

## Control de un Sensor Háptico Bidireccional para un Brazo Robótico en Laparoscopia.

Alberto S. Vaca<sup>1</sup>, Marcos E. Gaudiano<sup>1,2</sup>, Oscar Cáceres<sup>1</sup> y Ladislao Mathé<sup>1,3</sup>.

<sup>1</sup> Grupo de Robótica y Sistemas Integrados. FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Estudios de Matemática de Córdoba, CONICET. Argentina.

gaudiano@famaf.unc.edu.ar

<sup>3</sup> ing.ladislao.mathe@gmail.com

**Resumen**— Se describe un trabajo teórico y experimental realizado sobre un brazo robótico para laparoscopia dotado de un sensor háptico. Este tipo de sensor cumplirá dos funciones. Por un lado de posicionamiento, permitiendo al cirujano guiar el brazo hacia el lugar deseado (posicionamiento sobre el paciente, aproximación al endoscopio insertado en el paciente, etc.). También tendrá una función de seguridad, de manera que si el endoscopio insertado en el paciente se trabara con algún órgano, el sensor adquiera esta información y detenga al brazo robótico, evitando así posibles lesiones.

Actualmente existe una gran incerteza tanto sobre cuáles son las especificaciones técnicas de los componentes del aparato, como de las leyes físicas que lo gobiernan, porque el brazo fue construido sin seguir ningún diseño definido *a priori*. Se presenta una alternativa sobre cómo dimensionar el aparato para una posterior compensación.

**Palabras Clave**— robot, sensor, háptico, laparoscopia, dimensionamiento

### 1. INTRODUCCIÓN

En el año 2005 el Servicio de Cirugía Pediátrica, División Cirugía Laparoscópica del Hospital de Niños de la Santísima Trinidad de Córdoba, tomó contacto con investigadores del Grupo de Robótica y Sistemas Integrados de la Universidad Nacional de Córdoba (GRSI), proponiendo construir un robot que asistiera al cirujano sosteniendo la cámara endoscópica, posicionándola con precisión según algún comando. El propósito de desarrollar este tipo de tecnología en el país nace a partir de la necesidad de formar recursos humanos relacionados con la robótica biomédica que permita encarar nuevos desarrollos, optimizar su empleo y realizar mantenimiento y reparación. Bajo esta premisa se diseñó un primer prototipo modelo, bautizado Lapabot [1]. En esta oportunidad, se presenta una segunda versión del robot, que consiste en un robot tipo SCARA, y se describen las actividades realizadas para adaptarle un sensor háptico compuesto por dos celdas de carga. Este sensor cumple dos misiones: la primera es la de posicionamiento y la segunda como elemento de seguridad para evitar dañar al paciente.

El estado del arte y la arquitectura del brazo robótico con el sensor háptico se discuten en la sección 2. En la sección 3 se describe el funcionamiento del robot mediante un diagrama de bloques. En la sección 4 se detalla como se ajusta un modelo matemático que intenta imitar al robot real. Un modelo cinemático se presenta como trabajo futuro en la sección 5. Las conclusiones del trabajo se exponen en el apartado 6.

### 2. ARQUITECTURA DEL BRAZO Y SU SENSOR HÁPTICO.



Figura 1: Brazo Laparoscópico desarrollado en el GRSI. En el extremo del brazo, está montado el sensor háptico (Fig. (2))

Distintas configuraciones cinemáticas han sido propuestas y estudiadas a nivel mundial, entre las que se puede citar el manipulador de seis grados de libertad AESOP, del Departamento de Cirugía de la Universidad de California, en el Centro Médico de San Diego [2], la arquitectura de cinco grados de libertad de investigadores mejicanos [3], o el novedoso KaLAR, de estructura flexible [4] como las más representativas dentro del ámbito académico.

Ya en los años 90, está documentado el estudio de la aplicación de los brazos robóticos del tipo SCARA, en laparoscopia (ver por ej. [5, 6]). El segundo diseño que se describe en este documento consta de 2 grados de libertad,

que responden a un sistema de coordenadas polares. Por lo tanto, el movimiento correspondiente al radio variable se implementó a través de una corredera (telescópica), barriendo entre un radio mínimo y otro máximo, mientras que el movimiento angular tiene un rango de variación de  $\pm 90^\circ$  (Fig.(1)).

Por otro lado, vale mencionar que esta arquitectura es aceptada en cirugía laparoscópica, principalmente por el hecho de que permite situar la base del robot sobre la cabeza del paciente, maximizando el espacio de trabajo de los cirujanos (esto se sabe de conversaciones con profesionales médicos; ver también [5]).

Los sensores hápticos aplicados en laparoscopia han sido



Figura 2: Sensor háptico bidireccional.

estudiados en los últimos años (ver por ej. [7]). El sensor háptico de la Fig. (2) funciona con la simple presión que produce el tacto sobre un par de celdas de carga. Estas dos celdas se han montado sobre un dispositivo de manera que cada celda esté perpendicular respecto a la otra. De este modo, cualquier fuerza que se aplique al dispositivo, será medida tanto en magnitud como en el sentido en que se ha aplicado la fuerza respecto a las coordenadas  $x - y$  asociada a cada celda. Estas componentes  $x$  e  $y$  se corresponderán respectivamente al movimiento radial y al tangencial del brazo. Se logra así una descomposición bidireccional de la fuerza aplicada, al obtener de las celdas tensiones eléctricas proporcionales a las componentes radial y tangencial de la fuerza, que son quienes provocan finalmente el movimiento del brazo: a mayor fuerza aplicada, mayor velocidad.

### 3. DIAGRAMA DE BLOQUES.

Como se muestra en la Fig. (3) el extremo del brazo robótico realizará un movimiento en un plano, con una velocidad  $v_r$  (compuesta por una velocidad tangencial y

una radial) proporcional a la fuerza aplicada  $F$ . El diagrama de bloques del sistema se ve en la Fig. (4). La fuerza  $F$

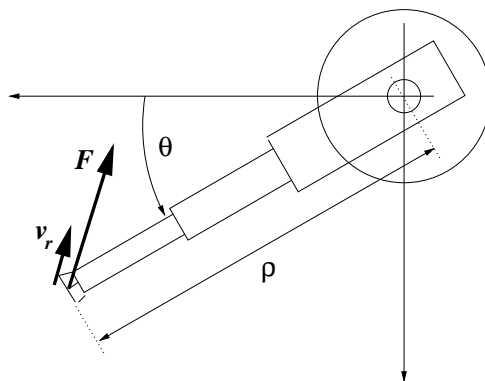


Figura 3: La velocidad de referencia  $v_r$  del extremo del brazo será proporcional a la fuerza aplicada  $F$ .

es aplicada sobre el sensor háptico, que es un par de celdas de cargas que producen señales  $V_{in} = [V_{1in}, V_{2in}]$  proporcionales a las componentes de la fuerza en sus direcciones tangencial ( $\theta$ ) y radial ( $\rho$ ) respectivamente. Luego, las señales pasan a un acondicionador de señales que las amplifica, filtra y digitaliza, convirtiéndolas en una velocidad de referencia  $v_{rD}$ , desplazando al brazo robótico con el dispositivo háptico en su extremo, en la misma dirección que  $F$ , satisfaciendo:

$$v_{rD} = \begin{pmatrix} a(\rho - \bar{\rho}) + b & 0 \\ 0 & c \end{pmatrix} V_{in}, \quad (1)$$

donde  $\bar{\rho}$  es el radio medio de acción y  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros totalmente conocidos/calculables dentro del software [8]. El error de la velocidad  $v_e$  surge de la resta por software de la velocidad  $v_{rD}$  con la velocidad de realimentación  $v_D$  (también digitalizada). El software hace que esta velocidad  $v_e$  sea proporcional a la tensión aplicada  $V = [V_1, V_2]$  sobre cada uno de los motores (bloque acondicionador "A"). A continuación, otro sensor mide la velocidad angular  $\omega = [\omega_1, \omega_2]$  de los motores en  $\theta$  y  $\rho$  y la digitaliza transformándola en  $\omega_D$ . Luego se multiplica la 1ra. componente de  $\omega_D$  por  $n$  (relación de engranajes del motor en  $\theta$ ) y por el radio  $\rho$  y, se multiplica la 2da. componente  $\omega_D$  por el paso radial  $\kappa$  del motor en  $\rho$ . El resultado será la velocidad  $v_D$  a la que se mueve el extremo del brazo, la cual realimentará el diagrama de bloques.

El brazo robótico actualmente funciona al tacto pero existen retardos, y no se alcanza la precisión que se ha propuesto para este prototipo. Para realizar una compensación óptima del robot, se debería conocer lo más exactamente posible los modelos matemáticos de los componentes correspondientes a cada uno de los bloques de la Fig. (4). Se conoce el modelo de cada uno de éstos, excepto el del bloque "motor( $\rho, \theta$ )+carga". Precisamente, el problema radica aquí, porque la construcción fue realizada en una serie de etapas por diversos estudiantes de grado, montando motores y mecanismos en desuso o de

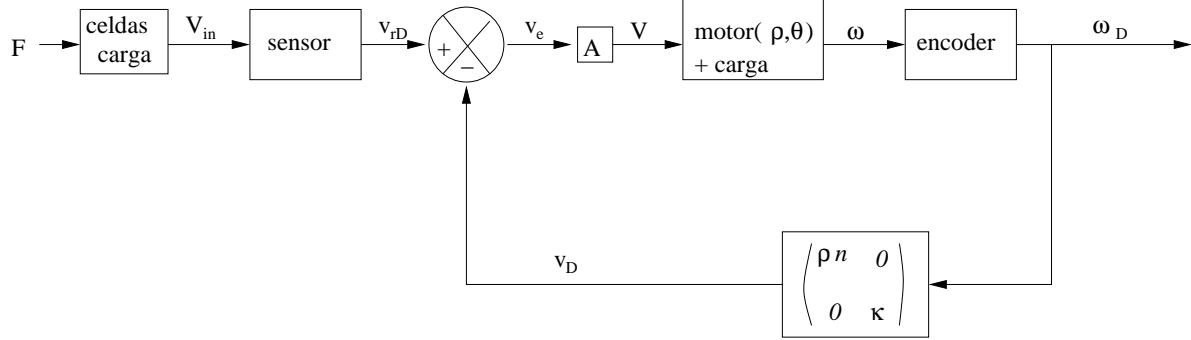


Figura 4: Diagrama de bloques del sistema.

origen prácticamente desconocido, adquiridos en el mercado local de modo que, al final, se tiene una gran incerteza tanto sobre cuáles son las exactas leyes físicas que gobiernan al sub-bloque en cuestión, como de los valores de los parámetros que éstas involucren.

#### 4. MODELO MATEMÁTICO

Mediante un modelo matemático sencillo, nos aproximaremos al sistema físico real, pero intentando tener en cuenta sus principales características. De esta manera, el movimiento del brazo se supondrá regido por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{d}{dt} (J_1(\rho)\omega_1) = -B_1\omega_1 + k_1 I_1(t) \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = n\omega_1 \quad (3)$$

$$J_2\dot{\omega}_2 = -B_2\omega_2 + k_2 I_2(t) \quad (4)$$

$$\dot{\rho} = \kappa\omega_2 \quad (5)$$

donde  $J_1(\rho)$  y  $J_2$  son los momentos de inercia equivalentes que ven los motores ( $J_1$  es función de  $\rho$  porque el brazo es telescópico, mientras que  $J_2$  se asumirá constante),  $B_i$  son coeficientes asociados a la fricción (de ahora en adelante,  $i = 1, 2$ ),  $k_i$  son las constantes electromecánicas de los motores (medidas en el Sistema MKS) y  $I_i(t)$  son las corrientes de armaduras, que se asumirán que satisfacen:

$$V_i(t) = L_i \dot{I}_i + R_i I_i + k_i \omega_i, \quad (6)$$

donde  $L_i$  y  $R_i$  serán interpretados como inductancias y resistencias efectivas asociadas a los motores.

La compensación del brazo robótico se realizará sobre el modelo matemático que mejor aproxime al sistema físico real. Es decir, ahora el problema consiste en obtener tanto los parámetros  $J_2$ ,  $B_i$ ,  $k_i$ ,  $L_i$  y  $R_i$ , como la función  $J_1(\rho)$  para los que las soluciones del sistema de Ecs. (2-6) se aproximen lo mejor posible a lo que se observe experimentalmente.

Nótese que, aún obteniendo los mejores parámetros que ajusten el modelo, muchos de ellos posiblemente no tengan un correlato físico directo en el brazo. Por ej., claramente se ve que eso ocurrirá con los  $L_i$ , los cuales, debido a su posición dentro de las Ecs. (6), darán cuenta de algún tipo de impedancia inductiva resultante y presente

en el sistema físico real, pero nó de una componente en particular del brazo robótico.

#### 4.1. Determinación de los parámetros.

Se procede a manipular el extremo del brazo y hacerlo barrer todas sus posiciones posibles. Con esto, mediante medición, se puede crear un registro de las velocidades angulares de los motores  $\omega_i(t)$ , las corrientes de armaduras  $I_i(t)$  y las tensiones  $V_i(t)$  para una serie de tiempos  $t = t_1, t_2, \dots, t_N$  (también se supondrán conocidas  $\dot{I}_i(t)$ ,  $\dot{\omega}_i(t)$ , que serán computadas como cocientes incrementales, a partir de las series temporales de  $I_i(t)$  y  $\omega_i(t)$ , respectivamente). Según la teoría de los *cuadrados mínimos* (ver por ej. [9]), los mejores parámetros que ajusten las Ecs. (6) pueden obtenerse minimizando la función  $G = G(L, k, R)$  definida por

$$G = \sum_t \left( L \dot{I}_i(t) + k \omega_i(t) + R I_i(t) - V_i(t) \right)^2 \quad (7)$$

para  $L, k, R \geq 0$ . El problema de la Ec. (7) se puede resolver con la función *quadprog* de Matlab.

Suponiendo conocidas ahora las constantes  $k_i$ , los momentos de inercia  $J_1 = J_1(\rho)$  (para un radio  $\rho$  fijo) y  $J_2$  y los  $B_i$  se pueden obtener de un modo similar, minimizando  $H = H(J, B)$  dada por

$$H = \sum_t \left( J \dot{\omega}_i(t) + B \omega_i(t) - k_i I_i(t) \right)^2, \quad (8)$$

En la Fig. (5) se muestra cómo funciona en la práctica lo recién descrito para el motor que proporciona movimiento angular.  $L_1$ ,  $k_1$  y  $R_1$  fueron obtenidos minimizando la Ec. (7) a radio fijo, variando  $\rho$  entre 0.582 m y 0.805 m (el mínimo y el máximo, respectivamente).  $J_1$  y  $B_1$  son promedios obtenidos al minimizar la Ec. (8) sobre varias tandas de mediciones para  $\rho = 0.693$  m. Estos parámetros se introducen en el sistema de ecuaciones diferenciales (2-6), al cual se lo resuelve numéricamente con la tensión de entrada  $V_1(t)$  que se mide experimentalmente, y con condiciones iniciales iguales a las del sistema real. Se observa que la correspondencia lograda es buena, aún teniendo en cuenta que las mediciones experimentales de  $V_1(t)$ ,  $I_1(t)$ ,  $\theta(t)$  y  $\omega_1(t)$  que se usaron en la figura

constituyen una sola tanda de medición. Además, ambas curvas de  $\theta(t)$ , i.e. la experimental y la teórica que es solución (2-6), se superponen al menos para  $t \leq 2$  s, siendo esto suficiente como para poder estudiar con éstas, la manera de reducir los tiempos de asentamiento.

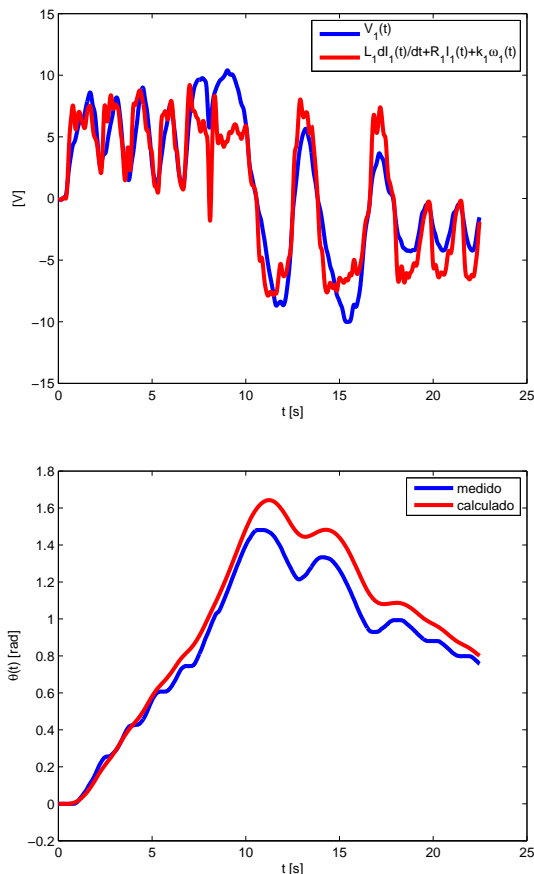


Figura 5: Arriba: Un ejemplo de la manera en que la Ec. (6) se satisface con las mediciones experimentales de la corriente de armadura  $I_1(t)$  y de la velocidad angular  $\omega_1(t)$  del motor que proporciona movimiento angular, donde  $L_1 = 0$  H,  $R_1 = 267 \Omega$  y  $k_1 = 0.825$  Vs. Abajo: el ángulo de barrido  $\theta(t)$  que describe el brazo (al aplicar sobre el motor la tensión  $V_1(t)$  de arriba) que se midió experimentalmente (para  $\rho = 0.693$  m), confrontada con el  $\theta(t)$  de la solución del sistema de ecuaciones diferenciales (2-6) para  $J_1 = 0.00927$  kgm<sup>2</sup> y  $B_1 = 0.0104$  Js.

## 5. MODELO CINEMÁTICO.

Una vez obtenidos los parámetros que mejor ajustan el modelo matemático al brazo robótico, se podrá simularlo por computadora y conseguir así dimensionar un controlador PID a ensamblar en el brazo, para conseguir la compensación que se desee.

Incluso sería muy útil obtener una fórmula para  $J_1(\rho)$ , que se obtendría calculando ésta para varios radios fijos  $\rho_k$  ( $k = 1, \dots, M$ ) (como se describió en la sección anterior), para luego realizar un *cubic smooth spline* sobre los puntos  $(\rho_k, J_1(\rho_k))$ ,  $k = 1, \dots, M$  (el comando para

eso en Matlab se llama *csaps*). La  $J_1(\rho)$  así obtenida se podría fácilmente incorporar al software reemplazando la Ec. (1) por

$$\mathbf{v}_{rD} = \begin{pmatrix} \frac{KJ_1(\rho)}{\rho^2} & 0 \\ 0 & c \end{pmatrix} \mathbf{V}_{in}, \quad (9)$$

donde  $K$  es una constante que se determina experimentalmente y  $c$  es la de la Ec. (1) (ver [8]). Así resultaría la velocidad  $\mathbf{v}_{rD}$  exactamente proporcional a  $\mathbf{F}$ , a lo largo de todo el rango posible de radios  $\rho$  y no sólo cerca del radio medio  $\bar{\rho}$ . Una vez hecho eso, se podría pasar a una etapa posterior, en la que dada una trayectoria en el plano  $(x(t), y(t))$  se busca accionar los motores del brazo para que el extremo del mismo describa la curva en cuestión. Si pensamos la curva como una sucesión discreta de puntos  $\mathbf{x}_m = (x_m, y_m)$  ( $m = 1, 2, \dots$ ), dados con un paso temporal pequeño  $\Delta t$ , la velocidad puede ser aproximada naturalmente por  $\mathbf{v}_m = (\mathbf{x}_{m+1} - \mathbf{x}_m) / \Delta t$ . Si la compensación es suficientemente buena, para ir desde  $\mathbf{x}_m$  hasta  $\mathbf{x}_{m+1}$  habrá que aplicar una fuerza  $\mathbf{F}_m$  proporcional a  $\mathbf{v}_m$  en el extremo del brazo durante un tiempo  $\Delta t$ . Teniendo en cuenta la Ec. (9) y dado que la tensiones  $V_{1in}$  y  $V_{2in}$  son proporcionales a las componentes tangencial ( $F_1$ ) y radial de la fuerza ( $F_2$ ) respectivamente, se deberá cumplir que:

$$\begin{pmatrix} V_{1in} \\ V_{2in} \end{pmatrix}_m = \begin{pmatrix} \frac{\rho_m^2 \cos \theta_m}{KJ_1(\rho_m)} & \frac{\rho_m^2 \sin \theta_m}{KJ_1(\rho_m)} \\ -\frac{\sin \theta_m}{c} & \frac{\cos \theta_m}{c} \end{pmatrix} \mathbf{v}_m, \quad (10)$$

donde  $\tan \theta_m = y_m/x_m$  y  $\rho_m = \sqrt{x_m^2 + y_m^2}$ . Por lo tanto, desconectando los sensores hápticos, pero suministrando señales de tensión de referencia escalonadas dadas por la Ec. (10), se conseguirá que la punta del brazo, siga la trayectoria  $(x(t), y(t))$  deseada.

## 6. CONCLUSIONES

El método descrito para dimensionar las características dinámicas del brazo robótico con sensor háptico, en principio arrojó buenos resultados. En un futuro cercano esto proporcionaría un marco de trabajo limpio, que permitirá estudiar la compensación del aparato mediante simulación por computadora. Este camino, sería naturalmente factible de aplicar en otros sistemas de control, especialmente cuando se tenga un alto grado de incerteza sobre su exacta cinemática y/o sus especificacioneste técnicas.

*Este trabajo fue patrocinado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba.*

## REFERENCIAS

- [1] J. Pedroni y L. Mathé, "Compensadores de Modos Deslizantes Aplicados al Control Dinámico de un Robot Laparoscópico Experimental," *XIV Reunión de Trabajo Procesamiento de la Información y Control*, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina, 2011, págs. 798-803.

- [2] Brown University, "Robotics: the Future of Minimally Invasive Heart Surgery," *Division of Biology and Medicine*, Brown University, USA, [http://biomed.brown.edu/Courses/BI108/BI108\\_2000\\_Groups/Heart\\_Surgery/Robotics.html#Aesop](http://biomed.brown.edu/Courses/BI108/BI108_2000_Groups/Heart_Surgery/Robotics.html#Aesop).
- [3] A. Minor, J. Mosso et al, "Robot para Cirugía Laparoscópica", *Revista Mejicana de Ingeniería Biomédica*, Sociedad Mejicana de Ingeniería Biomédica, Distrito Federal, México, 2002, Vol. XXIII.
- [4] K. Seong-Young Ko, K. Jonathan, et al., "Intelligent Interaction between Surgeon and Laparoscopic Assistant Robot System," *2005 IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication*, 2005, págs. 60-65. 0-7803-9275-2/05.
- [5] J. Funda, B. Eldridge, K. Gruben, et al., "Comparison of Two Manipulator Designs for Laparoscopic Surgery", *Telem manipulator and Telepresence Technologies*, SPIE, 1994, Vol.2351, págs. 172-183.
- [6] A. Faraz, S. Payandeh y A. Nagy, "Issues and Design Concepts in Endoscopic Extenders", en *Proceedings 6th IFAC Symposium on MMS*, MIT, Estados Unidos, 1995, págs. 109-114.
- [7] E. Hesselbacher, A. Kilayko, M. Russell y J. Varbanov, "Laparoscopic Manipulator with Haptics Force Feedback", *Bioengineering Conference (NEBEC), 38th Annual Northeast*, 2012, págs. 259-260.
- [8] La Ec. (1) obedece al hecho de que, si la fuerza se aplica enteramente en la dirección radial, la velocidad terminará siendo proporcional a fuerza, mientras que si se aplica en la dirección tangencial, dependerá del punto de aplicación, resultando proporcional a  $\rho^2/J(\rho)$  (donde  $J(\rho)$  es el momento de inercia variable del brazo). Por lo tanto, para que dada una fuerza, el movimiento resultante sea el mismo en magnitud independientemente de la dirección de la fuerza aplicada, la función lineal  $a(\rho - \bar{\rho}) + b$  de (1) deberá finalmente corresponderse con el polinomio de Taylor de 1er. grado de  $J(\rho)/\rho^2$  centrado en  $\rho = \bar{\rho}$ .
- [9] D. Bertsekas, *Nonlinear Programming, 2nd. Edition*. Belmont, Estados Unidos. Athena Scientific, 1999.