujo de la información de manera invariante. La descomposición vertical, el protagonista es el “comportamiento” por lo que las unidades funcionales se organización con el único fin de lograr implementar estas funciones. La información parte de los sensores y alimenta a todas y cada una de las unidades funcionales que implementan los diferentes comportamientos. Finalmente estas unidades, tras construir un esquema de percepción y un esquema motor generan las consignas y órdenes dirigidas a los actuadores. Cada comportamiento trabaja concurrentemente y de forma independiente, aunque luego las diferentes arquitecturas pueden establecer jerarquías que serán aplicadas en tiempo de ejecución y bajo determinadas condiciones, que fundamentalmente serán la obtención de comportamientos más avanzados.

Entre las ventajas de este enfoque destaca el modelo ejemplar de reutilización, la alta cohesión y el bajo acoplamiento de los módulos que constituyen comportamientos y que se agrupan en capas de competencia. Así mismo resulta muy interesante analizar el comportamiento del conjunto que de manera emergente surge sin programación previa como consecuencia de la paralelización de múltiples comportamientos “individuales”. Entre los inconvenientes más importante destaca el hecho de que la programación de comportamientos y su organización en capas es más un arte que una ciencia.

Física experimental: Fusión nuclear

El abastecimiento energético es esencial para el funcionamiento de la sociedad y constituye un elemento imprescindible para el desarrollo humano. En un escenario de crisis financiera como el actual, la demanda energética, lejos de reducirse se ha incrementado y los principales informes apuntan a que este crecimiento continuará en aumento. Es inevitable por tanto que la sociedad asuma una racionalización drástica del consumo e impulse la investigación y el desarrollo de fuentes de energía respetuosas con el medio ambiente. En la actualidad las principales fuentes de energía proceden de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), todos ellos recursos limitados y con un impacto muy negativo para el medio ambiente. A pesar de que existen alternativas en el ámbito de las renovables, el grado de eficiencia de las mismas y su capacidad de producción no es suficiente para satisfacer la demanda actual ni mucho menos la futura. En el ámbito de la energía nuclear existe una forma de generación denominada fusión termonuclear. Esta fuente de energía es la misma que se produce en las estrellas aunque mediante procedimientos ligeramente distintos. La producción de energía por fusión termonuclear no tiene los peligros medioambientales de la fisión nuclear y además genera mayor cantidad de energía que la obtenida por la fisión. Actualmente este mecanismo de producción de energía se encuentra en fase de investigación y para ello es necesario desarrollar sistemas de experimentación que permitan conocer en la mayor medida posible todas las características de la misma para su producción futura a nivel industrial.

No obstante hay que señalar que la generación de energía por fusión nuclear y en concreto la que se produce a través del confinamiento magnético no es totalmente limpia ya que por un lado el tritio que se produce en el interior a partir del litio sí es radioactivo y con el tiempo las paredes del reactor como consecuencia de los impactos de los neutrones emitidos durante la fusión se vuelve radioactiva. A pesar de ello hay que señalar que el tritio al producirse en el interior de la vasija no requiere traslado y por tanto se reduce el peligro de fugas, además, en cada instante sólo hay presencia del combustible necesario para los diez segundos siguientes de operación, la reacción no es en cadena por lo que es fácilmente controlable desde el exterior y la radioactividad de

las paredes se puede reducir empleando materiales de baja activación de forma que la radioactividad se limita a unos cincuenta años aproximadamente por lo que se reduce el compromiso de las generaciones venideras.

Aplicación en fusión nuclear: Eventos en espectrogramas

Las señales que se adquieren durante los diagnósticos de fusión reflejan en sus parámetros las propiedades físicas del plasma. El análisis de estas señales permite estudiar el comportamiento del plasma durante las diferentes descargas, caracterizar los fenómenos físicos observados y detectar en su caso la aparición de pérdidas de confinamiento conocidas como *disruptions* [deVries09]. En los últimos años se han propuesto y desarrollado diversos métodos concebidos para llevar a cabo la extracción de características relevantes en las señales adquiridas, por ejemplo a través de las características morfológicas obtenidas mediante técnicas de reconocimiento de patrones estructurales [Vega07]. Así mismo diversas técnicas de la inteligencia artificial junto con otros tratamientos avanzados de señales se están utilizando para implementar clasificadores automáticos, por ejemplo basados en redes de neuronas artificiales [Cannas07], máquina vector soporte [Rattá10] ó lógica difusa combinada con árboles de regresión [Murari08].

Todas estas propuestas no solo ponen de manifiesto la importancia de caracterizar y clasificar las señales sino que abren la puerta a la detección de eventos en tiempo real asociados a los resultados de la clasificación. La detección de estos eventos proporciona la posibilidad de proponer experimentos de adquisición y procesamiento cuya lógica control esté dirigida por la propia evolución del experimento haciendo del conjunto un sistema reactivo capaz de adaptarse al contexto. En [González10] se presenta una propuesta para el diseño de modelos adaptativos utilizando para ello un problema de clasificación de señales a partir de la detección de patrones morfológicos en el espectrograma que ha utilizado este modelo de arquitectura software.

Los nodos de adquisición y procesamiento capturan las señales procedentes de los diagnósticos de fusión y ejecutan los algoritmos de extracción de características significativas. La existencia de un motor de máquinas de estado que rige el sistema

facilita la interconexión con los sistemas de clasificación externa. Este motor también permite que la secuencia de proceso sea dirigida por eventos y los algoritmos de proceso sean cambiados en diferentes fases del experimento. En la Figura 34 aparece el despliegue del sistema en un experimento para caracterizar las señales con los parámetros de Hu [Hu62]. En la parte superior están las señales adquiridas por el nodo de adquisición y procesamiento denominado *Intelligent Test and Measurement System* (ITMS) [Ruiz04] que aplicando diversos algoritmos obtiene los momentos invariantes de HU. Estos momentos representan las características de la señal y se envían al sistema clasificador. Entonces, el sistema clasificador identifica la clase de señal y comunica como respuesta el resultado al sistema que evoluciona en función del mismo. El control declarativo a través de una máquina de estados expresada en SCXML aparece representando tanto de forma gráfica mediante un autómata en la figura como en una tabla en la parte inferior señalando las acciones asociadas a cada estado (comportamiento dinámico) mientras que los algoritmos de procesamiento y los perfiles (asociaciones entre canales de adquisición y algoritmos) conforma el conocimiento estático.

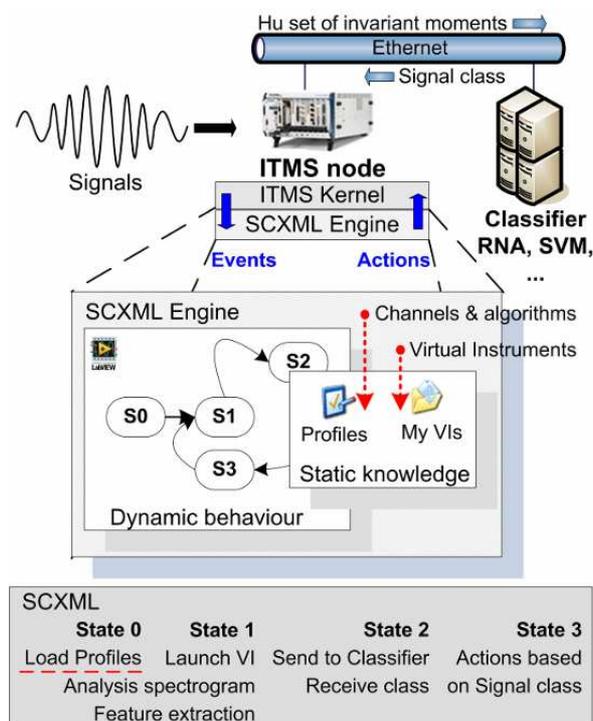


Figura 34 – Despliegue del sistema en un experimento de caracterización de señales

La base de conocimiento del experimento está formada por una parte estática que constituye los perfiles, es decir, las asociaciones entre canales de adquisición de señales con algoritmos de procesamiento y una parte dinámica que representa la lógica de los mismos. Los algoritmos de procesamiento son los responsables de manipular la información procedente del plasma y pueden expresarse en diferentes lenguajes de programación incluyendo desde lenguajes de propósito general como C++ o Java hasta lenguajes asociados a herramientas específicas como por ejemplo MatLab o LabVIEW ambos empleados habitualmente en el ámbito de la física experimental.

El comportamiento dinámico está formado por la identificación de los eventos que pueden producirse por los estados factibles del sistema y por las transiciones que los vinculan. El comportamiento dinámico se representa por una máquina de estados cuya función es regular el flujo del experimento. En el primer estado los perfiles definidos son cargados en la memoria y la máquina del estado evoluciona al siguiente estado. En el siguiente estado los procesos de adquisición y manipulación de las señales se encadenan transformando las mismas y generando eventos. Con cada evento se evalúa la máquina de estados y se efectúa un cambio de estado si procede. Con este enfoque, la lógica de ejecución del experimento queda determinada de forma declarativa y por tanto independiente a los algoritmos de procesado simplificando así su diseño.

En el caso concreto del experimento, el algoritmo desarrollado para extraer las características de la señal comienza elaborando el espectrograma de la misma utilizando la transformada rápida de Fourier (STFT) para la descomposición espectral, empleando un ventana de tipo Hanning de 64 muestras de longitud. En Figura 35 se observa el espectrograma aplicado a una señal chirp adquirida con una frecuencia de muestreo de 10 Hz. El siguiente algoritmo convierte el espectrograma en una imagen (una matriz de píxeles) y realiza diversas transformaciones con la misma, comenzando con un proceso de umbralización adaptativa según el histograma de la imagen. El resultado es una imagen binaria que se somete a procesos de cambio morfológico a través de cierres y aperturas (aplicación secuencial de erosiones y dilataciones) sobre los blobs o masas detectadas con objeto de borrar los agujeros y suavizar los bordes en su caso. Luego, las manchas o blobs son discretizadas usando un algoritmo de etiquetado y por último, se

realiza la esquelitización de los blobs lo que proporciona varios objetos bien definidos. Una vez identificadas las formas significativas del espectrograma, se obtiene cada momento de HU que son los que se comunican a la herramienta de clasificación para que la red neuronal o la máquina vector soporte clasifique la misma y devuelva el resultado de nuevo al motor de máquinas de estado que hace que el experimento pueda cargar otros perfiles y por tanto adapte su comportamiento a la evolución del mismo.

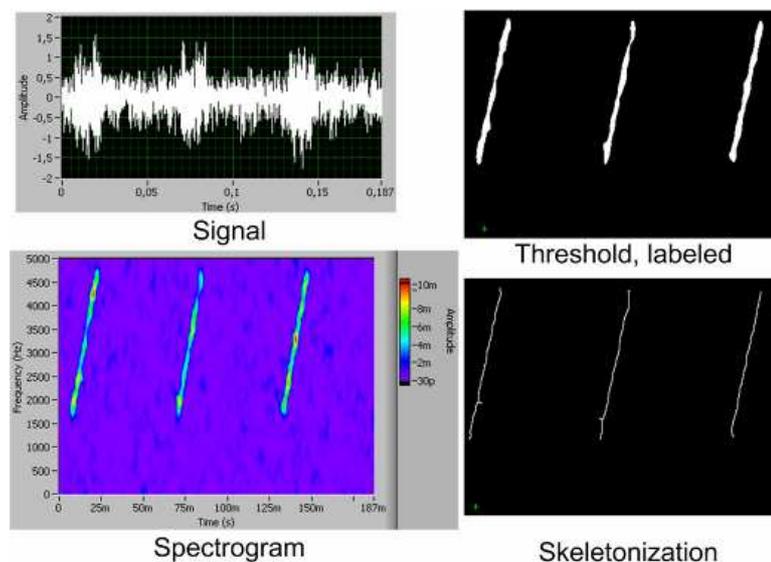


Figura 35 – Señal, espectrograma, umbralización y esquelitización

Una de las ventajas directas de este enfoque es que cada algoritmo está diseñado específicamente para un objetivo específico y no tiene que incluir instrucciones asociadas a los cambios de estado fruto de los eventos del sistema. En definitiva permite separar el procesamiento concreto de cada estado de la lógica de negocio asociada a la dinámica del mismo. Esto asegura la independencia y favorece la reutilización y el mantenimiento.

Por su parte, el servicio Jini es el responsable de llevar a cabo el despliegue de las funcionalidades de cada uno de los subsistemas utilizados. Por un lado, la herramienta de clasificación publica su interface y permite que la señal sea clasificada sin tener que establecer modificaciones en la misma. Por otro lado, el sistema que controla la evolución del experimento traslada todos los eventos recibidos y notifica los cambios al sistema de supervisión que puede además sustituir en cualquier momento la máquina de

estados y por tanto alterar todo el proceso si fuese necesario. En la Figura 36 se observa el despliegue Jini correspondiente al módulo de clasificación en la que se publica el interface correspondiente a las funcionalidades que pone a disposición del sistema de adquisición y que es fundamentalmente proporcionar la salida de la red ante la entrada proporcionado por lo algoritmos de extracción de los parámetros de HU.

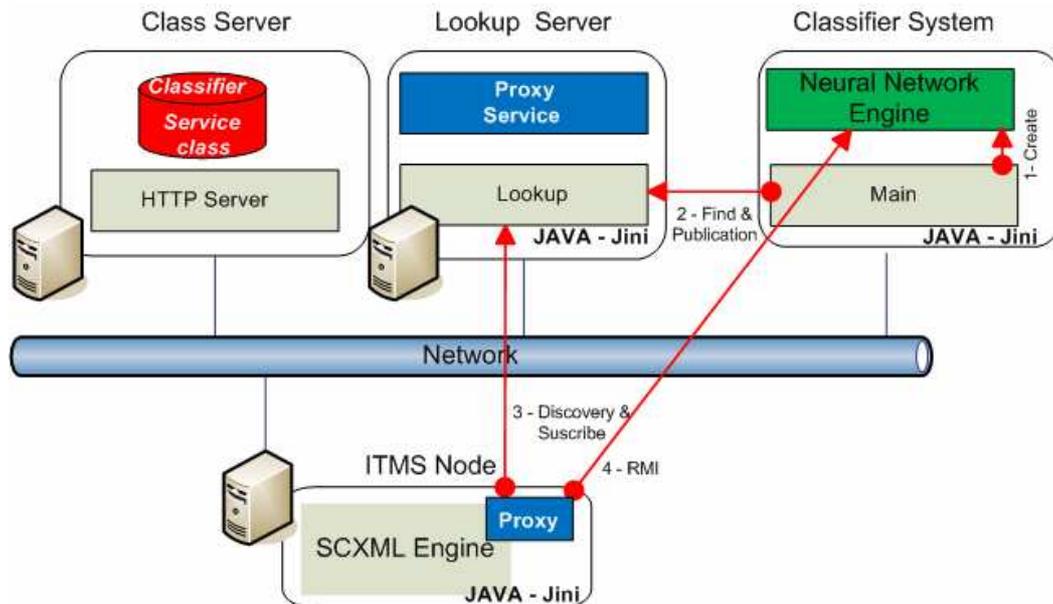


Figura 36 – Despliegue Jini del sistema clasificador basado en red neuronal

Capítulo 6 – Conclusiones y principales aportaciones

Resumen

Este trabajo trata de un proyecto multidisciplinar que tiene una componente de investigación en el ámbito de la tecnología para el desarrollo humano y sostenible y una componente de investigación de carácter más puramente técnico en el ámbito de la inteligencia artificial.

La primera se refiere al papel y el potencial de la IA como ingeniería al servicio del desarrollo humano y sostenible y la singularidad de sus aportaciones en el contexto general de las TICs, y supone una reflexión sobre el estado actual y potencial de las aplicaciones de la IA para el desarrollo humano y sostenible en ámbitos clásicos de aplicación de la IA como salud y educación, y también en áreas emergentes de particular relevancia para el desarrollo humano y sostenible tales como gestión medioambiental, gobierno electrónico, e-agricultura, sistemas de información geográfica o gestión de recursos hídricos.

La segunda componente de investigación se centra en una propuesta de una arquitectura y una plataforma software para aplicaciones de IA de aproximación conexionista en coherencia con el concepto de “tecnología apropiada”. Los resultados de esta última vertiente de investigación han resultado de interés general en el ámbito de la IA conexionista, más allá del contexto de investigación en tecnologías apropiadas, dadas las potencialidades reflexivas y adaptivas del modelo arquitectural propuesto, que sugieren líneas de investigación futuras prometedoras.

Conclusiones

El desarrollo humano debe ser el objetivo principal de cualquier empresa que afronte el ser humano. Perder este objetivo de vista no sólo resulta absurdo e incomprensible si se analiza un poco sino que conduce al deterioro de todos los aspectos de la vida. En el planteamiento de proyectos tecnológicos diseñados para ser aplicados en ámbitos concretos es crucial que las tecnologías sean apropiadas. El *green computing*, el software libre y las tecnologías abiertas constituyen aspectos y recursos clave a tener en cuenta a la hora de analizar el enfoque y el papel de las tecnologías de la información y la comunicación en este contexto. Por último la sencillez y el carácter asequible son propiedades cruciales para que la implantación y la sostenibilidad a todos los niveles puede ser garantizada.

En este trabajo se ha perseguido la integración de herramientas a través de un modelo abierto y escalable que permita desarrollar proyectos en los que la inteligencia artificial sea un elemento clave en la búsqueda de soluciones a problemas. Entre las características más destacadas de la propuesta sobresale un modelo de integración sencillo y claro, es decir, al alcance de cualquier neófito. Las propuestas de aplicaciones prácticas han modelado comportamientos con máquinas de estados, secuenciado acciones procedentes de redes neuronales obtenidas con algoritmos genéticos o clasificado señales a través de máquinas vector soporte pero sin duda podrían hacer muchas más cosas. Además permitir que el acceso a todos estos servicios de forma remota siguiendo un paradigma orientado a servicios permite incrementar las posibilidades de aplicación.

Es importante destacar que, aunque son muchas las aplicaciones que pueden encontrarse dispersas entre diferentes técnicas y campos de aplicación que pueden caber dentro del concepto de IA para el desarrollo humano y sostenible, no existe reflexión ni aproximación rigurosa al campo de la IA como tecnología apropiada, y que este proyecto es sólo una primera aproximación metodológica en el área de la IA conexionista.

Principales aportaciones

Como principales aportaciones que se derivan de este trabajo de investigación se pueden considerar las siguientes, las cuales se inscriben tanto en el campo de las tecnologías apropiadas como en la investigación pura IA:

- **El trabajo analiza y reflexiona sobre el concepto de IA como tecnología apropiada en proyectos para el desarrollo humano y sostenible** concluyendo que:
 - a) El carácter adaptativo de los sistemas IA facilita la transferencia tecnológica, dado que permite que los sistemas incluyan entre sus características la capacidad para adaptarse automáticamente a la idiosincrasia de los contextos de subdesarrollo, de casuística peculiar y compleja.
 - b) Los sistemas inteligentes incorporan más fácilmente el conocimiento local no formalizado o sistematizado, lo cual es común en los contextos de subdesarrollo.
 - c) El enfoque conexionista permite evitar la dificultad que podría tener utilizar ciertos sistemas de IA desarrollados fuera del contexto en que se implantan ya que las heurísticas empleadas en ellos pueden no ser aplicables.
- **Durante la investigación se han revisado aplicaciones de la IA en el desarrollo humano y sostenible identificando algunos de los campos de aplicación más comunes de la IA conexionista para el desarrollo humano y sostenible** ilustrando en ella algunos de los proyectos, concluyendo que:
 - a) Las redes neuronales son una técnica muy utilizada en estos contextos y suelen estar complementadas con técnicas procedentes de la computación evolutiva, las estrategias estadísticas o la lógica difusa principalmente con el objetivo de mejorar el proceso de aprendizaje de la red y acelerar la convergencia de la misma.
 - b) Las aplicaciones están presentes en múltiples campos de actividad críticos como son la generación de energía, intentando evaluar e incrementar el rendimiento y la sostenibilidad de la misma, el estudio sobre las estrategias de almacenamiento de recursos hídricos, combinando criterios de cantidad

con criterios de calidad, el tratamiento adecuado de los residuos sólidos urbanos, la conservación de la riqueza biológica con especial atención a la conservación de las especies, el control de la deforestación y en general la gestión de los recursos naturales, la mejora de la explotación agrícola y por supuesto la mejora de la salud.

- c) Destaca el potencial que las redes de sensores tienen en muchas aplicaciones estratégicas en contextos de subdesarrollo. Y que dado que pueden desarrollarse según el concepto de tecnología apropiada es crucial proponer modelos de trabajo y paradigmas de computación pensados para entornos distribuidos y con el punto de vista en la computación ubicua pero bajo el prisma del desarrollo humano y sostenible.
- **La investigación ha incluido el diseño y la experimentación del marco de referencia, con la revisión de la tecnología disponible en IA y la integración de otras tecnologías no específicas de IA pero muy pertinentes en el contexto tecnológico actual, proponiendo una arquitectura basada en componentes y una plataforma software que:**
 - a) Integra bajo un modelo de componentes diferentes herramientas y frameworks todos ellos procedentes del ámbito del software libre y que comparten el mismo lenguaje de programación por lo que su integración es natural y sencilla.
 - b) Representa los comportamientos, entendidos estos como el conjunto de acciones y la forma en la que estas se desencadenan, a través de un paradigma orientado a eventos basado en un motor de máquinas de estados cuyos autómatas finitos se describen en SCXML.
 - c) Dado el carácter declarativo del control de flujo del comportamiento, este dispone de capacidad de reflexión computacional
 - d) La inteligencia principal responde al enfoque conexionista utilizando redes neuronales y técnicas de computación evolutiva.
 - e) Las funcionalidades de la plataforma se despliegan en forma de servicio software dando al conjunto el carácter distribuido bajo el paradigma de la orientación a servicios y pudiendo constituir un agente software con capacidad de código móvil.

- f) El diseño de la plataforma atiende al concepto de tecnología apropiada impulsando las plataformas abiertas, el software libre y el *green computing*.
- **Aplicación de la plataforma propuesta en el campo de la robótica móvil al problema del aprendizaje de trayectorias.**
 - **Diseño de la plataforma propuesta en el ámbito de la experimentación de generación de energía por fusión nuclear que permite modelar experimentos dirigido por la detección de eventos en los espectrogramas de las señales a través de su identificación mediante técnicas de IA.**

Líneas de trabajo futuro

Tal y como se recogía en las conclusiones globales, es importante destacar que, aunque son muchas las aplicaciones que pueden encontrarse dispersas entre diferentes técnicas y campos de aplicación que pueden caber dentro del concepto de IA para el desarrollo humano y sostenible, no existe reflexión ni aproximación rigurosa al campo de la IA como tecnología apropiada, y que este proyecto es sólo una primera aproximación metodológica en el área de la IA conexionista. Por este motivo una de las principales líneas de trabajo futuro es llevar a cabo una aproximación mucho más rigurosa a la misma.

Desde un punto de vista más experimental el potencial de SCXML aún no ha sido completamente aprovechado. Si trasladamos la responsabilidad de dirigir el flujo de procesamiento a una máquina de estados expresada en SCXML estaremos ante un programa cuya secuencia de encadenamiento podrá ser fácilmente modificada. Pero lo que es más importante es observar la capacidad que tiene el propio programa para genere un nuevo SCXML que modifique en tiempo de ejecución su propia secuenciación. Este es uno de los aspectos más interesantes que pueden ser explorados analizando qué técnicas emplear para detectar la necesidad de modificar un comportamiento y la estrategia para elaborar el mismo a través de un autómata finito.

Finalmente analizar otros trabajos similares con el enfoque de tecnología apropiada en otros campos de la IA y experimentar en profundidad con la arquitectura y la plataforma en contextos reales de subdesarrollo.

Publicaciones

En relación con las tareas de investigación y experimentación llevadas a cabo durante este Máster de investigación y en colaboración con otra investigación realizada paralelamente durante estos años, se ha publicado el artículo siguiente, el cual incorpora avances obtenidos como resultado de ambas investigaciones:

[González10] González, J., Ruiz, M., Vega, J., Barrera, E., de Arcas, G., Lopez, J.M., Event recognition using signal spectrograms in long pulse experiments, Proceedings of the 18th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, Review of Scientific Instruments (81) 2010, Pages 10E126 - 10E126-3. doi:10.1063/1.3494273



Referencias

- [ACSCXML10] Apache Commons SCXML Web site: <http://commons.apache.org/scxml/> (Consulta 25 de Noviembre de 2010)
- [Aima11] Aima web site: <http://aima.cs.berkeley.edu/index.html> IA en Java: <http://aima.cs.berkeley.edu/ai.html#java> y código ejemplos del libro: <http://code.google.com/p/aima-java/> (Consulta 9 de Agosto de 2011)
- [Akay07] Akay, D., Atak, M., 2007. Grey prediction with rolling mechanism for electricity demand forecasting of Turkey. Energy 32 (9), 1670–1675.
- [ApacheRiver11] Apache River Web site: <http://river.apache.org/> (Consulta 12 de Julio de 2011)
- [Arduino11] Arduino Web site: <http://www.arduino.cc/> (Consulta 21 de septiembre de 2011)
- [Azadeha06] Azadeha, A, Ghaderia, S.F, Anvaria, M., Saberib, M., Performance assessment of electric power generations using an adaptive neural network algorithm, Research Institute of Energy Management and Planning, Department of Industrial Engineering, Department of Engineering Optimization Research and Center of Excellence for Intelligent Experimental Mechanics, Faculty of Engineering, University of Tehran, P.O. Box 11365-4563, Iran Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, University, of Bu Ali Sina, Hamedan and Islamic Azad University Tafresh, Iran
- [Beni05] Beni, G., From Swarm Intelligence to Swarm Robotics, Swarm Robotics, Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin / Heidelberg 2005, 978-3-540-24296-3, Volume 3342, pages 1-9, Url: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_1, Doi: 10.1007/978-3-540-30552-1_1
- [BNJ11] BNJ Web site: <http://bnj.sourceforge.net/index-es.html> (Consulta 9 de Agosto de 2011)
- [Boni05] Boni, A., La educación para el desarrollo en la enseñanza universitaria como una estrategia de la cooperación orientada al

- desarrollo humano, Tesis Doctoral, Universidad de Valencia, 2005.
Disponibile on-line:
http://ccd.webs.upv.es/files/Fondo_documental/Tesis/Alejandra%20Boni.pdf
- [Borenstein91] Borenstein, J, Histogramic in-motion mapping for mobile robot obstacle avoidance, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 7, No. 4, 1991, pp. 535-539.
- [Brooks85] Brooks, R.A., A Robusted layered control system for a mobile robot, Artificial Intelligence laboratory Massachusetts institute of technology, A.I. Memo 864, (1985)
- [Cannas07] Cannas, B., Fanni, A., Sonato, P. Zedda, M.K., and JET-EFDA contributors. A prediction tool for real-time application in the disruption protection system at JET. Nuclear Fusion 47 No 11 (2007) 1559-1569.
- [Canny86] Canny, J.F., A computational approach to edge detection, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, 679-698, 1986
- [Cano11] Cano, M., Cruz, I., Canadell, A., La sostenibilidad en 5 minutos, Portal Sostenibilidad, Cátedra UNESCO de Sostenibilidad, Universidad Politécnica de Cataluña, Disponible on-line: <http://portalsostenibilidad.upc.edu/index.php> (Consulta 21 de septiembre de 2011)
- [CEUTA] Centro Uruguayo de Tecnologías Apropriadas, ¿Qué son las Tecnologías Apropriadas?, Disponible on-line: <http://www.tecnologiasapropiadas.com/biblioteca/TecnologiasApropriadasQueSon.html> (Consulta 12 de mayo de 2011)
- [Ceylan04] Ceylan, H., Ozturk, H.K., 2004. Estimating energy demand of Turkey based on economic indicators using genetic algorithm approach. Energy Conversion and Management 45 (15–16), 2525–2537.
- [Ceylan05] Ceylan, H., Ozturk, H.K., Hepbasli, A., Utlü, Z., 2005. Estimating energy and exergy production and consumption values using three different genetic algorithm approaches. Part 2: Application and scenarios. Energy Sources 27, 629–639.
- [Chaves06] Chavez, P, Kojirria, T, Deriving reservoir operational strategies considering water quantity and quality objectives by stochastic fuzzy neural networks, Water Resources Research Center, Disaster Prevention Research Institute (DPRI), Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 6110011, Japan

- [Colomi92] Colorni A., Dorigo M. and Maniezzo V. An Investigation of some Properties of an Ant Algorithm. Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature Conference (PPSN 92), Brussels. Elsevier Publishing, 1992, pp.509-520
- [Crespo08] Crespo, E., Guía para el análisis del impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en el desarrollo humano, Proyecto final de carrera, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Marzo 2008.
- [Culler11] Culler, D., Doing Nothing Well: the essence of Green computing, Keynote Speaker, Second International Green Computing Conference (IGCC'11), Disponible on-line: <http://www.green-conf.org/2011/green-comp-keynote.pdf> (Consulta 25 de agosto de 2011)
- [deVries09] de Vries, P.C.de, Johnson, M.F., Segui, I., Statistical Analysis of Disruptions in JET, Nuclear Fusion 49 (2009) 055011
- [Dong02] Changqing Dong, C, Jin, B, Li, D, Predicting the heating value of MSW with a feed forward neural network, Ministry of Education Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Thermoenergy Engineering Research Institute, Southeast University, Nanjing, 210096, PR, China
- [Dorigo96] Dorigo M., V. Maniezzo and A. Colorni. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B. Vol 26, N° 1, 1996, pp.29-41.
- [Dorigo97a] Dorigo M. and L.M. Gambardella. Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem. BioSystems, in press. (Also Technical Report TR/IRIDIA/1996-3, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles. 1997
- [Dorigo97b] Dorigo M. and L.M. Gambardella. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol.1, No.1, 1997. In press.
- [Ediger07] Ediger, V.S., Akar, S., 2007. ARIMA forecasting of primary energy demand by fuel in Turkey. Energy Policy 35 (3), 1701–1708.
- [EDUTECCNO08] López, Juan Carlos López, Edutecno, Educación en Tecnología, Disponible on-line: <http://edutecno.org/2009/08/tecnologia-apropiada/> (Consulta 12 de Mayo de 2011)
- [Encog11] Encog Web site: <http://www.heatonresearch.com/encog> (Consulta 25 de Julio de 2011)

- [Foody05] Foody, G. M., Cutler, M. E.J., Mapping the species richness and composition of tropical forests from remotely sensed data with neural networks, aSchool of Geography, University of Southampton, Highfield, Southampton, SO17 1BJ, UK, Department of Geography, University of Dundee, Dundee DD1 4HN, UK, Ecological modelling 195 (2006) 37–42, Elsevier
- [Friedman84] Friedman, D.P.,Wand, M., Reification: Reflection without metaphysics. En Conference Record of the 1984 ACM Symposium on LISP and Functional Programming, 348-355, agosto 1984.
- [FSF11] Free Software Foundation, Inc., La definición de software libre, Disponible on-line: <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html> (Consulta 12 de Julio de 2011)
- [González10] González, J., Ruiz, M., Vega, J., Barrera, E., de Arcas, G., Lopez, J.M., Event recognition using signal spectrograms in long pulse experiments, Proceedings of the 18th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, Review of Scientific Instruments (81) 2010, Pages 10E126 - 10E126-3. doi:10.1063/1.3494273
- [Guerra06] Guerra, N., Crawford B. L., Optimización de funciones a través de Optimización por Enjambre de Partículas y Algoritmos Genéticos, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Informática, Valparaíso, Chile, 237-1099
- [Gupta07] Gupta,C.N., Palaniappan, R., Swaminathan, S. Krishnan, S.M., Neural network classification of homomorphic segmented heart sounds Applied Soft Computing 7 (2007) 286–297, Elsevier
- [Hachour09] Hachour, O., The proposed hybrid intelligent system for path planning of Intelligent Autonomous Systems, International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, Issue 3, Volume 3, 2009
- [Hachour11] Hachour, O., Neural Path planning For Mobile Robots, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development Issue 3, Volume 5, 2011
- [Haldenbilen98] Haldenbilen, S., Ceylan, H., 2005. Genetic algorithm approach to estimate transport energy demand in Turkey. Energy Policy 33, 89–98.
- [Harel87] D. Harel, Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems, Science of Computer Programming, vol. 8 (1987) 231 - 274.
- [Hegoa11] Instituto Hegoa, Tecnología apropiada, Diccionario de Acción Humanitaria y Cooperación al Desarrollo, Instituto de Estudios sobre

- Desarrollo y Cooperación Internacional, Universidad del País Vasco
Disponible on-line: <http://www.dicc.hegoa.ehu.es/listar/mostrar/214> (*Consulta 24 de Junio de 2011*)
- [Hobbs98] Hobbs, B.F., Helman, U., Jitrapaikulsarn, S., Konda, S., Maratukulam, D., 1998. Artificial neural networks for short-term energy forecasting: accuracy and economic value. *Neurocomputing* 23 (1-3), 71–84.
- [Holland75] Holland, J., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan, Press, Ann Arbor. 1975
- [Holland92] Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 2a ed. Massachusetts Institute of Technology, MIT Press Ed. 1992.
- [Hough62] Hough, T.H., A method and means for recognizing complex patterns, 1962
- [Hu62] HU, M., Visual pattern recognition by moment invariants, *IRE transactions on information theory*, vol.:8 iss:2, pp:179-187, Feb 1962.
- [Huhns98] Huhns, M., Singh, M. P.: *Readings in Agents*. Readings in Agents. Chapter 1, 1-24 ,1998
- [Jalali02] Jalali, P, *Wavelets and applications*. Energy Technology, Department Lappeenranta University of Technology, 2000
- [Janglová04] Janglová, D., *Neural Networks in Mobile Robot Motion* , *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Volume 1 Number 1 (2004), pp. 15-22
- [JGAP11] JGAP Web site: <http://jgap.sourceforge.net/> (*Consulta 9 de Agosto de 2011*)
- [Joone11] Joone Web site: <http://sourceforge.net/projects/joone/> (*Consulta 21 de Junio de 2011*)
- [Kandil02] Kandil, M.S., El-Debeiky, S.M., Hasanien, N.E., *Utility Long-Term Load Forecasting for Fast Developing using a Knowledge-Based Expert System*, *IEEE Transactions on power systems*, vol. 17, N°. 2, Mayo 2002
- [Kennedy95] Kennedy J and Eberhart R. *Particle Swarm Optimization*. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. 1995, pp. 1942-1948.

- [Kennedy98] Kennedy J. Thinking is social: Experiments with the adaptive culture model. Journal of Conflict Resolution. Vol 42, N° 1, 1998, pp. 56-76.
- [Kennedy01] Kennedy J. and Eberhart, R. Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers. 2001
- [Kilkberg98] Kliksberg, B., Repensando el estado para el desarrollo social; Más allá de dogmas y convencionalismos, Foro Intermunicipal Buenos Aires Sin Fronteras, Biblioteca Digital de la Iniciativa Interamericana de Capital Social, Ética y Desarrollo - www.iadb.org/etica, 1998
- [Kuhn62] T.S.KUHN The structure of scientific revolutions, University of Chicago Press, 1962
- [Läufer93] Läufer, K., Odersky, M., Self-interpretation and reflection in a statically typed language. En Proc. OOPSLA Workshop on Reflection and Metalevel Architectures. ACM Press,1993.
- [Liliana06] Liliana, S., Elementos para una revisión del desarrollo humano y social: del progreso a la satisfacción con la vida, Pensamiento Psicológico, Vol.2, N°6, 2006, pp. 115-135
- [Mahout11] Apache Mahout, Web site: <https://cwiki.apache.org/confluence/display/MAHOUT/Mahout+Wiki>
- [Maohua01] Maohua, W Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium, Computers and Electronics in Agriculture, 30 (2001) 45–50
- [Marcos04] Marcos, M.C, Guzmán, R., Alaiz, R., Autoguiado de robots móviles mediante redes neuronales, XXV jornadas de automática, Ciudad Real, 2004
- [Mas04] Mas, J.F., Puig, H., Palacio, J.L., Sosa-López, A., Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks, Environmental Modelling & Software 19 (2004) 461–471
- [Mataric97] Mataric, M.J., Behavior-Based Control: Examples from Navigation, Learning, and Group Behavior, Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, Volume 9, Numbers 2-3, 1, pp. 323-336, 1997
- [McCulloch43] McCulloch, W., Pitts, W., A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biophysics 5 (1943):115-133.

- [Melian03] Melián B, Moreno Perez J and Moreno Vega J. Metaheuristics: A global view. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. Vol 2, N° 19, 2003, pp. 7-28
- [Miller89] Miller, G.F., Todd, P.M., and Hedge, S.U., “Designing neural networks using genetic algorithms”, in J.D. Schaffer, ed., *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kauffman, 1989.
- [Mira07a] Mira, J., Delgado, A.E., On how the computational paradigma can help us to model and interpret the neural function, *Natural Computing* (2007) 6:211-240. DOI 10.1007/s11047-006-9008-6. Springer.
- [Mira07b] Mira, J., Delgado, A.E., *Funciones de Cálculo Local en Redes Neuronales*. Plataforma de cursos virtuales, 2007.
- [Mira07c] Mira, J., Delgado, A.E., *Mecanismos subyacentes al Aprendizaje Supervisado y No supervisado en RNAs*, Plataforma de cursos virtuales, 2007.
- [Mira95] Mira, J., Delgado, A.E., Boticario, J.G., Díez, F.G., *Aspectos básicos de la inteligencia artificial*, Sanz y Torres, Madrid, 1995
- [Mizuta01] Mizuta, S., Sato, T., Lao, D., Ikeda, M., Shimizu, T., *Structure Design of Neural Networks Using Genetic Algorithms*, *Complex Systems*, 13 (2001) 161–175
- [MLOSS11] mloss.org, machine learning open source software Web site <http://mloss.org/software/>
- [Moreno-Bid10] Moreno-Bid, J., Ruiz-Nápoles, P.. La educación superior y el desarrollo económico en América Latina. *Revista Iberoamericana de Educación Superior, Norteamérica*, 1, may. 2010. Disponible en: <http://ries.universia.net/index.php/ries/article/view/34>. Fecha de acceso: 14 ago. 2011.
- [Murari08] Murari, A., Vagliasindi, G., Arena, P., Fortuna, L., Barana, O., Johnson, M., and JET-EFDA Contributors, *Prototype of an adaptive disruption predictor for JET based on fuzzy logic and regression trees*. *Nuclear Fusion* 48 035010 (2008). doi: 10.1088/0029-5515/48/3/035010
- [NetBeans11] NetBeans Web site <http://netbeans.org/> (Consulta 5 de Agosto de 2011)
- [Neuratools11] Neuratools Web site: <http://www.palisade-lta.com/neuratools/>

- [Neuroph11] Neuroph Web site: <http://neuroph.sourceforge.net/> (Consulta 5 de Agosto de 2011)
- [Newmarch06] Newmarch, J., Foundations of Jini 2 programming, Apress 2006
- [Nilsson84] Nilsson, N. J., Shakey the robot. SRI International, Technical Note 323, April 1984
- [Nolfi93] Nolfi, S., Parisi, D., Genotypes for neural networks, In M. A. Arbib, editor, The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [Nolfi95] Nolfi, S., Parisi, D., ‘Genotypes’ for Neural Networks. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks (Michael A. Arbib, Ed.) pp 431-434. MIT Press 1995
- [OMPI09] Barefoot Collage, Las abuelas se especializan en energía solar, Revista de la Organización mundial de la propiedad intelectual, Junio 2009. Disponible on-line: http://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2009/03/article_0002.html (Consulta 8 de Marzo de 2011)
- [Ozturk05] Ozturk, H.K., Ceylan, H., Canyurt, O.E., Hepbasli, A., 2005. Electricity estimation using genetic algorithm approach: a case study of Turkey. Energy 30, 1003–1012.
- [Papazoglou06] Papazoglou, M.P., Traverso, P., Dustdar, S., Leymann, F., Krämer, B.J., Service-Oriented Computing Research Roadmap, Dagstuhl Seminar Proceedings 05462 Service Oriented Computing, <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2006/524> (Consulta 1/11/2010)
- [Pinguino11] Pinguino Web site: <http://www.hackinglab.org/pinguino/> (Consulta 21 de septiembre de 2011)
- [PNUD90] PNUD, 1990, Informe sobre Desarrollo Humano 1990, Mundiprensa, Madrid. Disponible on line: <http://www.undp.org>
- [Prats01] Prats, J., La Construcción Histórica de la Idea de Desarrollo, Paper nº 34 de la Biblioteca de Ideas, Instituto Internacional de Gobernabilidad, 2001, Disponible on-line: <http://www.iigov.org>
- [Rattá10] Rattá, G.A., Vega, J., Murari, A., Vagliasindi, G., Johnson, M.F., de Vries, P.C. and JET EFDA Contributors, An Advanced Disruption Predictor for JET Tested in a Simulated Real Time Environment, Nuclear Fusion 50 025005 (2010) doi:10.1088/0029-5515/50/2/025005

- [Rivière91] Rivière, Á., Orígenes históricos de la psicología cognitiva: paradigma simbólico y procesamiento de la información, Anuario de Psicología 1991, no 51, 129-155, O 1991, Facultat de Psicologia, Universitat de Barcelona
- [Rooj96] van Rooij, A.J.F., Jain, J.C., and Johnson, R.P., Neural Network Training using Genetic Algorithms, World Scientific, 1996.
- [Rueda11] Rueda, V.M., Velásquez, J.D., Franco, C.J., Avances recientes en la predicción de la demanda de electricidad usando modelos no lineales, Dyna, año 78, Nro. 167, pp. 36-43. Medellín, Junio, 2011. ISSN 0012-7353. Disponible on-line:
<http://dyna.unalmed.edu.co/ediciones/167/articulos/a04v78n167/a04v78n167.pdf>
- [Ruiz04] Ruiz, M., Barrera, E., López, S., Machón, D., Vega, J., Sánchez, E., Real-time data acquisition and processing platform for fusion experiments. Fusion Engineering and Design, Volume 71, Issues 1-4, Pages 135-140, June 2004.
- [Russell09] Russell, S., Norvig, P., Artificial Intelligence: A Modern Approach (Third edition). Prentice Hall, 2009
- [Russell1996] Russell, S: Inteligencia Artificial: un enfoque moderno. Prentice-Hall. México, 1996.
- [Sajikumar99] Sajikumar N., Thandaveswara, B.S, A non-linear rainfall–runoff model using an artificial neural Network, Journal of Hydrology 216 (1999) 32–55
- [Sánchez07a] Sánchez, F.M. et al. Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte I). Actas Urol Esp [online]. 2007, vol.31, n.2, pp. 69-76. ISSN 0210-4806.
- [Sánchez07b] Sánchez, F.M. et al. Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al Robot da Vinci (Parte II). Actas Urol Esp [online]. 2007, vol.31, n.3, pp. 185-196. ISSN 0210-4806.
- [Santamaria11] Santamaría, F., Inteligencia de enjambre: una inteligencia probabilística en experimentos de optimización. *Disponible on-line:* <http://fernandosantamaria.com/blog/2011/03/inteligencia-de-enjambre-una-inteligencia-probabilistica-en-experimentos-de-optimizacion/> (Consulta 29 de Julio de 2011)
- [Schreinemach06] Schreinemachers , P, The (Ir)relevance of the Crop Yield Gap Concept to Food Security in Developing Countries with an Application of Multi Agent Modeling to Farming Systems in Uganda, Aus Weert, Die Niederlande, Diese Dissertation

- [Schumacher73] Schumacher, E.F., Small is beautiful. A study if economics as if people mattered, Blond & Briggs, 1973, ISBN 978-00609163
- [SCXML09] W3C, State Chart XML (SCXML): State Machine Notation for Control Abstraction, Working Draft 29 October 2009, <http://www.w3.org/TR/scxml/>
- [Sezgin01] M. C. Sezgin, Z. Dokur, T. Ölmez, M. Korürek, “Classification of respiratory sounds by using an artificial neural network.” Proceedings of the Annual EMBS International Conference, Istanbul, Turkey, pp 697-699, 2001.
- [Silva07] Silva,R., García, J.R., Barrientos, V.R., Molina, M.A., Hernández, v.M., Silva, G. Una panorámica de los robots móviles, Revista Electrónica de Estudios Telemáticos, Universidad Rafael Beloso Chacín, Volumen 6 Edición No 3, 2007
- [Smith82] Smith, B.C., Reflection and Semantics in a Procedural Language. Tesis de Doctorado, Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [Smith84] Smith, B.C., Reflection and semantics in Lisp. En Principles of Programming Languages (POPL84), 23-35. ACM Press, 1984.
- [Sozen05] Sozen, A., Arcaklioglu, E., Ozkaymak, M., 2005. Modelling of the Turkey’s net energy consumption using artificial neural network. International Journal of Computer Applications in Technology 22 (2/3), 130–136.
- [Sozen07] Sozen, A., Arcaklioglu, E., 2007. Prospects for future projections of the basic energy sources in Turkey. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy 2 (2), 183–201.
- [Sudhira03] H. S. Sudhira, H.S., Ramachandra, T. V., Jagadishb, K. S., Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS a Energy and Wetlands Research Group, Centre for Ecological Sciences, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India and Department of Civil Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore 560 012, India
- [Taheri10a] Tahere Taheri, Comparing Neural Networks in Neuroph, Encog and JOONE, The code project, Disponible on-line: <http://www.codeproject.com/KB/recipes/xor-encog-neuroph-joone.aspx>
- [Taheri10b] Tahere Taheri, Benchmarking and Comparing Encog, Neuroph and JOONE Neural Networks, The code project, Disponible on-line:

<http://www.codeproject.com/script/Articles/ListVersions.aspx?aid=85487>

- [Téllez04] Téllez, R.A., Angulo, C., Generando un agente robótico a partir de la evolución de subagentes simples cooperativos. V Workshop en Agentes Físicos Girona, libro de actas, p. 113-118. Girona Edicions. 2004.
- [Tharakan08] Tharakan, John, The Relevance of Appropriate Technology, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Howard, Washington (Estados Unidos de América). Disponible on-line: <http://www.howard.edu/library/Scholarship@Howard/Articles/2008/icat2008tharakan-14.pdf> (Consulta 12 de Mayo de 2011)
- [Toksari07] Toksari, M.D., 2007. Ant colony optimization approach to estimate energy demand in Turkey. Energy Policy 35, 3984–3990.
- [Trucco98] Trucco, E., Verri, A, Introductory techniques for 3-D computer vision, Prentice Hall, 1998.
- [Turing37] Turing, A.M., On Computable numbers with an application to the entscheidungs problem, Proceedings of the London Mathematical Society, London Mathematical Society 1937
- [UC3M10] Computación evolutiva y algoritmos basados en hormigas para la Inteligencia Artificial, Segundo Seminario Internacional sobre Nuevas Cuestiones en Inteligencia Artificial, Universidad Carlos III de Madrid. Disponible on-line: http://www.uc3m.es/portal/page/portal/actualidad_cientifica/noticias/Nuevas_cuestiones_IA (Consulta 29 de Julio de 2011)
- [UN87] United Nations, Our Common Future: Brundtland Report, World Commission on Environment and Development., Disponible on-line: <http://worldinbalance.net/intagreements/1987-brundtland.php> (Consulta 25 de agosto de 2011)
- [UN92] United Nations, Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Disponible on-line: http://www.un.org/esa/dsd/agenda21_spanish/res_riodecl.shtml (Consulta 21 de septiembre de 2011)
- [UN02] United Nations, Cumbre mundial de Johannesburgo sobre desarrollo Sostenible, Disponible on-line: <http://www.johannesburgsummit.org> (Consulta 21 de septiembre de 2011)

- [Ünler08] Ünler, A., Improvement of energy demand forecasts using swarm intelligence: The case of Turkey with projections to 2025, *Energy Policy* 36 (2008) 1937–1944
- [Vega07] Vega, J., Rattà, G., Murari, A., Castro, P., Dormido-Canto, S., Dormido, R., Farias, G., Pereira, A., Portas, A., de la Luna, E., Pastor, I., Sánchez, J., Castro, R., Santos, M., Vargas, H., and JET EFDA contributors, Recent results on structural pattern recognition for Fusion massive databases, in: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2007*, ISBN 1-4244-0829-6, pp. 949–954.
- [Watson11] Watson, M., *Practical Artificial Intelligence Programming in Java Open Content Free Web Books*. Disponible on-line: <http://www.markwatson.com/opencontent/JavaAI3rd.pdf>
- [Weka3] Weka Web site: <http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> (*Consulta 9 de Agosto de 2011*)
- [Wikipedia11] Desarrollo Sostenible. Disponible on-line: http://es.wikipedia.org/wiki/Desarrollo_sostenible (*Consulta 11 de septiembre de 2011*)
- [Wooldridge95] Wooldridge, M. and Jennings, N. R.: *Intelligent agents: Theory and practice*. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2):115–152, 1995.
- [Yao93] Yao, X., “A Review of Evolutionary Artificial Neural Networks”, *International Journal of Intelligent Systems*, 8:539-567, 1993.
- [Yongmin11] Yongmin, C., Bijan, M., Xiaobu, Y., *Optimal Robot Path Planning with Cellular Neural Network*, *International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics*, 1(1), 20-39, January-March 2011
- [Yumurtaci04] Yumurtaci, Z., Asmaz, E., 2004. Electric energy demand of Turkey for the year 2050. *Energy Sources* 26, 1157–1164.
- [Zhang93a] Zhang, B.-T., & Miihlenbein, H. (1993a). Evolving optimal neural networks using genetic algorithms with Occam’s razor. *Complex Systems*, 7(3), 199-220.
- [Zhang93b] Zhang, B.-T., & Miihlenbein, H. (1993 b). Genetic programming of minimal neural nets using Occam’s razor. In S. Forrest (Ed.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms (ICGA-93)* (pp. 342-349). San Mateo, CA: Morgan Kaufmann.
-

