

RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 1 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

Índice

Introducción.....	2
Análisis dinámico.....	3
Electrónica de control.....	4
Implementación en código VHDL y programar el FPGA de la ALTERA.....	8
Resultado de la simulación.....	10
Conclusiones finales.....	14
Bibliografía.....	14

RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 2 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

INTRODUCCIÓN:

En este trabajo práctico vamos a llevar a cabo el análisis dinámico del robot, complementando el análisis cinemática que hicimos en el trabajo practico anterior.

En el trabajo inicial consideramos los movimientos sin tener en cuenta las fuerzas que los producen, las velocidades lineales y angulares involucradas en dichos movimientos son generadas por las fuerzas y pares aplicados a la estructura mecánica y dependen también de las magnitudes de las masas y su distribución. Las relaciones involucradas en estos movimientos representan el **modelo dinámico del robot**.

Si bien en el presente trabajo se hará el análisis **utilizando las formulaciones lagrangianas**, por ser una herramienta más eficaz a medida que aumentan los grados de libertad, cabe destacar que existen otras formulaciones también validas como las newtonianas y variantes entre estas dos que se han ido adaptando para obtener una mejor implementación computacional.

Plantear este análisis complementa el estudio del comportamiento del robot para diseñar las etapas de control del mismo. Muchas veces se diseña la etapa de control basándose solamente en el análisis cinemático, esto no trae grandes inconvenientes si los movimientos de las articulaciones son suaves sin producir aceleraciones significativas. Es por ello que el trabajo también comprenderá un ejemplo numérico, a través del cual podremos elegir el motor indicado para controlar las articulaciones y comprobar que cumplan con las cuplas que exige la trayectoria elegida con sus correspondientes aceleraciones.

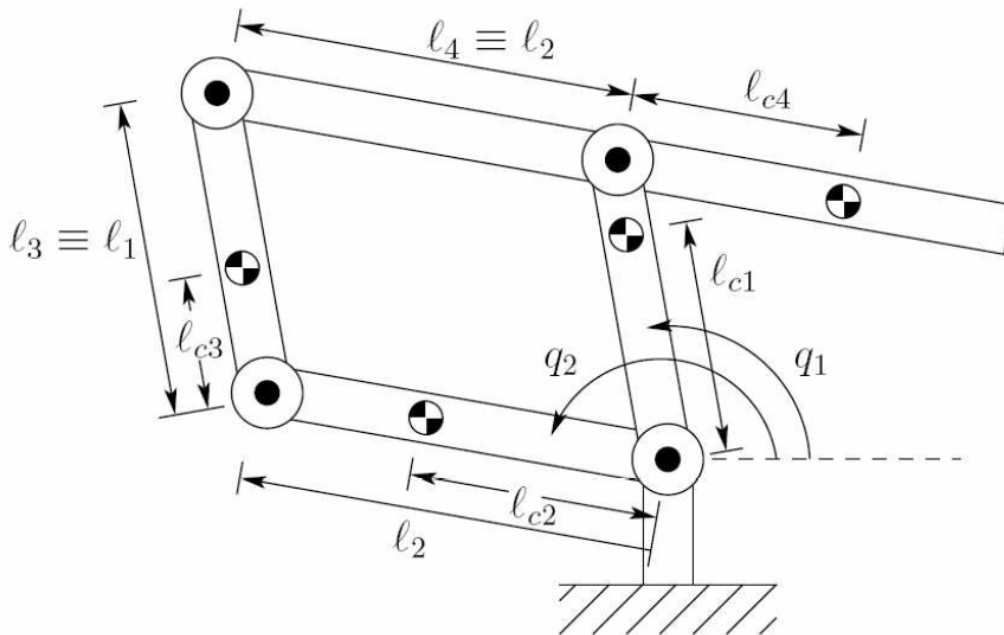
Para la generación de las trayectorias se implementara un control mediante modulación de ancho de pulso (PWM), para el cual se utilizara un lenguaje de descripción de hardware (VHDL) y será implementado sobre una FPGA de ALTERA.

Por ultimo se presentaran los resultados de la simulación los cuales permitirán analizar el comportamiento del robot y los sistemas mecánicos ante las trayectorias propuestas. Los resultados ayudaran al diseñador en la proyección y evaluación de la estructura mecánica, de los actuadores, de la electrónica de control utilizada y de las limitaciones en la generación de trayectorias utilizadas en el robot.

RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 3 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

ANALISIS DINÁMICO:

Tal como planteamos, el análisis dinámico lo vamos a realizar utilizando la formulación de Lagrange-Euler. Para comprender el análisis vamos a presentar la articulación a analizar y las convenciones para la representación del sistema:



La formulación lagrangiana se basa en el análisis energético y se plantea de la siguiente manera:

$$\tau = M \times \ddot{q} + H + C$$

Donde:

τ : Vector de fuerzas y pares motores efectivos aplicados sobre cada coordenada q_i .

M: Matriz de Inercias.

H: Matriz columna de fuerzas de Coriolis y Centrípetas.

C: Matriz columna de fuerzas de gravedad.

Donde la Matriz de Inercias es:

$$M_{11}(q) = m_1 l_{c1}^2 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 + I_1 + I_3$$

$$M_{12}(q) = d_{21}(q) = (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \cos(q_2 - q_1)$$

$$M_{22}(q) = m_2 l_{c2}^2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_{c4}^2 + I_2 + I_4$$

Si trabajamos con las matrices podremos llegar a:

$$T1 = (M_{11} + I_{h1}) \ddot{q}_1 + M_{12} \ddot{q}_2 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_2} \dot{q}_2^2 + g \cdot (m_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) \cos q_1$$

$$T2 = (M_{22} + I_{h2}) \ddot{q}_2 + M_{12} \ddot{q}_1 + \frac{\partial M_{12}}{\partial q_1} \dot{q}_1^2 + g \cdot (m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4}) \cos q_2$$

RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 4 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

Este mecanismo tiene la peculiaridad que si se eligen los parámetros de los brazos que cumplan la sencilla relación $L1=L3$ y $L2=L4$, las ecuaciones del manipulador están desacopladas, de manera que los movimientos q_1 y q_2 podrán ser controlados independientemente uno de otros.

Si a su vez diseñamos de tal manera que se cumpla:

$$m_2 \cdot l_3 \cdot l_{c3} = m_4 \cdot l_1 \cdot l_{c4}$$

Las ecuaciones dinámicas no contendrán ni la fuerzas de Coriolis ni las fuerzas centrífugas. Llevando estas consideraciones a las ecuaciones podemos obtener las ecuaciones de las cuplas exigidas a los motores:

$$T1 = M_{11} \cdot \ddot{q}_1 + \phi_1 \cdot \cos q_1$$

$$T2 = M_{22} \cdot \ddot{q}_2 + \phi_2 \cdot \cos q_2$$

$$T1 = (m_1 \cdot l_{c1}^2 + m_3 \cdot l_{c3}^2 + m_4 \cdot l_1^2 + I_1 + I_3) \cdot \ddot{q}_1 + g \cdot (m_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 \cdot l_1) \cdot \cos q_1$$

$$T2 = (m_2 \cdot l_{c2}^2 + m_3 \cdot l_2^2 + m_4 \cdot l_{c4}^2 + I_2 + I_4) \cdot \ddot{q}_2 + g \cdot (m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 \cdot l_{c4}) \cdot \cos q_2$$

DIMENSIONAMIENTO DE LOS MOTORES:

A nivel ejemplo proponemos las siguientes especificaciones para el mecanismo:

$$m_1=m_2=m_3=0,5 \text{ kg} \quad m_4=1 \text{ kg}$$

$$l_1=l_3=30 \text{ cm} \quad l_2=l_4=20 \text{ cm}$$

$$l_{c1}=l_{c3}=15 \text{ cm} \quad l_{c2}=10 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow m_2 \cdot l_3 \cdot l_{c3} = m_4 \cdot l_1 \cdot l_{c4}$$

$$l_{c4} = \frac{m_3 \cdot l_2 \cdot l_{c3}}{m_4 \cdot l_1}$$

$$l_{c4} = \frac{0,5 \text{ kg} \times 20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}}{1 \text{ kg} \times 30 \text{ cm}}$$

$$l_{c4} = 5 \text{ cm}$$

Ahora pasamos a calcular los momentos de inercia de cada link:

$$I_1 = I_3 = \frac{1}{12} \cdot m_1 \cdot l_1^2 = \frac{1}{12} \cdot 0,5 \text{ kg} \times 0,09 \text{ m}^2 = 0,00375 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_2 = \frac{1}{12} \cdot m_2 \cdot l_2^2 = \frac{1}{12} \cdot 0,5 \text{ kg} \times 0,04 \text{ m}^2 = 0,00166 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_4 = \frac{1}{12} \cdot m_4 \cdot l_4^2 = \frac{1}{12} \cdot 1 \text{ kg} \times 0,04 \text{ m}^2 = 0,00333 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 5 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

Ahora estamos en condiciones de calcular los componentes de la matriz de inercia:

$$M_{11} = m_1.l_{c1}^2 + m_3.l_{c3}^2 + m_4.l_1^2 + I_1 + I_3 = 0,5kg.0,0225m^2 + 0,5kg.0,0225m^2 + 1kg.0,09m^2 + 0,075kg.m^2$$

$$M_{11} = 0,1875kg.m^2$$

$$M_{22} = m_2.L_{c2}^2 + m_3.l_2^2 + m_4.l_{c4}^2 + I_2 + I_4 = 0,5kg.0,01m^2 + 0,5kg.0,04m^2 + 1kg.0,0025m^2 + 0,005kg.m^2$$

$$M_{22} = 0,0325kg.m^2$$

Luego resulta:

$$\phi_1 = g.(m_1.l_{c1} + m_3.l_{c3} + m_4.l_1). \cos q_1 = 9,8 \frac{m}{seg^2}. (2 \times 0,5kg.0,15m + 1kg.0,3m). \cos q_1$$

$$\phi_1 = 4,41Nm. \cos q_1$$

$$\phi_2 = g.(m_2.l_{c2} + m_3.l_2 - m_4.l_{c4}). \cos q_2 = 9,8 \frac{m}{seg^2}. (0,5kg.0,1m + 0,5kg.0,2m - 1kg.0,05m). \cos q_2$$

$$\phi_2 = 0,98Nm. \cos q_2$$

Entonces las ecuaciones de torque de los motores son:

$$T1 = 0,1875kg.m^2.\ddot{q}_1 + 4,41Nm. \cos q_1$$

$$T2 = 0,0325kg.m^2.\ddot{q}_2 + 0,98Nm. \cos q_2$$

Para seleccionar los motores tomaremos los ángulos límites del movimiento:

$$q_{1i} = 115^\circ = 2,007rad$$

$$q_{2i} = 180^\circ = 3,141rad$$

$$q_{1f} = 30^\circ = 0,523rad$$

$$q_{2f} = 45^\circ = 0,785rad$$

Si suponemos que la articulación va a moverse a aceleración constante y que cada movimiento lo debe hacer en 3seg:

$$q_1\Delta = \ddot{q}_1 \frac{t^2}{2} \Rightarrow \ddot{q}_1 = q_1\Delta. \frac{2}{t^2} = |q_{1f} - q_{1i}|. \frac{2}{t^2} = \frac{1,484 \times 2}{9} \frac{rad}{seg^2}$$

$$\ddot{q}_1 = 0,33 \frac{rad}{seg^2}$$

$$q_2\Delta = \ddot{q}_2 \frac{t^2}{2} \Rightarrow \ddot{q}_2 = q_2\Delta. \frac{2}{t^2} = |q_{2f} - q_{2i}|. \frac{2}{t^2} = \frac{2,356 \times 2}{9} \frac{rad}{seg^2}$$

$$\ddot{q}_2 = 1,57 \frac{rad}{seg^2}$$

RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 6 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

Entonces la cupla exigida a los motores va a ser:

$$T1 = 0,1875kg.m^2 . 0,33 \frac{rad}{seg^2} + 4,41Nm.cos(1,484.rad)$$

$$T1 = 0,062Nm + 4,41.0,087Nm = 0,44Nm$$

$$T2 = 0,0325kg.m^2 . 1,57 \frac{rad}{seg^2} + 0,98Nm.cos(2,356rad)$$

$$T2 = 0,051Nm + 0,98Nm.0,7 = 0,737Nm$$

De acuerdo al catalogo de ABB se seleccionan los siguientes motores, que en este caso resulta ser el mismo modelo para ambas articulaciones:

Marca: **ABB**

Tipo: **9C1.1.30.. ..M**

Rated Torque: 1,3 Nm @ 1,4A

Peak Torque: 4,1 Nm @ 4,5A

Rated Speed: 3000 rpm

En la siguiente figura podemos observar los motores seleccionados:



RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 7 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

Aspecto final del mecanismo con los motores montados:



RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 8 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

IMPLEMENTACIÓN EN CODIGO VHDL Y PROGRAMACION DE UN FPGA DE ALTERA:

A modo práctico se realiza la implementación de un driver que comanda a un motor DC por medio de 6 Mos-Fet de potencia. Para el control de los mismo se emplea un FPGA, aunque también es posible la implementación sobre un CPLD (quizás en este caso hasta tenga mas ventajas utilizar un CPLD ya que este no se borra al quitar la alimentación, su limitación es en memoria y velocidad, pero para esta aplicación sus prestaciones son suficientes).

El driver implementado tiene las siguientes I/O:

ENTITY Modulo_PWM IS

PORT (

--Entradas:

clock_M :in STD_LOGIC;
reset_M :in STD_LOGIC;
inversion_marcha :in STD_LOGIC;
Data_value_M :in std_logic_vector(7 downto 0);

--Salidas

pwm_1_M :out STD_LOGIC;
pwm_2_M :out STD_LOGIC;
pwm_3_M :out STD_LOGIC;
out_T4 :out STD_LOGIC;
out_T5 :out STD_LOGIC;
out_T6 :out STD_LOGIC;
clock_motor :out STD_LOGIC

);

END MODULO_PWM;

Donde

in STD_LOGIC : entrada bit.
in std_logic_vector(7 downto 0) : entrada byte (8 bits)
out STD_LOGIC : salida bit.

Características :

Esta programado para generar 3 señales de 50Hz desfasadas 120° entre si.

Las variaciones del ciclo de actividad se realizan con una señal de forma trapezoidal. La pendiente al ser constante, el tiempo de transiciones por cambio de ciclo de actividad varia proporcionalmente al mismo.

RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 9 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

El controlador realiza un control dinámico sobre la velocidad del motor, ya que variando el ancho de los pulsos varia el valor eficaz de la armónica fundamental de la señal generada.

Las principales ventajas de utilizar este tipo de modulación es que reduce el contenido armónico y a la vez controla el valor eficaz de la señal generada.

El Testbench genera la señal de clock, carga ciclo de actividad de 100% a secuencia directa y activa el modulo por 100ms, luego resetea por 10ms y vuelve a arrancar el modulo pero en secuencia inversa otros 100ms.

```

timulus_process: PROCESS
BEGIN
    sig_reset <= '1';
    sig_inversion_marcha <= '0';    -- Forward
    sig_data_value <= "11111111";
    sig_reset <= '0';
    wait for 100 ms;

    sig_reset <= '1';

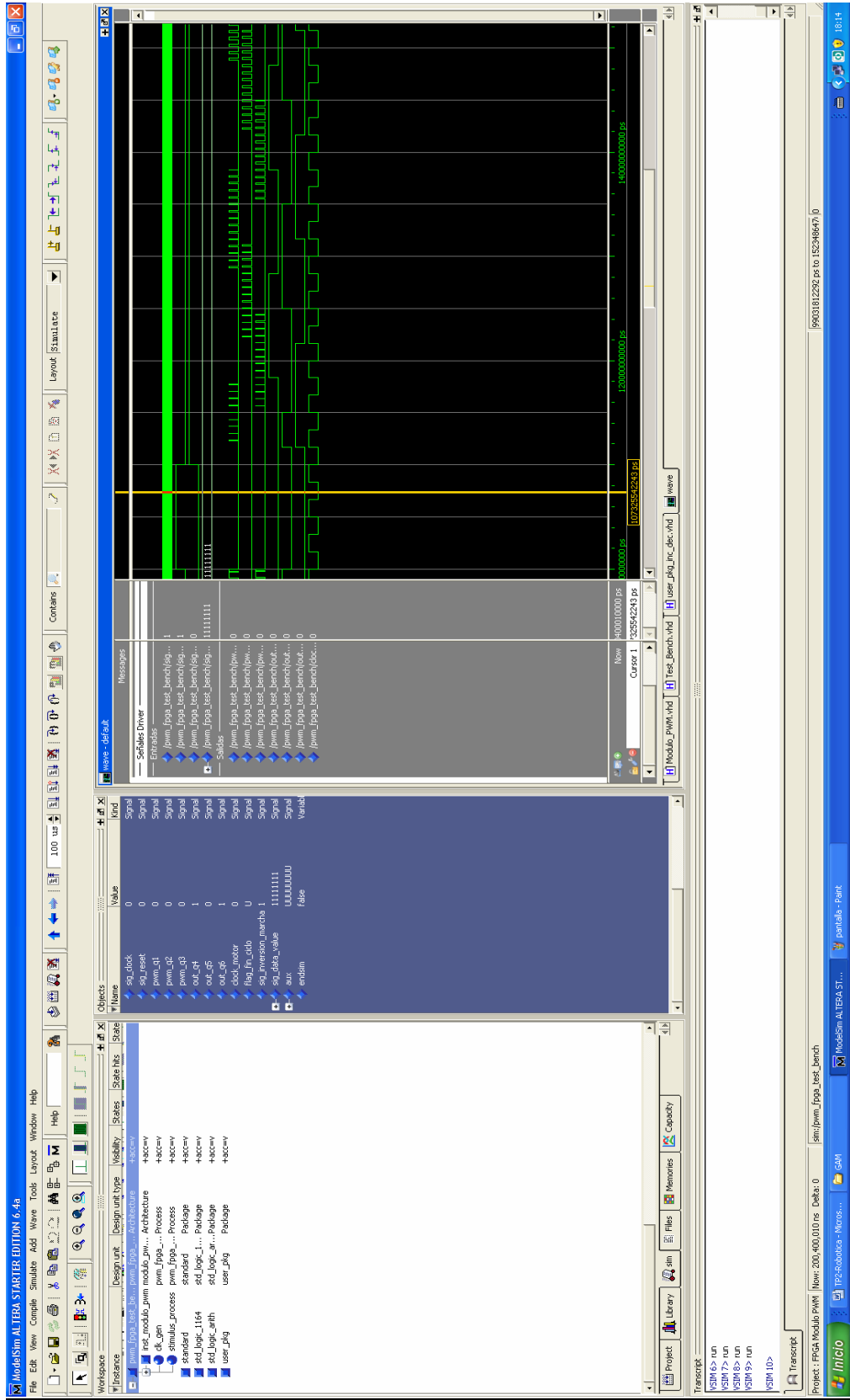
    wait for 10 ms;
    sig_inversion_marcha <= '1';    -- Reverse
    sig_data_value <= "11111111";
    sig_reset <= '0';
    wait for 100 ms;
    sig_reset <= '1';

    wait;
END PROCESS stimulus_process;

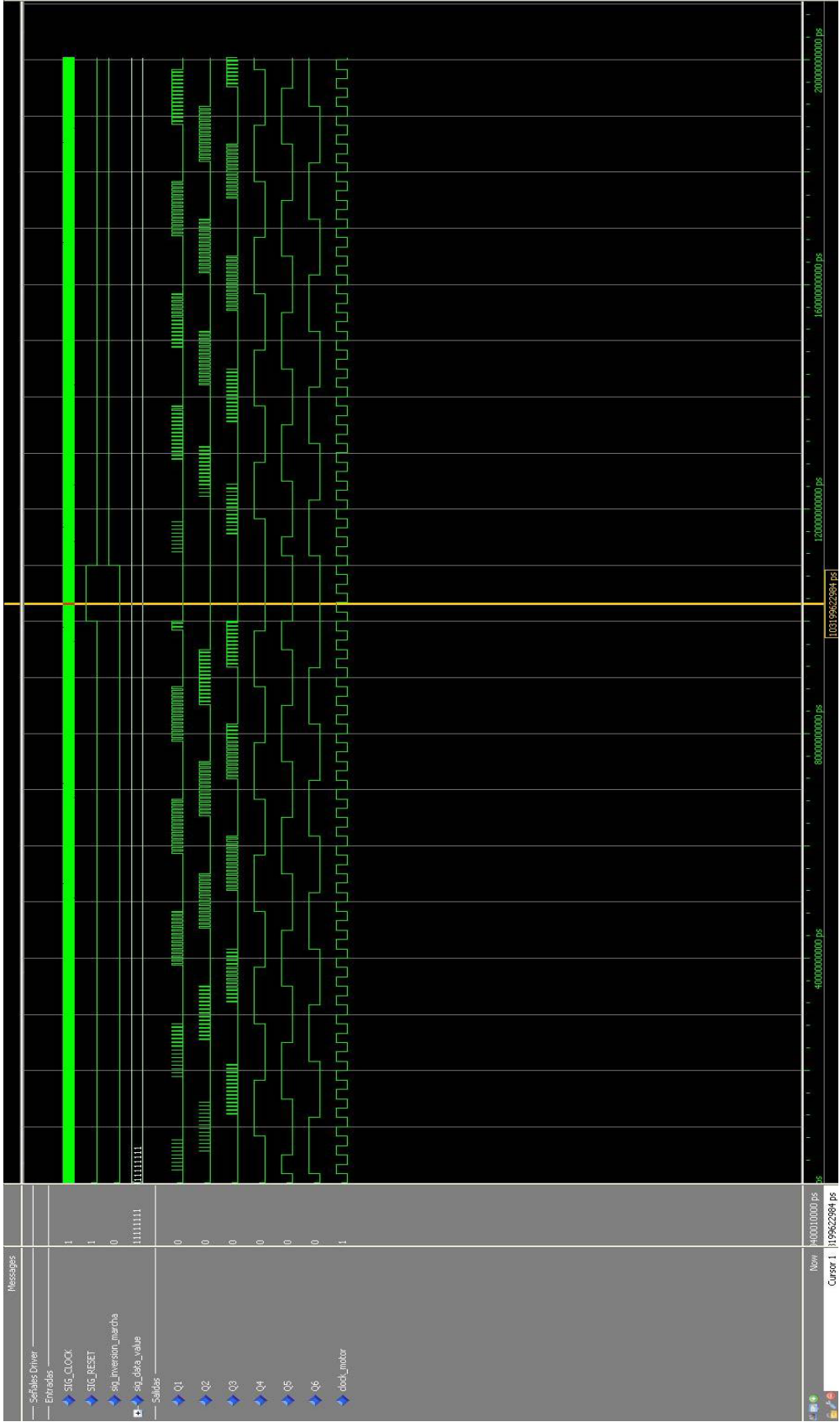
```

Nota: para las simulaciones se utilizo **Altera ModelSim Starter Edition 6.4a** (con licencia para estudiantes)

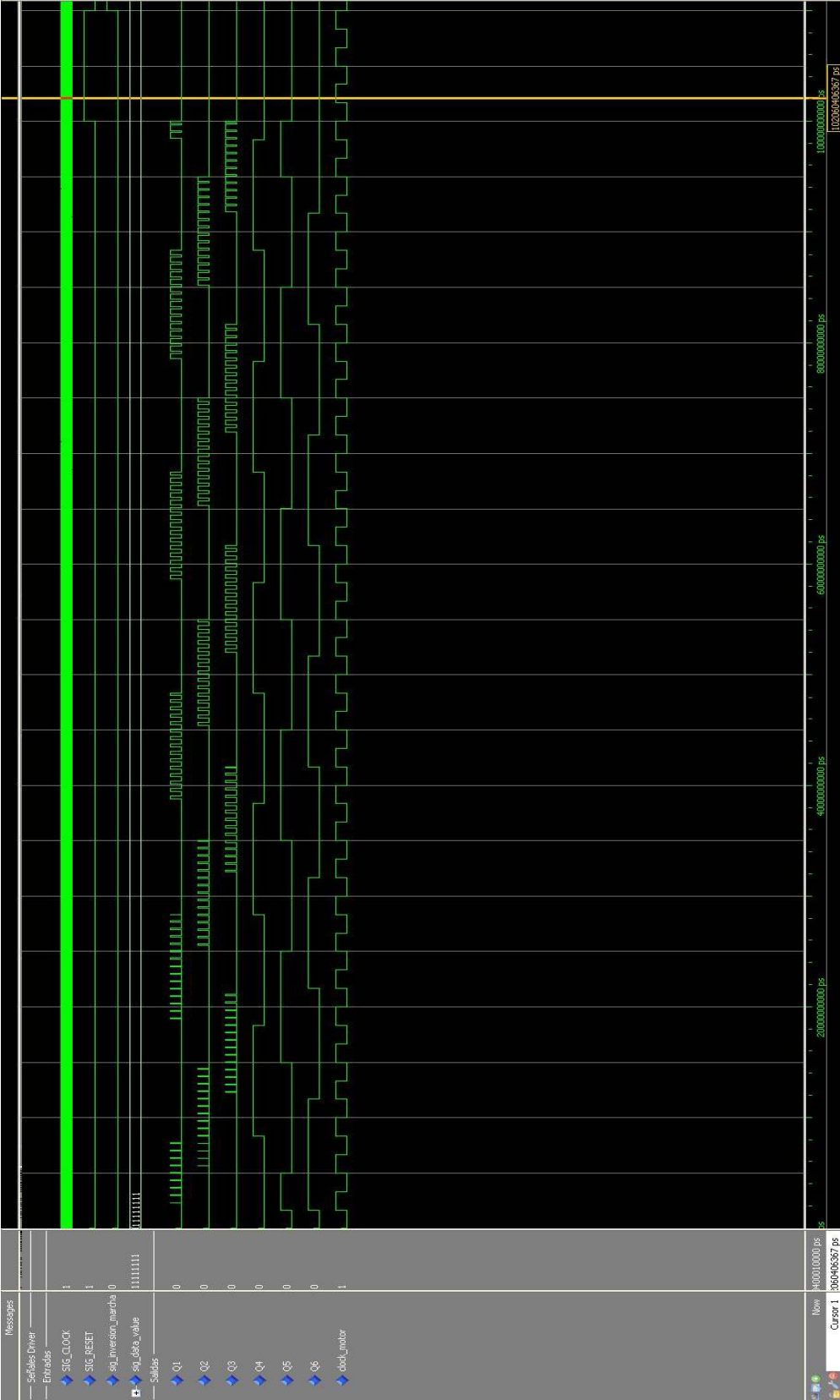
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:



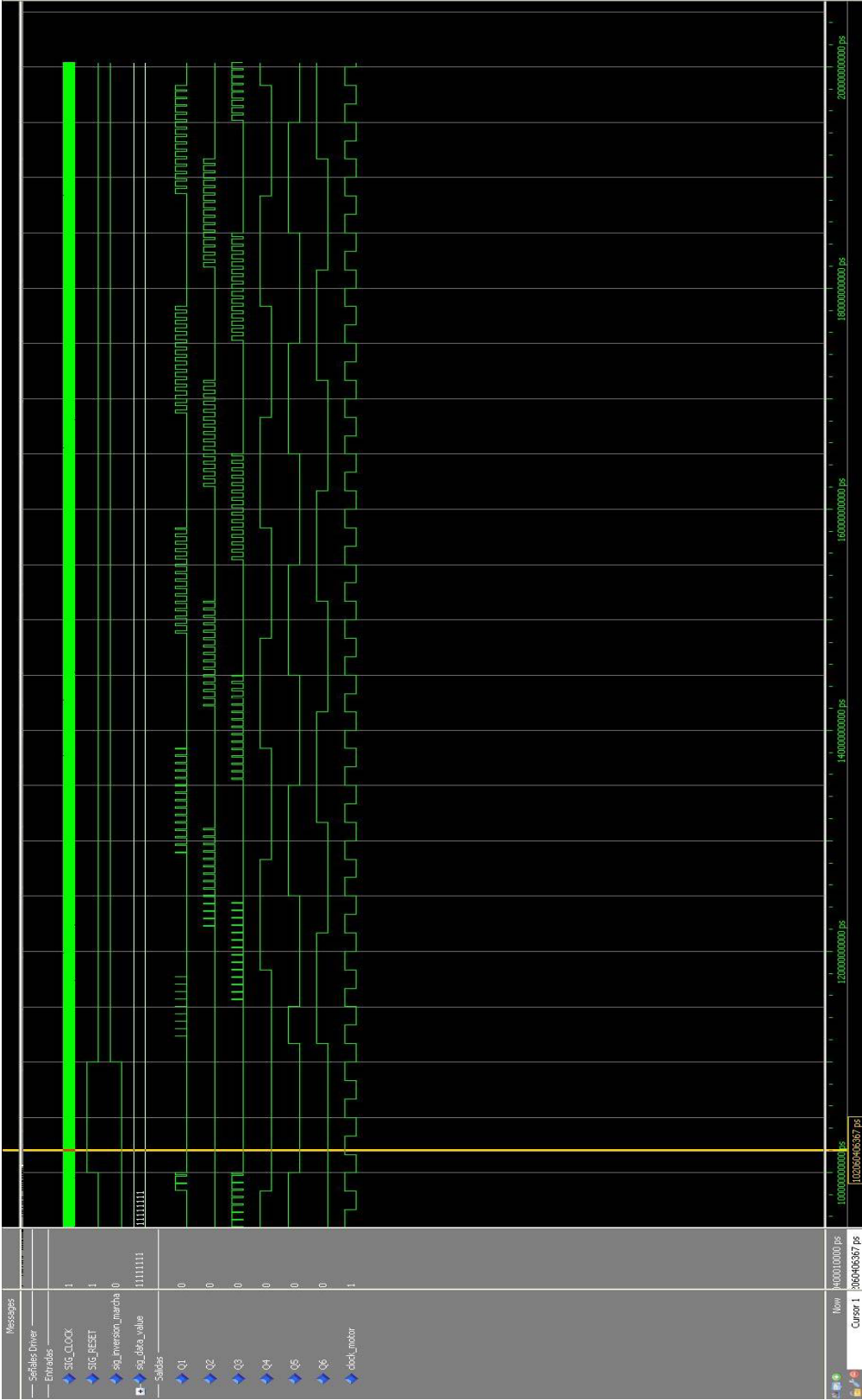
Simulación Full:



Simulación Motor girando directo:



Simulación del motor girando inverso:



RT	Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires ROBOTICA (Almela, A. – Bustos, M. – Gil, G.)	Fecha de creación 12/08/2009 06:14:00 p.m. Fecha Última Rev. Revisión 2 Página 14 de 14
	ANALISIS DINAMICO DE UN ROBOT & IMPLEMENTACION EN FPGA	

CONCLUSIONES FINALES:

En este trabajo pudimos notar que si bien el análisis dinámico del mecanismo es muy complejo, aumentando según los grados de libertad, existen herramientas de software tanto en programación y en simulación que nos permiten realizar una evaluación muy cercana a la realidad.

Esto tiene un gran impacto en los tiempos y los costos de desarrollo del robot. Además tuvimos contacto con los fabricantes de motores y con la programación de dispositivos de hardware reconfigurable, que sin duda representan la mejor opción para la implementación de control del robot complejo.

BIBLIOGRAFIA:

- **Fundamentos de robótica.** Barrientos, Balaguer y Aracil.
- **Introducción a las FPGA.** Cavallero, Rodolfo Antonio.
- **Robótica manipuladores y robots móviles.** Ollero Baturone, Aníbal.
- **Design and Implementation of an Adaptive Control for a Robot.** Iraj Hassanzadeh, Abbas Harifi and Farid Arvani. Center of Excellence for Mechatronics, University of Tabriz, Tabriz, Iran