



PROTOTIPO ROBÓTICO PARA TOMAR MEDIDAS DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA EN MODELOS HUMANOS

PROTOTYPE ROBOTIC FOR MEASURES OF COMPATIBILITY ELECTROMAGNETIC IN HUMAN MODELS

Andrés Poloche A.¹

Juan C. Bohórquez R.²

Fecha de envío: Abril de 2011

Fecha de recepción: Mayo de 2011

Fecha de aceptación: Agosto de 2011

Resumen:

Este documento describe el proceso de diseño e implementación de un prototipo de posicionamiento robótico cartesiano, que permite colocar un sensor a mapear la superficie de un modelo humano, para censar la radiación electromagnética absorbida por los tejidos simulantes al colocar un dispositivo emisor de Radio Frecuencia cercano. El prototipo permite obtener datos en laboratorio sobre un modelo humano y obtener una resolución en cada punto censado para aproximar al estándar de medida IEEE1528.

Palabras clave:

Specific absorption rate (SAR), radiofrecuencia (RF), modelo humano, Robot cartesiano, modelamiento, control.

Abstract:

This document presents the design of a prototype of positioning Cartesian robotic that allows placing a sensor to carry out the map of a surface that a human model likens, and this way to take a census of the electromagnetic radiation absorbed when placing an issuing device of RF. The prototype carried out the reconstruction of a human figure in

such a way that is possible to obtain a good resolution in each taken a census of point and this way to try to approach to the norm IEEE1528.

Key Words:

Specific absorption rate (SAR), radiofrequency (RF), human model, Cartesian robot, modeling, control.

1. Introducción

En la actualidad se encuentran al alcance de la población humana varios productos

¹ B.S. Ingeniería en Control, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Asistente académico Laboratorios de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes. Auxiliar Laboratorios área de Electrónica Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica. Correo electrónico: mpoloche@uniandes.edu.co, poloche74@gmail.com

² PhD. MSc. Ingeniero Eléctrico. Universidad de los Andes. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes. Investigador Grupo de Electrónica y Sistema de Telecomunicaciones, Universidad de los Andes. Correo electrónico: jubohorq@uniandes.edu.co

que son una fuente de campos de Radio Frecuencia RF o campos electromagnéticos propagados en el medio ambiente, muchos de estos equipos son de uso personal, comercial o industrial como: Teléfonos Celulares, aparatos de radio AM FM, hornos microondas, monitores de PC, TV, pantallas, transformadores, radares, dispositivos satelitales, bluetooth, WI FI, entre otros. Debido a la gran variedad de estas fuentes de electromagnetismo, se han generado estudios científicos para determinar los posibles riesgos a los que nos encontramos expuestos y que efectos perjudiciales se pueden generar en la salud humana y el ambiente. En algunas partes del mundo se lleva tiempo trabajando sobre este tipo de riesgos y existen entes reguladores de equipos de RF; países como USA, Australia y la Unión Europea certifican la entrada y uso de estos equipos en su población.

En Colombia el consumo de productos emisores de RF como celulares por ejemplo, se ha incrementado en más de 40 millones según estadísticas [1], por lo cual afrontamos también un riesgo. La Universidad de los Andes con su incremento de infraestructura en laboratorios de investigación, está en posibilidad de trabajar sobre este tema en Colombia y el Grupo de investigación de Electrónica y sistemas de Telecomunicaciones "GEST", ha identificado la necesidad de generar herramientas e instrumentos para realizar estos estudios de compatibilidad electromagnética y de este modo certificar productos emisores de RF en Colombia. Esto implica el desarrollo de varios instrumentos y entre ellos un prototipo de posicionamiento robótico, que permita a un sensor tomar datos de absorción electromagnética en un modelo humano cuando esta cerca de un dispositivo emisor de RF.

El desarrollo de este instrumento permite realizar una evaluación del alcance de los datos tomados de radiación en laboratorio. Además comprobar el sistema de medida (robot, sensor, adquisición de datos y software) en conjunto para realizar un estudio sobre ellos y determinar que tantos ajustes e instrumentación se necesitan desarrollar o adquirir para aproximar a la norma IEEE 1528 (técnicas de medida).

2. Conceptos Generales

Para poder entender cómo se desarrollan las pruebas para el estudio de la radiación electromagnética, se requiere el conocimiento de algunos conceptos fundamentales, a continuación una breve introducción a estos conceptos.

2.1. Radiación electromagnética

Existen fuentes de radiación de energía electromagnética tanto natural como artificial en forma de ondas propagadas en el ambiente. Estas ondas son oscilantes en el ambiente y tienen contacto con sistemas de todo tipo, bien sea orgánico e inorgánico. Según la potencia de energía irradiada, la frecuencia con la que se irradia y los efectos biológicos que genere, se clasifican en: radiación ionizante y no ionizante. La Radiación Ionizante son ondas de extremadamente alta frecuencia por encima de 2.4GHz, que tienen la energía para crear partículas cargadas (Ionización), que pueden romper los enlaces atómicos que mantienen a las moléculas unidas en las células. La Radiación no Ionizante son ondas propagadas de menor energía y frecuencia que la ionizante, son emisiones que comúnmente encontramos en el ambiente como lo son la radiación in-

frarroja, visible, ultravioleta, microondas y otros generadores estáticos de campos magnéticos [2]. Es sobre las radiaciones no Ionizantes el objeto de estudio, que aunque no generen un daño instantáneo en un sistema biológico, pueden producir efectos con una prolongada exposición, como calentamiento del área expuesta, lo que puede producir una inducción de corriente eléctrica en las células o generar alteraciones en reacciones químicas de las células.

2.2. SAR (Specific Absorption Rate)

Campos de RF por encima de 1MHz causan calentamiento o aumento de la temperatura local en la parte del cuerpo sometida a dicha radiación, pero este calentamiento es compensado por los procesos termo-regulatorios normales del cuerpo humano, sin que el individuo llegue apenas a notar dicho aumento de temperatura [2]. Pero cuando la exposición a la radiación es prolongada este calentamiento no siempre puede ser regulado y es allí donde se centra el estudio. Un ejemplo claro de esto es cuando se habla por el teléfono celular durante un tiempo prolongado.

Cuando los tejidos absorben energía de los campos de RF, la energía es contenida en el área expuesta del cuerpo, de esta energía absorbida se puede tomar una medida, llamada SAR (Specific Absorption Rate) o Tasa Especifica de Absorción en una masa de tejido dada. SAR es una medida de la cantidad de energía de ondas que absorbe el cuerpo al utilizar un dispositivo de RF. SAR está definido como Vatios por Kg de masa, las unidades del SAR son: Watts per kilogram [W/kg] o milliWatts per gram [mW/g]. El SAR en un tejido puede ser determinado por la medida del incremen-

to de la temperatura (1), o por la medida del campo electromagnético (2) [3]:

$$SAR = \frac{c\Delta T}{\Delta t} \quad (1)$$

$$SAR = \frac{\sigma|E|^2}{\rho} \quad (2)$$

Donde 'c' es la capacidad de calor específico, 'ΔT' el cambio de temperatura, 'Δt' tiempo de exposición, 'σ' es la conductividad eléctrica, 'E' es la magnitud de fuerza de campo eléctrico en forma de vector dado en RMS y 'ρ' es la densidad de masa media.

En la mayoría de los países, para dispositivos en contacto con la cabeza, torso o alguna parte del cuerpo excluyendo manos, muñecas, pies y tobillos, la mayoría de los estándares ponen el límite del SAR en 2W/Kg medidos en una masa de 10 g de tejido. La FCC de Estados Unidos es más rígida y pone el límite del SAR en 1.6W/Kg medido en un gramo de masa de tejido [4].

2.3. Estándares sobre pruebas SAR

Los estándares IEEE e IEC (IEEE1528 e IEC62209) son las normativas que rigen las pruebas y tomas de medidas SAR. A continuación se muestra el formato general de estos trabajos [4]:

- Alcances, referencias normativas y definiciones
- Especificaciones del sistema de medición.
- Modelos humanos (Fantasmas).
- Medición con sensor Electromagnetic-field y equipo
- Sistema de escaneo (brazo robótico).

- Protocolo para la evaluación del SAR.
- Preparación.
- Procedimiento de medida.
- Post-procesamiento.
- Evaluación de la incertidumbre en las medidas.
- Informe obligado sobre la medición realizada.

Los aspectos más importantes en las medidas SAR son la exactitud y funcionamiento del sistema de prueba y las modalidades para la ejecución de las mediciones.

2.4. Instrumentos de medida SAR (Estado del Arte)

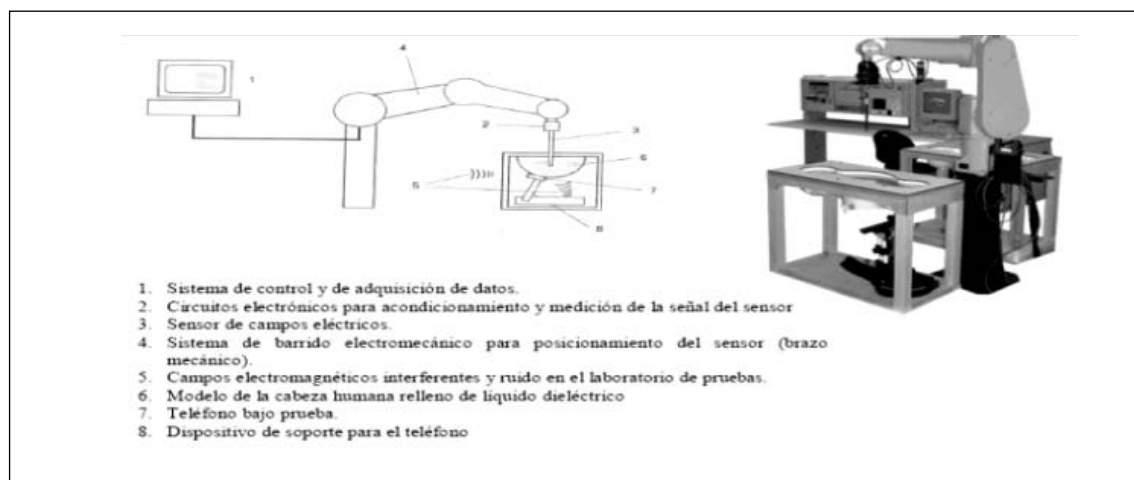
SAR es la medida por defecto que se debe tomar para determinar si un dispositivo cumple con las normativas de exposición. Para llegar a esta medida SAR se debe de disponer de una Cámara Anecoica (lugar que dispone de absorbentes dentro de un cuarto encerrado que impide el ingreso de ondas electromagnéticas u ondas mecánicas para obtener un ambiente limpio de electromag-

netismo) y una instrumentación de equipos de medida específicos, además de unos procedimientos según el tipo de dispositivo a poner bajo prueba. Para el proyecto el objetivo es trabajar con dispositivos celulares. Dentro de la instrumentación para tomar las medidas SAR se cuentan con varias herramientas tanto de hardware como software, este conjunto de instrumentos se puede visualizar en la figura 1.

Según la norma IEC 62209 Párrafo 5.1: “El ensayo se realiza con una sensor de E-field miniatura que se posiciona automáticamente en el interior de un modelo humano (fantasma) que representa la cabeza humana expuesta a los campos electromagnéticos producida por los dispositivos inalámbricos y así ver la distribución E-Field. De los valores medidos del campo, se obtiene la distribución SAR y su cálculo se realizara a partir de la masa máxima promedio utilizada” [4].

Los sistemas de pruebas deben incluir componentes para la colocación del equipo bajo prueba y alineación del sistema de escaneo. El modelo debe tener unas propiedades

Figura 1. Sistema de medida completo para SAR [5]



dieléctricas tanto de permisividad como de conductividad en el tejido líquido simulante para el control y validación de la medida con exactitud. La Figura 1 muestra los componentes básicos de un sistema SAR evaluación completa más detallada de los elementos principales.

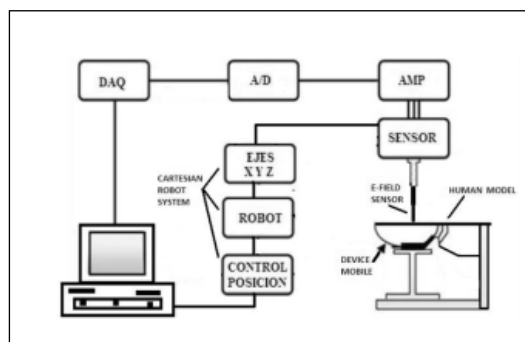
Como se puede observar de la figura se utiliza un modelo de superficie plana que se asemeja una figura humana, este modelo es un molde que se llena de un fluido preparado a base de un conjunto de ingredientes químicos, que al estar en contacto con RF asemejan la absorción de energía de un ser humano real.

3. Robot Cartesiano (Sistema Mecánico y Electrónico)

Para efectuar las medidas de SAR se utiliza por lo general un brazo robótico articulado de al menos 6 grados de libertad de movimiento, estos brazos son de un muy alto costo y su programación es muy tediosa, es por ello que se plantea para este proyecto la construcción de un prototipo de robot cartesiano de 3 grados de libertad de movimiento que nos sirva para tomar estas medidas SAR sobre el modelo humano de manera económica y de fácil programación para el usuario investigador. De esta manera se simplifica el control de posicionamiento del sensor a coordenadas cartesianas sobre la superficie plana quedándonos un esquema de trabajo como el de la figura 2.

El robot posicionador es el instrumento más importante para el proyecto, porque permite llevar el sensor sobre los puntos de medida del modelo humano, su precisión de movimiento debe ser lo suficientemente buena para que este en capacidad de reproducir

Figura 2. Diagrama del sistema con robot cartesiano



los movimientos de mapeo las veces que sea necesario.

3.1. Especificaciones de diseño

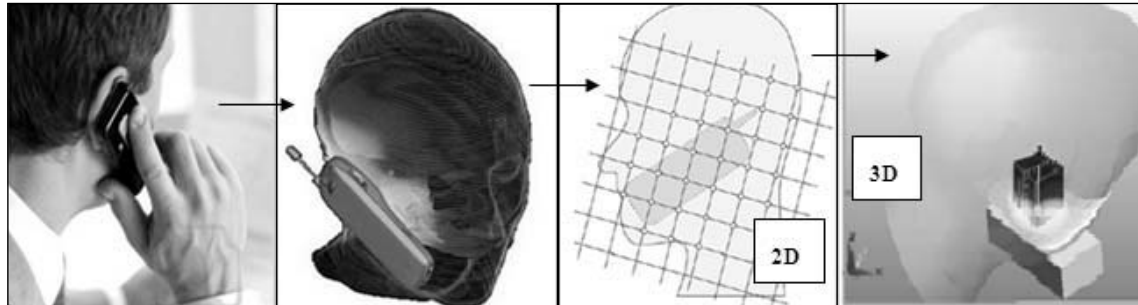
Dado que el sistema debe cumplir con el estándar de medida IEEE1528 se deben definir las características que debe tener el robot acorde al formato de medida. Para ello se realiza un estudio detallado de la norma y teniendo presente esto las características a tener en cuenta son:

Tamaño del modelo humano, ancho x largo x profundidad.

- Tamaño de la cuadrícula del área de escaneo, para obtener la resolución de movimiento.
- Área de escaneo para calibración del Sensor de E-Field.
- Área de escaneo básico 2D en coordenadas (X,Y) para obtener los datos iniciales de los puntos con mayor concentración de E-Field sobre el modelo humano.

Área de Zoom. Encontradas las áreas de mayor concentración de E-Field se procede a realizar un escaneo sobre esas áreas pero en coordenadas 3D (X,Y,Z) esto con un margen de puntos de medida de 7x7x7 respectivamente.

Figura 3. Procedimiento de escaneo sobre modelo humano



El área de escaneo y el área de zoom son el área del rostro del modelo que está en contacto con el dispositivo emisor de RF.

3.2. Descripción general del sistema

Un Robot Cartesiano tiene tres juntas prismáticas o grados de libertad, dos de ellas coinciden con el plano X-Y. Estas tres juntas perpendiculares lineales, se manejan a fin de posicionar cada junta con un motor. El motor genera un movimiento rotatorio que se transforma en movimiento lineal a través de un tornillo sobre cada eje, para generar el movimiento lo más sencillo

es utilizar motores paso a paso, por su fácil acceso y costo pero teniendo presente su precisión. Dada las características que debe cumplir el prototipo se realiza el modelo CAD con sus restricciones de tamaño y resolución para su construcción. Ver figura 4.

3.3. Tarjeta de control

El sistema de control se realiza en lazo abierto dado que utilizando los motores paso a paso se logra una gran estabilidad en cada vuelta generada, y con el análisis dinámico y cinemático se realizan los ajustes

Figura 4. Modelo CAD XYZ del robot cartesiano

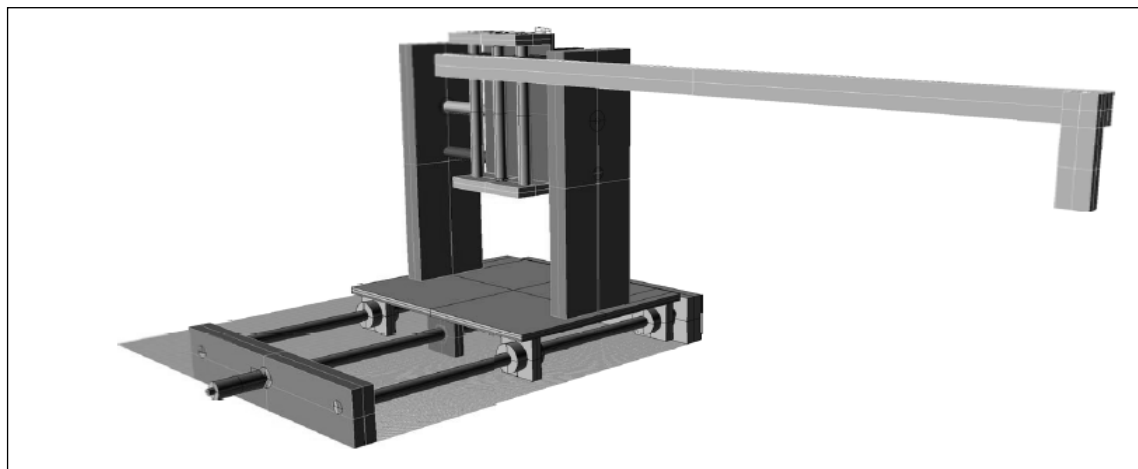
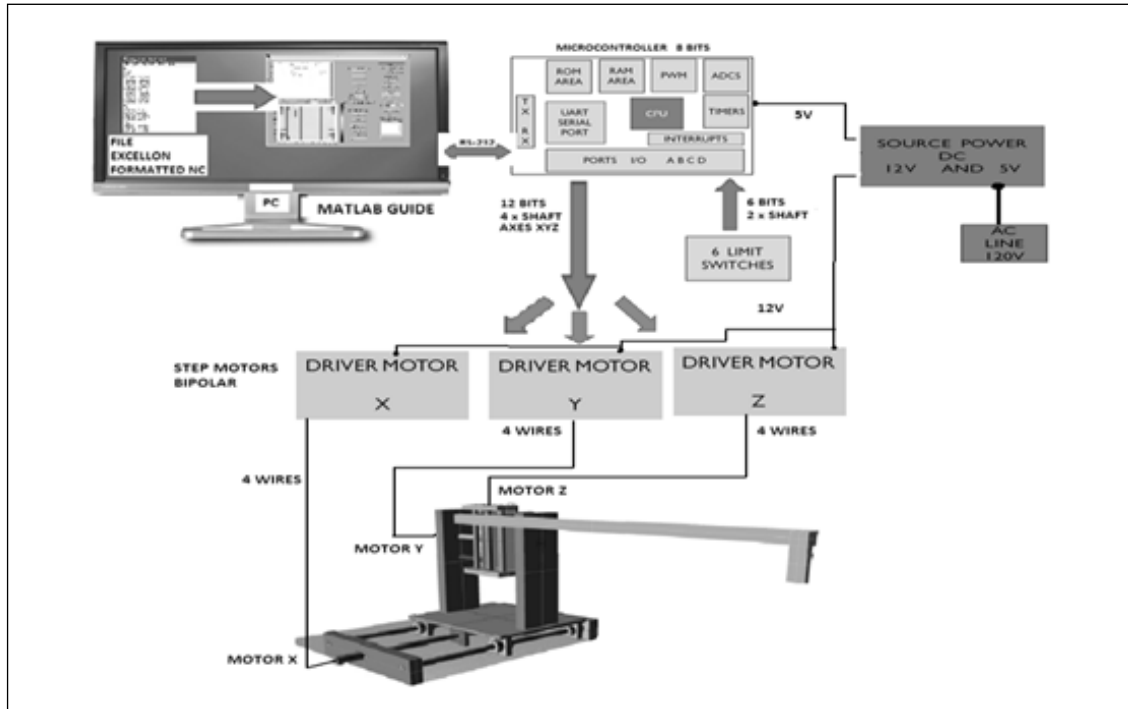


Figura 5 Sistema de control para el robot cartesiano



tes físicos, lo cual también nos asegura una buena resolución en cada paso.

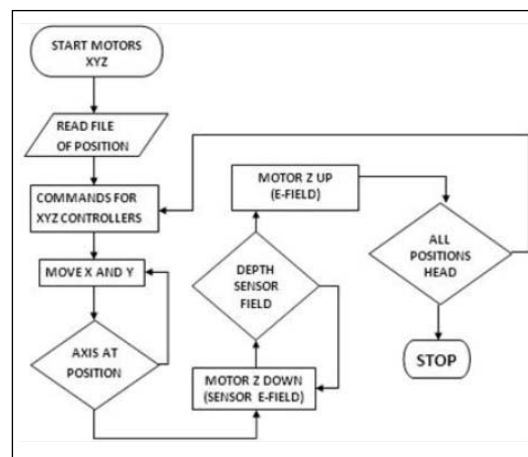
3.4. Algoritmo de control por PC

Definido el sistema de control de movimiento se debe diseñar un algoritmo que cumpla con las especificaciones de movimiento, para ello se diseña un software que permita realizar la interfaz entre la tarjeta de control y el PC que procesa y define los puntos de escaneo sobre la superficie.

3.5. Modelamiento Mecánico (Cinemática y dinámica)

Para poder simular el comportamiento del sistema se debe realizar un estudio del comportamiento mecánico de las piezas que lo conforman, esto permite revisar la estabili-

Figura 6. Algoritmo de control para los ejes del robot.



dad, las vibraciones posibles y desviaciones de los movimientos además de las fuerzas que actúan sobre el sistema, para ello se estudia la cinemática y dinámica, para llevar a

cabo esto se realiza el análisis matemático correspondiente.

Hay dos tipos de modelos cinemáticas, directo e inverso. El modelo directo transforma las terminales de una articulación a variables globales y modelo inverso convierte las variables globales en un espacio de articulación, es decir, el usuario da la posición del sensor en coordenadas cartesianas en el espacio global o superficie de trabajo y por cinemática estas posiciones se transforman en movimiento en las articulaciones o grados de libertad en XYZ, en este caso de movimiento lineal. Estos movimientos lineales de las articulaciones tienen un ángulo de giro que se ve reflejado en los motores. Ver ecuación 3:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

Donde:

$$d_i = p_i \frac{\theta_i}{2\pi} \quad (4)$$

Donde θ_i , es la medida de rotación expresada en radianes. XYZ son las coordenadas de posición global, tenemos l_x, l_y, l_z son los conjuntos de direcciones en XYZ, d_i es el desplazamiento de las juntas i , mientras p_i es el campo de movimiento de avance del tornillo sin fin en cada eje y tenemos que $i = 1, 2, 3$ o ejes XYZ.

La dinámica del sistema robótico tiene que ver con la aceleración de las articulaciones y las fuerzas de las articulaciones. En el modelo cinemático tenemos dos modelos, el directo e inverso. El modelo directo calcula la aceleración en las articulaciones con las fuerzas de coyuntura dada, mientras que el

modelo inverso computa las fuerzas conjuntas de la aceleración dada la masa conjunta, el modelo dinámico se utiliza para diseñar el controlador para el sistema considerado. El modelo dinámico para el robot manipulador cartesiano está dado por [7]:

$$\begin{pmatrix} \ddot{d}_x \\ \ddot{d}_y \\ \ddot{d}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{m_{dx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_{dy}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_{dz}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Donde:

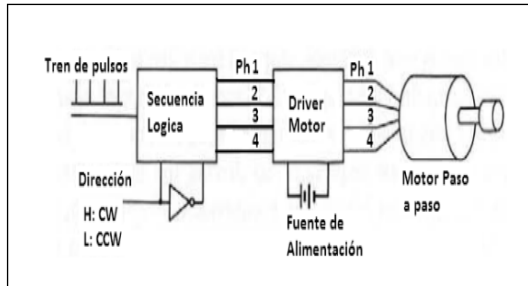
- $m_z = m_{d_z}$ = masa de d_z columna de motor y caja.
- m_y = masa de la caja moviéndose a lo largo de d_y
- m_x = masa de la caja moviéndose a lo largo de d_x
- $m_{d_y} = m_z + m_y$ = masa de ensamble contenida en el eje de d_y
- F_x, F_y, F_z = fuerzas en los ejes XYZ
- $\dot{d}_x, \dot{d}_y, \dot{d}_z$ = velocidades en cada junta en direcciones xyz.
- g = aceleración de la gravedad.

La dinámica del robot directa está dada por (6):

$$\begin{aligned} \ddot{d}_x &= \frac{F_x}{m_{dx}} \\ \ddot{d}_y &= \frac{F_y}{m_{dy}} \\ \ddot{d}_z &= \frac{F_z}{m_{dz}} \end{aligned}$$

El modelo inverso para la dinámica del sistema está dada por (7) [7]:

Figura 7 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo abierto para los motores paso [12]



$$F_x = m_{dx} \ddot{d}_x$$

$$F_y = m_{dy} \ddot{d}_y$$

$$F_z = m_{dz} \ddot{d}_z$$

3.6. Modelamiento matemático motores y circuitos electrónicos

Cuando se usa un motor paso a paso este se sincroniza con un tren de impulsos de control, para conmutar la fuente en cada una de las fases, el par producido por el motor es equivalente al par de carga que se opone al movimiento. Este es la suma del par necesario para acelerar el rotor/inercia de la carga y el par de fricción. La expresión que lo define viene determinada por las ecuaciones dinámicas fundamentales:

$$\tau_M = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} + B\omega + T_f \quad (8)$$

Donde:

- τ_M = torque producido por el motor
- J = inercia del rotor y combinación de carga
- B = fricción viscosa constante
- ω = velocidad angular del rotor

- T_f = torque de carga por fricción independiente de la velocidad

El torque τ_M del motor es función de la velocidad, las fuerzas magneto motrices, el ángulo de torque y otros parámetros de torque estático relacionados con la máquina. Si se usa la ecuación anterior se tiene que asumir: (1) no se utilizan compensadores mecánicos de inercia; (2) el par del motor no tiene componentes oscilantes, y sólo se considera el rango de velocidad.

El primer término situado a la izquierda es el torque necesario para acelerar la inercia del rotor y una combinación de carga. Cuando el torque del rotor es transmitido a la carga por medio de engranajes o poleas, la inercia J no es la inercia de la carga por si misma, pero debe ser la cantidad reflejada en el eje.

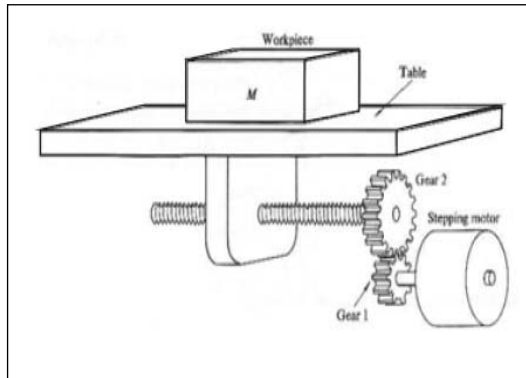
Cuando se consideran los términos de control, es conveniente expresar la ecuación dinámica en función de la relación de pasos f (Hz, Pasos *s-1) y la ecuación de movimiento para este caso es expresada como:

$$\tau_M = \theta_s J \frac{\Delta f}{\Delta t} + f \theta_s B + T_f \quad (9)$$

Donde:

- θ_M = ángulo de paso (radianes)
- f = frecuencia de paso (pasos s⁻¹)

De esta manera podemos obtener una aproximación directa de la respuesta del motor paso a paso cuando este es excitado por voltaje en sus bobinados mediante las secuencias de control del motor. Si se desarrolla la ecuación diferencial por medio de la transformada de Laplace obtenemos una función equivalente de primer orden lo que nos permite ver la relación directa entre frecuencia y torque entregado.

Figura 8. Eje con tornillo sin fin acoplado a motor mediante piñones [11]


3.7. Determinación de la inercia de movimiento lineal mediante tornillo sin fin y piñones

Cuando una pieza de trabajo y una tabla de trabajo son manejados por medio de piñones y un tornillo sin fin (llamado también husillo), la inercia total reflejada en el motor está dada como:

$$I = J_1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 (J_2 + J_3) + M \left(\frac{p}{2\pi} \frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \quad (10)$$

Donde:

- J_1 = inercia del piñón acoplado al rotor [$kg \ m^2$]
- J_2 = inercia del piñón acoplado al tornillo sin fin [$kg \ m^2$]
- J_3 = inercia del tornillo sin fin [$kg \ m^2$]
- Z_1 = numero de dientes en el piñón acoplado al rotor
- Z_2 = numero de dientes en el piñón acoplado al tornillo sin fin
- M = masa del objeto y tabla o carga [kg]
- p = paso entre estrías del tornillo sin fin [m]

4. Conclusiones

El modelo matemático funciona como realimentación, para dimensionar y corregir el diseño en detalle, el diseño es planificado en cada detalle e investigado antes de ser construido, con parámetros como peso, fricción, aceleración, trayectorias, baja inercia y bajo costo mecánico. El tamaño será de 50cm de largo, 30cm de ancho y 35cm de alto. Se obtiene un espacio de trabajo 20cm de alto x 14cm de ancho x 12cm de profundidad según tamaño del modelo humano, área scan, zoom scan y especificaciones de la norma IEEE1528.

Se lograría obtener un punto de medida en menos de 5 s con una teórica resolución de 4.375 micrones en un husillo de 12mm, con una fricción de aprox 0.003N/m, y una velocidad máxima de 200rpm, con motor de 1.8 grados por paso nema 23. Con el estudio de la norma y el diseño, la estructura tendría un costo de menos de 3000 dólares vs comprar un robot típico de 6 grados de 18000 dólares.

El consumo de corriente será de menos de 3 A en comparación con un robot comercial que pide 6 A o más. Con el estudio de la norma, desarrollo, planificación del diseño y los experimentos, se aportaría una máquina sencilla para generar pruebas SAR.

Referencias

- [1] ASOCEL, Asociación de la industria celular en Colombia, estadísticas. Consultado Enero de 2011. Disponible en: <http://www.asocel.org.co/estadisticas.php>
- [2] B. J. Klauenberg; D. Miklavcic, "Radio frequency radiation dosimetry and its relationship to the biological effects of

- electromagnetic fields,” NATO Science series, High Technology, vol 82, pp. 170-192 Oct 1998.
- [3] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (Standards Coordinating Committee 28 on Non-Ionizing Radiation), “IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Radio Frequency Electromagnetic Fields With Respect to Human Exposure to Such Fields, 100 kHz–300 GHz”, IEEE Std C95.3™-2002 (R2008).
- [4] D. Seabury, “An Update On SAR Standards And The Basic Requirements For SAR Assessment”. Consultado Enero de 2011. Disponible en http://www.ets-lindgren.com/pdf/sar_lo.pdf
- [5] J. E. Harmon, “The Structure of Scientific and Engineering Papers: A Historical Perspective”, IEEE Trans. On Professional Communication, vol. 32, No. 2, pp. 132-138, Sept., 2009.
- [6] R. D. Robinett, “Flexible Robot Dynamics and controls” Springer December 2001.
- [7] L. Sciavicco; B. Siciliano, “Modeling and Control of Robot Manipulators”, The McGraw-Hill Companies, 1997.
- [8] C. K. Chou; H. Bassen; J. Osepchuk; Q. Balzano; R. Petersen; M. Meltz; R. Cleveland; J. C. Lin; L. Heynick, “Radio frequency electromagnetic exposure: Tutorial review on experimental dosimetry”, Bioelectromagnetics, Vol. 17, pp. 195-206, 1996.
- [9] M. A. Stuchly; A. Kraszewski; S. S. Stuchly; G. W. Hartsgrrove; R. J. Spiegel, “RF energy deposition in a heterogeneous model of man: Near-eld exposures”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 34, No. 12, pp. 944-950, Dec. 1987
- [10] Draft Standard IEEE P1528, Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Body Due to Wireless Communications Devices: Experimental Techniques, IEEE, New York, not yet published.
- [11] V. V. Athani, “Stepper motors: fundamentals, applications and design”, New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007
- [12] P. P. Acarnley, “Stepping motors: a guide to theory and practice”, IEE control engineering series, Institution of Electrical Engineers, 2002