

**Diseño  
mecatrónico,  
un curso de  
aplicación  
de nuevas  
tecnologías**

---

PAOLA A. NIÑO S.\*

### **Resumen**

En este artículo presentaremos una propuesta para la enseñanza en ingeniería, nacida de la experiencia vivida al dictar la asignatura Diseño Mecatrónico de octavo semestre del programa de pregrado de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada de la ciudad de Bogotá en Colombia. Se relatará cómo se desarrolla dicha asignatura, tomando como base el diseño e implementación de un prototipo mecatrónico, apoyados en nuevas tecnologías como lo son el CAD (diseño asistido por el computador), el CAM (manufactura asistida por el computador), la simulación de circuitos electrónicos, la verificación de funcionamiento mediante modelos matemáticos computacionales, la generación de sistemas de control por software mediante lenguajes avanzados de programación y la utilización de sistemas de consulta como Internet o las bibliotecas virtuales para recibir apoyo bibliográfico. Luego se plantean algunas recomendaciones para el desarrollo del proceso enseñanza-aprendizaje en

ingeniería, nacidas de la experiencia obtenida al aplicarlas en el desarrollo de nuestras asignaturas.

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería mecatrónica se define como la integración sinérgica de la ingeniería mecánica con la ingeniería electrónica, con la ingeniería de software y el control inteligente por computador, en el diseño y fabricación de productos y procesos industriales.

Como resultado de esta integración e interrelación nacen nuevos conceptos y tecnologías con el fin de propiciar la optimización de un producto o proceso industrial; al combinar y potenciar las ingenierías se hace necesario para su enseñanza el apoyo en cada asignatura de tecnologías nuevas, pues de eso depende que el estudiante esté a la vanguardia del desarrollo de los sistemas que la ingeniería mecatrónica integra.

La asignatura de diseño mecatrónico está orientada a definir un proceso para la generación de un producto, de forma tal que se aproveche el desarrollo rápido de la electrónica y el software, para acelerar el desarrollo de soluciones tradicionalmente mecánicas que respondan ágilmente a los cambios en el mercado, haciendo su uso amigable al usuario. En definitiva se quiere que el estudiante conozca y practique las técnicas más apropiadas para diseñar sistemas sencillos, eficientes y precisos, con capacidad de decisión

## ANTECEDENTES

En octavo semestre de ingeniería mecatrónica de la Universidad Militar Nueva Granada los estudiantes cursan una asignatura titulada *Diseño Mecatrónico*, la cual está orientada al desarrollo de técnicas, modelos y procesos de diseño, pero especialmente enfocados a un tipo de sistemas

muy concreto como lo son los sistemas mecatrónicos. Un sistema mecatrónico se define como un sistema compuesto de partes mecánicas, eléctricas y electrónicas, dotadas de sensores que registran la información, microprocesadores que la interpretan, la procesan y la analizan y partes que reaccionan a esta información.

Para el desarrollo de la asignatura se consideró que una buena metodología de trabajo era tener como objetivo final el diseño, construcción y puesta en marcha de un *robot* de configuración SCARA de tres grados de libertad, un excelente representante de lo que se denomina un Sistema Mecatrónico, y en torno a este proceso desarrollar los temas proyectados en la asignatura.

Para lograr este objetivo era necesario apoyarnos en todas las herramientas de nueva tecnología que la universidad poseía, de tal manera que el estudiante entendiera para qué estaban y cuál era su verdadera utilidad en procesos reales de diseño y ejecución de proyectos.

Para el desarrollo de esta asignatura, el estudiante cuenta con cursos previos de formación básica en ingeniería (matemáticas, física, diseño gráfico, procesos de mecanizado) en mecánica (materiales, estática, dinámica, mecánica de fluidos), en electrónica (circuitos, electrónica analógica, electrónica digital, microprocesadores), en programación avanzada (fundamentos de programación, estructuras de datos, programación orientada a objetos) en control (sistemas dinámicos, control analógico, control digital, robótica), conoce los fundamentos del diseño, a través de Introducción al Diseño una asignatura donde se determinan cuáles son los principios de la presentación y desarrollo de un proyecto.

## ANÁLISIS

El curso se inició con una descripción de las características específicas en el diseño mecatrónico:

- Eficiencia
- Precisión
- Estabilidad
- Alto rendimiento
- Inteligencia
- Flexibilidad
- Alta confiabilidad

De esta manera se concienció al estudiante de la importancia de integrar en ese momento los conocimientos adquiridos en otras asignaturas y el manejo que poseían en algunos programas de modelamiento, de simulación, de matemática y de programación, además de su entrenamiento en el uso de la Internet y la biblioteca virtual.

Luego de planteado el objetivo final del curso, la primera labor por realizar fue identificar cuáles eran las características del sistema por prototipo por diseñar. Para el desarrollo de esta primera fase fue necesario consultar a través de la Internet y la Biblioteca Virtual cuáles eran las características más relevantes de su diseño y si existían algunas experiencias en otras universidades con respecto a este tipo de proyectos.

Los resultados obtenidos de dicha consulta arrojaron datos como que el manipulador SCARA (*Selective Compliant Articulated Robot for Assembly*) es una configuración muy popular y relativamente reciente que, como su nombre lo indica, está diseñado para operaciones de ensamble. Los ejes de las dos primeras articulaciones de revolución son verticales, haciendo que los eslabones se muevan en un plano horizontal, mientras que el eslabón 3 se mueve según un eje vertical. En esta configuración las fuerzas gravitatorias, centrífugas y de Coriolis no cargan la estructura en la medida que ocurre en las demás configuraciones, como se observa en la figura 1.

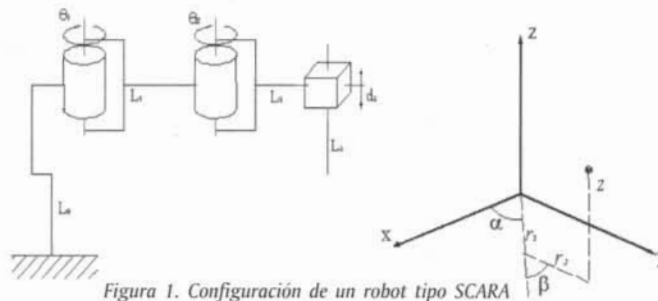


Figura 1. Configuración de un robot tipo SCARA

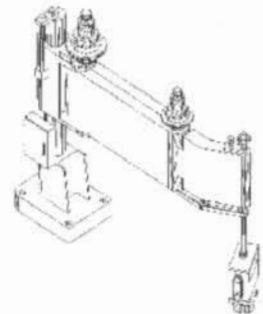
Luego de la selección del tipo de robot, se procedió a realizar el análisis cinemático del manipulador, el cual consiste en describir analíticamente el desplazamiento espacial de los componentes de la estructura mecánica con respecto a un sistema de coordenadas fijo ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) en función del tiempo, sin considerar las fuerzas o torques que originan dicho movimiento.

Para asignar los parámetros del manipulador se hace una relación transnacional o rotacional de los elementos adyacentes; esta representación se llama de "Denavith-Hartenberg", la cual es usada como convención para desarrollar la cinemática del manipulador. Se tiene en cuenta, entonces, el esquema de la figura 2.

A partir de los parámetros estructurales del robot, (ángulo de desplazamiento del brazo, ángulo de desplazamiento del antebrazo, distancia entre los ejes coordenados y distancia de desplazamiento de la pieza donde está la muñeca) para expresar las diferentes rotaciones y translaciones que se hacen en las articulaciones se utilizan matrices de transformación homogéneas (en rotación y translación) para sistemas coordenados adyacentes y con articulaciones de rotación, teniendo como base la ecuación de transformación homogénea:

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

se obtienen las ecuaciones cinemáticas del robot de la siguiente forma:



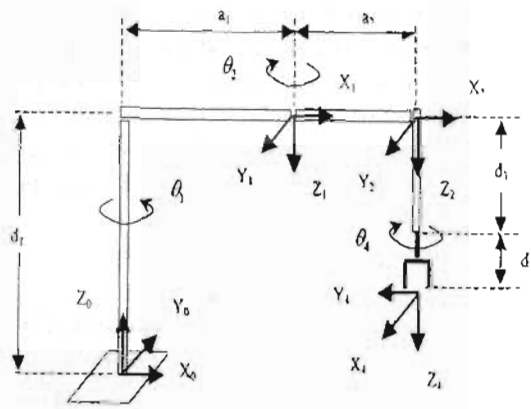


Figura 2. Representación de un robot tipo SCARA

$$T_0^n = T_0^1 T_1^2 \dots T_{n-1}^n$$

donde  $n$  es el número de grados de libertad, para nuestro caso  $n=3$ .

De la cinemática directa se obtiene para cada articulación una matriz que define su movimiento.

Para la cinemática inversa, el estudio consiste en la determinación de las variables de las articulaciones correspondientes para obtener la posición y orientación del efector final; la cinemática inversa puede conllevar a solucionar ecuaciones que por lo general son no lineales y para las cuales no siempre es posible encontrar la solución de forma cerrada, es decir que múltiples soluciones pueden existir; varios métodos pueden ser usados para encontrar la solución, Transformada Inversa, Álgebra de Tornillo, Matrices Duales, Cuaternios Duales, Método Geométrico.

Y, por último, el análisis dinámico del robot permite verificar su comportamiento mediante análisis de fuerzas cuando esté en movimiento, parte de la ecuación fundamental de la física de *Lagrange-Euler* y de las relaciones matemáticas asociadas.

Como se puede observar, dada la complejidad de las soluciones para la cinemática directa, la cinemática inversa y para las ecuaciones dinámicas

del robot se hace necesario la implementación de un programa en un software especializado para análisis matemático, con el fin de obtener dichas soluciones de una manera rápida y eficaz. Por lo cual los estudiantes, aplicando los conocimientos obtenidos en su curso de robótica implementaron varios programas en *MatLab* para determinar la cinemática directa, inversa y el modelo dinámico del robot, lo cual permitió reducir el tiempo de estimación de parámetros y así no detenernos ante la complejidad de los cálculos por realizar, además de lograr la proyección de los movimientos del robot en cuanto a posición, velocidad y aceleración sin siquiera haberlo construido, como se observa en la simulación de la figura 3.

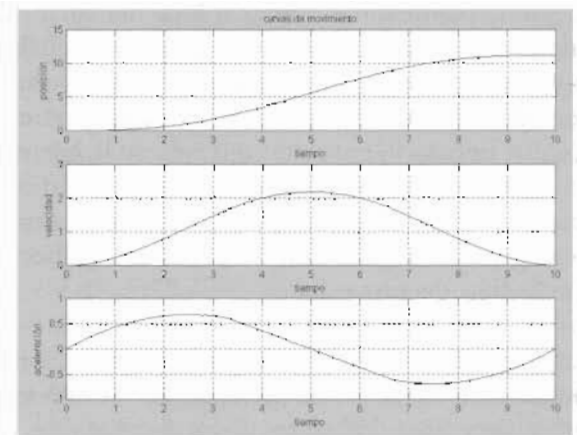


Figura 3. Simulación de los parámetros de movimiento

Definidas la cinemática directa e inversa y la dinámica del robot, se determinaron sus dimensiones y formas en una primera aproximación. Para el siguiente paso, la realización del diseño mecánico, era necesario modelar las piezas con las relaciones de distancias ya obtenidas y generar los planos para su construcción. Aprovechando las ventajas que la tecnología ofrece, para este proceso decidimos apoyarnos en el CAD, Diseño Asistido por Computador, utilizando el software *Solid Edge* con el cual se cuenta en la sala de Diseño Gráfico de la facultad, los estudiantes aprendieron el manejo de este software en su módulo fundamental de modelamiento y generación de planos en primer semestre, en una

asignatura denominada Diseño Gráfico. Y a través de las asignaturas de diseño se les muestran todas las capacidades del software y las herramientas que les proveen de soluciones rápidas y confiables para resolver ciertas situaciones de ingeniería que involucran además del modelamiento de las piezas, la verificación del ensamble de éstas y análisis de tolerancias. Luego, con la selección del material y las dimensiones se pueden generar los cálculos de masa, encontrar los momentos de inercias, las diferentes fuerzas que soportará cada pieza, y al realizar el ensamble final se pueden determinar y verificar los cálculos realizados manualmente.

Este proceso de diseño asistido por computador le permite al alumno estar seguro de las dimensiones de cada una de las piezas, ver en detalle todos los ensambles, de tal forma que si se hubiera generado el diseño sólo con el método tradicional, el proceso no tendría verificación sino luego de realizadas las piezas, por tanto habría que generar nuevas piezas y realizar muchos ensayos hasta obtener el diseño final, además con la ayuda del CAD se obtienen los planos directos de cada pieza, como se observa en la Figura 4, lo cual esto no implica que el estudiante no deba manejar las reglas de dibujo técnico, es sólo que este tipo de herramientas brinda la oportunidad de realizar mayor cantidad de planos de piezas en menor tiempo.

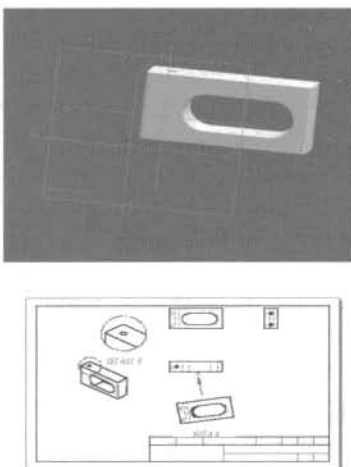


Figura 4. Modelo de las piezas obtenidas por CAD

Con los resultados obtenidos en la primera etapa de diseño mecánico, se procedió a realizar la selección del tipo de actuadores por utilizar, se seleccionaron como actuadores motores de paso, los cuales debían tener unas características específicas determinadas por el diseño mecánico y dado que en el país es muy difícil conseguir la información directamente de los catálogos, fue necesario recurrir de nuevo a la Internet como fuente de información y medio de contacto con los proveedores y fabricantes de dichos motores, pues era necesario conocer datos exactos de cada motor, tales como: su torque sostenido, inercia del rotor y peso para poder continuar con el proceso de revisión del diseño mecánico y determinar los verdaderos valores inerciales que se necesitaban y cuáles serían las relaciones de transmisión de fuerzas por utilizar; de no existir la posibilidad de realizar este tipo de consultas por un medio como la Internet, la consecución de las especificaciones precisas de los motores hubiera sido muy demorada y la adquisición, un proceso más complejo.

Luego de haber determinado todos los parámetros, las dimensiones, formas y tipos de material de cada pieza, se procedió a la fabricación de ellas, estas se realizaron, algunas de forma manual en los talleres de diseño mecánico de la universidad y otras con la ayuda de máquinas de control numérico (Torno de CN) y del centro de maquinado (CNC) del SENA una entidad del Estado con la cual se tiene un convenio que nos permite utilizar sus instalaciones; de esta manera en la fabricación de las piezas nos apoyamos en otra nueva tecnología, CAM, (manufactura asistida por computador); la idea era generar a través de programas de control numérico el maquinado de las piezas. Los estudiantes ya tenían conocimiento de esta nueva tecnología por su asignatura anterior Introducción al Diseño, pero aún no habían realizado la práctica de generar una pieza, desde la creación del programa hasta su implementación en el CNC, como se observa en la figura 5.



Figura 5. Fabricación de pieza en un CNC

Al tiempo que se maquinaban las diferentes piezas del robot, se comenzó con el diseño del sistema electrónico del robot, el cual incluía:

- El sistema de potencia
- El sistema de alimentación
- El sistema de control
- El sistema de transmisión de datos al ordenador

Para realizar cada uno de estos módulos, los estudiantes se apoyaron en los diferentes programas de simulación y diseño que habían manejado durante sus asignaturas de electrónica y de control.

Todos los circuitos fueron diseñados con los métodos convencionales de diseño electrónico pero verificados mediante programas de simulación electrónica como el *Electronic WorkBench* antes de ser implementados. La ventaja que ofrecen hoy en día estos paquetes de simulación electrónica es la capacidad de utilizar componentes con características de funcionamiento iguales a las reales, de tal forma que el estudiante puede implementar en el software el mismo circuito con diferentes componentes y determinar qué cambios ocurren en la respuesta de éste al cambiar el tipo de componente utilizado o al cambiar el valor nominal, así, la simulación le entrega resultados muy cercanos al valor real y es un proceso ideal de enseñanza cuando el estudiante no sabe qué resultado debe esperar de un sistema o para ampliar y

verificar lo que su profesor le dice teóricamente en un salón de clase, sin necesidad de implementarlo en un laboratorio. Esto no quiere decir que la parte práctica no debe realizarse, por supuesto que sí, lo que indica es que el estudiante perderá menos tiempo si ya tiene una idea del sistema por implementar y de cómo funciona éste.

El sistema de potencia y el sistema de alimentación se implementaron luego de su correspondiente simulación y adecuación de componentes, sin presentarse mayores inconvenientes (figura 6).

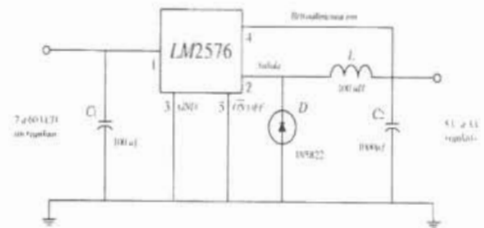
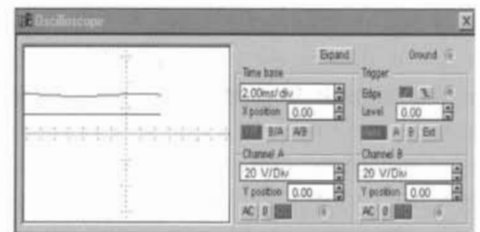


Figura 6. Simulación de los circuitos electrónicos

El diseño del sistema de control y de transmisión de datos al ordenador partió del principio de funcionamiento de los motores paso a paso que se iban a utilizar, los cuales deben manejarse a través de una secuencia de pulsos digitales, por lo cual era necesario diseñar un sistema lógico que generara estos pulsos y que de acuerdo con las órdenes recibidas por el ordenador modificara la frecuencia, duración y sentido de giro del motor. La otra función del sistema era la de transmitir las variables capturadas por unos sensores de límite, ubicados en el cuerpo del robot al computador y de enviar las órdenes de activación a los motores generadas desde el computador.

El primer paso fue el diseo tradicional del sistema, partiendo de procesos de mquinas de estado y determinando las secuencias que se deban generar, se simulon los sistemas diseados con elementos reales y se verific la lgica de trabajo.

Dado que eran tres motores para controlar, se requeran tres circuitos idnticos de lgica digital, es decir, de tres pequeas tarjetas, debido a la cantidad de componentes, al costo, al tiempo que se deba dedicar al diseo de las tarjetas y a su implementacin, se decidi explorar otras opciones de diseo e implementacin que la microelectrnica nos ofrece como son los PLD, dispositivos lgicos programables. Un dispositivo lgico programable reemplazara varios integrados por uno slo, de tal forma que se manejar a slo una tarjeta para controlar todos los motores y la implementacin sera menos compleja, pues a travs del software de diseo XILINX utilizando lo que se denomina *Programacin de Hardware*, herramienta que los estudiantes ya manejaban en sus cursos de electrnica digital, se transcribira el diseo ya realizado con componentes discretos a un FPGA que cumpliera exactamente con las mismas funciones. En este caso la transmisin y recepcin de datos al ordenador, se realizara a travs del puerto paralelo (figura 7).

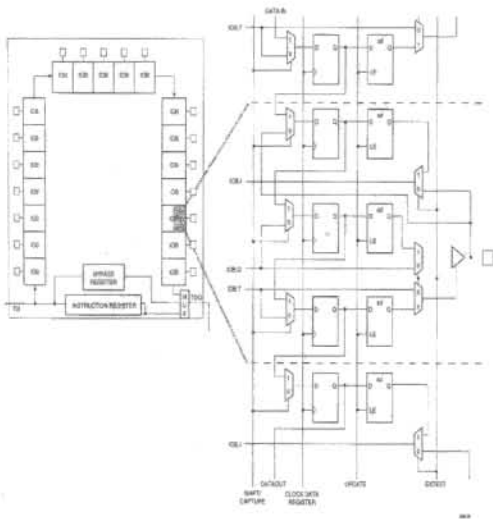


Figura 7. Diseo del sistema de control con FPGA

Otra opcin que se evaluó fue trabajar con dispositivos PIC, que los estudiantes conocan y manejaban gracias a sus cursos de microprocesadores, cuya adecuacin no se realiza ya por Programacin de Hardware sino por Programacin de Software, a travs de un lenguaje de tipo ensamblador con instrucciones propias de cada familia de PIC y con ayuda de un software de desarrollo denominado MPLAB se realiza la programacin y simulacin del funcionamiento del PIC, ofreciendo las mismas ventajas en costo y reduccin en espacio y tiempo con respecto a la utilizacin de los FPGAs.

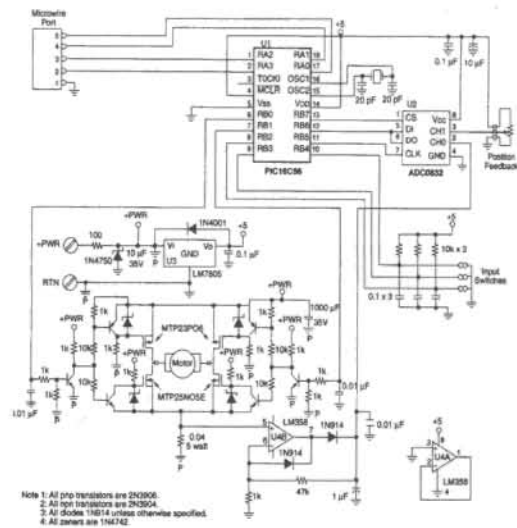


Figura 8. Diseo del sistema de control con PIC

La nica diferencia es que en este caso era ms fcil la realizacin de la transmisin de las seales de control por el puerto serial (figura 8).

Dado que eran dos grupos los que realizaban el trabajo, se defini que cada grupo desarrollara una opcin. Terminado el diseo de los circuitos, con el mismo software de simulacin electrnica, *Electronic WorkBench*, se realizaron los layouts de las tarjetas para mandarlas a fabricar, pues infortunadamente a n no contamos con un sistema de fabricacin de circuitos impresos (figura 9).

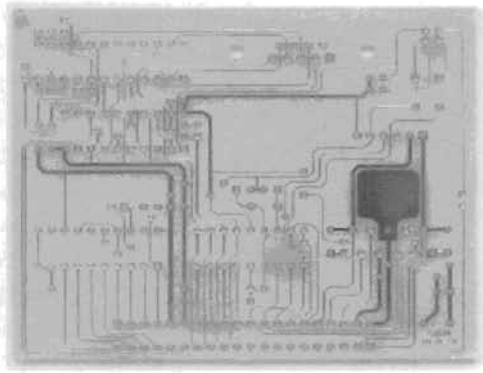


Figura 9. Layout de una tarjeta impresa

La última fase del diseño fue el desarrollo del programa que genera las trayectorias por seguir por el robot y las transmite al circuito de control para sincronizar los movimientos de los diferentes motores, además de verificar que el robot no se chocará contra su propio cuerpo. Dado que los estudiantes tenían un amplio dominio del lenguaje de programación *Turbo C++*, adquirido en sus cursos de programación, se desarrolló en dicho lenguaje el programa de planeación de trayectorias, utilizando los resultados obtenidos de los cálculos matemáticos realizados en Matlab y la

generación de una interfaz gráfica que le permitía al usuario poner en funcionamiento al robot escribiendo los ángulos y los desplazamientos deseados, además de conocer en qué posición con respecto al origen se encuentra el manipulador en un momento determinado (Figura 10).

Como una manera de dar a conocer el desarrollo del Robot se propuso la elaboración de una página Web, que se instalará en la página del programa de Ingeniería Mecatrónica, donde los estudiantes compartieran su experiencia con los demás miembros de la comunidad universitaria, una muestra clara de que la tecnología también sirve para mostrar los resultados obtenidos de un proyecto en ingeniería.

## RECOMENDACIONES

Dada la grata experiencia obtenida con este tipo de metodología y demostrando lo importante que fue la preparación previa de los estudiantes en el manejo de las herramientas que las nuevas

tecnologías nos ofrecen, preparación obtenida en las asignaturas cursadas en el transcurso de su carrera, proponemos las siguientes recomendaciones, buscando fortalecer la preparación de los estudiantes de ingeniería por medio de la utilización de las nuevas tecnologías de información y siendo plenamente conscientes de que en

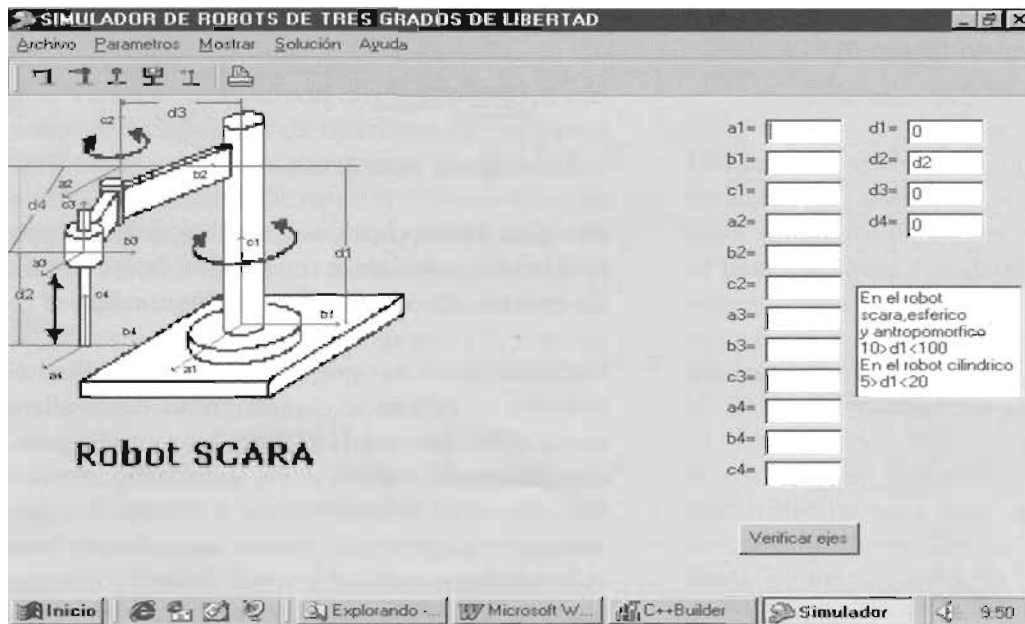


Figura 10. Interfaz gráfica del software de control y simulación del robot.



el proceso de enseñanza-aprendizaje en ingeniería, es indispensable una renovación en las metodologías utilizadas, y la generación de nuevos planteamientos en la enseñanza de manera que ésta se oriente a lograr una apropiación por parte de los estudiantes de las herramientas que la tecnología brinda hoy en día para su futuro desarrollo profesional.

- Integrar de manera definitiva los cursos de ciencias básicas, matemáticas y físicas a los procesos reales de desarrollo en la línea de ingeniería en la cual se esté desarrollando el estudiante. Estas asignaturas deben contemplar entre el desarrollo de sus ejemplos y ejercicios, elementos prácticos reales que el estudiante vaya a aplicar a lo largo de su carrera y del desarrollo de su profesión, además debe vincularse en los cursos de matemática el manejo de algún programa de lenguaje matemático avanzado, que permita al estudiante realizar y entender cálculos complejos, de tal forma que estas asignaturas tengan como objetivo brindar las herramientas básicas para el desempeño del futuro ingeniero.
- Introducir en los primeros semestres, asignaturas que incluyan dentro de su temática la enseñanza y el empleo adecuado de los nuevos instrumentos tecnológicos para la adquisición de información originados de la Internet y todas sus herramientas, como son la navegación por la red, el uso de buscadores para información específica, el diseño de páginas WEB, la consulta a bibliotecas y hemerotecas virtuales, la participación en Chats de carácter académico y cultural, entre otras.
- Introducir dentro de los primeros semestres asignaturas orientadas a que el estudiante domine un lenguaje de programación que utilizará como una herramienta más en el desarrollo de las diversas asignaturas de las áreas de ingeniería básica e ingeniería aplicada. De la misma manera y de

acuerdo con las necesidades específicas de cada ingeniería, es conveniente que el estudiante maneje, aparte del dibujo técnico, algún software para modelamiento en 3D o de tipo CAD, que también aprovechará como una herramienta para su desempeño futuro.

- Reestructurar los programas de las asignaturas de las áreas de ingeniería básica, de manera que cada una se apoye para su desarrollo en el manejo de un software específico, que permita ampliar los conocimientos adquiridos teóricamente por el estudiante mediante procesos de simulación y de diseño asistido por computador, o que se apoye en herramientas de trabajo que los estudiantes desarrollen por medio de un lenguaje de programación que previamente haya sido enseñado.
- En las asignaturas de las áreas de ingeniería aplicada, es conveniente orientar su enseñanza utilizando como metodología el planteamiento de un problema real y solucionarlo de tal manera que el estudiante se vea abocado a utilizar todas las herramientas que la tecnología pone a su disposición y que han sido aprehendidas previamente en los cursos básicos.
- Adelantar permanentemente programas de capacitación para los docentes en las diferentes áreas de formación tecnológica y científica, de tal manera que los conceptos y herramientas transmitidas a sus estudiantes estén relacionados con la tecnología de punta, además procurar su entrenamiento en el manejo de los programas y recursos de las nuevas tecnologías informáticas que las universidades vayan adquiriendo.
- Realizar una revisión y un estudio detallado que determine cuáles herramientas de apoyo tanto en software como en hardware debe poseer la universidad para desarrollar adecuadamente las asignaturas que ameriten la utilización de las nuevas tecnologías en la educación.

## CONCLUSIONES

- Para lograr que los procesos enseñanza-aprendizaje en los programas de ingeniería se renueven de tal manera que se exploten las herramientas que las nuevas tecnologías brindan, se necesita el apoyo decidido de la institución y de las correspondientes facultades para lograr que las herramientas que el estudiante necesita estén a su alcance y pueda usarlas, apoyo que se debe ver reflejado en la adquisición de sistemas y software actualizados, lo mismo que facilidades de acceso a la Internet tanto para estudiantes como para docentes.
- La iniciativa de cambiar los métodos tradicionales de enseñanza y apoyarse en las nuevas tecnologías para mejorar sus clases y afianzar el conocimiento de sus alumnos se da en el docente si esta motivado y preparado para hacerlo, por lo cual es responsabilidad de la institución ofrecer a sus maestros las posibilidades de capacitarse en el uso de las nuevas tecnologías e incentivarlos a utilizarlas.
- Está comprobado que la innovación en los procesos de enseñanza-aprendizaje requiere una integración de principio a fin en todas las asignaturas de las áreas de ciencias básicas, ingeniería básica e ingeniería aplicada, ya que sólo así se podrá formar una estructura sólida para preparar a los futuros profesionales en ingeniería, los cuales deberán enfrentar el avance vertiginoso de las nuevas tecnologías.

## BIBLIOGRAFÍA

- ULLMAN, D. *The mechanical design process*, McGraw Hill, 1998.
- STUART, PUGH. *Total design*, Addison Wesley.
- ULRICK. *Product desing and development*, McGraw Hill, 1999.
- U.C. BERKELEY, RENSSELAER, STANFORD, N.C. STATE, VT IEEE/ASME. *Transactions on mechatronics*.
- GOMÁRIZ, S. *Teoría de control: diseño electrónico*, Alfaomega, 1998.
- SCIAMCCO, L. *Electrical and computer engineering*, McGraw Hill, 1998.
- OGUIC, PATRICE. *Control electrónico con el P.C.* Paraninfo, 1995.
- GUPTA, K. *Mechanics and control of robots* Springer.
- AUGULO, J. *Robótica práctica: teoría y aplicaciones*, Paraninfo, 1996.