

GENE DIGITAL EN FPGA PARA CONTROL DE LOCOMOCIÓN DE ROBOT MOVIL CAMINADOR HEXÁPODO DE 12 GRADOS DE LIBERTAD

I. Argote. D. Castellanos. J. Vargas. A. Baquero. H. Borrero. Member IEEE

Resumen—La bioinspiración ha generado posibilidades importantes hacia la implementación de soluciones alternativas frente a diversas problemáticas y de hecho no se puede negar el gran aporte que le ha significado a la robótica móvil, de manera que resulta importante apostarle al desarrollo en el área mediante la implementación de prototipos que generen mayor dominio y desarrollo del tema. La emulación electrónica de las características anatómicas y fisiológicas de los organismos vivos o incluso alguno de sus elementos constituyentes sumado a la existencia de dispositivos electrónicos reconfigurables, permite aprovechar capacidades valiosas como el procesamiento paralelo, memoria asociativa, entre otras. Se presenta la utilización de un gene digital para controlar la navegación de un mini-robot móvil caminador hexápodo lo cual implica que para lograr la respectiva locomoción se desarrolló e implementó un esquema general desarrollado en el lenguaje de descripción de hardware VHDL e implementado en una FPGA.

Palabras clave— Gene digital, hexápodo, locomoción, paralelismo, memoria asociativa, servomotor, FPGA, maquina de estados algorítmicos, VHDL.

I. INTRODUCCIÓN

CUANDO se aborda la emulación del electrónica del chip CADN y el gene (gene digital) es indispensable disponer de arquitecturas electrónicas que permitan aprovechar realmente las posibilidades que implica el procesamiento paralelo y la memoria asociativa, para ello se considera imprescindible contar con los FPGA y aplicarlos a la implementación en hardware de las arquitecturas bioinspiradas ya mencionadas,

Se agradece de manera especial el apoyo financiero aprobado en la oficina de proyección social de la facultad de ciencias básicas e ingeniería en dirección por parte del Ing. Oscar Agudelo Varela, apoyo financiero aprobado para el montaje del prototipo. También se agradece de manera especial al Instituto de Investigaciones de la Orinoquía Colombiana por apoyar financieramente la presentación de las ponencias emanadas desde el grupo de investigación en ciencias de la computación de la Universidad de los Llanos.

I. Argote, D. Castellanos, J. Vargas y A. Baquero reciben su formación de ingenieros electrónicos, actualmente cursan cuarto semestre en la Universidad de los Llanos en Villavicencio meta – Colombia (giro@unillanos.edu.co)

H. Borrero imparte docencia en la Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad de los Llanos, Km 12 vía Puerto López sede Barcelona Villavicencio – Colombia (h_borrelo@ieec.org).

pues la utilización del gene digital implementado en FPGA aplicado al control de navegación de robots móviles, constituye una enorme posibilidad de desarrollo.

La estructura mecánica general del mini-robot se basa en algunas características de los seres vivos, como lo son sus órganos locomotores y sus sistemas pasivos y masivos de transporte. Algunas de las aplicaciones más interesantes en cuanto a robots caminadores autónomos se refiere, corresponde a las que requieren una compleja cinemática como en el caso de la exploración de planetas remotos, la inspección de terrenos, entre otros.

El trabajo presentado muestra como aporte la utilización de un gene digital en el control de locomoción de un robot móvil caminador hexápodo, mediante la utilización de un FPGA en función de permitir explotar las capacidades de procesamiento paralelo y memoria asociativa propias del gene. Básicamente el trabajo es motivado por interés en conocer más afondo sobre las enormes posibilidades que tiene el control inteligente de sistemas aplicando FPGA particularmente al control de navegación de robots móviles. También resulta motivador entender que el dominio de las técnicas que corresponden con este trabajo genera un futuro prometedor para las investigaciones a seguir desarrollando.

En general se demostró como el paralelismo ofrecido por la FPGA permite controlar los 12 grados de libertad al mismo tiempo, así como se apreció la versatilidad del gene digital en el procesamiento de señales de entrada para la evasión de obstáculos hace uso de la memoria asociativa.

En este documento se presentan algunos de los avances alcanzados por el grupo de investigación en ciencias de la computación de la Universidad de los Llanos en el marco de los proyectos de investigación abordados y en lo particular se expone sobre el aprovechamiento del gene digital implementado en FPGA como unidad de control para la locomoción de un mini-robot móvil caminador hexápodo con 12 grados de libertad.

En la sección II se expone sobre los aspectos generales teóricos inherentes al diseño e implementación del mini-robot

móvil, se mencionan ciertas generalidades sobre servomotores así mismo se presenta un marco básico sobre los *Field Programmable Gate Array (FPGA)*, el lenguaje de descripción de hardware VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language*), también se comenta sobre algunos aspectos cinemáticos del mini-robot. En la sección III se expone sobre una serie de elementos que hicieron parte de la construcción del caminador hexápodo y en la sección IV se presenta una explicación general sobre las descripciones de hardware elaboradas en VHDL e implementadas en FPGA para controlar la navegación del prototipo.

II. CONCEPTOS GENERALES

A. ADN y Gene digital

El ADN (ácido desoxirribonucleico) está constituido por moléculas denominadas nucleótidos, cada nucleótido está compuesto de un fosfato, un azúcar de cinco carbonos (desoxirribosa) y una base nitrogenada [1]. Los nucleótidos derivan su nombre de la base que poseen las cuales se clasifican en dos pirimidinas {Citosina (C), Timina (T)} y dos purinas {Adenina (A), Guanina (G)}. En la figura 1(a) se representan los cuatro nucleótidos constituyentes del ADN cada fosfato (cruz) se enlaza con la desoxirribosa (óvalo) y el grupo fosfato – azúcar se enlaza a una base nitrogenada.

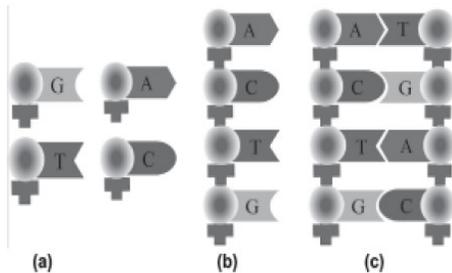


Fig. 1. Representación básica del ADN [2]. (a) los nucleótidos, (b) cadena sencilla de ADN, (c) doble hélice de ADN.

Una cadena de ADN está conformada por una secuencia de nucleótidos como se representa en la figura 1 (b). Existe un principio natural denominado complemento Watson – Crick en el cual dos nucleótidos son complementarios si sus bases son complementarias, la Adenina complementa la Timina y la Citosina complementa la Guanina, el complemento corresponde a la unión por enlaces de hidrógeno. Es importante tener en cuenta que para el caso de las cadenas sencillas de ADN (ver figura 2(b)) se cuenta con 4 elementos de base de modo que si se podría en principio que si dispone de n bases disponibles para formar una sola cadena, es posible que se forme alguna de 4^n posibles combinaciones.

Cuando dos cadenas de ADN son complementarias en el sentido Watson – Crick, ocurre el proceso denominado hibridación en el cual se produce una doble hélice de ADN tal como se ilustra en la figura 1(c).

El ADN es la molécula de la vida, es una molécula compleja que además de almacenar información genética, juega un papel activo en los organismos. Los genes son segmentos de ADN que codifican una o más proteínas, en la figura 2 se muestra un esquema en el cual se representan las regiones constituyentes de un gen [1].

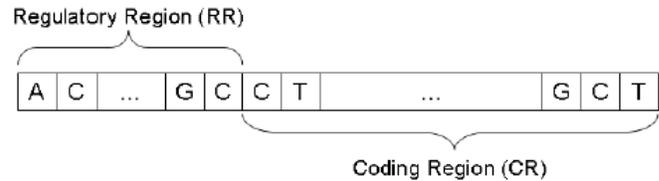


Fig. 2 Representación de un gen [4, 5]

La región reguladora (RR) es donde las proteínas y otras moléculas se fijan para iniciar o parar la expresión de los genes, la segunda región corresponde a la región codificadora (CR) que es el segmento de DNA que se transcribe en RNA [1].

B. Chip ADN y Gene digital

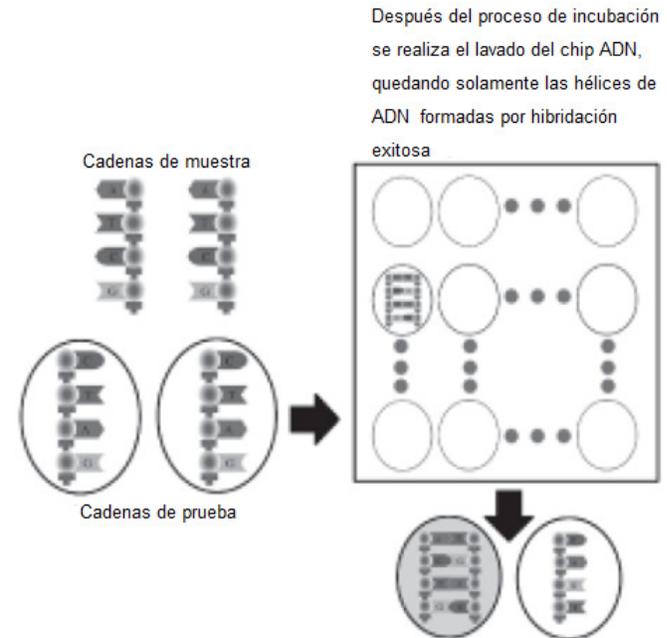


Fig. 3. Imagen representativa de un chip ADN y su funcionamiento [2].

Un chip ADN, consiste de un gran número de cadenas de ADN fijadas ordenadamente sobre un substrato sólido formando un arreglo matricial. De acuerdo con la representación de la figura 3, dentro de una celda (pozo) del chip se encuentran implantadas miles de cadenas de nucleótidos de la misma secuencia; cada secuencia de nucleótidos (cadenas sencillas) las secuencias son diferentes entra sí, a las cadenas de ADN en los pozos se les denomina cadenas de prueba [2, 3].

Los chips ADN explotan la propiedad de hibridación de las cadenas de ADN complementarias [2, 3], las secuencias de prueba han de ser comparadas con las muestras extraídas de algún organismo vivo y son incubadas sobre la superficie del

chip, de tal manera que cuando se presente complementariedad en el sentido Watson - Crick con alguna de las cadenas de prueba del chip ocurre la hibridación formando una doble hélice de ADN en cada uno de los puntos que corresponde.

La identificación de los puntos en los cuales hubo hibridación depende de las técnicas utilizadas, existen adelantos tecnológicos por medio de los cuales es posible detectar este efecto de acuerdo con la generación de un potencial o corriente eléctrica. Otra de las técnicas consiste en marcar con sustancias fluorescentes las cadenas de muestra de tal manera que cuando hay hibridación las muestras pigmentadas forman hélices de ADN con sus complementarios en el chip, al aplicar luz al chip para su análisis se resaltan por su color las moléculas de ADN formadas. En la detección de las hélices de ADN formadas en el chip, la electrónica y la informática juegan un papel fundamental pues permiten automatizar el análisis de la información proporcionada por los chips ADN.

En esencia, los genes son segmentos de ADN transcritos en mRNA, su composición se basa en cadenas de tres moléculas conocidas como nucleótidos. Desde el punto de vista de la emulación electrónica, se vislumbran varias posibilidades de programación e implementación del gene biológico, conocido como gene digital [4, 5].

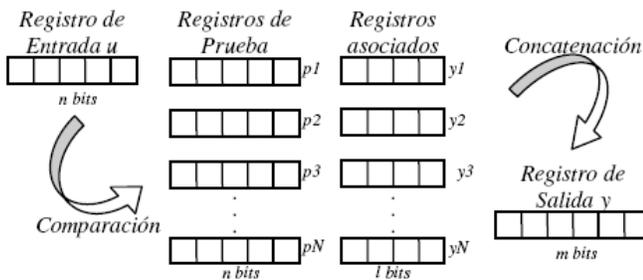


Fig. 4. Diagrama de registros en el gene digital [4, 5].

Basándose en los aspectos mencionados, se plantea el gene digital como una configuración de registros de forma tal que se logre asociar una acción a un comportamiento determinado en la entrada del sistema, ver figura 4. En el gene digital hay cuatro secciones de trabajo: (i) un registro de entrada (u); (ii) una serie de registros de prueba (p_i); (iii) registros asociados a los anteriores (y_i); (iv) un registro de salida (y). La operación consiste en realizar comparaciones, en paralelo, entre el registro de entrada y cada uno de los registros de prueba. A partir de esta comparación y según alguna restricción, el registro asociado correspondiente, es o no concatenado al registro de salida. Como método para realizar la comparación, se propone el uso de la distancia de Hamming, en la que se mide el número de bits diferentes entre los registros. Para determinar la condición de concatenación, definimos un parámetro llamado umbral de Hamming, si la distancia es menor al umbral, se concatenará el registro asociado correspondiente [4, 5].

C. Cinemática del robot

La locomoción del mini-robot se basa en un modelo trípode de movimiento, igual como sucede con los seres vivos el mini-robot debe ser capaz de soportar su propio peso y superar la fuerza de gravedad. Este modelo trípode básicamente consiste en mantener tres patas en el suelo y darle libertad de movimiento a las demás; una ventaja de este modelo basado en patas es la estabilidad que se genera para el mini-robot y que permite aislar el cuerpo del terreno empleando puntos discretos de soporte. Así mismo, mediante patas, es posible conseguir cierta omnidireccionalidad y el deslizamiento en la locomoción es mucho menor [6].

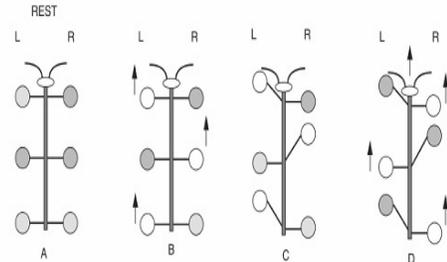


Fig. 6. Representación sobre el modelo trípode para la locomoción del hexápodo. [6].

Como se muestra en la figura 6 (A), la posición inicial para el prototipo será la de mantener todas sus patas en el suelo, seguido de esto (figura 6 (B)) se reafirma la posición fija para tres de las patas las demás avanzan; el siguiente paso se fijan las patas que avanzaron lo que permitirá el avance de las demás. Esta dinámica de movimiento será reiterativa hasta el momento en el que se reinicie el algoritmo que controla la cinemática que realiza el robot. En la figura 7 se muestra una imagen de la estructura mecánica implementada para el funcionamiento del robot móvil.

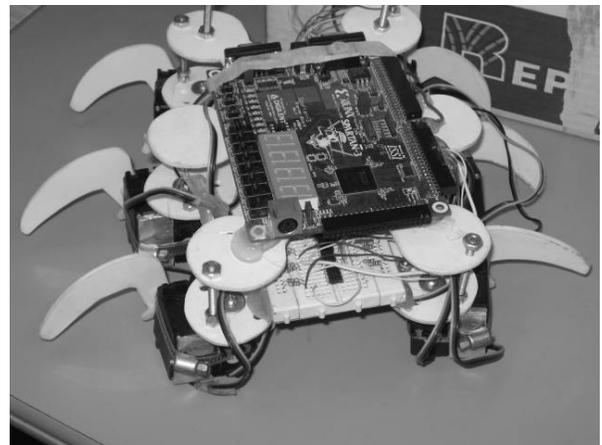


Fig. 7. Vista sobre los avances alcanzados en la construcción del hexápodo

III. CONSTRUCCIÓN DEL HEXÁPODO

La estructura del hexápodo está hecha de poliestireno de color blanco calibre 100, un material resistente, liviano y de fácil manipulación; comprende dos bases de 20cm por 20cm

cada una, el diseño está basado en formas circulares y curvas acordes con la ejecución de sus movimientos.

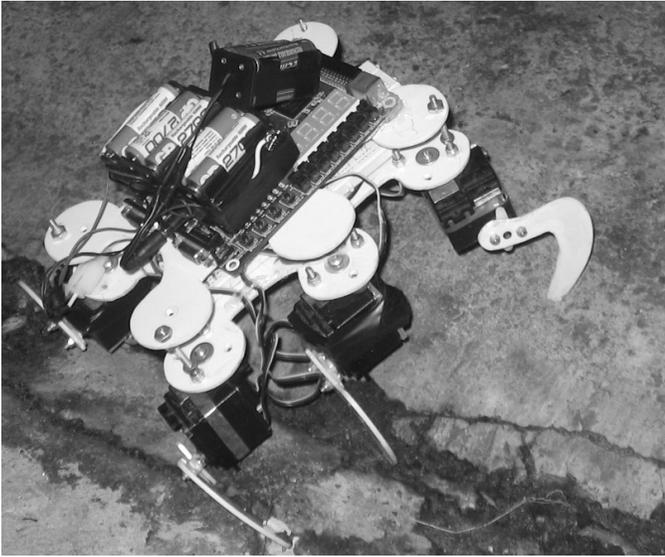


Fig. 8. Vista general del mini-robot caminador hexápodo

La función de la base superior es soportar una tarjeta de desarrollo FPGA XILINX SPARTAN 3, mientras que la base inferior aloja el circuito de interface entre la tarjeta de desarrollo FPGA, sensores y actuadores, además sostiene las extremidades del hexápodo como se aprecia en la figura 8.

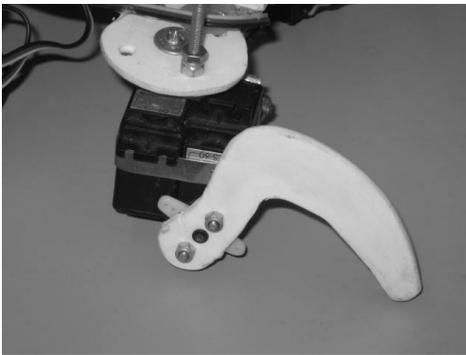


Fig. 9. Vista sobre la disposición de los servos en las patas del mini-robot.

Los 12 servomotores se distribuyen de manera equitativa en las extremidades del hexápodo, obteniendo 2 por cada pata unidos por una abrazadera; uno de ellos está incorporado a la base inferior y es el que realiza el movimiento adelante – atrás, el otro es el anteriormente mencionado el cual va unido a la extremidad del hexápodo como se aprecia en la figura 9.

IV. DESCRIPCIONES DE HARDWARE

En el desarrollo del proyecto mini-robot hexápodo se utilizó el lenguaje descripción de hardware VHDL. Utilizando como referencia de la figura 10 se nota que a nivel general el proyecto implementado en FPGA corresponde a una entidad

que tiene como puertos de entrada: el puerto *s* que permite poner en funcionamiento la dinámica del robot; el puerto *reset* simplemente permite reiniciar la dinámica del robot de manera asincrónica; el puerto *clk* sirve como señal de reloj fundamental en la ejecución de las máquinas de estados algorítmicas [6, 7] que hacen parte de la implementación; se tiene también el puerto de entrada *muestra* previamente mencionado y que consta de 4 bits cuatro sensores de proximidad, lo cual implica que la muestra es una palabra de cuatro bits; se cuenta con 12 puertos de salida por medio de los cuales se transmiten señales de onda cuadrada con ciclo útil controlado necesarias para el posicionamiento de los ejes de 12 servos que hacen parte fundamental de los 12 grados de libertad del sistema.

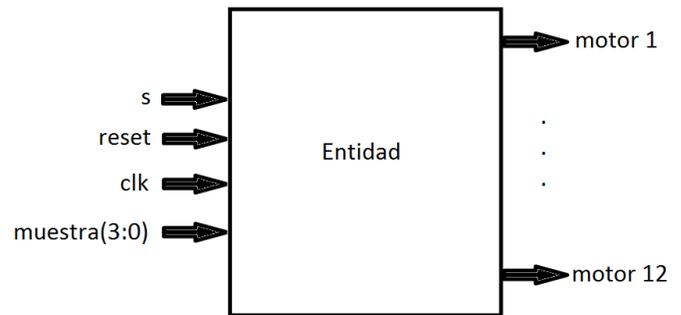


Figura 10. Esquema general sobre los puertos de entrada – salida del sistema.

En la figura 11 se aprecia un diagrama de bloques en el cual se representa sobre las descripciones de hardware implementadas y que son subconjuntos de la entidad representada en la figura 10. Básicamente el sistema consta de un bloque denominado gene digital en el cual la información de entrada (*muestra*) se procesa para habilitar cada uno de los puertos E de cada uno de los bloques ASM (adelante, atrás, derecha, izquierda), según la configuración del obstáculo justo al frente de la estructura del robot el gene digital habilitará una de las ASM lo cual generará la dinámica correspondiente al desplazamiento del prototipo, por medio de las descripciones de hardware adecuadas generan la secuencia correspondiente de posicionamiento de cada uno de los 12 servo-motores según sea el caso ASM habilitado como se indica en la figura 11.

Cada una de los bloques ASM habilita de manera paralela cada uno de los 12 servos para posicionar sus respectivos ejes y por ende las extremidades del prototipo según el desplazamiento habilitado.

En el bloque servos de la figura 11 se generan 12 señales de onda cuadrada con diversos anchos de pulso según el ángulo de posicionamiento de las extremidades, decir cada servomotor, de modo que en el bloque servos se implementan 12 máquinas de estados algorítmicos para así generar las señales y controlar el posicionamiento de 12 motores.

Como se mencionó, la palabra generada desde los sensores constituye la entrada al gene digital (muestra) el cual la procesa de manera paralela y asociativa.

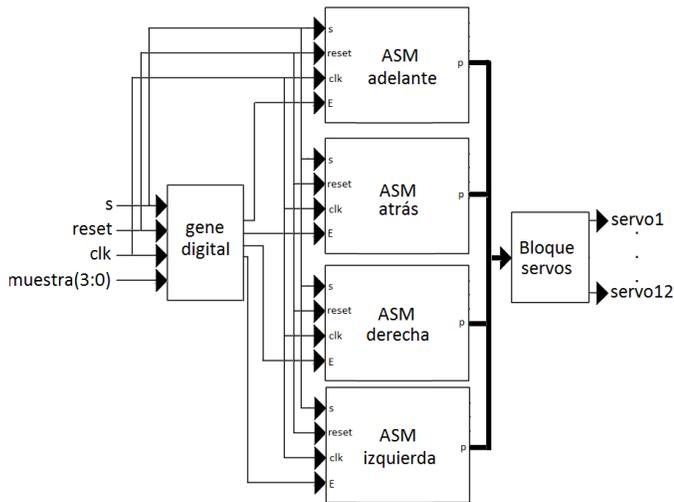


Fig. 11. Diagrama de bloques que representa de manera general las descripciones de hardware implementadas en FPGA.

El bloque servos corresponde a 12 controladores para los 12 servos que hacen parte del montaje, como se puede apreciar en la figura 10, los servos son controlados desde alguna de las ASM previas (adelante, atrás, derecha, izquierda), habilitada previamente desde el gene digital.

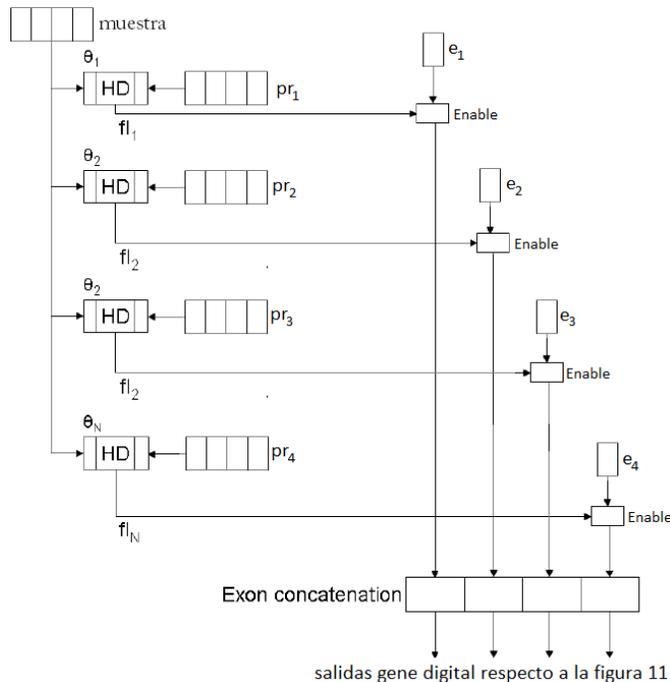


Fig. 12. Diagrama representativo del gene digital utilizado en el comando del robot móvil.

Básicamente, el mini-robot tiene la capacidad de evadir los obstáculos ubicados en su frente procesando de manera paralela y asociativa la información de entrada (obstáculos),

utilizando al gene digital instalado y así mismo comanda los 12 servomotores actuadores de forma paralela para lograr los desplazamientos ordenados a las salida del gene digital.

De acuerdo con el diagrama representativo de la figura 12, la palabra creada desde los sensores que corresponde a la muestra, es comparada paralelamente con respecto a cada una de las palabras almacenadas previamente en los registros pr_n , cuando entre muestra y la palabra almacenada en pr_n existe una distancia hamming mayor al umbral θ_n , se habilita (Enable) el paso de la información almacenada en los registros e_n hacia el exón de salida (exón concatenation). En el exón básicamente reside la información sobre la habilitación de cada uno de los bloques ASM (figura 11) que habilita la correspondiente a cada desplazamiento del mini-robot.

III. CONCLUSIONES

La aplicación de descripciones de hardware utilizando un lenguaje como (VHDL) en una plataforma como Xilinx permite aprovechar las capacidades de procesamiento paralelo de los circuitos combinatorios, también permite implementar suficientes circuitos secuenciales síncronos que trabajan también de manera paralela.

El uso de una arquitectura electrónica reconfigurable como lo es el FPGA permite explotar el paralelismo disponible que el caso fue aprovechado para ejecutar el procesamiento combinatorio en el gene digital y el trabajo en paralelo de 13 máquinas de estados algorítmicas sincrónicas, lo cual a nivel mecánico permitió generar 12 señales requeridas para controlar los servos [6].

De acuerdo con la implementación mecánica adoptada, para que las extremidades funcionen correctamente, la estructura no debe ser muy larga y el ancho debe ser el adecuado justo en donde se sujeta al eje del motor para que pueda asegurarse en otros dos puntos y no forzar ningún mecanismo interno del servomotor (engranajes).

El gene digital aplicado al control de navegación de mini-robot, es susceptible de ser aprovechado para entrenamiento del mismo con algoritmo genético y sistema clasificador [2], de manera que se aprovecha aún más las posibilidades que ofrecen los FPGA en función de desarrollar un mini-robot con capacidades de aprendizaje y por lo tanto adaptación respecto al entorno que le rodea.

En virtud al paralelismo y a la memoria asociativa que propone el gene digital es valioso aprovechar sus cualidades en el procesamiento de palabras de mayor resolución ó una mayor cantidad de bits, lo cual exija un mayor número de registros de prueba y por lo tanto acciones más complejas en las que se adecuado apoyarse en los algoritmos genéticos y los sistemas clasificadores para el correspondiente entrenamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto agradecen de manera especial al grupo de investigación CIS (control inteligente de sistemas) de la Universidad nacional de Colombia y en particular a su director el Dr. Alberto Delgado por la formación y apoyo ofrecido en el marco del programa Jóvenes investigadores al Ing. Henry Borrero Guerrero, lo cual es sin duda alguna la base del actual reconocimiento de COLCIENCIAS para el grupo de investigación en Ciencias de la Computación, reconociendo al grupo CIS como pionero de la temática propuesta en este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Campbell, A.M. y Heyer, L.J.: "Discovering genomics, proteomics, and bioinformatics, Pearson Education", 2003.
- [2] Borrero, H., Delgado A.: "Evolución de chip ADN emulado con algoritmo genético en FPGA para control de navegación de un robot móvil," Revista Orinoquia ISSN: 0121-3709, 2008 vol:12 fasc: 1 págs: 117 – 129.
- [3] Delgado, A.: "DNA chips as lookup tables for rule based systems," IEE Computing and Control Engineering Journal, Vol. 13, No. 3, pp. 113 - 119, 2002.
- [4] Prieto, J., Ramos, O. y Delgado, A.: "Diseño de un gene digital en FPGA y MATLAB con aplicaciones en robótica móvil," XIII Taller Iberchip IWS-2007, Lima – Perú, Marzo 14-16, 2007.
- [5] Farfan, A., Herreño J. y Delgado, A.: "Gene digital y chip ADN electrónico: aplicaciones en robótica móvil," 3rd Colombian Workshop on Robotics and Automation (CWRA), Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Agosto 21- 22, 2007.
- [6] Iovine, J. "Pic Robotics -- A Beginner's Guide To Robotic". McGraw-Hill. 2004
- [7] Brown, S. "Fundamentals of digital logic with VHDL Desing". McGraw Hill, 2000.
- [8] Enoch, H. "Microprocessor Desing Principles and Practices". Brooks / Cole 2004.