

Docencia sobre Algoritmos Evolutivos en la Universidad de Málaga

Enrique Alba y Carlos Cotta

Resumen— En este trabajo presentamos las consideraciones más importantes en relación a la docencia en algoritmos evolutivos en la Universidad de Málaga. En particular, nos centraremos en el curso denominado de dicha forma perteneciente al programa de doctorado “Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial”. Discutiremos los contenidos, aproximaciones algorítmicas, las aplicaciones y en general el enfoque de la enseñanza de tercer ciclo en este tema. Asimismo, abordaremos cuestiones de mejora y de relación con el entorno tanto local como nacional e internacional del curso en marcha.

Palabras clave— Algoritmos Evolutivos, Tercer Ciclo, Universidad de Málaga

I. INTRODUCCIÓN

LA enseñanza reglada en la universidad de Málaga (UMA) en relación con el estudio de algoritmos evolutivos (EAs) [1] y otros heurísticos presenta ciertas características propias de interés en cuanto a su formato y contenidos. En general, debemos decir que la enseñanza sobre metaheurísticas, y en particular sobre EAs es escasa e incluso inexistente en las carreras de Ingeniería Informática, Telecomunicación o Industriales.

Tales asuntos, desde un punto de vista matemático (no computacional), se abordan en ciertas asignaturas del plan de estudios para graduados en las titulaciones de Licenciado en Económicas y Licenciado en Matemáticas. Sin embargo, es importante resaltar que los breves contenidos sobre este campo que se imparten suelen tener ciertos componentes que los diferencian bastante de las expectativas propias de una ingeniería.

De esta forma, el presente trabajo se enfocará en la presentación de la única asignatura disponible para cursar en relación a metaheurísticas y algoritmos evolutivos en la UMA. Los cursos regulares conducentes a la graduación en Ingeniería Informática apenas mencionan la existencia de heurísticas, de forma que podemos afirmar que los alumnos únicamente toman contacto con este campo cuando realizan su proyecto de

fin de carrera con investigadores afines. Por tanto, el grado de conocimiento en este aspecto es aún minoritario y muy desigual.

Sin embargo, sí existe desde hace varios años una asignatura denominada “Algoritmos Evolutivos” que se imparte como parte del curso de doctorado en “Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial” ofertado por el departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación de la UMA. Este curso está accesible únicamente a los estudiantes de postgrado, que en su mayoría, están interesados en realizar una tesis doctoral.

En este trabajo discutiremos las particularidades de dicho curso (Sección II), y su evolución e interacción con otros cursos e investigaciones (Sección III). Finalmente, ofrecemos algunas conclusiones y consideraciones para el desarrollo futuro de la enseñanza en este campo en la Sección IV.

II. ESTRUCTURA DEL CURSO “ALGORITMOS EVOLUTIVOS”

En esta sección discutimos los detalles internos del curso denominado *Algoritmos Evolutivos*. Este curso dispone de 3 créditos y se imparte como parte del programa de doctorado en Informática denominado *Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial* en la UMA desde el curso 1999-2000 hasta la actualidad de manera ininterrumpida.

El objetivo del curso sobre EAs es conseguir que los alumnos se familiaricen con estas técnicas, de manera que al finalizar el curso sean capaces de reconocer las diferentes familias, paradigmas más comunes y aplicaciones de este tipo de algoritmos. El enfoque de los contenidos es por una parte el de mostrar la estructura y funcionamiento interno de los distintos algoritmos evolutivos, así como conocer sucintamente sus fundamentos teóricos más importantes. Las aplicaciones se utilizan durante el curso de manera estratégica para conseguir que el alumno aprenda por sí mismo el impacto que estas técnicas pueden aportar en general y en particular para su dominio de interés.

La metodología docente de este curso se basa en clases magistrales dictadas por los profesores (los dos autores del presente trabajo) que se

imparten durante el primer cuatrimestre de cada año académico. Adicionalmente, los alumnos deben realizar un trabajo en relación a algunos de los temas que se proponen cada año o bien de su propia elección si se considera pertinente. La evaluación de los alumnos de este curso se realiza atendiendo a su asistencia continuada a las clases magistrales, así como a la calidad del trabajo realizado y otros posibles elementos de evaluación continua como aprovechamiento de los conocimientos, posible presentación de resultados en una mini-charla realizada por el alumno, asistencia a eventos del tema (conferencias invitadas, reuniones en la UMA sobre este asunto, etc.).

La discusión de los contenidos se realiza principalmente utilizando presentaciones con cañón proyector unido a un ordenador portátil. Esto permite realizar claras explicaciones gráficas de los conceptos e incluso dotar de movilidad y evolución en el tiempo a los propios algoritmos explicados y a las aplicaciones ilustradas. Adicionalmente, los alumnos disponen de gran cantidad de material tal como bases de datos con artículos, referencias, charlas de profesores visitantes, enlaces a páginas del grupo y personales, etc. Toda esta información está también disponible para el público en general en Internet, en la URL <http://neo.1cc.uma.es>.

El contenido del curso gira mayoritariamente en torno a tres aspectos: (a) introducción a los algoritmos evolutivos, (b) descentralización y paralelismo, y finalmente (c) hibridación con otras técnicas. Por tanto, los contenidos abarcan tanto la descripción de las familias algorítmicas que se encuadran bajo el mismo apelativo de *evolutivas*, como dos de las formas más exitosas de aplicación y extensión de dichos paradigmas, como son su funcionamiento paralelo y su colaboración con otros procedimientos de optimización y aprendizaje.

El temario que se viene impartiendo en los últimos años es el siguiente:

TEMARIO:

- 1. Introducción a los Algoritmos Evolutivos.
- 2. Fundamentos de los Algoritmos Evolutivos.
- 3. Algoritmos Evolutivos Descentralizados.
- 4. Algoritmos Evolutivos Paralelos.
- 5. Aplicaciones de los Algs. Evolutivos (I).
- 6. Hibridación: Necesidad y Mecanismos.
- 7. Hibridación Fuerte.
- 8. Hibridación Débil.
- 9. Aplicaciones de los Algs. Evolutivos (II).

Pueden comprobarse claramente los tres apartados mencionados antes:

- A. Introducción a los EAs (temas 1 y 2).
- B. Descentralización y Paralelismo (temas 3, 4 y 5).
- C. Hibridación (temas 6 a 9).

La descripción de estos temas presenta al alumno de manera cohesionada todos los elementos del curso, y tiene un carácter marcado hacia los procesos de optimización típicos de la optimización combinatoria tradicional. Las aplicaciones ilustran las características más interesantes de los algoritmos tanto desde el punto de vista de la academia como de la industria, remarcando las posibilidades reales de las técnicas a través de las tareas abordadas en el mundo real con ellas.

La bibliografía para los alumnos podría ser muy amplia, ya que libros como el de Mitchell [2], o los más recientes de De Jong [3] o el de Eiben y Smith [4] son textos apropiados para un investigador novel en algoritmos evolutivos. También se recomiendan las revistas IEEE Transactions on Evolutionary Computation (IEEE) y Evolutionary Computation (MIT) como fuentes actualizadas y de calidad para la investigación en el área. Finalmente, se ha tomado la decisión de proporcionar al final de cada tema un conjunto de referencias muy concretas y cercanas a los contenidos reales que se les presentan al alumno, de forma que el resto de literatura genérica mencionada se deja al criterio del alumno según sus necesidades.

A continuación detallamos los contenidos de cada tema un poco más en profundidad en las siguientes subsecciones.

A. Introducción a los Algoritmos Evolutivos

El primer tema del curso introduce a los alumnos en los conceptos básicos de la búsqueda multipunto, describiendo el proceso de búsqueda canónico de cualquier algoritmo evolutivo. Se presentan ejemplos de aplicación básicos, normalmente utilizando operadores de mutación y recombinación simples. Se dedica en este tema un tiempo a la explicación de la nomenclatura especial que se suele utilizar y a su enlace con los procesos matemáticos tradicionales de óptimo (global y local) y combinatoria básica.

Para mejorar la comprensión inicial se realiza un ejemplo de construcción de un algoritmo genético para resolver una función matemática simple. Durante todo el proceso de intentan resaltar las diferencias con otras técnicas, especialmente con las técnicas exactas, con las deterministas y con las técnicas de búsqueda que usan un único punto. El alumno al final del tema comprende las ventajas e inconvenientes de

estos heurísticos, y puede diferenciar entre las distintas familias básicas atendiendo a la representación y utilización de operadores que cada una de ellas hace: algoritmo genético, estrategia evolutiva, programación genética y programación evolutiva. También se van mencionando la existencia e interés de otras variantes para ir acomodando al alumno poco a poco al campo de trabajo.

Para terminar la discusión inicial, se plantean alternativas a la optimización tradicional, entendida ésta como encontrar el extremo matemático de una única función estática en el tiempo. Con este objetivo en mente se introduce al alumno en la posibilidad de optimizar múltiples funciones contrapuestas a la vez (optimización multiobjetivo) y también la posibilidad de que la función optimizada dependa del tiempo (optimización dinámica o DOP).

B. Fundamentos de los Algoritmos Evolutivos

El segundo tema versa sobre los fundamentos algorítmicos de esta plantilla genérica de búsqueda formada por los EAs. Por tanto, se intenta familiarizar al alumno con los conceptos de esquema, forma, teoría de esquemas y formae, y otros elementos teóricos de interés para el estudio de los algoritmos tales como la presión selectiva, la respuesta a la selección, cadenas de Markov y otros elementos de la literatura (análisis de Fourier, extensiones para codificaciones no discretas, etc.).

En este tema se plantean las fases de instanciación personalizada de la técnica al problema, haciendo hincapié en tipos de códigos (binarios, reales y permutaciones, principalmente), operadores tradicionales variados para cada codificación y algunos elementos matemáticos para la mejor comprensión del espacio de búsqueda que representa la función de adecuación.

Al final de este tema se introducen variantes conocidas de las familias principales, tales como el algoritmo CHC, algoritmos desordenados (*messy*), GA-P (GA+GP) y algoritmos de distribuciones (EDAs). También se intentan crear nuevas inquietudes a los alumnos con la idea de búsqueda por colonias de hormigas (ACO) o varios tipos de hibridación que justifiquen el temario propuesto.

Es destacable en todo el proceso de discusión de este capítulo la generalidad con que se hace la exposición, de forma que intrínsecamente se presentan tanto algoritmos adecuados para optimización discreta (binaria, Gray, permutaciones, etc.) como para optimización continua, para lo que se discuten operadores sobre genotipos reales.

C. Algoritmos Evolutivos Descentralizados

En este tema se presentan al alumno las posibilidades de un algoritmo evolutivo que no utilice una única población totalmente conectada de individuos (panmixia). Para ello se discute primero un marco unificado para encuadrar a cualquier algoritmo, sea en panmixia o en politipia (descentralizado o estructurado). Después se estudian en detalle los dos exponentes más importantes de este tipo de algoritmos: algoritmos descentralizados y algoritmos celulares. Estas dos clases de algoritmos son estudiadas en profundidad, de manera que se formalizan, se aplican, y se extienden con variantes que están en la línea actual de investigación de varios grupos internacionales.

Este tema pretende dejar clara la diferencia entre un algoritmo descentralizado y otro paralelo, términos que aún hoy se confunden frecuentemente. Es por eso que en este tema no se habla de detalles sobre máquinas o software paralelo, y toda la discusión se centra en la importancia de que los individuos evolucionen en vecindarios de distintos tipos. Con frecuencia este tipo de algoritmos arrojan resultados más precisos o calculados de forma más eficiente (numéricamente hablando), de forma que estos dos aspectos son ilustrados con aplicaciones complejas explícitamente.

En este tema también se apuntan las dificultades inherentes a programar un algoritmo descentralizado, casi en su totalidad provenientes del uso de múltiples poblaciones más pequeñas frente a una única de mayor tamaño: equilibrio exploración/explotación.

D. Algoritmos Evolutivos Paralelos

El tema destinado a estudiar algoritmo paralelos existe de manera independiente del tema anterior para reforzar las diferencias entre modelo y ejecución del modelo. Esta diferencia es difícil de ver con los algoritmos descentralizados distribuidos para muchas personas, pero es especialmente evidente en algoritmos celulares (que tanto pueden implementarse en máquinas SIMD como en monoprocesadores, lo más usual hoy en día) y también con otros tipos de algoritmos paralelos como los de paralelismo global, donde se evalúan los individuos en paralelo y el algoritmo básico es la mayor parte de las veces el mismo que la contrapartida secuencial.

En este tema se presentan herramientas paralelas tales como MPI, PVM o Globus, naturalmente de manera introductoria. Se explican las dificultades de implementación de algoritmos paralelos, principalmente provenientes del uso correcto de las herramientas, tales como las mencionadas u otras de menor nivel como BSD

socket. De una especial importancia es el estudio en este tema de la definición “correcta” de ganancia de velocidad o *speedup*. Esta ganancia y las medidas tradicionales en paralelismo como la eficiencia del algoritmo paralelo deben ser definidas en concordancia a la literatura existente para algoritmos tradicionales y programas paralelos existentes, frente a la tentación de los investigadores en heurísticas en redefinir a su manera tales definiciones.

Este tema describe numerosos detalles sobre la implementación (sobre todo orientada a objetos) de algoritmos, detallando los tipos de clases de objetos más interesantes y su conexión con la red. Asimismo, en este tema se introducen dos proyectos de especial relevancia para el grupo de investigación que imparte el curso: el proyecto MALLBA (2000-2002) y el proyecto TRACER (2003-2005), ambos con financiación pública, donde los enfoques en paralelismo son parte del núcleo de los estudios y aplicaciones realizadas.

E. Aplicaciones de los Algoritmos Evolutivos (I)

En este tema se presentan al alumno aplicaciones realizadas y posibles de las técnicas mostradas hasta el momento. Este tema sirve como punto de puesta en práctica para las explicaciones de los temas anteriores, haciendo gran hincapié en aplicaciones de optimización combinatoria y del mundo real. Es importante mencionar que el uso de presentaciones multimedia y el acceso a Internet para recolección e inspección de material ha sido decisivo como elemento de innovación tecnológica para acercar a los alumnos la potencia computacional de la que disponen para ejecutar las técnicas analizadas.

En particular, en este tema se discute la solución eficiente de problemas tales como SAT, Mochila, TSP, VRP y otros clásicos de la optimización combinatoria. También se presenta el diseño de redes neuronales como problema complejo, así como problemas típicos de las telecomunicaciones: routing, localización de antenas, asignación de frecuencias, diseño de códigos correctores de errores, diseño fiable de redes (Steiner), etc.

En los últimos años, se ha incluido con creciente importancia un apartado especial orientado a mostrar las potenciales ventajas de considerar una definición multiobjetivo de problemas tradicionalmente monoobjetivo. Además de un ejemplo inicial introductorio se comentan también definiciones multiobjetivo ventajosas, en especial para VRP y algunos problemas del dominio de las telecomunicaciones mencionados

antes.

Este tema es importante para recalcar la validez de las técnicas heurísticas en general y de los algoritmos evolutivos en particular. Adicionalmente, es interesante motivar la necesidad de la hibridación y el paralelismo en este campo como medios para conseguir algoritmos eficientes y precisos, lo cual aporta coherencia y completitud al temario que impartimos.

F. Hibridación: Necesidad y Mecanismos

Este tema presenta la necesidad de incorporar conocimiento específico del problema que se desea resolver dentro de la técnica de optimización empleada. Para ello se parte de la visión clásica de superioridad de la búsqueda evolutiva sobre cualquier tipo de búsqueda especializada. Esta visión se revisa a la luz de los resultados teóricos más relevantes al respecto (e.g., el Teorema de *No Free Lunch*), y que muestran su incorrección. El corolario es la relación directa que existe entre empleo de conocimiento específico de un problema y rendimiento esperado del algoritmo de optimización.

Una vez formalizada esta necesidad, se proporciona un marco general dentro del cual entender la hibridación, y que da lugar a dos enfoques:

- hibridación fuerte (uso de representaciones y operadores ad hoc) e
- hibridación débil (combinación de diferentes técnicas de búsqueda).

G. Hibridación Fuerte

La hibridación fuerte es abordada en este tema. Se muestra el concepto de visión de un problema, y cómo un cambio de visión puede hacer que un problema simple se torne difícil y viceversa. Acto seguido se procede a presentar dos estrategias para el diseño de híbridos fuertes. La primera estrategia se basa en el marco formal del Análisis de Formas, y está orientado al uso de operadores adecuados para un cierto problema. Esta estrategia puede concebirse como un análisis estadístico de ciertas propiedades del espacio de búsqueda, y es ejemplificado sobre un problema de planificación de tareas.

La segunda estrategia se centra en el empleo de representaciones no-homogéneas, en las que el propio mecanismo de representación de las soluciones introduce un sesgo en el comportamiento del algoritmo, potenciando la búsqueda en ciertas regiones del espacio de soluciones. Esta estrategia se ejemplifica sobre un problema de optimización combinatoria con restricciones: el problema de la mochila binaria multidimensional.

H. Hibridación Débil

El presente tema se centra en la hibridación débil o combinación de diferentes tipos de algoritmos de búsqueda. Tras presentar una primera clasificación de las formas en las que puede producirse esta combinación, se discuten dos tipos concretos de hibridación. La primera se basa en el empleo de búsquedas heterogéneas débilmente acopladas, estrategia que es ejemplificada en el contexto de un problema de optimización numérica con técnicas de *hill climbing*, y con algoritmos genéticos con representación binaria. La heterogeneidad se presenta en el uso combinado de codificación binaria pura y codificación binaria Gray.

El otro modelo de hibridación presentado se centra en la combinación de algoritmos heurísticos y exactos. Concretamente se muestra como se puede incorporar un algoritmo de optimización exacta (*Branch & Bound* en este caso) como operador de un algoritmo evolutivo. Esto conduce al marco formal de la recombinación dinásticamente óptima, cuyas características más relevantes son presentadas sobre diferentes problemas de optimización numérica y combinatoria.

I. Aplicaciones de los Algoritmos Evolutivos (II)

Finalmente, el tema de aplicaciones aborda diferentes tareas en las que se hace hincapié en el uso de conocimiento específico dentro del algoritmo evolutivo. Dichas aplicaciones ilustran el empleo de operadores ad hoc (problemas de corte), representaciones no homogéneas (asignación de frecuencias de radio), algoritmos meméticos clásicos (ajuste paramétrico), y recombinación dinásticamente óptima (control de un agente móvil).

III. EVOLUCIÓN E INTERACCIONES DEL CURSO

El curso objeto de análisis ha evolucionado de manera gradual en los últimos años, sin variaciones traumáticas en cuanto a impartición. Usualmente el número de alumnos es de 7-8 (Figura 1), frente a un total de unos 15-20 en el curso de doctorado global. Por tanto, podemos afirmar que entre un 30 % y un 50 % de los alumnos que se matriculan en el curso eligen cursar conocimientos sobre algoritmos evolutivos. De hecho, es en los últimos años donde se ha apreciado un incremento en el porcentaje de alumnos que eligen este curso.

Los alumnos matriculados en el curso suelen estar fuertemente motivados, y lo han seleccionado con la intención clara de asistir y trabajar los contenidos. Un ejemplo del esfuerzo voluntario son los trabajos realizados en los múltiples años que

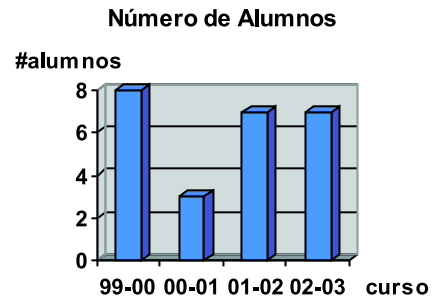


Fig. 1. Evolución del número de alumnos matriculados.

se ha impartido el curso. Como ejemplo, podemos mencionar algunos de estos trabajos:

- Segmentación de Texturas en una Imagen. Un Enfoque Basado en Optimización.
- Estado del Arte en Localización y Algoritmos Evolutivos.
- Apoyo Hardware a los Algoritmos Genéticos.
- Estado del Arte en Diseño Evolutivo.
- Una Comparativa de los Algoritmos de Optimización Aleatorios Clásicos.
- Utilización de Algoritmos Genéticos en Juegos.
- Redes Neuronales Artificiales Evolutivas.
- Algoritmos Genéticos y la Predicción Bursátil. Sistema ANTAS.

La interacción de este curso es importante con algunos de los otros cursos, aunque relativamente alejado de los conocimientos de otros. En particular, el curso “Técnicas de Bases de Datos y de Programación Distribuida para la Web” tiene un gran porcentaje de conocimientos dedicados al estudio de tecnologías paralelas para la web, Internet y procesamiento en rejillas computacionales (*grid computing*). Estos conocimientos se fusionan fácilmente en la línea de trabajo existente en la UMA relativa a la resolución de problemas de optimización en computación grid, lo cual refuerza la interacción entre los profesores y alumnos de estos cursos.

Asimismo, el curso guarda cierta relación con contenidos de otras áreas, también incluidos en el mismo programa de doctorado. Nos referimos a los cursos que imparten docencia sobre aprendizaje computacional, redes neuronales, agentes o sistemas distribuidos y de tiempo real. Por otro lado, el curso sobre algoritmos evolutivos siempre se ha caracterizado por imbuir un conjunto de comportamientos en sus alumnos en profundo respeto con la ingeniería del software (único curso obligatorio en el programa) en cuanto a la concepción e implementación de nuevos algoritmos,

así como un estudio formal de dichas técnicas que en parte se aborda también en el curso de “Complejidad Computacional”.

Como ya mencionamos antes, en la universidad de Málaga se imparten cuatro cursos de postgrado conducentes a la obtención del título de suficiencia investigadora (quizás futuro “magister” con los cambios de planes de estudio futuros) en el campo de la **Tecnología de la Información, Comunicación y de la Producción**:

- Ingeniería de los Sistemas de Producción.
- Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial.
- Técnicas de Representación Gráfica y Diseño.
- Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones.

La relación entre los distintos programas en cuanto a contenidos es actualmente escasa; un punto de mejora para el futuro puede provenir efectivamente de la mayor relación y cohesión con el resto de programas, quizás comenzando con la innovación en contenidos y en el formato de la oferta, por ejemplo a través de Internet. Otra posibilidad de interacción a nivel local o incluso nacional es la oferta de nuevos programas de doctorado en el dominio de los algoritmos evolutivos y metaheurísticas en general que puedan plantearse en un futuro cercano.

En relación al ámbito nacional debemos decir que el curso se parece en cuanto a contenidos y metodología de impartición a otros similares de postgraduado en universidades españolas; sin embargo, el enfoque en nuestro caso está claramente orientado al estudio formal, el paralelismo y la hibridación, de entre las múltiples posibilidades al impartir tal curso. Nuestra elección está en clara sintonía con la línea de investigación que se realiza en la UMA, en el departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación donde se imparte.

Las relaciones internacionales influyen y son influidas por la actual oferta educativa. Normalmente, la invitación de investigadores nacionales o extranjeros de renombre permiten avanzar e innovar los conceptos y materiales que configuran el curso de la UMA. En concreto, en los últimos años varios investigadores han ofrecido interesantes conferencias en el ámbito del curso de doctorado o relacionado directamente con él:

- Multi-Objective EAs (by Carlos Coello).
- MOEA Applications (by Carlos Coello).
- Estimation of Distribution Algorithms (by Pedro Larrañaga).
- Natural Language and EAs (by Lourdes Araujo).
- Combinatorial Optimization and EAs (by Sami Khuri).

- Generalized Steiner Problems (by Sergio Nesmachnow).

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo hemos presentado los detalles relacionados con la impartición del curso de doctorado denominado “Algoritmos Evolutivos” en la Universidad de Málaga. Los contenidos de este curso promueven la necesidad del uso de herramientas modernas tales como presentaciones multimedia y uso de recursos en Internet para comprender los alcances de los contenidos. La novedad de las propias técnicas explicadas y sus aplicaciones requieren una continua revisión de contenidos anual para mejorar la formación de los alumnos que sólo es posible con el apoyo de las nuevas tecnologías.

La incidencia de la metodología absorbida por los alumnos en su trabajo es elevada, de manera que acaban con una buena preparación para el estudio y aplicación, tanto en teoría como en la práctica, de heurísticas variadas y su aplicación a problemas de dimensión real. Asimismo, se intenta potenciar la generación razonada de informes escritos y también material preciso y especializado para Internet, al ser conscientes de que en muchos ámbitos estas son dos deficiencias actuales de la investigación.

En el futuro el curso mejorará sus contenidos con nuevo material interactivo para resolución de problemas, y potenciará las relaciones con otros grupos y programas de doctorado a través de charlas invitadas de investigadores de calidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con el apoyo del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCYT) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante contrato TIC2002-04498-C05-02 (proyecto TRACER).

Asimismo, agradecemos el apoyo de la Red HEU TIC-2002-10886-E a la realización y difusión del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] T. Bäck, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz, Eds., *Handbook of Evolutionary Computation*, Oxford University Press, 1997.
- [2] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- [3] Kenneth A. De Jong, *Evolutionary Computation*, MIT Press, 2002.
- [4] A.E. Eiben and J.E. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*, Springer, 2003.