

ROBOT MANIPULADOR PARA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTO EN LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

**José E. Vargas, Gilberto Reynoso, Leopoldo S. Villarreal,
Omar Romero, Juan C. Ituarte, Mario A. Zamarripa,
Marcos Hernández, Daniel Hernández y Sergio Arciniega.**

En este trabajo se describen algunas de las actividades realizadas como parte del desarrollo de un proyecto orientado a solucionar el problema de efectuar labores de limpieza y recubrimiento en las líneas aéreas de alta tensión. El objetivo de este proyecto es diseñar, construir y operar de forma sencilla y eficiente un robot manipulador capaz de efectuar de forma segura tareas de limpieza y recubrimiento en los aisladores de vidrio y porcelana de las líneas aéreas de alta tensión. Dicho proyecto es el resultado de una labor conjunta entre el ITESM Campus Querétaro y la empresa Silidriel S.A. de C.V. quienes buscan solucionar problemas importantes a través del desarrollo y el uso de la tecnología.

El trabajo describe los objetivos del proyecto, así como las diversas contribuciones que se desean lograr con el robot. Se muestran las consideraciones de diseño del robot, así como la metodología del proyecto, la cual se basa en el concepto de la mecatrónica. Posteriormente, se describe el robot manipulador, denominado: robodriel, para después mostrar parte del trabajo realizado por alumnos de Ingeniería, que se integraron a dicho proyecto realizando el diseño de los últimos dos grados de libertad del robot, esta actividad se efectuó como un proyecto final del curso de "Diseño de Elementos de Máquinas".

El trabajo finaliza mostrando algunos resultados del diseño de los últimos dos grados de libertad, el estado actual del proyecto, y algunas de las actividades por realizar como parte del desarrollo del robot.

Palabras clave: Robot Manipulador, Robótica, Mecatrónica, Mantenimiento.

1. Introducción

Las líneas aéreas de alta tensión y las subestaciones eléctricas se soportan mediante aisladores de porcelana y vidrio. Cuando estos aisladores se contaminan su función aislante disminuye porque el material contaminante se mezcla con el agua formando un electrólito que conduce creando bandas secas, arcos eléctricos y falla del aislador.

La mejor manera de resolver este problema es mediante el lavado del aislamiento con líquido dieléctrico y mediante la aplicación de un recubrimiento a base de agua y silicón capaz de repeler el polvo y formar una película hidrofóbica que no permite que la superficie se humedezca, evitando así la secuencia que deriva en falla.

Existen diferentes técnicas para limpiar aisladores. La más simple y segura es cuando la línea eléctrica es desenergizada para permitir la limpieza a mano, o con ácidos, en casos extremos. En el caso en que la línea no se puede desenergizar, existen técnicas de lavado, pero ninguna con la eficiencia deseada.

Últimamente, Aplicaciones Silidriel S.A. de C.V. desarrolló y patentó una técnica que permite el lavado en vivo con una gran calidad y también aplicar recubrimiento de silicón, el cual fue desarrollado por la misma empresa, llamado SILIDRIEL, que ha tenido excelentes resultados.

El trabajo de lavado y aplicación en vivo se hace con pértigas dieléctricas que maneja un operador diestro, teniendo muchas precauciones, y con la constante supervisión de otros trabajadores para evitar accidentes por descuidos. La técnica es relativamente segura si se tienen todos los cuidados y se sigue el procedimiento con formalidad. La desventaja, sin embargo, es que se requiere soportar la pértiga con guantes dieléctricos, dentro de un traje dieléctrico independientemente del calor o del frío y en posiciones a veces incómodas, lo que resulta muy cansado para el operario, reduciendo la eficiencia y propiciando la posibilidad de cometer un error.

2. Justificación del proyecto

La limpieza de aisladores cerámicos, cuando las líneas eléctricas de alta tensión se encuentran energizadas, es una tarea que requiere de un considerable desgaste humano y de sistemas especiales de protección por tratarse de una tarea de alto riesgo para las personas (ver Fig.1). La posibilidad de realizar dicha limpieza mediante un robot manipulador que permita al operario controlar los movimientos del robot de forma eficiente y segura fue uno de los principales motivos que llevo a plantear y realizar un proyecto de desarrollo tecnológico entre el ITESM Campus Querétaro y la empresa Silidriel S.A. de C.V. De esta forma, se busca lograr reducir de forma significativa la posibilidad de que un operario sufra un grave accidente, como por ejemplo: perder alguna de sus extremidades por el efecto del arco eléctrico al entrar o abandonar su cuerpo, sufrir quemaduras severas e incluso perder su vida.



Fig. 1 Forma actual de limpiar los aisladores cerámicos

Por otra parte, resulta novedoso orientar el diseño y la aplicación de un robot manipulador hacia una actividad en la que este tipo de máquinas no se encuentran trabajando actualmente en ninguna parte del mundo. Existen diseños de robots que ayudan a dar otro tipo de mantenimiento a las líneas eléctricas, pero dicho mantenimiento es diferente al que se propone en este trabajo.

Desde el punto de vista económico y tecnológico, se estimó el tiempo y el costo del proyecto con base a los recursos disponibles y al perfil del personal designado para cada actividad, de esta forma se determinó que el costo del proyecto era de 112,000 pesos, cantidad que se prevé recuperar en dos años mediante dos formas, la primera es a través del trabajo realizado por el robot y la segunda es comercializando la venta del robot en aquellas aplicaciones que tienen características similares de trabajo para lo que el robot fue diseñado. Es importante mencionar, que en el momento de escribir el presente documento, la empresa ha logrado el interés con uno de sus clientes, situación que llevó al cliente ha solicitar formalmente la utilización del robot en los trabajos futuros.

3. Contribución del proyecto

A medida que se ha desarrollado el proyecto, se han logrado diferentes resultados y contribuciones que motivan a llegar a la meta propuesta. Desde el punto de vista académico, el proyecto a contribuido a apoyar la formación de jóvenes estudiantes de Ingeniería en el ITESM Campus

Querétaro, situación que llevó a los estudiantes a adquirir compromisos, actitudes y responsabilidades con el proyecto, con la empresa y con ellos mismos.

Lograr la conjunción de esfuerzos en un proyecto de desarrollo tecnológico entre una empresa y nuestra Institución, sin duda contribuye favorablemente a aumentar nuestro conocimiento en proyectos de este tipo, así como en lograr una confianza para que otras empresas colaboren con el Instituto a lograr una verdadera vinculación que beneficie a ambos, así como a la sociedad.

Desde un punto de vista externo, que intenta visualizar el trabajo realizado por el robot, esta máquina muestra la destreza e imaginación de personas mexicanas para resolver problemas complejos de Ingeniería, así como la aplicación de tecnologías especializadas en el mantenimiento de las líneas eléctricas de alta tensión, lo que lleva a considerar una disminución de descargas eléctricas en dichas líneas, situación que beneficia a todos ya que se logra una distribución más efectiva de la energía eléctrica en las ciudades.

4. Objetivos del proyecto

La tarea de lograr un camino dirigido hacia el desarrollo del robot, nos llevó a definir de forma clara y precisa el siguiente objetivo general: ***Diseñar, construir y operar de forma sencilla y eficiente un robot manipulador capaz de efectuar de forma segura tareas de limpieza y recubrimiento en los aisladores de vidrio y porcelana de las líneas aéreas de alta tensión.***

Así mismo, para lograr de forma gradual un avance que nos permitiera alcanzar dicho objetivo, se definieron los siguientes objetivos particulares [1]:

- a) Justificar el proyecto bajo diversos criterios (económicos, sociales y de servicio).
- b) Definir claramente los alcances, las limitaciones y las normas del proyecto, así como las responsabilidades y retribuciones que tendrán los participantes directos.
- c) Conocer las habilidades de los participantes directos, de forma que se puedan distribuir fácilmente las tareas a realizar durante el desarrollo del mismo.
- d) Efectuar el diseño mecánico del robot a través de una metodología clara y definida desde un punto de vista mecatrónico.
- e) Con base a las necesidades de operación y control, realizar el diseño del sistema de teleoperación.
- f) Una vez logrados los objetivos anteriores, diseñar y construir las partes del robot (mecánica, neumática, control, etc.).
- g) Integrar y probar los sistemas del robot en su conjunto (mecánica, neumática, control, canastilla, etc.).
- h) Con el fin de garantizar la efectividad del robot, se evaluarán las tareas de limpieza y recubrimiento con base en las normas oficiales mexicanas para este tipo de tareas (ayudará en mucho la experiencia que tiene la empresa de certificación ante el Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales, LAPEM, de la Comisión Federal de Electricidad).
- i) Una vez que el robot sea certificado, el proyecto finalizará con la redacción de diversos manuales que permitan al operario transportar, dirigir y dar un servicio de mantenimiento al robot.

5. Consideraciones de diseño

A continuación se describen brevemente las principales consideraciones de diseño del robot manipulador orientado a la limpieza y al recubrimiento de líneas eléctricas de alta tensión. Dichas consideraciones han sido expuestas y revisadas tanto por la empresa como por el Instituto, con el propósito de asegurar los conceptos de diseño del robot.

- a) Aislamiento. Obtener un robot manipulador de material aislante, que sea capaz de lavar y recubrir los aisladores cerámicos de las líneas eléctricas de alta tensión, las cuales pueden estar energizadas hasta 115 kV. De forma que la fuga permisible de corriente a tierra debe ser inferior a los 0.1 mA cuando el robot se conecte a una línea energizada.
- b) Movilidad. El robot deberá desplazarse con 5 grados de libertad, que son los grados de libertad necesarios para realizar la tarea de limpieza y recubrimiento que se desea lograr.
- c) Peso. El peso máximo que se desea tener en el robot es de 50 Kg. , por las limitaciones operativas de la canastilla dieléctrica que tiene la empresa.
- d) Portabilidad: El robot debe transportarse con la canastilla. De esta forma, el operario podrá transportar fácilmente al robot dentro o fuera de la canastilla.
- e) Maniobrabilidad: El robot deberá ser dirigido por un operador que puede estar en la canastilla o en algún lugar donde pueda observar y controlar fácilmente las tareas de limpieza.
- f) Versatilidad: El órgano terminal del robot, o la garra, debe ser capaz de sostener una tovera especial para tareas de lavado, o bien una pistola para aplicar el recubrimiento. El diseño debe tomar en cuenta la posibilidad de abrir o cerrar, de forma controlada, el órgano terminal.
- g) Modularidad: los principales elementos aislantes del robot, que son los eslabones más largos, deberán poderse cambiar con rapidez cuando se humedezcan, para continuar lavando en vivo.

6. Metodología

En las máquinas de tipo mecatrónico, los sistemas mecánicos, electrónicos y computacionales convergen de forma significativa en el diseño [2]. Una metodología para desarrollar este tipo de máquinas permite:

- a) Reducir los tiempos de diseño e implantación
- b) Reducir los costos asociados al diseño y la implantación.
- c) Tener un orden de actividades en un proyecto integral
- d) Visualizar la dirección de un proyecto

En este sentido, aunque no se tiene un peso específico importante en electrónica o informática, como elementos que conforman físicamente al robot, desde el punto de vista de diseño se aplica la filosofía de la mecatrónica desarrollar el proyecto, con base en algunas de las actividades generales que se muestran en la Fig. 2. Aunque esta metodología se refiere principalmente a las actividades asociadas de diseño y al desarrollo de la máquina, así como a la relación de estas actividades entre ellas, es importante mencionar que antes de aplicar algunas de estas ideas, el líder o responsable del proyecto, debe haber realizado un trabajo previo en donde se hayan definido los siguientes puntos:

- a) Las ventajas y desventajas de utilizar un robot
- b) Las normas y limitaciones del proyecto
- c) La justificación del proyecto bajo diversos criterios (económicos, sociales, etc.)
- d) La definición clara y precisa de los objetivos del proyecto.
- e) Las características técnicas del robot
- f) La evaluación de los conceptos de diseño de los sistemas del robot
- g) La selección de la mejor alternativa con base en criterios claros y definidos

7. Descripción general del robot.

En esta sección se describe, en forma general, el sistema de limpieza y recubrimiento de los aisladores cerámicos, con el propósito de lograr una idea clara sobre la disposición del robot en la canastilla móvil (elevadriel), para aproximar la tovera ubicada en el órgano terminal del robot en la región propicia para realizar la limpieza o el recubrimiento. La Fig.3 muestra la ubicación de la base del robot en dicho sistema elevador.

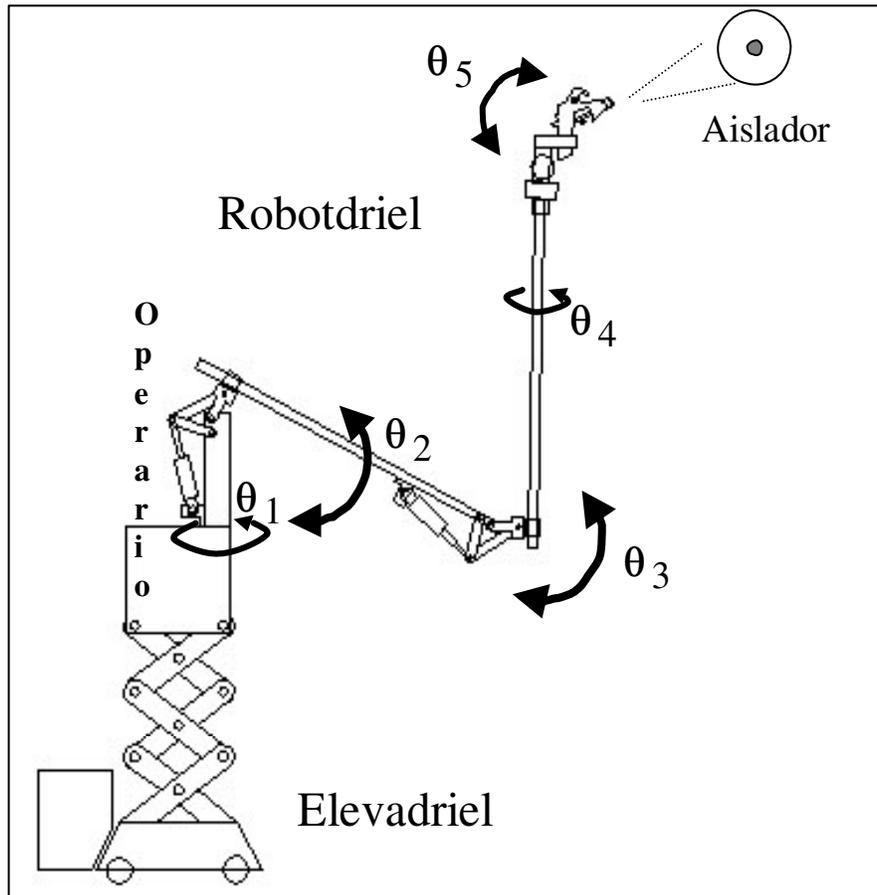


Fig.3 Disposición del robot para realizar la limpieza del aislador cerámico

En la Fig.3 las variables θ_i , donde $\{i=1,2,3,4,5\}$, representan el i -ésimo grado de libertad del robot. Todos los movimientos son de tipo rotacional. El primer grado de libertad se refiere a un movimiento giratorio alrededor de una línea vertical colocada sobre el eje principal de la base del robot, lo que permite girar el robot con respecto a la canastilla que lo soporta. El segundo y el tercer grado de libertad permiten girar los eslabones principales del robot en un plano, la longitud de ambos eslabones es de 1.3 m. Las variables θ_4 , y θ_5 , se refieren a los dos últimos grados de libertad del robot, y su función principal es de lograr controlar de forma más precisa la dirección de chorro del líquido limpiador hacia los aislantes cerámicos.

En la siguiente sección se muestra parte del trabajo realizado del proyecto. Principalmente se describe el diseño mecánico de los elementos que lograrán el movimiento de los dos últimos grados de libertad del robot. Dicho trabajo se efectuó como proyecto final en el curso de "Diseño de Elementos de Máquinas", del semestre 00-1 ofrecido por el Departamento de Ingeniería Mecánica e Industrial del ITESM Campus Querétaro [4].

8. Diseño de los últimos dos grados de libertad

El proceso de diseño de los elementos que integrarán al robot para lograr el movimiento de los últimos dos grados de libertad se basó en la metodología expuesta anteriormente. Se evaluaron diferentes ideas para lograr satisfacer las características de diseño. Uno de los primeros problemas por resolver fue el de la cinemática del mecanismo, así como la selección de los materiales de acuerdo a la condición de aislamiento requerida y a las propiedades mecánicas necesarias para que los elementos puedan soportar y transmitir adecuadamente las fuerzas.

Con el fin de facilitar y agilizar los cálculos para este proyecto, se diseñó y programó una hoja de cálculo en el Programa Excel. Con esta hoja se determinó, con las especificaciones dimensionales ya definidas, la cinemática del mecanismo, la sumatoria de momentos y cargas. Los esfuerzos principales y la prueba con el criterio de Von Mises. Con ayuda de dicho programa, se encontraron los esfuerzos principales que actuaban en determinados puntos de interés del mecanismo. Los resultados de este análisis se encuentran en [4]. Las posiciones y los puntos críticos del mecanismo nos llevaron a analizar resultados gráficos, como el mostrado en la Fig. 4. Para este caso, el punto A al cual se refiere la gráfica, es el punto definido entre la intersección entre el eje del actuador rotativo del cuarto grado de libertad y el plano de apoyo de dicho actuador. Estos mismos puntos fueron analizados con el criterio de Von Mises para diseño. En todos los puntos críticos se encontró que no se sobrepasaba el valor máximo determinado por este criterio, se utilizó un factor de seguridad de 3.

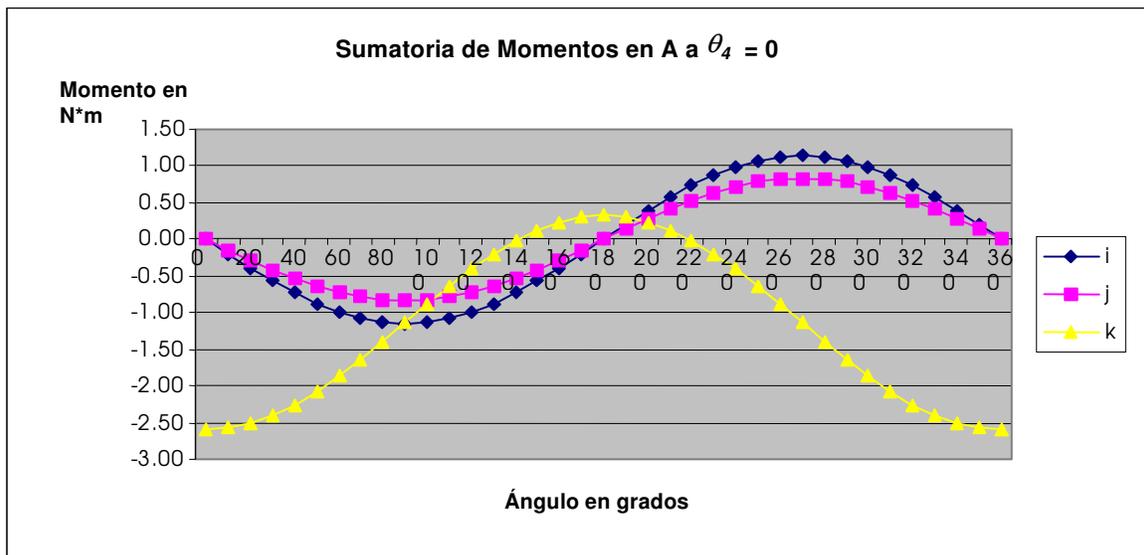


Fig. 4 Gráfica de la sumatoria de momentos en un punto crítico del mecanismo, $\theta_4 = \text{cte.} = 0^\circ$.

8.1 Selección de material

Por las características del diseño de las piezas, se decidió utilizar Aluminio en la mayoría de las piezas a maquinar. Algunas de las características principales por la que se escogió este material son su ductilidad, facilidad de maquinado, su resistencia a la corrosión y además no es magnético. Por último y no menos importante, cabe señalar el peso específico del aluminio aumenta la posibilidad de lograr un diseño ligero. El eslabón que soportará al mecanismo será de fibra de vidrio, debido a las propiedades de aislamiento eléctrico, a su peso específico y a la experiencia de la empresa en manufacturar grandes piezas con dicho material.

8.2 Determinación de los actuadores:

Después de un largo proceso para documentar y evaluar los tipos de actuadores que podrían utilizarse para lograr el movimiento deseado de los últimos dos grados de libertad del robot, finalmente se seleccionó un actuador rotativo de tipo neumático modelo CRB1BW20-270 de la marca SMC para ambos grados de libertad. A continuación se muestran algunas de las especificaciones del actuador [5].

Ángulo de rotación:	270°
Tipo de fluido:	aire
Presión de prueba (kgf/cm ²):	10.5
Rango operativo de presión (kgf/cm ²):	1.5 ~ 7
Rango de velocidad de giro (s/90°):	0.03 ~ 0.3
Temperatura de operación (medio y fluido):	5 ~ 60 °C
Volumen (cm ³):	7.9
Peso (gf):	103

8.3 Selección de Rodamientos:

Debido a que existe movimiento giratorio relativo entre algunos elementos que componen el mecanismo de los últimos dos grados de libertad, se consideraron diferentes ideas para disminuir la fricción entre los elementos que soportan el eje de los actuadores rotativos y los eslabones del sistema. Después de valorar las distintas propuestas, se seleccionó un tipo de rodamiento, ya que éste se ajustó a las necesidades geométricas y técnicas del diseño. El modelo seleccionado es el FAG-NK525A del catálogo WL 41510/3 EA [6].

8.3 Diseño de detalle y simulación del mecanismo

Una vez solucionado el problema de la cinemática, la determinación de los materiales, los actuadores, los rodamientos y las dimensiones básicas del mecanismo, se procedió a efectuar el diseño de detalle y la elaboración de los planos de fabricación de todos los elementos que componen al mecanismo. La elaboración de los planos se efectuó utilizando el programa Autocad en su versión 2000, lo que nos llevó a visualizar y resolver algunos problemas de ensamble que inicialmente no se habían considerado.

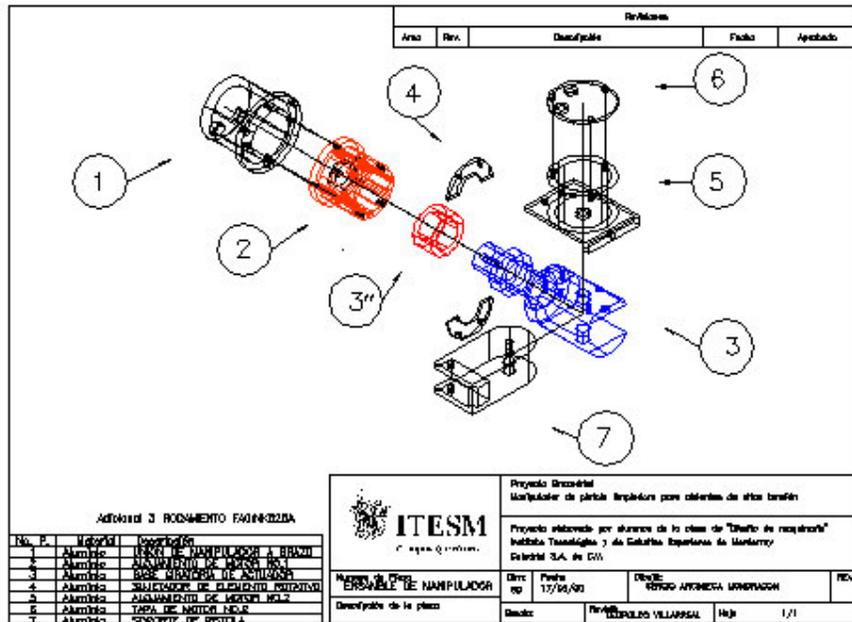


Fig. 5. Ensamble de los elementos para los últimos dos grados de libertad.

En este sentido, y conociendo sobre la posibilidad de simular el mecanismo del robot se estudió la manera de lograr simular la acción de limpieza del aislador a partir de los diseños realizados con el programa Autocad. La Fig. 6 muestra una imagen virtual en 3D de la posición obtenida cuando el mecanismo diseñado se encuentra realizando dicha tarea.

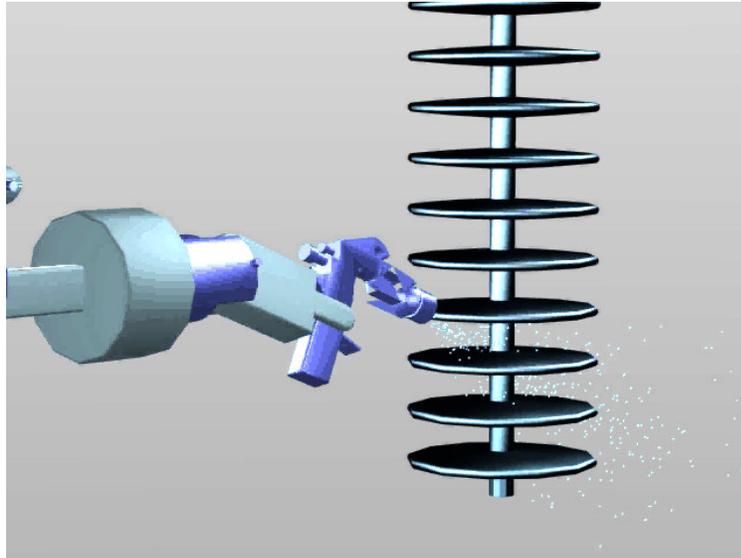


Fig.6 Vista del órgano terminal del robot al limpiar los aisladores

9. Resultados

Entre los resultados más importantes por mencionar, es que se lograron diseñar con éxito los dos últimos grados de libertad del robot; propósito que se planteó al inicio del semestre 00-1. Este diseño representa un avance al proyecto en donde se enmarca este trabajo. Así mismo, al conjuntar esfuerzos de un grupo de alumnos y un grupo de personas de la empresa, se sensibilizó a los participantes en las necesidades y responsabilidades de ambas partes. Discutir ideas, intercambiar puntos de vista y plantear soluciones, siempre con la intención de buscar lo mejor para el proyecto, fue una actitud que se mantuvo durante el transcurso del mismo.



Fig.7 Prototipo de la base

Se espera que gracias a este avance, se tenga un primer prototipo del robot antes de finalizar el año 2000. Es importante recordar, que no existe un robot de este tipo en el mundo, lo que lleva a considerar un impacto tecnológico en la forma de realizar la limpieza y el recubrimiento de las líneas de alta tensión. Además, se obtendrá un beneficio social, al aumentar la productividad del mantenimiento de las líneas eléctricas de alta tensión, ya que se reducirán las descargas de dichas líneas por aisladores sucios.

Un resultado que destaca del proyecto, es que se logró un avance significativo. Lo que permitirá en un futuro tener una herramienta segura para realizar tareas de alto riesgo físico para el operario.

10. Conclusiones

En este trabajo se mostró un esquema de trabajo basado en conceptos de la mecatrónica, los resultados se observan en las actividades descritas en el trabajo. Aun cuando el proyecto no esta terminado, se describió la metodología en la que se basa este trabajo, las características del robot y el diseño de sus últimos dos grados de libertad. Sin duda habrá que enfrentar nuevos problemas no considerados, como la posibilidad de aumentar el peso del robot, en caso de que se requiera aumentar la resistencia en los eslabones principales, o bien problemas de vibraciones por el efecto del chorro en la boquilla del sistema de limpieza. Aunque estos problemas se han analizado de una forma básica, mediante la medición del momento en la base del eslabón al aplicar el chorro, existirán condiciones diferentes cuando el chorro se aplique con el robot. Los problemas como el mencionado, serán estudiados lo suficiente, como en su momento han sido analizados otros problemas, a fin de superar dichos retos de investigación y desarrollo.

11. Agradecimientos.

Los autores desean agradecer a todas las personas que de alguna u otra manera han ayudado el desarrollo del proyecto, algunos confrontando ideas, otros más mediante sugerencias y mejoras a los diseños. Se agradece de forma especial al señor Cirilo López por su disposición en la manufactura de los prototipos del robot, y al Dr. Gabriel Morelos Borja, Director del Departamento de Ingeniería Mecánica e Industrial en el ITESM Campus Querétaro, por las facilidades brindadas durante el desarrollo del proyecto.

12. Referencias.

- [1] Vargas E., Rafael M., "*Brazo Manipulador para Aplicaciones de Recubrimiento en Líneas de Alta Tensión*", Propuesta de la Metodología, Reporte interno. Querétaro, 1998.
- [2] Vargas E., "*Metodología Aplicada al Desarrollo de Máquinas Mecatrónicas*", Memorias del 1er. Congreso Latinoamericano de Instrumentación y Control de Procesos, UAQ, Querétaro, Qro. Agosto 2000.
- [3] Cohen L., "*Quality Function Deployment: How to Make QFD Work for You*", Addison-Wesley 1995.
- [4] Ituarte J.C., Zamarripa M.A., Hernández M., Hernández D., Reynoso G., Romero O., Villareal L. y Arciniaga S., "*Brazo Manipulador para Aplicaciones de Recubrimiento en Alta Tensión*", Reporte del proyecto final del curso: "Diseño de Elementos de Máquinas", Mayo del 2000.
- [5] SMC. "*Rotary Actuator*", Catálogo de Actuadores rotatorios, serie CRB1BW10*15*20*30, 1999.
- [6] FAG, "*FAG Rolling Bearings. Standard Programe*", Catalogo WL 41 510/3 EA, 1992