

## UN MODELO AUTOMATICO PARA EL DISEÑO DE PROGRAMAS DE CONTROL

MSc. Jaime Alberto Guzmán Luna, Ing. Jheison Urzola H

*Universidad Nacional de Colombia- Sede Medellín*  
*Miembros del Grupo de Investigación de Inteligencia Artificial*  
*jaguzman@unalmed.edu.co, jaurzola@tifon.unalmed.edu.co*

**Abstract:** En el presente artículo se presentan los diferentes enfoques en que se aplican los sistemas de planificación en la generación automática de programas de control para sistemas de manufactura y se ilustra la aplicación del planificador STRIPS en el desarrollo del prototipo de un sistema inteligente cuya función es producir la secuencia de operaciones de una máquina de mecanizado.

**Keywords:** Planificación de Inteligencia Artificial, planificador STRIPS, Sistemas de Manufactura, Programa de Control secuencial, Problemas de Mecanizado.

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales aspectos de las técnicas de planificación de inteligencia artificial (Allen et al., 1990, McDermott D. y Hendler, 1995, Nilsson N. J. 1980), es la fuerte semejanza entre los procesos de planificación y los de programación y entre el concepto de un plan y el de un algoritmo. Aunque existió un fuerte interés y varios trabajos se llevaron a cabo al inicio bajo el aspecto de la síntesis automática de programas (Green C., 1969, Manna Z. et al., 1995) muy pocos avances se han producido desde entonces. En este sentido, el dominio de los sistemas de manufactura se está convirtiendo en un área de creciente interés para los investigadores del campo de los sistemas de planificación de inteligencia artificial.

Este artículo estudia la aplicación de las técnicas de planificación de inteligencia artificial para la generación automática de programas de control secuencial en problemas de mecanizado y describe la aplicación del algoritmo STRIPS (Fikes, R. E. y Nilsson 1971) en la construcción de un prototipo de un sistema inteligente que genera de manera automática el programa de control para un sistema de mecanizado específico. En la siguiente sección se presenta la revisión de los diferentes enfoques en que se aplican las técnicas de planificación en los sistemas de manufactura. La sección 3 ilustra las características de un caso práctico en el dominio de un problema de mecanizado. La sección 4 presenta una breve descripción del planificador STRIPS en la implementación del sistema inteligente. La sección 5 ilustra la representación del problema de mecanizado como un problema de planificación.

La sección 6 detalla la implementación del prototipo del sistema inteligente. La sección 7 presenta los resultados de la evaluación del prototipo. La sección 8 presenta las conclusiones y recomendaciones.

## 2 LA GENERACION AUTOMÁTICA DE PROGRAMAS DE CONTROL

Uno de los aspectos más atractivos de las técnicas de planificación de IA es la gran similitud entre el proceso de construcción de un plan de acción y el proceso de construcción de un programa de computador, así como entre la representación del propio plan y la representación de un programa. La síntesis automática de programas en el dominio de los sistemas de manufacturación esta surgiendo como un área de creciente interés para los investigadores en planificación de IA. Un caso particular, es la obtención automática del programa de control que coordina el funcionamiento de un sistema de manufacturación.

Un sistema de manufactura (Bouttiette, et al. 1991, Fisher T. Bach 1990, ISA 1995) es un conjunto de procesos, maquinas y fabricas donde se manejan materias primas para transformarlas en productos manufacturados de mayor valor. Las transformaciones se llevan a cabo mediante los actuadores, unas máquinas que realizan una cierta función. Estas transformaciones deben estar coordinadas con el estado de la planta, recogido a través de sensores y las ordenes de un operador humano, recogidas a través de un panel de control. El diseño del programa de control secuencial que gobierna un sistema de manufactura es una tarea que tradicionalmente se ha llevado a cabo de forma manual por ingenieros de control. Esta elaboración manual del programa de control se ve afectada por los siguientes problemas:

- Este proceso es largo y complicado el cual consume mucho tiempo de ingeniería y que puede generar errores humanos en el programa.
- Este proceso se complica por la necesidad de adaptarse a la evolución del ciclo de vida del sistema de manufactura.

La aparición de nuevas técnicas de IA y la maduración de las técnicas ya existentes, esta permitiendo el establecimiento de iniciativas conjuntas con el objetivo de desarrollar soluciones innovadoras para la automatización progresiva de las

metodologías de construcción de los programas de control secuencial de forma que se puedan obtener de manera completamente autónoma por un computador, eliminando por completo cualquier intervención humana.

Aunque algunas de las aproximaciones se basan en técnicas generales basadas en el conocimiento ( Cai et al., 1992, Mizutani, et al., 1991), los aportes más importantes provienen de la utilización de técnicas de planificación de IA y, entre ellas, la disciplina más extendida es LA PLANIFICACIÓN DE PROCESOS.

La automatización del proceso de manufactura de partes discretas particularmente por procesos de mecanizado, como por ejemplo un tornillo o una tuerca, ha generado siempre un gran interés.

Un problema de mecanizado consiste en la construcción de un programa de control secuencial, es decir, una secuencia de operaciones de mecanizado que permitan obtener una pieza final procesada a partir de una pieza inicial en bruto. Algunos problemas se pueden resolver analíticamente mediante algoritmos basados en satisfacción de restricciones. Sin embargo, la mayor parte de estos problemas requieren la modelación e inclusión del conocimiento especializado disponible en este dominio particular y un proceso de razonamiento adecuado a este conocimiento. Es en este punto donde entran en juego las técnicas de planificación de inteligencia artificial.

Una de las primeras aproximaciones a la aplicación de técnicas de planificación en problemas de mecanizado es GARI (Descotte, Y., Latombe, 1981). Es un sistema que utiliza conocimiento experto sobre las operaciones de transformación conocidas y genera, de forma automática, un plan de mecanizado.

Posteriormente a este trabajo inicial, se han sucedido muchas aproximaciones a la planificación de procesos desde distintos puntos de vista tales como SIPP (Nau D.S. 1986) e IMACS (Nau D. Gupta, et al., 1995), basados en técnicas de planificación jerárquica de tareas HTN. TOLTEC (Tsatsoulis C. y Kashyap R.I. 1993), es un planificador basado en casos que elabora planes de mecanizado a partir de fragmentos de planes a distintos niveles de abstracción previamente almacenados en memoria.

### 3 UN CASO PRÁCTICO

Con el fin de evaluar en forma práctica la aplicación de las técnicas de planificación de IA para la generación automática de programas de control secuencial se desarrolló un prototipo de un sistema inteligente orientado a resolver un problema de mecanizado ficticio consistente en una máquina cuya función es hacer huecos sobre una materia prima. Sus características básicas son:

#### 3.1 La máquina de mecanizado

Consiste en un robot el cual realiza su movimiento en las tres dimensiones y está compuesto por los siguientes elementos: El Brazo, cuerpo de la máquina que permite el desplazamiento en el espacio de trabajo, la Mano, elemento terminal del robot que permite el agarre de la herramienta, el Rotor, elemento que permite la rotación de la Mano para realizar la tarea de hacer huecos (ver Fig. 1).

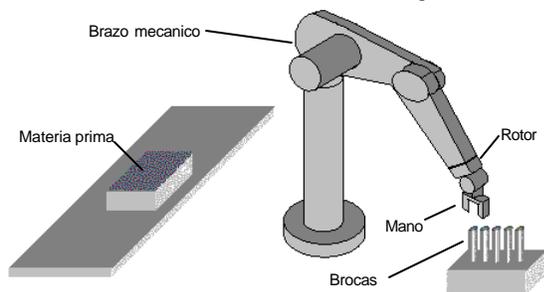


Fig. 1. Ejemplo del sistema de mecanizado.

#### 3.2 El conjunto de herramientas

Para realizar los huecos en la materia prima se utilizan brocas de diferentes tamaños. Estas brocas están colocadas en una localización determinada dentro de una caja de herramienta.

#### 3.3 El proceso de mecanizado

El proceso de mecanizado se lleva a cabo en una sola máquina regulada por un sistema de control secuencial, de forma que solo se puede hacer una acción a la vez. La máquina se dedica a la realización de huecos en una pieza proporcionada como materia prima convirtiéndola al final del proceso en un producto manufacturado de mayor valor.

### 4. EL PLANIFICADOR STRIPS

Producir la secuencia de operaciones de mecanizado mediante las técnicas de planificación de inteligencia artificial implica la necesidad de utilizar un planificador que represente las características del sistema de mecanizado (componentes y proceso) para obtener un plan de acciones que sea el esqueleto del programa de control. Para esto se seleccionó el planificador STRIPS por las siguientes razones:

- El modelo de planificación: Dado que el modelo de planificación del STRIPS implementa la planificación lineal se adapta al proceso de mecanizado propuesto en nuestro problema ya que es una sola máquina dotada de los accesorios necesarios para ello, y regulada por un sistema de control secuencial, de forma que esta máquina solo puede hacer un paso a la vez.
- El modelo de acción: Posee un modelo de acción muy sencillo, el cual es quizás el más utilizado en la mayoría de los planificadores.
- El algoritmo STRIPS: es uno de los más estudiados en la literatura académica de los sistemas de planificación, razones por las cuales facilitó su análisis y posterior adecuación al problema propuesto.

El planificador STRIPS, surge a principios de los 70. Está basado en la arquitectura de GPS (Newell A.y Simon H. A., 1963), un conocido resolutor de problemas de propósito general. En este se mantiene una representación basada en la lógica de predicados para los estados del mundo y considera representaciones ad-hoc para las acciones. Cada estado se representa mediante conjunciones de literales básicos. Su contribución técnica más importante se conoce como la representación de acciones de STRIPS. Esta representación y el algoritmo para modelar los efectos de una acción constituyen lo que podría denominarse la suposición de STRIPS, que consiste en que la ejecución de una acción que afecta únicamente a aquellos aspectos recogidos explícitamente en la descripción del operador.

En la representación de acciones de STRIPS, cada acción se describe a partir de tres componentes:

- Lista de precondición: es una lista de predicados que deben ser ciertos en un estado para que pueda aplicarse una acción.

- Lista de adición: es una lista de predicados nuevos que se hacen ciertos tras la aplicación de la acción.
- Lista de supresión: es una lista de predicados antiguos que dejan de ser ciertos tras la aplicación de la acción.

Esta representación de acciones tuvo gran acogida por los investigadores en planificación y fue usada como la base de la mayoría de las técnicas de planificación automática desde principios de los años 70 como ABSTRIPS (Sacerodotti D.E. 1974), NONLIN (Tte A., a 1977) ó TWEAK (Sacerdote E.D., 1975) hasta los años 90 como PRODIGY(Waldinger R. J. 1977).

El STRIPS es un planificador por regresión, es decir dada la descripción de un problema de planificación a partir de estados iniciales, estados objetivos y un conjunto de operaciones o acciones disponibles, el enfrenta su solución como un proceso de búsqueda en espacio de estados, comenzando por el estado meta hasta el estado inicial. Esta técnica que construye el plan al revés está basada en la regresión de objetivos a través de la descripción de una acción (Waldinger R. J. 1977).

**5. REPRESENTACION DEL PROBLEMA DE MECANIZADO COMO UN PROBLEMA DE PLANIFICACION**

Dado que el planificador STRIPS utiliza una descripción del mundo basada en estados y acciones y enfoca la planificación como un problema de búsqueda en este espacio de estados, es necesario representar el problema de mecanizado planteado bajo esta perspectiva.

El funcionamiento de cada uno de los componentes de la máquina de mecanizado, llamados también actuadores, se pueden describir mediante el uso del autómeta de estados finitos (Cai Y. y Sekiguchi T., 1990, Fisher T. Bach, 1990, Gruver W. A. 1993), donde los estados del autómeta describen todos los estados en que se puede encontrar el actuador y cada transición entre estados representa una acción del actuador (ver Fig. 2). Estos son las únicas entidades capaces de realizar transformaciones mediante sus acciones y las relaciones existentes entre ellos.

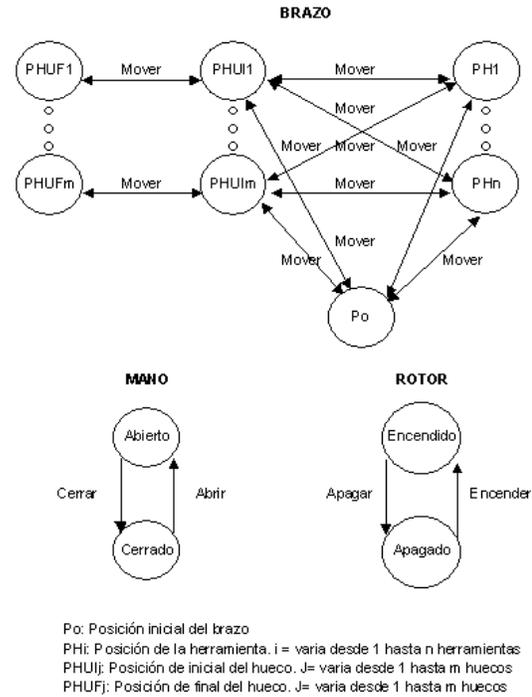


Fig 2. Estados y acciones de los componentes de la máquina

Cada herramienta puede ser vista como un elemento que cambia de estado como resultado de una acción del actor Mano como se muestra en la Fig. 3.

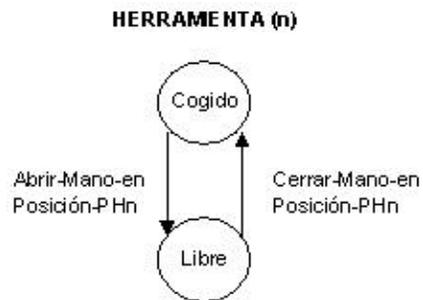


Fig 3. Comportamiento de una herramienta

Las descripciones de un problema de mecanizado en el sistema, consisten en una serie de transformaciones que deben realizarse sobre la materia prima para poder obtener el producto manufacturado. Estos procesos de transformación se representan mediante la secuencia de acciones a seguir por cada uno de los componentes de la máquina que permitan la realización de los diferentes

huecos que deberá tener el producto manufacturado. Esto es representado mediante el plan final que resulta al aplicar el planificador STRIPS para el caso específico del problema.

La representación del problema de mecanizado como un problema de planificación en el STRIPS se manejan como la unión de tres componentes: el estado inicial, el estado final y el modelo de acción.

El estado inicial es una conjunción de literales que representa un conjunto de hechos que son ciertos, inicialmente, en el sistema de mecanizado. Estos hechos hacen referencia al estado en que se encuentran los actuadores y al estado, características y situación en que se encuentra la materia prima y las herramientas al inicio del problema. En Fig. 4 se describe el estado inicial del problema.

Brazo	Mano	Herramienta X	Materia prima
Posición=(0,0,0)	Estado=abierto	Estado=Libre	Vacia

Fig. 4. Descripción del estado inicial del problema

El estado final del problema es una conjunción de literales que representa el conjunto de hechos que son ciertos luego de elaborar el producto manufacturado a partir de la materia prima presentada en el estado inicial mediante las acciones de los actuadores. En Fig. 5. se describe las condiciones del estado final para el proceso de la materia prima.

Brazo	Mano	Herramienta x	Materia prima
Posición=(0,0,0)	Estado=Abierto	Estado=Libre	Hueco1,... Hueco m

Fig. 5 Descripción del estado final del problema

El modelo de acción representa la descripción del conjunto operaciones de los actuadores en los diferentes estados del sistema de mecanizado que se utilizan para resolver el problema de manufactura.

Dado que en el STRIPS cada acción se describe a partir de los tres componentes: lista de precondition, lista de adición y lista de supresión el modelo de acción del problema se describe en la forma como se muestra en la Fig. 6.

<b>Actuador:</b>	<b>Mano</b>
<b>Regla:</b>	Cerrar-mano-posición (PHi)
<b>Lista Precondición:</b>	(mano-estado abierto), (brazo-posición PHi)
<b>Lista Adición:</b>	(mano-estado cerrado), (herramienta-cogida Hi)
<b>Lista supresión:</b>	(mano-estado abierto), (herramienta-cogida ninguna)
<b>Actuador:</b>	<b>Mano</b>
<b>Regla:</b>	Abriir-mano-posición (PHi)
<b>Lista Precondición :</b>	(mano-estado cerrado), (brazo-posición PHi)
<b>Lista Adición:</b>	(mano-estado abierto), (herramienta-cogida ninguna)
<b>Lista supresión:</b>	(mano-estado cerrado), (herramienta-cogida Hi)
<b>Actuador:</b>	<b>Brazo</b>
<b>Regla:</b>	Mover-Brazo(P1,P2)
<b>Lista Precondición :</b>	(brazo-posición P1)
<b>Lista Adición:</b>	(brazo-posición P2)
<b>Lista supresión:</b>	(brazo-posición P1)
<b>Actuador:</b>	<b>Brazo</b>
<b>Regla:</b>	Hacer-Hueco(P1,P2,Hj)
<b>Lista Precondición:</b>	(brazo-posición P1), (mano-estado cerrado)
<b>Lista Adición:</b>	(hueco-hecho HUi)

Fig. 6. Modelo de acción del problema de mecanizado

En la descripción del problema con el STRIPS, un hueco se representa como la secuencia de movimientos de los componentes de la máquina (ver Fig. 7). Por lo tanto en nuestro sistema, un hueco es la acción de incluir en la lista del plan de la máquina la secuencia indicada anteriormente.

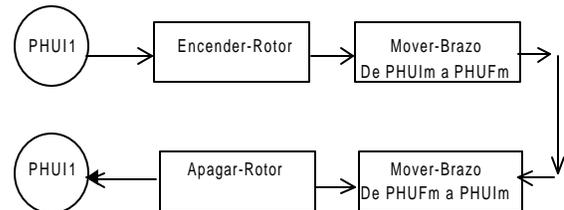


Fig. 7. Un hueco como secuencia de acciones

## 6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA INTELIGENTE

La implementación del sistema inteligente se basa en las técnicas de orientación a objetos tomando como punto de entrada los planteamientos del problema expuestos en la sección anterior. Esta fue hecha en JAVA versión 1.4.1. Dada su fortaleza para el desarrollo de programas orientados a objetos su implementación fue mucho más sencilla que la hecha en el ambiente de programación anterior.

### 6.1 Arquitectura

El sistema está compuesto por un único módulo que se compone de los elementos interfaz de usuario, el sistema de planificación y el mecanismo de almacenamiento de la secuencia de control y la especificación del problema (ver Fig. 8).

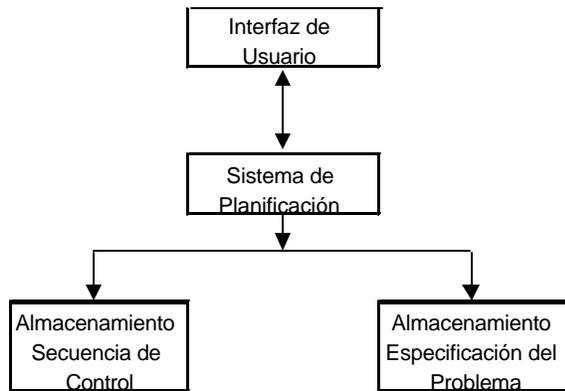


Fig. 8. Arquitectura del sistema

La interfaz de usuario permite la interacción del sistema con el usuario para:

- Organizar la entrada de los datos del problema de acuerdo a la forma de representar un problema el STRIPS.
- Mostrar la salida de los datos del problema mostrando la secuencia de control que deberá seguir el sistema de mecanizado.

El sistema de planificación contiene el modelo lógico del sistema de manufactura basado en el STRIPS y permite crear la secuencia de control para el proceso de mecanizado.

El sistema posee un mecanismo de almacenamiento en forma de archivos para guardar la especificación del problema y la secuencia de control (el plan).

### 6.2 Definición de las clases del sistema

El sistema inteligente está compuesto básicamente por las siguientes clases:

- La clase problema: Provee la descripción básica de un problema de planificación que puede plantearse al STRIPS. En esta se describe: el estado inicial del problema (atributo estadoProblema), el estado final (atributo objetivos) e implementa el algoritmo STRIPS mediante los diferentes métodos que posee.

- La clase regla: Las reglas que permiten al planificador construir un plan son instancias de esta clase. Describe las siguientes características de una regla: Nombre de la acción (atributo acción), la lista de precondiciones (atributo precondiciones), la lista de adición (atributo listaAdicionar) y la lista de supresión (atributo listaBorrar).
- La clase DatosAdicProgAutoControl: Permite adicionar los datos necesarios para conformar la secuencia de control. En nuestro caso se emplea para generar la secuencia de acciones que representan un hueco.
- La clase SubProbProgramasControl: Permite personalizar los mensajes que saldrán cada vez que se ejecute una regla.

La clase GeneracionProgramasIU: Genera la interfaz gráfica del sistema y permite especificar un problema en el dominio de hacer huecos para una materia prima.

## 7. EVALUACION DEL SISTEMA

Para el problema de mecanizado propuesto, el prototipo se ensayo variando la cantidad de huecos a realizar para un mismo número de herramientas (5). Los resultados se presentan en la tabla 1, donde se muestra el número de huecos que se hicieron en la materia prima, el número de pasos que componen la secuencia de control que realizará la máquina y el tiempo que se gastó el prototipo en calcularla.

De estos resultados se deduce que el prototipo obtiene la secuencia de control en un tiempo mucho menor del necesario para elaborarlo a mano, consiguiendo un considerable ahorro de tiempo de ingeniería.

Tabla1. Resultados de la solución del problema

Huecos (unidades)	Pasos (unidades)	Tiempo (segundos)
10	80	0.8
15	104	1
20	116	1.5
25	129	1.2
30	152	1.2
35	175	1.5
40	198	1.5
50	250	2

## 8. CONCLUSIONES

Este trabajo ha sido motivado por la necesidad de buscar nuevas técnicas de apoyo a la creación de programas de control para sistemas de mecanizado, que permita un proceso de construcción libre de errores, rápido y de bajo costo para tales programas. La construcción del sistema inteligente mostrado en este trabajo, no ha permitido ver que las técnicas de planificación representan la generación automática de programas de control para sistemas de mecanizado. Aunque el sistema aún es un prototipo, se encontró que utilizar técnicas de planificación (el STRIPS) ayuda a la estructuración del problema mediante su mecanismo de representación y permite la generación automática de la secuencia de operaciones mediante su componente de búsqueda logrando un ahorro importante de tiempo de ingeniería.

Este trabajo es el punto de partida a trabajos futuros, como es el desarrollo de un modelo genérico basado en técnicas de planificación que permita modelar un problema de manufactura general para crear de forma automática su respectivo programa de control. En esta dirección es necesario estudiar diferentes técnicas de planificación que permitan una mayor expresividad que la ofrecida por el algoritmo STRIPS con el fin de extender el dominio de aplicación del modelo a construir.

## REFERENCIAS

- [1]. Allen J. F. Hendler, J. y Tate, A. (1990) Readings in Planning, Morgan Kaufmann.
- [2]. Boutteille, D., Bouteille, N., Chantreuil, S., Collot, R., Frachet, J. Gras, H. L., Merlaud, C., Selosse, J. Y Starf, A., (1991), Los automatismos programables, Telemecánica Eléctrica Española.
- [3]. Cai, Y., Martins-Shih, H. y Sekiguchi, T., (1992) "Acquisition of knowledge in sequential control systems", en IEEE Intern. symp. on industrial electronic, págs. 300–303.
- [4]. Cai, Y. y Sekiguchi, T., (1990) "Petri-net-based representation and acquisition of knowledge in sequential control systems", en IEEE conference on industrial electronics, págs. 1293–1297.
- [5]. Descotte, Y. y Latombe, J., (1981), "GARI: A problem solver that plans how to machine mechanical parts", en IJCAI 1981, págs. 766–772.
- [6]. Fikes, R. E. y Nilsson, N. J., (1971), "STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving", Artificial Intelligence, tomo 2, págs. 189–208.
- [7]. Fisher, T., Batch (1990), control systems: Design, application and implementation, Instrument Society of America (ISA).
- [8]. Green, C., (1969), "Application of theorem proving to problem solving", en IJCAI, págs. 741–747.
- [9]. Gruver, W. A. y Boudreaux, J. C., (1993), Intelligent manufacturing: programming environments for CIM, Springer-Verlag, London.
- [10]. Instrument Society of America (ISA), Batch control, (1995), Part 1: models and terminology (SP88).
- [11]. Manna, Z. y Waldinger, R. J., (1975), "Knowledge and reasoning in program synthesis" Artificial Intelligence, tomo 6, págs. 175–208.
- [12]. McDermott, D. y Hendler, J., (1995), "Planning: what is, what it could be, an introduction to the special issue on planning and scheduling", Artificial Intelligence, tomo 76, págs. 1–16.
- [13]. Mizutani, H., Nakayama, Y., Ito, S., Namioka, Y. y Matsudaira, T., (1991), "Automatic programming for sequence control", en Innovative applications of artificial intelligence, A. C. Scoot y P. Kahr, eds., págs. 315–331, AAAI Press.
- [14]. Nau, D., Gupta, S. K. y Regli, W. C., (1995), "AI planning versus manufacturing-operation planning: A case study", en IJCAI95, págs. 1670–1676.
- [15]. Nau, D. S., (1986) "Hierarchical representation of problem solving knowledge in a frame-based process planning system", International Journal of Intelligent Systems, tomo 1, págs. 29–44.
- [16]. Newell, A. y Simon, H. A., (1963), "GPS: a program that simulates human thought", en Computers and thought, E. A. Feigenbaum y J. Feldman, eds., R. Oldenburg KG.
- [17]. Nilsson, N. J., (1980), Principles of Artificial Intelligence, Tioga Publishing.
- [18]. Sacerdoti, D. E., (1974), "Planning in a hierarchy of abstraction spaces", Artificial Intelligence, tomo 5, págs. 115–135.
- [19]. Sacerdoti, E. D., (1975), "The nonlinear nature of plans", en IJCAI 1975, págs. 206–214.
- [20]. Tate, A., (1977) "Generating project networks", en IJCAI 1977, págs. 888–893.
- [21]. Tsatsoulis, C. y Kashyap, R. L., (1993), "Casebased reasoning and learning in manufacturing with the TOLTEC planner", IEEE Transactions on Systems, Man a Cybernetics, tomo 23, págs. 1010–1023.
- [22]. Veloso, M., Carbonell, J., Pérez, A., Borrajo, D., Fink, E. y Blythe, J., (1995), "Integrating planning and learning: The PRODIGY architecture", Journal of Experimental and Theoretical Artificial intelligence, tomo 1, n o 7.
- [23]. Waldinger, R. J. (1977), "Archived several goals simultaneously", Machine Intelligence, tomo 8.