

Simulación de los movimientos de la rodilla

Frost G.

Lab. de Biomecánica, Area de Ing. Biomédica, Dpto. Ing. Eléctrica
U.A.M.-Iztapalapa. México D.F.

RESUMEN

Uno de los factores esenciales en el diseño de prótesis de rodilla, es el movimiento que tiene ésta en diversas actividades cotidianas. En este artículo se presenta la simulación de dichos movimientos haciendo uso de un mecanismo RRRR espacial.

La rodilla ha sido una de las articulaciones más estudiadas debido a sus características anatómo-fisiológicas, las afecciones que presenta y al importante papel que desempeña en la transmisión de cargas durante la realización de las diferentes actividades cotidianas.

En esencia, la rodilla trabaja comprimida por el peso que soporta, debe tener una gran estabilidad en extensión completa y una gran movilidad en flexión. El movimiento del eje transversal en flexión es la principal característica anatómo-funcional de la articulación de la rodilla. Esto provoca un movimiento de deslizamiento y rodamiento de los cóndilos femorales sobre las glenoides, permitiendo movimientos rotacionales de la articulación.

El movimiento principal de la rodilla es el de flexión-extensión, el cual se realiza alrededor del eje XX' , Fig. 1. Además, esta articulación posee dos movimientos adicionales, el longitudinal (ab-adducción) que se lleva a cabo alrededor de YY' y el de lateralidad (rotación int.-externa) alrededor de ZZ' [1], [2].

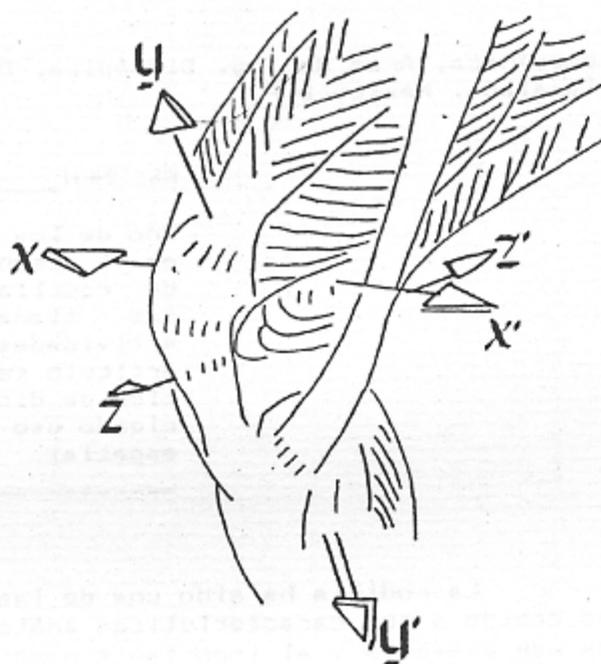


Fig.1 Ejes de movimiento

Los movimientos de la rodilla están gobernados por los ligamentos, los cuales representan cuatro puntos de estabilidad. De estos las estructuras más importantes que rigen el movimiento sagital son los ligamentos cruzados. El sistema completo fémur-ligamentos cruzados-tibia puede entenderse como una cadena cinemática cerrada, Fig.2, constituida de cuatro eslabones:

1. Elemento distal del fémur. Eslabón A-B.
2. Extremidad proximal de la tibia. Eslabón $A_1 - B_1$.
3. Ligamento cruzado anterior. Eslabón B- B_1 . (O)
4. Ligamento cruzado posterior. Eslabón A- A_1 . (H)

Cuando el eslabón $A_1 - B_1$ se mueve, su trayectoria está determinada por las barras cruzadas O,H. En cualquier posición P ($A_1 - B_1$) será tangente a una curva ovoide. Dicha curva es similar al contorno condíleo. Si el eslabón rígido P, el cual no es una representación exacta de la superficie tibial, se sustituye por un eslabón que se asemeje más al plato tibial, F_1 , el mecanismo describirá una curva casi idéntica al contorno femoral. Fig.2

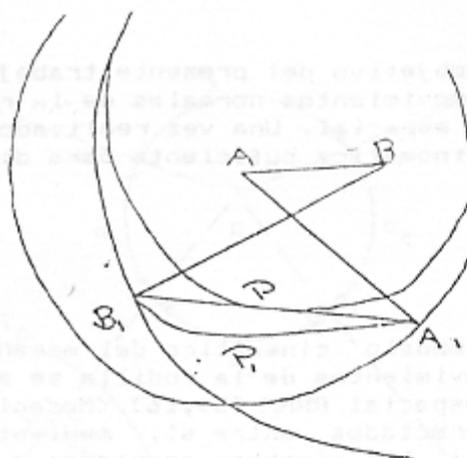


Fig. 2 Representación del sistema fémur-ligamentos cruzados-tibia

Dado que es una articulación localizada entre los dos brazos de palanca más grandes del cuerpo, está sujeta a esfuerzos mecánicos severos además, es necesario cumplir con el movimiento tibiofemoral requerido para desempeñar distintas actividades cotidianas lo cual se resume en la tabla siguiente [3],[4]:

TIPO DE MOVIMIENTO	FLEXION/ EXTENSION	AB-ADDUCCION	ROTACION INT-EXTERNA
Caminar	67° (54°-79°)	3° + 8° = 11°	7° + 8° = 15°
Subir escaleras	21° (8°-29°)		
Sentarse	83° (60°-98°)		
Levantar un objeto	71°		

Fig. 4 Programa de movimiento

El objetivo del presente trabajo fuè simular lo mejor posible los movimientos normales de la rodilla, utilizando un mecanismo RRRR espacial. Una vez realizado esto, se cuenta con la información cinemática suficiente para diseñar una prótesis de rodilla.

DESARROLLO

El modelo cinemático del mecanismo que propongo para generar los movimientos de la rodilla se muestra en la Fig.3. Es un mecanismo espacial RRRR [5],[6] (Mecanismo formado por cuatro eslabones, conectados entre sí, mediante uniones que permiten rotación entre los miembros acoplados a ella) de un grado de libertad, cuya entrada (eslabón cuyo movimiento acciona al mecanismo) es el elemento 2 y cuya salida (eslabón cuyo movimiento es el resultante) es el elemento 4. Supóngase que se requiere satisfacer el programa de movimiento dado en la Fig.4, la cual muestra una función continua $\phi(\psi)$ donde ψ es el ángulo de rotación a la entrada del mecanismo propuesto en tanto que ϕ es el ángulo de rotación a la salida. Debido al número limitado de parámetros por determinar (los cuatro ángulos que caracterizan al mecanismo), se podrían satisfacer, exactamente, muy pocas posiciones lo cual limitaría su aplicación. Con el fin de simular lo más fielmente posible dicha curva se recurre a formular el problema como uno de optimización lo cual permite satisfacer un número mayor de posiciones aunque no exactamente [7].

El problema de síntesis, es del tipo de Generación de Función, dada una $f=f(x)$, encontrar los parámetros del mecanismo que produzcan la relación de entrada-salida que satisfaga la ecuación mencionada con anterioridad.

El desarrollo teórico para este problema se encuentra en [8]. En particular, para un mecanismo espacial RRRR, la función de entrada-salida es:

$$F(\psi_i, \phi_i) = c d_1 c d_2 c d_4 - c d_3 + s d_1 s d_2 c d_4 c \psi_i + s d_2 s d_4 s \psi_i s \phi_i + \\ + c d_1 s d_2 s d_4 c \psi_i c \phi_i - s d_1 c d_2 s d_4 c \phi_i = 0$$

$$i = 1, \dots, m \quad \dots 1$$

donde

$$s = \sin \quad \text{y} \quad c = \cos$$

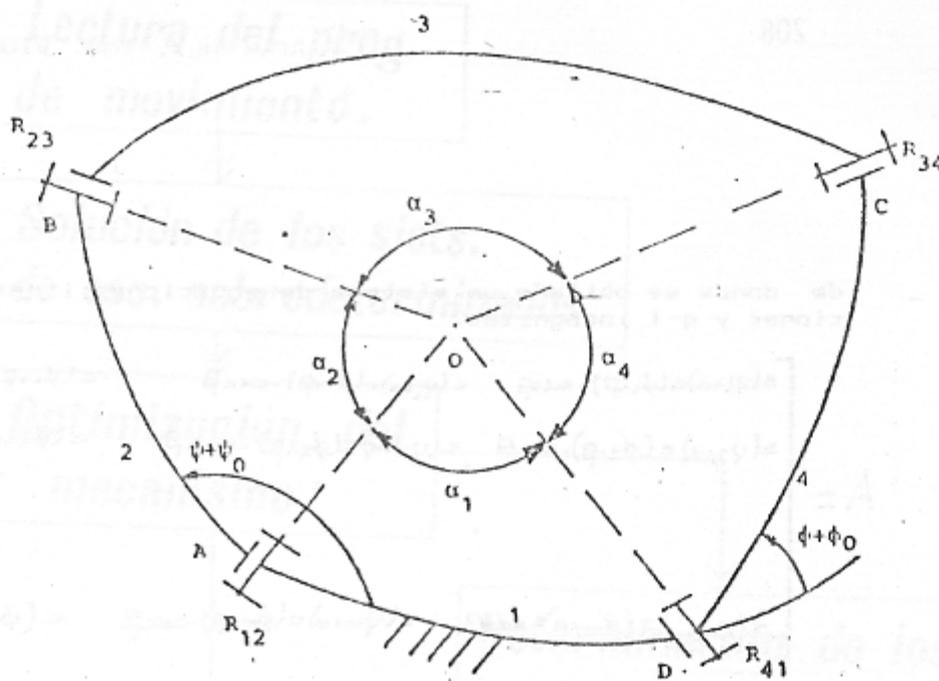


Fig.3 Mecanismo RRRR

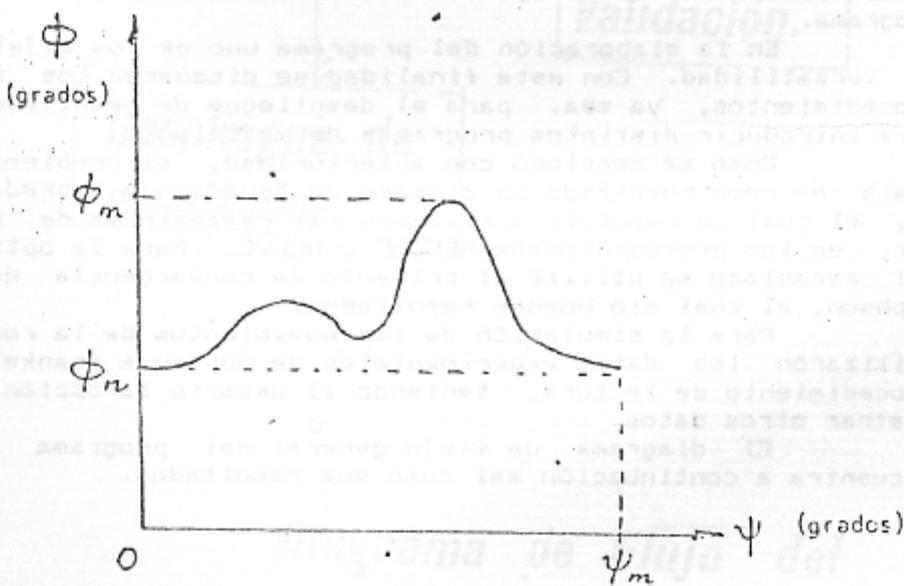


Fig.4 Programa de movimiento

de donde se obtiene un sistema de ecuaciones lineal con r ecuaciones y $q-1$ incógnitas.

$$A = \begin{bmatrix} s(\psi_{11\alpha})s(\phi_{11\beta}) - \alpha\alpha\beta & c(\psi_{11\alpha})c(\phi_{11\beta}) - \alpha\alpha\beta & c(\phi_{11\beta}) - c\beta \\ s(\psi_{21\alpha})s(\phi_{21\beta}) - \alpha\alpha\beta & c(\psi_{21\alpha})c(\phi_{21\beta}) - \alpha\alpha\beta & c(\phi_{21\beta}) - c\beta \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s(\psi_{m1\alpha})s(\phi_{m1\beta}) - \alpha\alpha\beta & c(\psi_{m1\alpha})c(\phi_{m1\beta}) - \alpha\alpha\beta & c(\phi_{m1\beta}) - c\beta \end{bmatrix}$$

Basándose en las ecuaciones de síntesis se desarrollaron e implementaron los procedimientos necesarios para la realización de los cálculos y obtención de los parámetros que caracterizan a un mecanismo espacial RRRR. Una vez realizado esto, se procedió al análisis del mecanismo resultante verificando que dicho mecanismo satisfaga las condiciones dadas al inicio del programa.

En la elaboración del programa uno de los objetivos fue la versatilidad. Con esta finalidad se diseñaron los distintos procedimientos, ya sea, para el despliegue de resultados, como para introducir distintos programas de movimiento.

Como se mencionó con anterioridad, el problema de síntesis da como resultado un sistema de ecuaciones sobredeterminado, el cual se resolvió utilizando las reflexiones de Householder, en los procedimientos HECOMP y HOLVE. Para la optimización del mecanismo se utilizó el criterio de convergencia de Newton-Raphson, el cual dió buenos resultados.

Para la simulación de los movimientos de la rodilla, se utilizaron los datos experimentales de Nordin & Frankel en el procedimiento de lectura, teniendo el usuario la opción de suministrar otros datos.

El diagrama de flujo general del programa ZETTA se encuentra a continuación así como sus resultados.

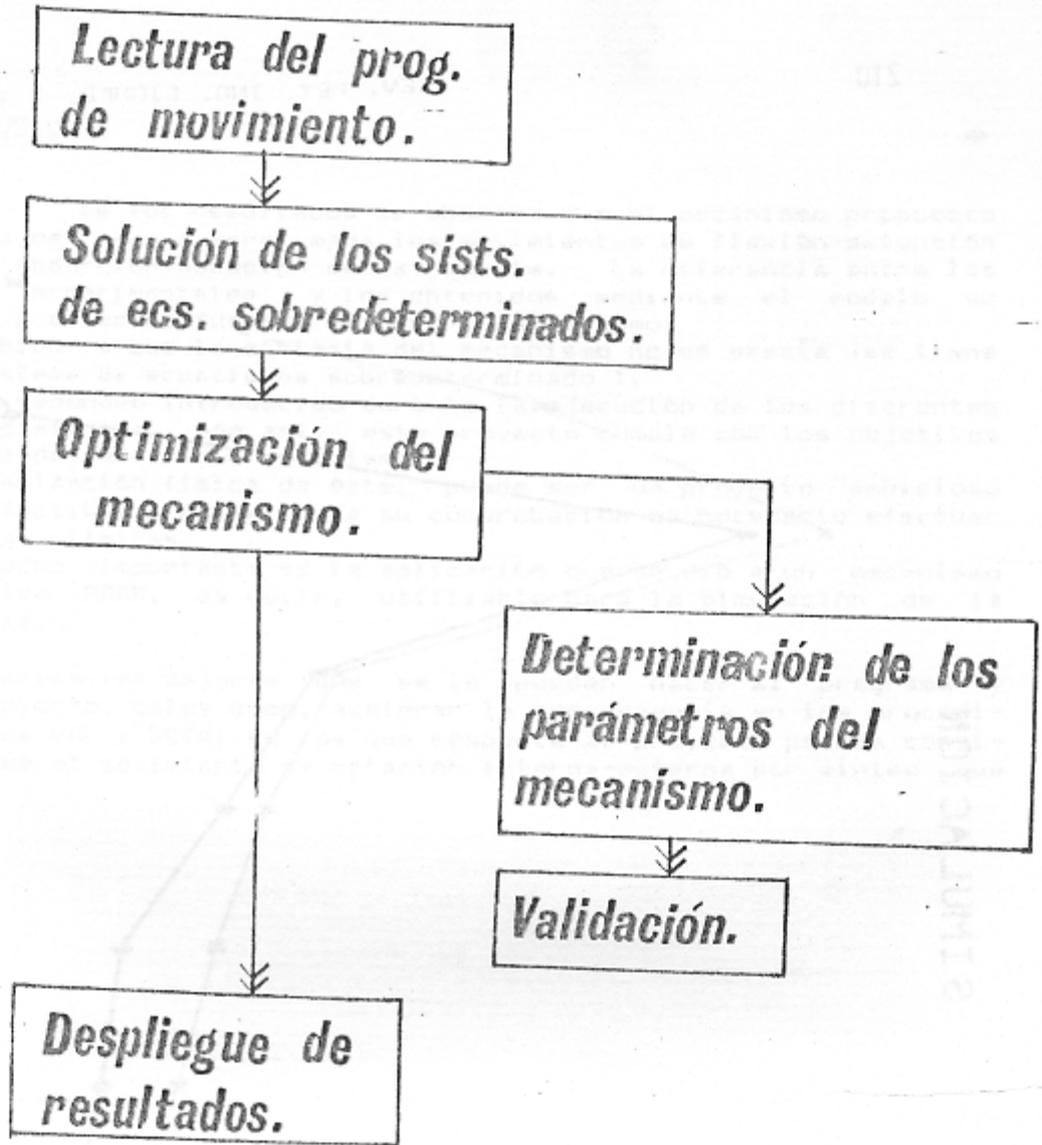
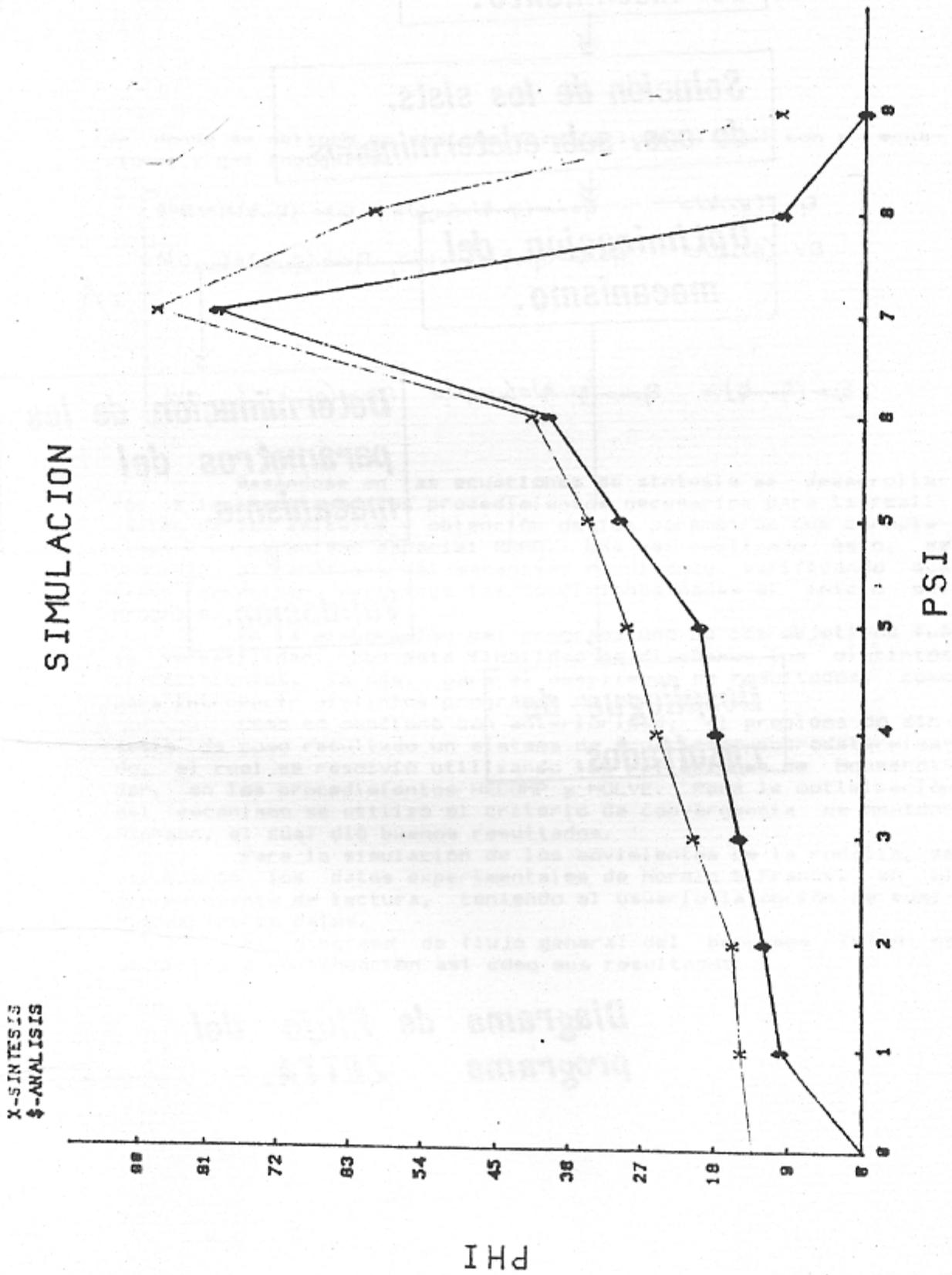


Diagrama de Flujo del programa ZETTA.



CONCLUSIONES

De los resultados se observa que el mecanismo propuesto simula de manera aproximada los movimientos de flexión-extensión y de abducción-adducción de la rodilla. La diferencia entre los datos experimentales y los obtenidos mediante el modelo se deben a diversas fuentes de error, tales como:

Debido a que la síntesis del mecanismo no es exacta (se tiene un sistema de ecuaciones sobredeterminado).

El redondeo introducido durante la ejecución de los diferentes procedimientos. Aún así, este proyecto cumple con los objetivos planteados al inicio del mismo.

La realización física de éste, puede ser un proyecto ambicioso pero factible, donde, para su comprobación es necesario efectuar pruebas clínicas.

Un hecho importante es la aplicación que se dió a un mecanismo esférico RRRR, es decir, utilizarlo para la simulación de la rodilla.

Son varias las mejoras que se le pueden hacer al programa y al proyecto, tales como, acelerar la convergencia en los procedimientos VAL y BETA; en los que respecta al proyecto podría considerarse el movimiento de rotación interna-externa por mínimo que sea.

BIBLIOGRAFIA:

- 1.-Kapandji I.A. "Fisiologia Articular", vol.II. Ed.Masson, Segunda Edición.
- 2.-Nissan M."Review of Some Basic Assumptions in Knee Biomechanics". J.Biomechanics, Vol 5, pp 581-589, 1972.
- 3.-Imman V.T.,Ralston H.J. & Todd F, "Human Walking". Williams & Wilkins,1981.
- 4.-Friedebold G. & Kölbl R. " State of the Art of the Hip and Knee Replacement". Advances in Artificial Hip and Knee Technology, Springer-Verlag, Erlangen, 1976.
- 5.-Angeles J. "Spatial Kinematic Chains. Analysis-Synthesis-Optimization ". Springer-Verlag 1982.
- 6.-Hartenberg & Denavit. "Kinematic Synthesis of Linkages" McGraw Hill 1964.
- 7.-Frost G. "Simulación de los movimientos de la rodilla mediante un mecanismo RRRR esférico" .Tesis de Licenciatura. U.A.M. Julio/1985.
- 8.-Angeles J. "Optimierung der Synthese für Ebenes, Räumliches und Sphärisches Viergelengetriebe des Typs RRRR für die Annäherung Zeugungsfunktion". DESFI, UNAM.