

Proyección de Diseño de Hardware Electrónico Robusto Basado en Quorum Sensing

Fredy H. MARTÍNEZ S.

fhmartinezs@udistrital.edu.co

Grupo de Investigación ARMOS, Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”

Carrera 7 No 40-53 – Bogotá D.C., Colombia

RESUMEN

Este artículo presenta una primera aproximación en el desarrollo de la propuesta de investigación doctoral en el área de los sistemas inteligentes bio-inspirados, como opción para incrementar la robustez en sistemas artificiales electrónicos complejos. El enfoque se fundamenta en algunas características observadas en los seres vivos, que les brinda como sistemas complejos autónomos, la posibilidad de soportar y superar cierto nivel de daño sin perder su operabilidad. Particularmente, es de interés observar y replicar características recientemente detectadas en bacterias, relacionadas con un mecanismo de comunicación inteligente que les permite coordinar determinadas expresiones genéticas de acuerdo a su densidad poblacional (*quorum sensing*), características que bien podrían duplicarse en sistemas electrónicos a fin de incrementar su confiabilidad operativa.

Palabras Claves: Auto-reparación, sistemas inteligentes, sistemas bio-inspirados, sistemas robustos.

1. INTRODUCCIÓN

Observando el mercado tecnológico presente en los últimos años a nivel mundial, es posible observar como se ha incrementado de forma considerable el desarrollo y la construcción de sistemas electrónicos para una gran diversidad de aplicaciones, desde las más triviales en el área del ocio y entretenimiento, hasta las críticas en áreas como la medicina y desarrollo industrial. La característica evidente en todos estos desarrollos es el incremento continuo en la complejidad de los sistemas, consecuencia de la lucha incesante por mejorar los productos y destacarse en el mercado.

Fredy H. MARTÍNEZ S. fhmartinezs@udistrital.edu.co, Ingeniero Electricista Universidad Nacional de Colombia, Especialista en Gestión de Proyectos de Ingeniería Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Candidato a Doctor en Ingeniería Sistemas y Computación Universidad Nacional de Colombia, Director del grupo de investigación ARMOS. Docente planta Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”. Teléfono: (57) 3005585481, Fax: (57-1) 7311537.

Sin embargo, pese a la gran complejidad alcanzada en muchos de estos diseños, los equipos electrónicos a la fecha no llegan a competir en complejidad con los organismos vivos; y aún más interesante, no logran competir con ellos en cuanto a confiabilidad. Cabe recordar que al igual que los seres vivos, las aplicaciones electrónicas son sistemas autónomos individuales, pero a diferencia de ellos, no son capaces de operar cuando, por ejemplo, sufren un daño no destructivo en alguna de sus partes; de hecho, entre más complejo el sistema, más propenso a fallar. En un ser vivo, cuando parte del organismo sufre un daño no destructivo, su sistema es capaz de reparar el daño [1].

Los seres vivos poseen un número finito de células, cada una realizando una cierta función, y no están diseñados en su forma final como normalmente pasa con las aplicaciones electrónicas. Ellos se encuentran continuamente en un proceso o desarrollo, conocido como ontogénesis, que le permite alterar continuamente su estructura durante la vida.

Generalizando el concepto de proceso ontogénico, se podría afirmar que desde el punto de vista de sistema independiente, es posible incluir a los sistemas electrónicos como candidatos a sufrir estas premisas evolutivas, siempre y cuando se conciben, diseñen e implementen en ellos los algoritmos necesarios para duplicar los mecanismos observados en los organismos vivos.

La mayoría de las técnicas robustas hardware se fundamentan en la re-configuración de elementos redundantes, para lo cual utilizan complejos algoritmos para reasignar los recursos físicos en el caso falla [2]. Esta tendencia ha demostrado ser efectiva, pero su naturaleza centralizada no solo va en contra del principio de diseño, sino que hace al sistema susceptible a fallas si colapsa el procesador central.

El proyecto pretende desarrollar la teoría necesaria para duplicar, en sistemas electrónicos, mecanismos

celulares esenciales como comunicación y la especialización celular, en aras de dotar a los sistemas de la posibilidad de auto-repararse en caso de daños menores [3].

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas electrónicos, diseñados por el hombre para aplicaciones finales requeridas en su entorno, presentan hoy en día un elevado nivel de complejidad. Esto, unido con su característica de operación secuencial, ha permitido que en general se incremente la susceptibilidad a fallos. En aplicaciones críticas, este problema se ha atacado tradicionalmente con la duplicación de todo el sistema (redundancia), con un sistema de control central que conmuta el sistema al fallar el primero. Sin embargo, en la naturaleza existen sistemas mucho más complejos y con una mayor tolerancia a los fallos, en donde la estructura de soporte que mantiene a los sistemas funcionando frente a fallas es completamente diferente y mucho más eficiente.

Para atacar éste problema, y como posibilidad de trabajo en hardware bio-inspirado se presta especial atención a la ontogenética [4][5].

Quorum Sensing

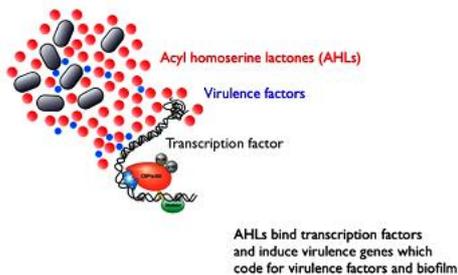


Fig. 1. *Quorum sensing*.

Para el autor, ha sido de particular interés un mecanismo de control de expresiones genéticas dependiente de la densidad celular, observado y caracterizado recientemente en el campo de la biología sistémica, durante investigaciones médicas en el área de la eficacia de los antibióticos [6].

Este fenómeno es el responsable de que un conjunto de células independientes, bajo la generación de señales extracelulares, desarrolle comportamientos sociales coordinados. Las bacterias patógenas que portan los organismos vivos superiores no son virulentas hasta que alcanzan una mayoría suficiente para hacer efectivo un ataque en masa contra el sistema inmunitario. Cuando las bacterias determinan que son suficientes para

desencadenar un ataque, entonces se transforman y se vuelven virulentas.

A este fenómeno se le denomina *quorum sensing* y conforma un sistema de desarrollo y supervivencia estratificado de microorganismos que bien podría pensarse en duplicar en sistemas artificiales electrónicos.

Un elemento clave que se ha considerado en principio para el diseño del sistema, es que los mecanismos de diagnóstico y re-configuración deben distribuirse a lo largo del arreglo, de tal forma que no se requiera de un agente central [7].

3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Como hipótesis iniciales se plantearon las siguientes preguntas:

- ¿Es posible diseñar un sistema artificial robusto inspirado en características biológicas como el *quorum sensing*?
- ¿Un sistema artificial basado en *quorum sensing* es realmente robusto frente a sistemas artificiales con diseño tradicional?

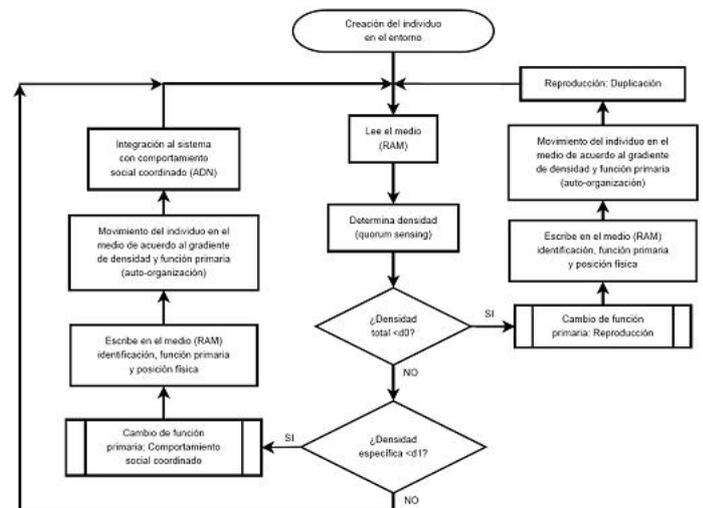


Fig. 2. Algoritmo de desarrollo para los individuos artificiales basado en *quorum sensing*.

Como primer acercamiento a la demostración de las hipótesis, se ha realizado una revisión teórica preliminar alrededor del *quorum sensing*. De tal revisión, se ha logrado generar una idea global del funcionamiento de éste mecanismo. Luego, y en coherencia con el modelo biológico, se pretende diseñar un algoritmo que simule artificialmente su desempeño, el cual finalmente se

codificó y evaluó mediante simulación. La Fig. 2 muestra una primera aproximación del algoritmo buscado para los organismos artificiales, mismo que demuestra positivamente la primera hipótesis.

El algoritmo parte de algunos supuestos básicos:

- La implementación de los individuos artificiales se realizará sobre un sistema electrónico programable, preferiblemente *in-system* (con el sistema electrónico energizado y operando).
- A pesar de que en este punto no se ha definido el tipo de sistema electrónico (digital, analógico, tamaño, tecnología, etc.), el algoritmo asume la necesidad de contar con bancos de memoria RAM y Flash.
- A fin de que los individuos artificiales mantengan información confiable de la población, es necesario que el sistema actualice la memoria de entorno o medio periódicamente.
- En las poblaciones bacterianas, algunos principios básicos de comportamiento como la dirección de crecimiento están determinados por los recursos disponibles (comida), en el sistema artificial la alimentación siempre esta disponible de igual forma para todos los individuos, por lo cual estos principios no se tienen en cuenta en el algoritmo.

Como se observa también en la Fig. 2, existen dos funciones primarias para los individuos artificiales (dos posibles tareas a realizar): Reproducción y comportamiento social coordinado, la selección de una u otra depende de dos valores umbrales de densidad poblacional (*quorum sensing*).

El comportamiento social coordinado corresponde a la función que se desea realice el sistema artificial, y para lo cual se programaron a todos los individuos artificiales (código ADN).

Se escogió como primera aproximación para estructurar a las células electrónicas un procesador PSoC de Cypress Semiconductor Corporation, particularmente el CY8C29566 (Fig. 3). La selección de este componente se justifica en sus características únicas:

- Posee bloques programables tanto digitales como analógicos.
- Posee la posibilidad de programación *in-system*.
- Posee un bus I²C que facilita el trabajo con la memoria de entorno.
- Muchos otros recursos de microcontroladores tradicionales (dos multiplicadores internos 8x8, velocidad de trabajo de hasta 25 MHz, etc.).

De acuerdo al componente seleccionado para implementar la célula electrónica, se estructuró una malla de conexión básica (Fig. 4) que eventualmente permitiera la operación del sistema.

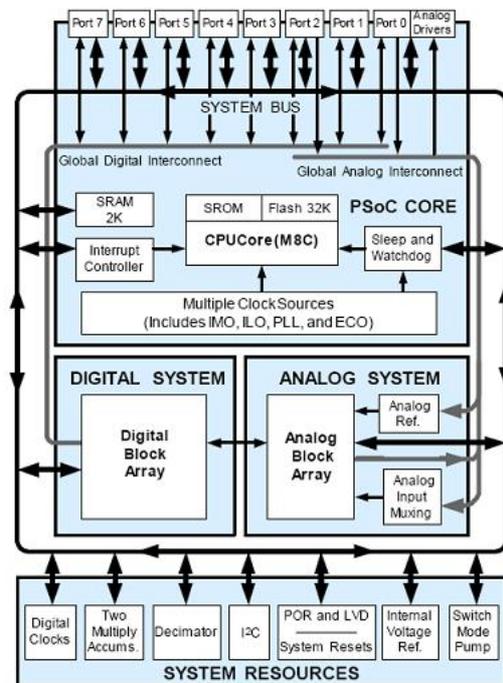


Fig. 3. Estructura interna del PSoC que estructura la célula electrónica.

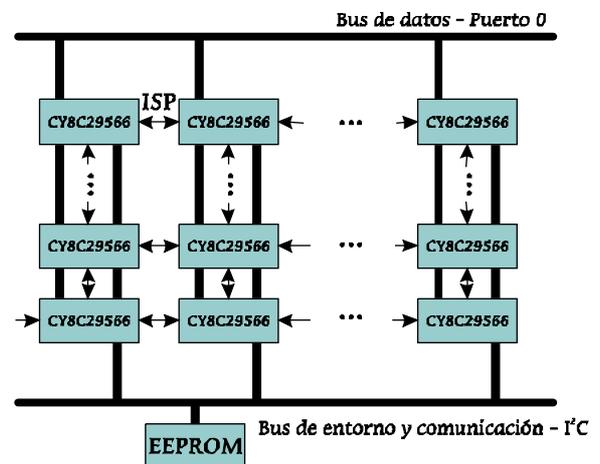


Fig. 4. Malla de células electrónicas.

En el diseño básico, se han definido dos buses de interconexión, uno exclusivo para las células denominado bus de datos, cuya función es permitir la implementación final de la funcionalidad del sistema (comportamiento social coordinado). De acuerdo a la estructura del PSoC, este bus se soportará en el puerto 0 del mismo. El segundo bus, denominado de entorno y comunicación, se estructura sobre el protocolo de comunicación I²C, y permite comunicar no solo a cada una de las células entre

si, sino también con una memoria EEPROM que almacenará la información del entorno (allí se encontrará la información de densidad poblacional).

Otra característica que posee la malla, es la posibilidad de cada una de sus células de programar su código en las células vecinas (de dos a cuatro células de acuerdo a su posición física en la malla) gracias a la posibilidad de programación *in-system* del PSoC. Así, es posible cumplir la premisa de multiplicación celular. Esta estructura básica permite en primera instancia, comprobar la segunda hipótesis.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

A fin de analizar el comportamiento del algoritmo sobre una población, se realizó una simulación del crecimiento y la concentración de los individuos. Para ello, se asumió un crecimiento parabólico de acuerdo con la ecuación de Poisson sobre un plano cuadrado $\Omega \times 5 \times 5$, con condiciones de frontera Dirichlet homogéneas. Para determinar el comportamiento, se resuelve la ecuación diferencial en derivadas parciales (PDE) con ayuda de MatLab. Para la parabólica, se tiene la siguiente ecuación de segundo orden con coeficientes constantes:

$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2h \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + b \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2f \frac{\partial u}{\partial x} + 2g \frac{\partial u}{\partial y} + cu = 0 \quad (1)$$

con:

$$ab - h^2 = 0 \quad (2)$$

Se dibujan dos niveles de contorno a fin de diferenciar las células que han modificado su función primaria hacia la actividad del sistema (comportamiento social coordinado, violeta oscuro) y las que aún se mantienen reproduciendo células (violeta claro).

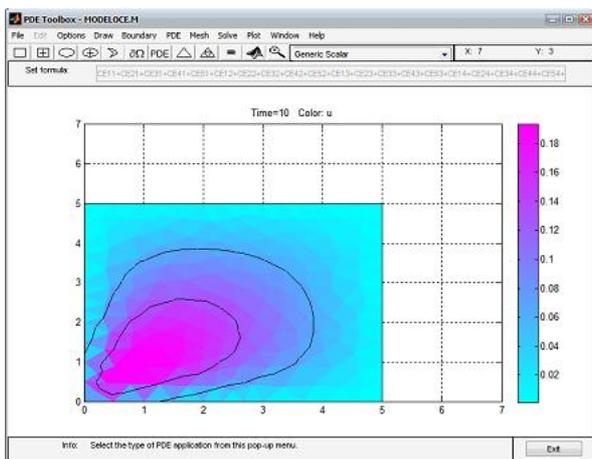


Fig. 5. Simulación del crecimiento celular.

La formulación para la simulación queda como:

$$-\Delta u = 1 \quad \text{en } \Omega \quad \text{y} \quad u = 0 \quad \text{en } \delta\Omega \quad (3)$$

donde $\delta\Omega$ es la frontera del plano.

Las gráficas se generaron asumiendo 1 para los coeficientes de la ecuación parabólica, asumiendo que la primera célula programada externamente en el plano se encuentra en la posición [1, 1].

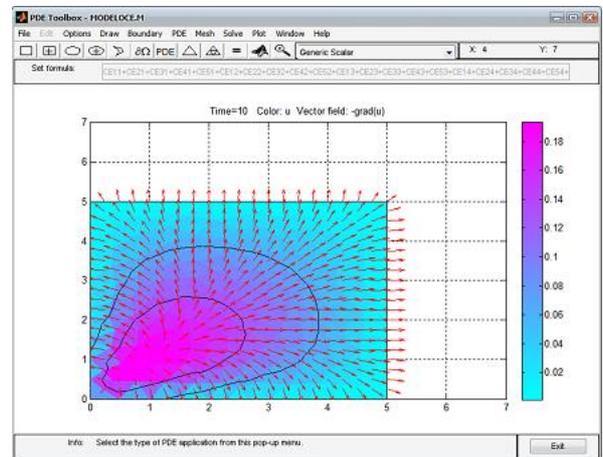


Fig. 6. Simulación del crecimiento indicando dirección de desplazamiento.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo plantea una alternativa de diseño para sistemas electrónicos artificiales basados en *quorum sensing*, a fin de incrementar la robustez del sistema frente a daños físicos no destructivos.

Se logró la conceptualización de un algoritmo de comportamiento y crecimiento del sistema artificial. A fin de concretar físicamente una posible implementación del algoritmo que permitiera ejecutar el comportamiento definido en el mismo, se definió una red de procesadores tipo PSoC con posibilidad de auto-programación y evaluación continua de la densidad poblacional. Además, para lograr observar el crecimiento que tendría tal comunidad artificial sobre este sistema hardware, se realizó una simulación del crecimiento poblacional sobre una placa cuadrada asumiendo un crecimiento parabólico de acuerdo a la ecuación de Poisson.

Los resultados preliminares del trabajo permiten corroborar positivamente las hipótesis iniciales, y posibilitan el continuar el trabajo en ésta línea.

6. REFERENCES

- [1] C. Langton, "Artificial Life", 1989, Reprinted in Boden M. (ed.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, 1996, pp. 39-94.
- [2] C. Ortega and A. Tyrrell, "Reliability Analysis of Self-Repairing Bio-inspired Cellular Hardware", IEE, Savoy Place, London, 1999, pp. 1-5.
- [3] M. Chean and J. Fortes, "A Taxonomy of Reconfiguration Techniques for Fault-Tolerant Processor Arrays", Computer Society, 1990, pp. 55-69.
- [4] D. Mange, M. Sipper, A. Stauffer, and G. Tempesti, "Toward Robust Integrated Circuits: The Embryonics Approach", *Proceedings of the IEEE*, 2000, pp. 516-541.
- [5] C. Ortega and A. Tyrrell, "Envolvible Hardware for Fault-Tolerant Applications", IEE Colloquium on Evolvable Hardware Systems, London, 1998, Digest No: 98/233.
- [6] Otero, A. M., Muñoz, A., Bernández, M. I. y Fábregas, J., "Quorum Sensing el lenguaje de las bacterias", Primera edición, Editorial Acirbia, España, 2005.
- [7] A. Stauffer, D. Mange, and J. Rossier, "Design of Self-organizing Bio-inspired Systems", Second NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS 2007), IEEE Computer Society, 2007.
- [8] M. B. Miller, B. L. Bassler, "Quorum Sensing in Bacteria", *Annual Review in MicroBiology*, 2001, pp. 165-199.