

Control de Micro-Redes de Energía Renovable a través de estructuras LFCS Reconfigurables en VHDL (*Control of Micro-Networks of Renewable Energy through reconfigurable LFCS structures in VHDL*)

Cecilia E. Sandoval-Ruizⁱ

Resumen

Esta investigación presenta el diseño de un control basado en arquitectura LFCS (*Linear Feedback Concurrent Structure*), sobre hardware configurable en VHDL, para soluciones en el área de ingeniería sostenible. El modelo cuenta con la capacidad de ajustar sus parámetros de control de acuerdo a las condiciones dinámicas de un sistema reconfigurable de conversión de energía renovable. El método de diseño consiste en el modelado para hardware del elemento de procesamiento LFCS, obteniendo como resultado las ecuaciones descriptivas del modelo de control reconfigurable. Lo que permite concluir que este nuevo modelo de control presta grandes ventajas en control avanzado, integrando las bondades de las nuevas tecnologías. Uno de los aspectos de interés es que este modelo de control está diseñado en correspondencia para el control eficiente de sistemas de conversión de energía reconfigurables, con el propósito de promover el diseño sostenible de producción de energía alternativa, con responsabilidad ambiental y esquemas con capacidad de adaptación que superan la obsolescencia programada, siendo más ecológicos y con alta capacidad de cómputo.

Palabras Clave: Control adaptativo y por planificación de ganancias; Control de estructura variable; DSPs, FPGAs, Control neuronal.

Abstract

This research presents the design of a control based on Linear Feedback Concurrent Structure – LFCS architecture, on configurable hardware, where the model has the ability to adjust its control parameters according to the dynamic conditions of the

ⁱ Universidad de Carabobo, Venezuela. cesandova@gmail.com

reconfigurable systems of the conversion of renewable energy. The design method is in the model for the LFCS processing element, obtaining the descriptive equations of the reconfigurable control model. This allows us to conclude that this new control model provides great advantages in advanced control, integrating the benefits of new technologies. One of the objectives of this control model is designed in correspondence for the efficient control of reconfigurable energy conversion systems, with the purpose of promoting the sustainable design of alternative energy production, with environmental responsibility and schemes with capacity to adaptation that overcome the programmed obsolescence, more ecological and with greater capacity of computation.

Keywords: Adaptive control and profit planning; Variable structure control; DSPs, FPGAs, Neural control.

1. Introducción

Hoy en día cada vez es más necesario establecer planes de migración tecnológica en la producción de energía, la des-carbonización en las centrales termoeléctricas y el aprovechamiento de los recursos naturales, a través de sistemas híbridos en los que se adapten los actuales equipos a sistemas con energías renovables. Actualmente, la investigación científica se ha concentrado en establecer modelos de redes eléctricas distribuidas a pequeña escala, así como estudiar estrategias de control para estos sistemas, a través de arquitecturas avanzadas y conceptos de control para *microgrid* (Zekun, 2016). En este sentido se ha considerado el diseño de una arquitectura de control adaptativo-reconfigurable como solución para el control eficiente de sistemas reconfigurables de energía renovable, aplicando hardware definido para operaciones eficientes, basados en el modelado de estos esquemas en lenguaje VHDL.

El diseño de sistemas electrónicos inteligentes para el control neuronal (Nava, Steckler, Duarte, Zambrano, & Sandoval-Ruiz, 2018), así como redes eléctricas distribuidas (Real-calvo et al., 2017) son áreas de investigación que propone alternativas de solución en materia energética corresponde a las redes eléctricas inteligentes (Villa, Martin, Villanueva, Moya, & López, 2011), en las cuales se pueden manejar conceptos de redes reconfigurables, donde el diseño puede considerar las condiciones de demanda energética a través de control predictivo basado en modelos, para establecer la configuración más eficiente de la red eléctrica, incorporando técnicas de control avanzado e inteligencia artificial (García, Carlos, & López, 2011; Real, 2016).

Esta investigación surge a partir de la necesidad de control eficiente para modelos híbridos sostenibles (Sandoval-Ruiz, C. 2016b) y como una ampliación teórica de la optimización de modelos a partir de estructuras LFSR paralelizadas (Sandoval-Ruiz, C. 2013), en su aplicación para control de procesos dinámicos de conversión

de energía, tomando en cuenta criterios de control óptimo (Sandoval, Velazco, & Díaz, 2008), esquemas de control adaptativo (Sandoval-Ruiz, C. 2017b; 2014a), sus algoritmos (Castellanos, Sandoval, & Azpurua, 2014), a fin de proponer una arquitectura a nivel de hardware para los esquemas de control avanzado.

La generación distribuida permite disminuir las pérdidas de transmisión (Humberto, Berrío, & Zuluaga, 2014), estos modelos pueden ser considerados como una solución en la disminución de la inversión para ampliar la capacidad y la operatividad eficiente del sistema eléctrico. En este sentido, las micro redes eléctricas con fuentes de energía renovable, tienen entre sus objetivos la soberanía energética, sostenibilidad y optimización del uso de energía, siendo el esquema de control un elemento fundamental para el diseño óptimo de estos sistemas.

Al momento de diseñar los sistemas de conversión de energía renovable, se presenta una dinámica compleja que debe ser abordada con un esquema de control avanzado, con capacidad de configuración dinámica que permite ajustar la arquitectura en modo de operación, dando así mayor versatilidad al sistema de control. En este orden de ideas, se propone un sistema de control con estructura variable y parámetros adaptativos, que puede ser considerado como un modelo para establecer la arquitectura basada en módulos híbridos de conversión e incorporando estrategias de control avanzado con tecnología de hardware reconfigurable FPGA.

2. Control Reconfigurable para microgrid

Un sistema de control eficiente de microgrid, para sistemas eléctricos industriales comprende modelado, operación, elaboración de pronóstico, planificación y optimización en tiempo real (Siemens, 2015), donde las estrategias de control neuronal y reconfiguración dinámica de sistemas de potencia, se perfilan como una solución, tanto para *microgrid* industriales que disminuya el consumo de la red eléctrica central, como para redes alternativas que buscan la diversificación de Fuentes renovables, de manera colaborativa.

2.1 MicroGrid de Energía Renovable

Las redes eléctricas compuestas por microsistemas son sistemas distribuidos a pequeña escala que utiliza gran cantidad de tecnología eléctrica moderna, interconectado de forma paralela (Zekun, 2016). Destacan entre sus características la modularidad para el desarrollo a futuro, integrando convertidores en atención a la demanda, interacción con la red eléctrica convencional aportando energía de forma independiente, aplicación de nuevas tecnologías de control que facilita su operación, simplifica el mantenimiento de la red, aumenta su potencial de desarrollo

y la diversificación de las fuentes permite la reducción de la emisión de CO_2 .

2.2 Control de Arquitectura Reconfigurable

El sistema de control reconfigurable está compuesto del controlador con arquitectura y parámetros variables y una etapa de supervisión, donde se realiza el diseño en línea del controlador, a partir de un módulo de diagnóstico de la planta, considerando las señales manejadas por el sistema y un módulo de reconfiguración, ver Figura 1.

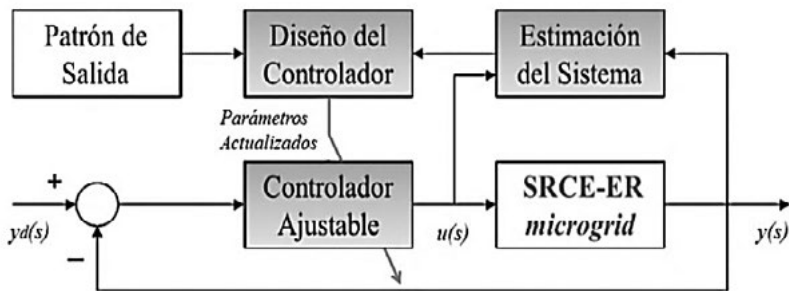


Figura 1. Esquema de Control Reconfigurable (Steffen, 2005).

De este esquema se debe resaltar la diferencia entre control adaptativo tratando redes neuronales con pesos sinápticos ajustables (Sandoval-Ruiz, C. 2017b) y el control reconfigurable en el que se reconfigura la arquitectura de los elementos de cálculo, es decir que los coeficientes en lugar de ajustarse pueden cambiar la arquitectura, con la ventaja propia de simplificación y eficiencia.

2.3 Arquitectura LFCS para el esquema de Control

Para el control reconfigurable se considera la estructura LFCS, tanto a nivel del esquema general con módulos ponderados para la salida del sistema, como en los componentes de operación, ya que los controladores convencionales diseñados para procesamiento de señales en software presentan parámetros definidos como variables de tipo punto flotante, en tanto que el diseño orientado a hardware está planteado para el procesamiento con señales de longitud fija, como un vector binario, al entrar en este nivel de abstracción el diseño se reformula para optimizar sus resultados.

Es así como se plantea el modelo de control basado en multiplicadores en campos finitos, como un elemento de ajuste de los parámetros de control de longitud fija. En este modelo se plantea un esquema de acción basada en el controlador con procesamiento concurrente y un esquema de verificación que corresponde a la etapa

de análisis de la salida del sistema, donde ocurre la operación inversa para calcular las entradas estimadas en función de la salida especificada. Este comportamiento puede ser descrito en VHDL, partiendo de modelo de control neuronal.

2.4 Modelo VHDL de Control Neuronal sobre tecnología FPGA

Una neurona artificial puede ser vista como la combinación de una transformación afín (suma de pesos sinápticos) seguida de una transformación no lineal (función de activación). La forma más común de este tipo de redes consiste en la configuración de solo una capa oculta relacionada con una capa de salida con lo que se obtiene una profundidad de 2, entendiendo la profundidad de la red como el número de capas de la red neuronal.

En necesario analizar la profundidad de la arquitectura de la red, ya que funciones que pueden ser representadas compactamente por una arquitectura de profundidad k , pueden requerir un número exponencialmente grande de elementos computacionales (neuronas) para ser representadas por una arquitectura de profundidad $k - 1$. Una característica fundamental es que entre mayor sea el número de elementos utilizados para representar una función, mayor será el número de patrones necesarios para el proceso de aprendizaje con el objetivo de obtener una buena generalización (De la Rosa M., 2014).

Las relaciones de las diversas arquitecturas, permiten observar un mayor potencial en el diseño de redes compuestas, que subredes operando de manera independiente. Si se emplean un conjunto de subredes trabajando cooperativamente, esto equivale a añadir una tercera capa en la arquitectura de la red de la función general, logrando solucionar problemas más complejos, en el caso del código, puede solucionar combinaciones de casos no entrenados. Considerando el compromiso entre la profundidad de la red y el número de neuronas asociadas a consumo de recursos de hardware. Todo esto requiere definir una profundidad adecuada para cada función. Por lo tanto, se considerarán soluciones particulares, tomando en cuenta el comportamiento de cada uno, el paralelismo y consumo de recursos del dispositivo (Salsic, 2006), ya que estos aspectos estarán definiendo la eficiencia de la red neuronal.

En el caso de las Deep Neural Network – DNN, el entrenamiento basado en el método del gradiente descendente para redes neuronales profundas supervisadas se estanca en lo que ha sido llamado mínimo local aparente, a diferencia de redes entrenadas por medio de arquitecturas con una sola capa de neuronas ocultas (D. Erhan, P.-A. Manzagol, Y. Bengio, S. Bengio, & P. Vincent, 2009; H. Larochelle, Y. Bengio, J. Louradour, & P. Lamblin, 2009). Estos estudios permitieron establecer que un algoritmo de pre-entrenamiento no supervisado sobre cada una de las capas comenzando con la capa de entrada a la red presenta mejores resultados, con los

que la red puede ser ajustada utilizando un criterio supervisado para la capa de salida, como lo es el método del gradiente descendente (De la Rosa M., 2014).

Esto nos lleva a considerar un novedoso método de entrenamiento fraccionado, para las redes neuronales profundas, que ahora serán consideradas como redes fractales cumpliendo con los criterios de modelo compuesto del sistema es conocido y auto-similitud entre las funciones de las subredes. De esta manera, conocidos los targets de entrenamiento para las redes componentes, se puede realizar el pre-entrenamiento supervisado de las funciones contenidas en las neuronas complejas. Estos aspectos son considerados en lo que se ha definido como redes neuronales de arquitectura fractal, las cuales pueden ser incluidas como una subclase de las redes neuronales de arquitectura profunda, en las cuales el entrenamiento está basado en sub-entrenamiento para las redes con funciones básicas, definidas como operaciones internas de la red neuronal.

Para la comprensión del modelo de aprendizaje, resulta útil estudiar el concepto de los autoencoders (Hinton & Zemel, 1994), estos han sido utilizados como bloques constructores de entrenamiento de arquitecturas profundas, donde cada nivel está asociado con un codificador que entrena inicialmente una capa independientemente de las demás. Éste es entrenado para codificar la entrada x en alguna representación correspondiente $c(x)$, tal que la entrada pueda ser reconstruida a partir de esta representación. En este caso se puede establecer la correspondencia entre estos y los componentes de la red fractal de codificación RS, tratando cada modelo de neuro-multiplicador GF, como un autoencoder.

Un tópico de estudio de interés corresponde a los circuitos electrónicos con estructura fractal, cuyo modelado en lenguaje descriptor de hardware, puede realizarse a través de ecuaciones con características de funciones iteradas (Sandoval-Ruiz C. & Fedón-Rovira, 2013), en el cual las redes neuronales pueden coincidir, y se pueden modelar bajo este criterio. Para el esquema de control de cada uno de los elementos de la estructura reconfigurable, el ajuste de los parámetros del controlador se puede realizar a través del algoritmo adaptativos, notando que el algoritmo permite adaptar los coeficientes para obtener una salida deseada, a través de la ponderación de las entradas, este tipo de control adaptativo presenta similitud entre algoritmos LMS para *beamforming* (Castellanos et al., 2014), el cálculo puede ser sustituido por una expresión lógica del procesamiento concurrente con la estructura circuital LFCS, tal como se presenta en la ecuación (1).

$$w_{new} = w_{old} \oplus GF[\alpha(t_q - a_q) p_q^T] \quad (1)$$

Los coeficientes actuales se calculan con operaciones lógicas en campos finitos a partir de los valores previos y el error estimado en la salida del sistema, donde la descripción en VHDL del ajuste de ganancia adaptativa será dado por el criterio de la Tabla 1.

Tabla 1. Código De Ajuste de Ganancia en VHDL.

if eqn1= eqn then	-- relación del error estimado
gn <=gn (1 downto 0) & '1'; else	-- aumento de la ganancia
gn <='0' & gn (2 downto 1); end if;	-- disminución de la ganancia

3. Método de Diseño del Control Reconfigurable

Al momento de establecer el diseño se han considerado aspectos como el cálculo de ganancias dentro de un campo finito, para los cálculos internos del controlador, siempre que estos están definidos en un rango de operación finito, con el propósito de establecer operadores lógicos de mayor eficiencia y bus de datos para las señales de longitud fija. En tal sentido se han definido operaciones de producto módulo, con operadores descritos en VHDL (Sandoval-Ruiz, C. 2017), con el cual se establece el cálculo de control dentro de un campo definido.

3.1 Desarrollo del Modelo Concurrente del Controlador

Para generar cada símbolo, correspondiente a aplicar el circuito LFSR sobre un polinomio $P(x)$, cuyos coeficientes serán representados por los símbolos de datos, el cual depende del instante de tiempo y la posición del elemento en el polinomio, $G(x)$ el polinomio generador del código, el cual tendrá representados sus elementos por el coeficiente c_p , el cual será fijo en el tiempo y su valor depende de la posición, de donde se obtuvo la ecuación (2).

$$w(i) = w_{t-1}(i-1) \oplus (p(i) \otimes c(i)) \quad (2)$$

Donde $w(i)$ corresponde al coeficiente i del controlador $y(x)$ en un instante de tiempo t , $w_{t-1}(i)$ corresponde al coeficiente almacenado en el registro un instante de tiempo anterior, $p(i)$ corresponde al símbolo del patrón de entrada al sistema y $c(i)$ la ponderación del polinomio generador que es variable en la arquitectura del LFSR para la descripción del controlador, en función del error instantáneo. Seguidamente, se definió la ecuación general del vector $C(x)$ para cada instante de tiempo, el cual corresponde a la concatenación de los términos obtenidos para cada elemento i en la ecuación (2), donde se empleará el símbolo '&' para indicar la operación de concatenación a fin de coincidir con la descripción en VHDL, de donde se obtiene la ecuación (3).

$$w_t = \&_{i=n-k}^0 w_{t-1}(i-1) \oplus (p(i) \otimes c(i)) \quad (3)$$

Siendo w_t , el vector generado en un tiempo t de aplicar el circuito de generación de símbolos de redundancia. De esta manera, se tomó el modelo del circuito de estructura concurrente de realimentación lineal para la generación los coeficientes del controlador, partiendo del LFSR que forma parte de la arquitectura del controlador reconfigurable, cuya longitud está dada por los n registros, de m bits cada uno, se obtiene el modelo paralelizado, en el cual cada palabra corresponde a un elemento del campo finito $GF(2^m)$, de esta manera, se procedió a la generalización de la ecuación del LFCS, esta vez aplicable a registros de capacidad de b bits, al desarrollar la ecuación (3), se obtiene la expresión presentada en la ecuación (4), que corresponde a la aplicación del modelo concurrente del LFSR para la descripción del codificador paralelo.

$$\begin{aligned} w_i = & d(i) \otimes c(n-k) \& w(n-k) \\ & \oplus (p(i) \otimes c(n-k-1)) \& \dots \\ & \& w_{i-1}(1) \oplus (p(i) \otimes c(1)) \end{aligned} \quad (4)$$

Para la implementación en VHDL se ha expresado el factor de la multiplicación en álgebra finita de Galois, a través de la salida del multiplicador como operando del LFSR concurrente, siendo éste un operador para la obtención del producto en el campo finito, y el cálculo de los coeficientes del controlador, así como las operaciones que definen la ponderación de los elementos que forman parte del control reconfigurable diseñado para la *microgrid*.

Los elementos finales de control son manejados por señales entre 0-5V o 4-20mA, posicionamiento de motores en un ángulo en el rango de 0-360°. Por lo que es importante señalar que el posicionamiento dinámico de los convertidores de energía, manejan una ganancia definida en un intervalo definido, permitiendo el diseño de un control con operaciones aritméticas de campo finito, que maneja longitud fija de los coeficientes del modelo, lo que garantiza un cómputo eficiente de los parámetros del controlador, es por ello que en esta investigación se desarrolla el cómputo basado en hardware LFSR concurrentes. En tal sentido, el producto en campos finitos permite la implementación matemática de las funciones de salida del controlador, simplificando su modelo matemático, esto eliminando resultados con variables punto flotante y cálculo complejo, así como el manejo de tablas ajustadas a la dinámica del sistema de control.

4. Resultados

Entre los resultados destaca la implementación del algoritmo adaptativo a través de un LFCS (*Linear Feedback Concurrent Structure*) para el modelo de control reconfigurable de sistemas híbridos de conversión de energía renovable (ver Figura 2), donde cada uno de los convertidores presenta su control adaptativo ponderando el aporte de cada convertidor.

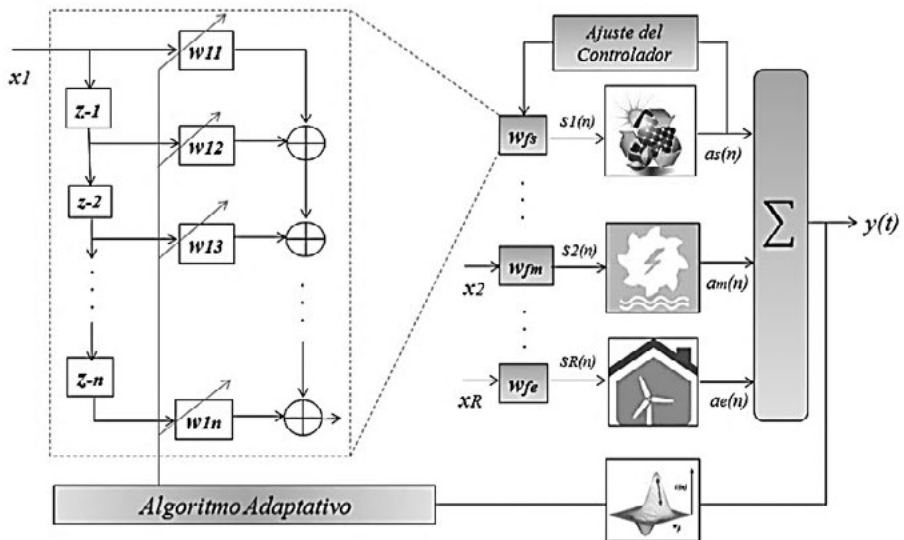


Figura 2. Modelo del Esquema de Control con Red Lineal Fractal.

El esquema permite observar, en primer lugar los módulos de multiplicación pueden ser esquematizados como la suma ponderada de los bits de entrada de la señal x_k , que el componente producto presenta una arquitectura similar a la arquitectura de la neurona, en tanto que la arquitectura de la red presenta similitud con el modelo de la neurona, podemos concluir que entre la estructura de la red y los componentes se presenta una estructura circuital auto-similar, principio que se ha discutido ampliamente en el análisis de estructuras fractales y sistemas de funciones iteradas desarrollado en (Sandoval-Ruiz, C. 2017a).

Las ecuaciones de la red neuronal fractal se pueden expresar a partir de la base de una neurona. Esta operación que corresponde a la convolución, puede ser expresada como la operación base que sustituye la operación producto, de la forma que sigue como en la ecuación (5).

$$a(n) = \sum_{k=0}^{Rc} w_{j,k} \left(\sum_{i=0}^{Rf} w_{i,j} \cdot x_i \right) \tag{5}$$

Donde $a(n)$ corresponde a la salida de la red, $w_{j,k}$ los pesos sinápticos de la red externa, $w_{i,j}$ los pesos sinápticos de la subred componente y x_i las entradas de la red neuronal, se tiene que la operación entre los componentes de la red están siendo operados bajo el producto de convolución (Sandoval-Ruiz, C. 2016a), suma de productos, que se definirá como operación de *sinapsis neuronal*.

A partir de este modelo fractal, donde el circuito de la red neuronal se ha tratado como componentes de una subred, como parte del componente principal de las neuronas de la capa fractal, se presentan diversos esquemas que pueden ser configurados de acuerdo a la aplicación de interés. Tal es el caso de una red concurrente multicapa, que puede representar el operador de la red fractal, como se muestra en la Figura 3.

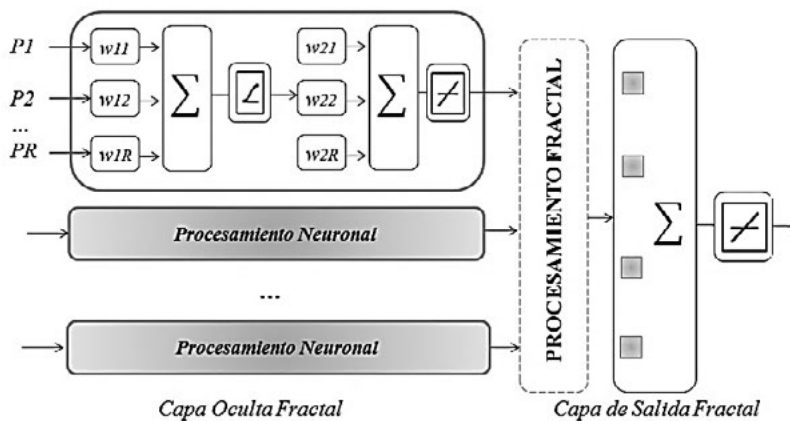


Figura 3. Esquema MPL en el componente de la Red Neuronal Fractal.

Estas configuraciones de Redes Neuronales Fractales, pueden ser aplicadas en el caso de sistemas complejos, como codificadores/decodificadores Reed Solomon, siendo estos la aplicación a estudiar.

El modelo define el concepto de sistemas reconfigurables de conversión de energía renovable – SRCE, siendo estos micro-sistemas modulares, que pueden ser configurados en tiempo de operación, disminuyendo los costos asociados a la instalación y operatividad de estos, que pueden ser escalados e integrados en microgrids, diseñando la arquitectura de la red de conversión de energía a partir de las condiciones del entorno, las características de las fuentes de energía renovable y la demanda eléctrica en el tiempo, aplicando criterios de control óptimo.

Se destaca que el sistema presenta una etapa de control dedicado al esquema de conversión o automatización específico, los cuales son igualmente concatenados en el control reconfigurable que considera los criterios de diseño para adaptar la microgrid. Por otra parte para cada subsistema se requiere de un control con capacidad de reconfiguración, que permita que el sistema adapte su configuración, requiere así de un modelo de control eficiente que ajuste sus parámetros en tiempo de operación, a fin de optimizar la respuesta del sistema y su eficiencia energética, donde se puede aplicar un controlador diseñado a partir de un modelo neuronal de control avanzado, con algoritmos que se ajusten a la dinámica propia de estos sistemas.

Esto se realiza predefiniendo unos valores de ganancia del polinomio generador del parámetro de coeficientes $g(x)$, en relación al error obtenido. De esta forma la estructura LFCS (Sandoval-Ruiz C., 2012) se configura para el polinomio que define el coeficiente más cercano de la ganancia para el resultado esperado, en esquemas de control adaptativo este LFCS reconfigurable ofrece amplias ventajas en desempeño óptimo y eficiencia en tiempo de respuesta, obteniendo resultados concurrentes para la estimación del valor por aproximaciones sucesivas, la paralelización de este algoritmo adaptativo a través del circuito concurrente se obtiene mediante la descripción en VHDL de los términos de este elementos (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de Términos del LFCS para VHDL.

t	$i=n-k$	$i=n-k-1$...
0	0	0	...
1	$x(k) g(n-k)$	$c_{1,(n-k)} \oplus (x(k) \otimes g(n-k-1))$...
...
$n-k$	$x(0) g(n-k)$	$c_{n-k,(n-k)} \oplus (x(0) \otimes g(n-k-1))$...
n	0	$c_n(n-k)$...

El tratamiento concurrente de las señales en el módulo de diseño del controlador se perfila como una ventaja ya que optimiza los tiempo de respuesta del controlador acercándose a la solución óptima para obtener la salida deseada del sistema, vale decir que este tipo de procesamiento sobre estructuras de hardware LFCS son un enfoque novedoso en el área de control, donde se incorporan conceptos de control reconfigurable por la capacidad de este de adaptar la arquitectura del controlador.

Luego del análisis teórico, se procedió a la obtención del consumo de potencia en mW de los módulos diseñados, usando la herramienta del *XPower Analyzer* del IDE de Xilinx, como se observa en la Tabla 3, considerando como factor de comparación el orden de asignación de las señales para el circuito multiplicador (Sandoval Ruiz, C. 2014b).

Tabla 3. Consumo de Potencia del multiplicador.

Potencia (mW)	Logic	Signal	Clk	IO	Dinámica
LFCS (A,B)	0,04	0,35	0,00	-	0,39
LFCS (B,A)	0,04	0,38	0,00	-	0,42

En primer lugar, el consumo de potencia asociado a la lógica del circuito *Pot_Logic* en ambos casos fue de 0.04 mW, en tanto que la *Pot_Signal* presentó una variación, de acuerdo al orden de los operandos, consumiendo una potencia asociada a las señales de 0.38 mW en el caso de *LFCS (B,A)* y un consumo de potencia de 0.35 mW en el caso de *LFCS (A,B)*, esta optimización se logró a través de la *Técnica de Reordenamiento de señales*, en este caso se probaron los resultados del multiplicador empleando la propiedad conmutativa de las operaciones. Por otra parte, no se presenta consumo asociado a la señal de reloj *Pot_clk*, ya que el multiplicador es concurrente. Para el cálculo del consumo de compuertas se establecieron a través de las ecuaciones, para el cálculo de AND y XOR requeridas.

$$\#AND_{mult} = m^2 \quad (6)$$

$$\#XOR_{mult} = m^{2+p} \cdot m - 4 \cdot m - p + 3$$

Donde m corresponde al número de bits de cada palabra del campo y p corresponde al número de bits no nulos del polinomio irreducible $P(x)$, en este caso la optimización corresponde a la simplificación de operaciones, en función del número de coeficientes $P(x)$ no nulos. Finalmente, con la estimación del desempeño de los componentes, a partir de una estimación de los modelos de la planta usando redes neuronales, describiendo el modelo neuronal en VHDL, se obtiene el esquema de control para cada módulo, concatenando estos últimos en el esquema de control reconfigurable con el modelo dado en la ecuación (7).

$$c_t = \&_{i=n-k}^0 c_{t-1}(i-1) \oplus (x(i) \otimes g(i)) \quad (7)$$

Donde, corresponde a la salida de los elementos de control, $x(x)$ el vector de entrada y $g(x)$, los coeficiente de ponderación de cada subsistema, en el caso de la aplicación acá estudiada será cada micro-convertidor, permitiendo estimar los recursos de hardware asociados a su implementación.

5. Conclusiones

Gracias al modelo de control reconfigurable se ofrece un soporte con tecnología novedosa para el desarrollo de modelos de control para sistemas con dinámica compleja, como los sistemas eléctricos de potencia con energías renovables. La importancia de este modelo viene dada por la aplicación que busca aumentar la eficiencia de la red eléctrica, disminuyendo costos tanto de operación como implementación, siendo éste uno de los costos más elevados asociados a la tecnología, sin embargo con el esquema LFCS, se puede simplificar el procesamiento, manejar de forma modular la implementación y optimizar su diseño. De manera que la demanda sea cubierta de forma eficiente, independientemente de la fuente de energía renovable que esté alimentando la red.

De la investigación tecnológica acá desarrollada se extrapolan los resultados obtenidos en optimización de estructuras para procesamiento de datos (Sandoval-Ruiz, C. & Fedón-Rovira, 2014), haciendo uso de principios de procesamiento neuro-fractal y códigos en campos finitos, como conceptos base del esquema de control. Además, representa un aporte por el nuevo enfoque al control reconfigurable, basado en el modelado en VHDL (Sandoval & Fedón, 2008), el cual puede ser aplicado como alternativa a los esquemas de control convencional, con las ventajas en el tratamiento de las señales, aumentando así las prestaciones en cuanto a velocidad de procesamiento, simplificación y eficiencia energética.

Incluso el diseño presenta un avance con respecto a trabajos previos (Sandoval-Ruiz, C. 2017b), en el que se tienen resultados secuenciales que validan el diseño de un algoritmo adaptativo, en tanto que en esta investigación se obtienen resultados concurrentes basados en los modelos circuitales optimizados de la arquitectura LFCS, logrando la paralelización de los algoritmos de control adaptativo mediante descripción circuital, siendo esto un valioso aporte para el área de control de sistemas dinámicos de conversión de energía renovable, promoviendo así el desarrollo de micro-redes eléctricas inteligentes, módulos híbridos de conversión (Sandoval-Ruiz, C. 2015), como soluciones para garantizar la independencia tecnológica, ampliando la matriz energética, con criterios de diseño de respeto ambiental.

Otro aspecto de interés, destaca la importancia de la arquitectura de control acá desarrollada, en la que los multiplicadores de campos finitos juega un papel primordial, con el modelo desarrollado a través de ecuaciones y estimadores de consumo de potencia del diseño, útiles en la estimación de los parámetros del controlador, lo que constituye una herramienta para actualizaciones e investigaciones en el área siendo así una fuente para la producción de conocimientos en centros de investigación y universidades.

Se puede concluir que la investigación aporta una solución a la necesidad de tecnologías para el desarrollo de micro-sistemas reconfigurables de conversión de energía, que se integren a través de un modelo de control digital. Este modelo busca

promover el desarrollo sostenible, con integración de métodos de reutilización de recursos en generación de energía, reducción de CO₂, entre otras aplicaciones con altos requerimientos de cómputo para automatización y control, que van a representar un avance en materia de responsabilidad ambiental.

6. Referencias

- Castellanos, J., Sandoval, C., & Azpurua, M. (2014). A FPGA implementation of a LMS adaptative algorithm for smart antenna arrays. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería de La Universidad de Zulia, Venezuela*, 37(3), 270–278. Retrieved from <http://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/21211/21051>
- D. Erhan, P.-A. Manzagol, Y. Bengio, S. Bengio, & P. Vincent. (2009). The difficulty of training deep architectures and the effect of unsupervised pretraining. In *Proceedings of The Twelfth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*. California, USA. (pp. 153–160).
- De la Rosa M., E. D. (2014). *El aprendizaje profundo para la identificación de sistemas no lineales*. Centro de Investigación y de estudio Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México, D.F. Retrieved from <http://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/MaTesER.pdf>
- García, T., Carlos, J., & López, L. (2011). Técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas a la Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid). España. *Novótica*, 213, 29–34. Retrieved from <http://arco.esi.uclm.es/public/papers/2011-NOVATICA.pdf>
- H. Larochelle, Y. Bengio, J. Louradour, & P. Lamblin. (2009). Exploring strategies for training deep neural networks. Montreal, Canada. *Journal of Machine Learning Research*, 10, 1–40. Retrieved from <http://www.jmlr.org/papers/volume10/larochelle09a/larochelle09a.pdf>
- Hinton, G. E., & Zemel, R. S. (1994). Autoencoders, minimum description length and Helmholtz free energy. In *In Advances in neural information processing systems* (pp. 3–10).
- Humberto, L., Berrío, L. H., & Zuluaga, C. (2014). Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida : una revisión en el contexto energético mundial. Colombia. *Ingeniería Y Desarrollo*, 32(2), 369–396. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85232596010>

- Nava, C., Steckler, D., Duarte, J., Zambrano, J., & Sandoval-Ruiz, C. E. (2018). Design of Neural Networks on microcontrollers, applied in functional modules for an eco-park. Venezuela. *Revista Ingeniería uC*, 25(1), 1–12.
- Real-calvo, R., Moreno-munoz, A., Pallares-lopez, V., Gonzalez-redondo, M. J., Moreno-garcia, I. M., & Palacios-garcia, E. J. (2017). Sistema Electrónico Inteligente para el Control de la Interconexión entre Equipamiento de Generación Distribuida y la Red Eléctrica. Córdoba, España. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial*, 14(1), 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.11.002>
- Real, R. (2016). *Integración de dispositivos electrónicos inteligentes en smart grid*. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, España.
- Salsic, Z. (2006). FPGA Prototyping of RNN Decoder for Convolutional Codes. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 1–9.
- Sandoval-Ruiz, C. (2012). Codificador RS (n,k) basado en LFCS : caso de estudio RS (7,3). Colombia. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, (64), 68–78. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n64/n64a07.pdf>
- Sandoval-Ruiz, C. (2013). *Modelo Optimizado del Codificador Reed-Solomon (255,k) en VHDL a través de un LFSR paralelizado*. Tesis Doctoral, Universidad de Carabobo, Venezuela. Retrieved from <http://produccion-uc.bc.uc.edu.ve/documentos/trabajos/2000369C.pdf>
- Sandoval-Ruiz, C. (2015). Sistema Eco-Adaptativo integrado en elementos arquitectónicos con tecnología sostenible. Venezuela. *Revista Electrónica Científica Perspectiva*, 8(4), 96–109. Retrieved from <https://issuu.com/recperspectiva/docs/rec8/96>
- Sandoval-Ruiz, C. (2016a). Modelo de Estructuras Reconfigurables con Registro Desplazamiento, para Lenguaje Descriptor de Hardware VHDL. Venezuela. *Revista Fac Ing UCV*, 31(3), 63–72.
- Sandoval-Ruiz, C. (2016b). Plataforma Reconfigurable de Investigación aplicada a Movilidad Sostenible. Venezuela. *Revista Universidad, Ciencia Y Tecnología*, 20(78), 35–41. Retrieved from <http://www.uct.unexpo.edu.ve/index.php/uct/article/view/748/601>
- Sandoval-Ruiz, C. (2017a). Analysis of Fractal Circuits and Modeling through Iterated Functions System for VHDL Case Study : Reed Solomon Encode. Venezuela. *Rev. Ciencia E Ingeniería*, 38(1), 3–16.
- Sandoval-Ruiz, C. (2017b). Modelo Neuro-Adaptativo en VHDL, basado en

- circuitos NLFSR, para Control de un Sistema Inteligente de Tecnología Sostenible. Venezuela. *Revista Universidad, Ciencia Y Tecnología*, 21(85), 140–149.
- Sandoval-Ruiz, C. (2017). VHDL Optimized Model of a Multiplier in Finite Fields. Venezuela. *Ingeniería Y Universidad*, 21(2), 195–211. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu21-2.vhdl>
- Sandoval-Ruiz, C., & Fedón-Rovira, A. (2013). Modelo fractal de un codificador Reed Solomon. Venezuela. *VIII Congreso Nacional Y 2do Congreso Internacional de La UC*, 1–12.
- Sandoval-Ruiz, C., & Fedón-Rovira, A. (2014). Efficient RS (255 ,k) encoder over reconfigurable systems. Venezuela. *Rev.Téc.Ing.Zulia*, 37(2), 151–159.
- Sandoval, C., & Fedón, A. (2008). Programación VHDL de algoritmos de codificación para dispositivos de hardware reconfigurable. Venezuela. *Rev.Int. Mét.Num.Cálc.Dis.ing.*, 24(1), 3–11.
- Sandoval, C., Velazco, K., & Díaz, J. (2008). Accionamiento eléctrico de sistemas dinámicos a través de criterios de control óptimo. Colombia. *Rev. Ing E Investigación*, 28(2), 66–71. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/643/64328210.pdf>
- Sandoval Ruiz, C. (2014a). Adaptive Control in VHDL Applied to a Solar Oven. Colombia. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(23), 142–147.
- Sandoval Ruiz, C. (2014b). Power Consumption Optimization in Reed Solomon Encoders over FPGA. Venezuela. *Latin American Applied Research*, 44(1), 81–85.
- Siemens. (2015). *Control eficiente de microredes en redes eléctricas industriales*. Erlangen, Germany.
- Steffen, T. (2005). *Control reconfiguration of dynamical systems: linear approaches and structural tests*. (Springer, Ed.). Springer Science & Business Media.
- Villa, D., Martín, C., Villanueva, F., Moya, F., & Lopez, J. (2011). A dynamically reconfigurable architecture for smart grids. La Mancha, España. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57(2), 411–419. <https://doi.org/10.1109/TCE.2011.5955174>
- Zekun, S. (2016). *Estudio de funcionamiento y control de micro red*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, Sevilla, España.

