

Códigos Reed Solomon para Sistemas Distribuidos de Energías Renovables y Smart Grids

a través de Dispositivos Electrónicos Inteligentes sobre Tecnología FPGA

Reed Solomon codes for Distributed Systems of Renewable Energies and Smart Grids through Intelligent Electronic Devices on FPGA Technology

Cecilia E. Sandoval-Ruiz¹

Recibido: mayo 2018

Aprobado: setiembre 2018

Resumen. - Esta investigación presenta el diseño de los códigos Reed Solomon orientados a su implementación sobre FPGAs, para el sistema de control y comunicación de Sistemas Distribuidos de Energías Renovables y Smart Grids. Esto nos permite construir un modelo de red eléctrica con capacidad de reconfiguración dinámica, facilitando la adaptación del sistema de conversión y distribución de energía a las condiciones del entorno y la demanda de electricidad. El método de diseño consiste en la definición de la arquitectura, en lenguaje de descripción de hardware, para la configuración dinámica de terminales remotos, a fin facilitar el acoplamiento inteligente de componentes de red y la diversificación de fuentes de energías para la migración hacia sistemas de potencia carbon-free. Los resultados muestran el esquema de control distribuido, la descripción VHDL para configuración de módulos en los dispositivos electrónicos inteligentes – IEDs, el modelo neuronal general, el reporte de síntesis y comportamiento de un código Reed Solomon, definido para la transmisión de parámetros del equipo de las Smart Grids. De esta forma, se proporciona un modelo reconfigurable para la aplicación de dispositivos inteligentes en la gestión de la red eléctrica reconfigurable, abriendo un espacio para la investigación sobre la eficiencia energética. Se logra así una propuesta de innovación científica que integra aplicaciones tecnológicas prácticas y modelo lógico-matemático, basado en operadores de concatenación realimentada – LFCS (n,k), para el soporte de funciones de control y comunicación, que ofrecen grandes bondades al área de sistemas distribuidos de energías renovables.

Palabras Clave: *Dispositivos Electrónicos Inteligentes, VHDL, FPGA, Redes Eléctricas Distribuidas, Energías Renovables, Código Solomon-Reed.*

Abstract - *This research presents the design of the Reed Solomon codes oriented to their implementation on FPGAs - Intelligent Electronic Devices in VHDL, for the control and communication system of Distributed Systems of Renewable Energies and Smart Grids. This allows us to build a dynamic reconfiguration model of the network, facilitating the adaptation of the energy conversion and distribution system to environmental conditions and the demand for electricity. The design method consists in the definition of the architecture, in hardware description language, for the dynamic configuration of remote control and communication terminals, in order to facilitate the intelligent coupling of network components and the incorporation of various sources. The results show the distributed control scheme, the description of the support for the IEDs, the general neural model, the report of synthesis and behavior of a Reed Solomon code (n, k), defined for the transmission of parameters of the Smart equipment. Grids In this way, a*

¹ *Facultad de Ingeniería, Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado, Universidad de Carabobo, Venezuela.*

reconfigurable model for the application of intelligent devices in the management of the reconfigurable electrical network is provided, opening a space for research on energy efficiency.

Keywords: *Intelligent Electronic Devices, VHDL, FPGA, Distributed Electrical Networks, Renewable Energies, Reed-Solomon Code.*

1. Introducción.- Actualmente, la investigación científica se ha concentrado en establecer modelos de redes eléctricas distribuidas a pequeña escala, así como en estrategias de control para estos sistemas, a través de arquitecturas avanzadas y conceptos de control para micro-redes [1]. En este sentido se ha considerado el diseño de una arquitectura de control adaptativo-reconfigurable como solución para el control de sistemas reconfigurables de energía renovable, aplicando hardware definido para operaciones eficientes [2], basados en el modelado de estos esquemas en lenguaje VHDL - VHSIC (Very High Speed Integrated Circuits) Hardware Description Language.

El término Smart Grids se refiere a la próxima generación de redes eléctricas, en las que la distribución de energía y la administración se actualiza incorporando un sistema avanzado de comunicación bidireccional y capacidad distribuida para control, eficiencia, confiabilidad y seguridad [3]. La generación eléctrica distribuida, a través de micro-redes eléctricas con fuentes de energía renovable, permite (1) disminuir las pérdidas de transmisión [4], (2) alcanzar la soberanía energética, (3) sostenibilidad, (4) menor impacto ambiental y (5) optimización del uso de energía. 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, siendo el esquema de control un elemento fundamental para el diseño óptimo de estos sistemas.

Un punto de especial atención corresponde a equilibrar los aportes de cada una de las fuentes de energía alternativa, para obtener un comportamiento balanceado del sistema, en el que se pueda optimizar el suministro eléctrico. En este orden de ideas, es necesario el diseño de un control avanzado [5], que permita adaptarse a esta dinámica, donde los equipos de manejo pueden estar diseñados sobre hardware reconfigurable y modelar el sistema para su optimización dinámica, en el ambiente inteligente, definido por el control distribuido de estos dispositivos electrónicos inteligentes.

Estos sistemas de conversión de energía renovable, presentan una dinámica compleja que debe ser abordada con un esquema de control para modelos híbridos sostenibles y como una ampliación teórica de la optimización de modelos a partir de estructuras LFSR paralelizadas [6]. Esto para su aplicación para cogeneración de energías renovables [7], control de procesos dinámicos de conversión de energía, tomando en cuenta esquemas de control adaptativo [8], [9], sus algoritmos [10], a fin de proponer una arquitectura a nivel de hardware para los esquemas de control avanzado. En tal sentido, es de vital importancia el diseño de los dispositivos electrónicos inteligentes. Para la implementación sus funciones en el sistema de potencia, se plantea la aplicación de tecnología de hardware reconfigurable, lo que va a permitir la definición de un nuevo modelo de redes inteligentes, con capacidad de reconfiguración dinámica. Los FPGAs (Fields Programmable Gate Arrays) se perfilan como una alternativa para implementación de estos dispositivos, que cumplirán la función de elementos terminales remotos, para la identificación y gestión on line de los equipos de la red.

El diseño de sistemas electrónicos inteligentes para el control de redes eléctricas distribuidas [11], es una área de investigación que propone alternativas de solución en materia energética, a fin de soportar las redes eléctricas inteligentes [12], en las cuales se pueden manejar conceptos de redes reconfigurables. En estos casos 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 [13], [14].

Al momento de definir los criterios de diseño, los IEDs deben tener amplia capacidad de cómputo, paralelismo y flexibilidad, para cubrir funciones de monitoreo, control y accionamiento remoto, con los respectivos protocolos de comunicación, con capacidad cognitiva, para adaptarse a las condiciones específicas, a fin de garantizar la eficiencia de sus funciones. Es así como se considera la inteligencia computacional para Smart Grid [15] y las características de las redes neuronales artificiales, como modelos para el diseño de los dispositivos electrónicos inteligentes. Donde se busca alcanzar la capacidad de reconfiguración de la arquitectura de la red eléctrica, a través de estos elementos inteligentes y tele-configuración. De esta manera se pueden incorporar, de manera eficiente, fuentes de energías renovables, que resulten competitivas gracias a la tecnología de punta.

La configuración remota, por su parte demanda el diseño de códigos inteligentes, para obtener el mejor rendimiento del canal de comunicación. En [16] se afirma que el aprendizaje profundo es una herramienta de decodificación competitiva, teniendo en cuenta el nivel de rendimiento y complejidad. Aunque el entrenamiento de aprendizaje profundo puede requerir una alta complejidad computacional, se debe tener en cuenta que la aplicación de campo de redes capacitadas se puede lograr con un bajo nivel de complejidad, creemos que lo que evidencia la tendencia de aplicar modelos neuronales en áreas de comunicaciones, como una solución eficiente.

En [17] se presenta un análisis de la tecnología blockchain para soporte para la gestión distribuida de los sistemas de energías renovables, donde se requiere la definición de códigos y criptografía para la identificación de paquetes en los nodos. En tanto que [18] destaca la importancia de los protocolos de comunicación para la confiabilidad y eficiencia de los sistemas de potencia de próxima generación. Las comunicaciones aplicadas a la red eléctrica de potencia (PLC – Power Line Communications), son aplicadas en gestión de energía y Smart Grids, sistema de gestión de energía, red de sensores y actuadores interconectados (esto se orienta al concepto Smart Grid) y automatización [19]. Por lo que se mantiene la investigación en los estándares de estos sistemas IEEE 1901.2, en los que se busca unificar la tecnología, como ocurre en la propuesta PLC-G3, que aplica código Reed Solomon para corrección de errores. En [20] se presenta el modelo de ruido de las PLC y sus características, usando código RS(n,k). Esto códigos de canal permiten recuperar errores causados por ruidos provocados por pulsos típicos de la línea AC [21].

Los códigos Reed Solomon [22]–[24], presentan características de interés para la comunicación de señales en la red eléctrica con capacidad de reconfiguración dinámica, por lo que ha sido seleccionado, para su modelado y aplicación en la propuesta sobre dispositivos FPGA. En este trabajo se ha considerado las aplicaciones de códigos Reed Solomon en la comunicación de las aplicaciones Smart Grid y configuración remota del sistema eléctrico de potencia.

2. Smart Grid Reconfigurable. - Un sistema de control de microgrid, para sistemas eléctricos industriales comprende modelado, operación, elaboración de pronóstico, planificación y optimización en tiempo real [25]. Las estrategias de control neuronal y reconfiguración dinámica de sistemas de potencia, se perfilan como una solución, tanto para micro-red industriales, como para redes alternativas que buscan la diversificación de fuentes renovables, de manera colaborativa.

Las redes inteligentes de distribución eléctrica activas (Active Distribution Network – ADNs) deben contar en su arquitectura con: (1) estaciones de control remoto – RCS, (2) Unidad Terminal Remota de Generación Distribuida – GDRTU, (3) terminales remotas de los convertidores eólicos WRTU, (4) terminales remotas de carga LRTU, las cuales transmiten la información al sistema de gestión de la demanda DMS [26]. Esto a fin de cumplir con los criterios de optimización dados por una función objetivo [26], para su aplicación al entrenamiento dinámico de las redes neuronales o para optimización de las funciones.

Como punto innovador, el DMS (*Distribution Management System*) utiliza efectivamente las capacidades de reconfiguración de red, esto se realiza por el manejo de interruptores controlados a distancia (RCS). En consecuencia, se obtiene un cronograma óptimo de elementos activos, a través de la configuración adaptativa de la topología. El procedimiento de optimización está formulado como un problema no lineal, abordado con un algoritmo genético. Es así como se detecta la factibilidad de diseñar estos dispositivos a través de tecnología FPGA, en la cual se puede incorporar redes neuronales artificiales para el manejo de la red inteligente, así como los subsistemas de una central eléctrica híbrida, con diversas fuentes de energías renovables.

Los IEDs permitirán manejar la información de los medidores, así como el diagnóstico de equipos de la red, a través de sus parámetros, a fin de mantener un control inteligente sobre los convertidores, transformadores, interruptores y la carga de la red. Esto permite a su vez el mantenimiento robótico de paneles solares, acciones remotas sobre los equipos y ajuste de parámetros.

El proyecto comprende el diseño de digitalización usando IEDs, que incorporarían: (1) neuro-controladores para identificación y control, a fin de mejorar la eficiencia de la planta de generación de energías renovables. Así como para la construcción de perfiles de los clientes en la demanda, ajustando el servicio de forma inteligente. (2) configurar algoritmos de procesamiento de imágenes con redes neuronales CNN para la identificación y monitoreo de imágenes de termografía de líneas y equipos, para mejorar los procesos de mantenimiento. (3) La incorporación de códigos distribuidos, en los paquetes como identificadores de cada arreglo, para la gestión de la red eléctrica, como una planta virtual de potencia, a través de una red distribuida. En la Figura I se muestra el esquema conceptual del sistema reconfigurable de conversión de energías renovables.



Figura I.- Esquema Conceptual de la Red Cognitiva

2.1. Sistema de Control y Comunicación para Smart Grid.- En [27] se analizan los requisitos de infraestructura y diseño orientado a redes inteligentes (ver Tabla I), introduciendo un estándar que cumpla con el concepto de una arquitectura de software reconfigurable, para dispositivos electrónicos inteligentes.

En [3], [28] se presenta el estudio de sistemas de radio cognitivo aplicados en la comunicación de las Smart Grid, estos modelos pueden ser configurados en los dispositivos inteligentes en la etapa de comunicación, donde se plantea, una alternativa de comunicación para las etapas de la red eléctrica.

Etapas de Smart Grid	Funciones de Comunicaciones
AMI – Infraestructura de Medición Avanzada con Medidores Inteligentes	Enlaces de comunicación bidireccional, permiten lectura, control, detección de medidores remotos
DSM – Gestión de la Demanda	Comunicación de la demanda eléctrica, para equilibrar las cargas, con control de la red (activo, limitando cargas no críticas. Pasivo, por precios dinámicos).
Tolerancia a fallos y auto-reparación de circuitos	Monitoreo de estados de la red, auto-reconfiguración de los circuitos, con información bidireccional

Tabla I.- Funciones de la Smart Grid

2.2. MicroGrid de Energía Renovable.- Las redes eléctricas compuestas por microsistemas son sistemas distribuidos a pequeña escala, que utilizan gran cantidad de tecnología eléctrica moderna, interconectado de forma paralela [1]. Destacan entre sus características (1) la modularidad para el desarrollo a futuro, integrando convertidores en función de la demanda, (2) interacción con la red eléctrica convencional aportando energía de forma independiente, (3) 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 CO₂. En atención a las nuevas necesidades de la red inteligente, se plantea el diseño de puntos de acoplamiento (PCC – *Point of Common Coupling*), para los equipos tales como: fuentes distribuidas (DER), carga y los equipos de la red actual. De esta manera, se detecta la necesidad de un sistema de gestión inteligente de la interconexión, para la configuración dinámica de la infraestructura de la red, a medida que se amplíen los puntos de generación distribuida, al igual que la capacidad de escalar los diseños hacia los futuras requerimientos.

2.3. 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 cálculo y 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. El sistema reconfigurable de la red eléctrica distribuida, debe considerar la gestión inteligente de los equipos de conversión, los cuales pueden estar dados por pequeñas fuentes alternativas in-situ, así como arreglos de convertidores o parques solar-eólicos. En tal sentido, los dispositivos de control y comunicación deben contar con la capacidad de reconocimiento y configuración dinámica, al igual que predictores de la demanda eléctrica, por parte de los consumidores, a fin de interactuar de forma dinámica. Definidos los criterios de diseño del dispositivo electrónico inteligente (IED), para el manejo optimizado de cada componente de la red se plantea su configuración dinámica de estos, en lenguaje descriptor de hardware. El modelo comprende el diseño lógico, como se presenta en la Figura II.

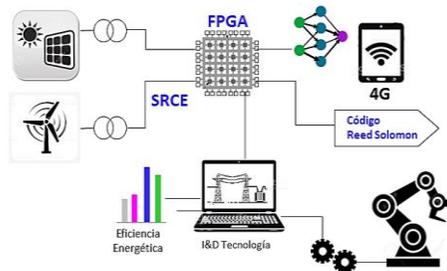


Figura II.- Red Eléctrica Dinámica Reconfigurable

Cada módulo corresponde a un tipo de convertidor de energía renovable, como parte del concepto de plantas virtuales, con elementos distribuidos. El rápido avance de la tecnología digital ha cambiado este paradigma de dispositivos que componen la red eléctrica, haciendo posible la integración de funciones en un mismo dispositivo, como es el caso de los IED, así como los sistemas electrónicos embebidos. En estos sistemas se pueden implementar funciones de configuración, manejando las interconexiones de la red, con mayor flexibilidad, control, así como las funciones de los relés de protecciones y medición de calidad de suministro, entre otras.

En este escenario se requiere el diseño de dispositivos inteligentes multifuncionales IEDs, pensados para cumplir las exigencias en los inversores de generación fotovoltaica, la monitorización inteligente del consumo, en vista de la necesidad de crear estrategias de eficiencia energética y otras funciones. A fin de complementar los equipos ya instalados, con la funcionalidad necesaria y con capacidad de actualización, para la dinámica del sistema eléctrico. Es en este punto, que surge como alternativa de diseño para estos dispositivos configurables la tecnología FPGA.

2.4. Protecciones Adaptativas en la Red Eléctrica Inteligente. - La filosofía de la protección adaptativa se basa en la posibilidad de comunicación entre diferentes entidades de la red, con objeto de elegir la respuesta más adecuada de la protección frente a los cambios en las condiciones o requerimientos del sistema eléctrico. En este sentido, un relé adaptativo (ver Figura III), será aquel que pueda cambiar su configuración, característica y sus funciones, en tiempo real, tanto por acciones de control como por medio de señales generadas externamente.

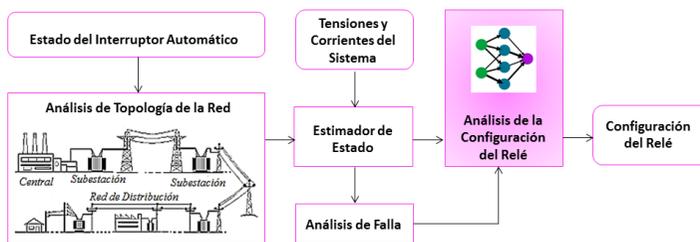


Figura III.- Esquema de Protecciones Adaptativas

De este esquema se debe resaltar la diferencia entre el control adaptativo tratando redes neuronales con pesos sinápticos ajustables [8] 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.

2.5. Arquitectura LFCS para el esquema de Control.- Para el control reconfigurable se considera la estructura LFCS – Linear Feedback Concurrent Structure [29], tanto a nivel del esquema general con módulos ponderados para la salida del sistema o microgrid [30], como en los componentes de operación. Todo esto con un diseño orientado a hardware, planteado para el procesamiento con señales de longitud fija (como un vector binario, a través de multiplicadores de campos finitos). Al presentar este nivel de abstracción el diseño se reformula, para optimizar sus resultados, sobre dispositivos de hardware.

Es importante señalar que procedimientos como el posicionamiento dinámico de convertidores de energía, manejan una ganancia definida en un intervalo finito, por lo cual el diseño de un control con operaciones aritméticas de campo finito, que maneja longitud fija de los coeficientes del modelo, 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.

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.

3. Descripción Metodológica. - Entre los métodos destaca la implementación de un modelo adaptativo, a través de un LFCS para el control reconfigurable de sistemas híbridos de conversión de energía renovable (ver Figura IV), así como el desarrollo de módulos de comunicación, para radio cognitivo, donde cada uno de los elementos presenta un conjunto de funciones inteligentes, para el acoplado dinámico a la red.

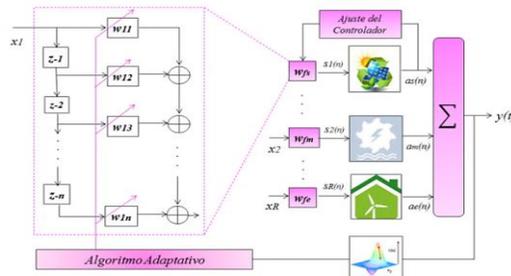


Figura IV.- Modelo de Control con Red Lineal Fractal

El modelo define el concepto de sistemas reconfigurables de conversión de energía renovable – SRCE, con circuitos fractales [31], con esquema LFSR en la concatenación del arreglo, como es el caso de la arquitectura del multiplicador [32], entre los componentes del controlador neuronal implementado en el dispositivo IEDs. De esta manera, el diseño y tratamiento de los sistemas modulares, permite su configuración en tiempo de operación, disminuyendo los costos asociados a la instalación y operatividad de estos, que pueden ser escalados e integrados en micro-redes.

4. Análisis de Resultados. - Se plantea el diseño de un modelo de migración de la matriz energética, basada en el potencial de las zonas de desarrollo. En las que se integre conceptos de Redes Eléctricas Definidas por Software, Aplicaciones Sostenibles Cognitivas, electrónica reconfigurable, y sistemas eléctricos de potencia innovadores.

4.1. Criterios de la Propuesta. - En los sistemas eléctricos de potencia se ha identificado una estructura para modelado de esquemas híbridos de energías renovables, con adaptación en sitio, de tarjetas FPGA de identificación y control neuronal, lo que permite la actualización y configuración dinámica de estos modelos. Es en tal sentido, que se propone la migración escalonada con arquitectura reconfigurable, que permita la integración de etapas modulares, sin implicar elevados costos de inversión inicial, pensada en la actualización de los equipos instalados. Con el objetivo de ofrecer una alternativa viable con disminución de gastos en combustible, eficiencia energética y disminución en las emisiones.

La estructura LFSR, como esquema de concatenación con realimentación lineal para la producción de energía a partir de fuentes renovables, por la realimentación de energía a sus etapas de conversión y los sistemas de recuperación de energía, lucen como una arquitectura viable, para su adaptación a un modelo termo-solar híbrido. De allí nace la propuesta de un nuevo modelo, el cual comprende etapas paralelas de circuitos cerrados para recuperación de calor, en la producción de energía eléctrica a partir de energía solar. Se parte del estudio de centrales termoeléctricas de ciclo combinado con integración solar, con reconfiguración dinámica del sistema eléctrico de potencia.

Por otra parte, la generación eléctrica distribuida permite disminuir las pérdidas de transmisión [4], 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. Este trabajo de investigación propone el diseño de una estructura dinámica de acoplado de fuentes híbridas de energía renovable a una central termoeléctrica convencional, con el objetivo de propiciar la migración tecnológica de manera escalonada, a fin de avanzar en el proceso de desarrollo sostenible.

El diseño de sistemas electrónicos inteligentes para el control de redes eléctricas distribuidas [11] es una área de investigación que propone alternativas de solución en materia energética corresponde a las redes eléctricas inteligentes [12], 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 [13], [14]. La configuración del esquema es presentada en la Tabla II.

Elementos del Esquema LFCS propuesto
Elementos de Conversión por accionamiento de Energías renovables,
Arreglo de Concentradores Modulares, con gestión paralela y secuencial
Acoplado Inteligente de Elementos por medio de dispositivos electrónicos IEDs
Sistema de Control Distribuido con FPGA para optimización energética
Control para el esquema de Realimentación
Recuperadores de Calor en los radiadores adaptados de los equipos
Realimentación Eléctrica a dispositivos de circuitos auxiliares

Tabla II.- Configuración de Esquemas LFSR

Al momento de definir los criterios de diseño, de los IEDs deben tener amplia capacidad de cómputo, paralelismo y flexibilidad, para cubrir funciones de monitoreo, control y accionamiento remoto, con los respectivos protocolos de comunicación, con capacidad cognitiva, para adaptarse a las condiciones específicas, a fin de garantizar la eficiencia de sus funciones, es por ello que su diseño sobre hardware reconfigurable, permite dotar de estas capacidades al sistema.

Se define la digitalización de los sistemas de potencia, para identificación, modelado y control de sistemas de conversión, gestión de los procesos de O&M, análisis de perfiles de clientes en el uso de la electricidad, soporte de reconfiguración remota, todo esto a fin de optimizar la eficiencia del sistema. En los procesos de mantenimiento de líneas, equipos y aisladores eléctricos, se propone el entrenamiento de algoritmos neuronales para el Procesamiento de Imágenes, en esta función se asigna al sistema de monitoreo inteligente, el análisis y diagnóstico de fallas en los equipos a partir de imágenes de termografía [33], que puedan prever el estado de operación de estos. Para este procesamiento se puede seleccionar clasificación y análisis de señales, a través de redes neuronales convolucionales profundas CNN, redes pre-entrenadas y transferencia de aprendizaje, dando como conjunto de entrenamiento señales relacionadas con los equipos de potencia. En la Figura V se muestra la arquitectura LFCS del esquema termo-solar propuesto.

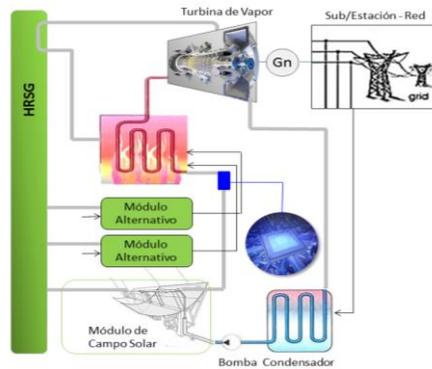


Figura V.- Esquema LFCS Híbrido con IEDs sobre FPGA

Al momento de definir los criterios de diseño, de los IEDs deben tener amplia capacidad de cómputo, paralelismo y flexibilidad, para cubrir funciones de monitoreo, control y accionamiento remoto, con los respectivos protocolos de comunicación, con capacidad cognitiva, para adaptarse a las condiciones específicas, a fin de garantizar la eficiencia de sus funciones, es por ello que su diseño sobre hardware reconfigurable, permite dotar de estas capacidades al sistema.

4.2. Esquema de los Dispositivos Electrónicos Inteligentes. - En la Figura VI, se presenta el esquema conceptual del sistema propuesto, con criterios de micro-red. En éste se identifican los dispositivos electrónicos inteligentes IEDs, configurados en VHDL con modelo arquitectónico de red neuronal. Estos tendrán como función: control, monitoreo y configuración dinámica de los elementos de conversión acoplados a la red eléctrica. Tendiendo dos códigos fundamentales, control neuronal y comunicaciones con códigos de canal RS.

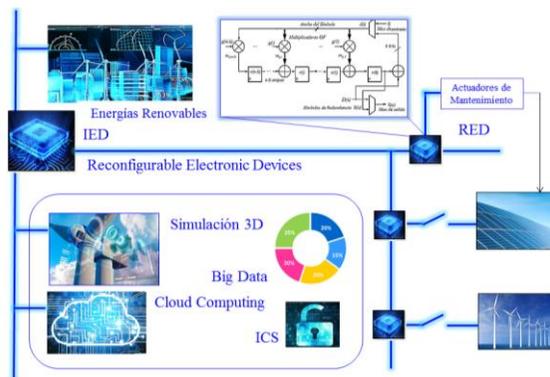


Figura VI.- Esquema Conceptual del Diseño

4.3. Códigos Reed Solomon en comunicaciones de Smart Grid.- De la propuesta desarrollada, se requiere implementar los modelos VHDL sobre hardware, para el soporte de funciones de control y comunicación, como los neuro-procesadores, con operaciones LFC [35], que permitan el tratamiento paralelo de señales de las Smart Grids y los códigos Reed Solomon [6], [36], [37], para el manejo de los datos. Con el propósito de definir la configuración de los Dispositivos Electrónicos Inteligentes IEDs, a través de estructuras reconfigurables [38], que permitan el acoplamiento y operación de elementos de potencia, para la gestión de la red distribuida

4.4. Diseño del Convertidor de Energía Solar Reconfigurable. - En primer lugar, se selecciona la tecnología de concentración fotovoltaica HCPV, que permite ahorrar material fotovoltaico en toda la superficie del panel, a través de elementos económicos como espejos y lentes, para la concentración de la energía solar en puntos de conversión, para reducir los costes de forma importante. Con los módulos colectores se pueden integrar tecnologías de conversión termo-solar y fotovoltaica. Esta propuesta tiene como objetivos investigar el comportamiento de nuevas tecnologías en energía solar, comprobar la mejor alternativa, con mayor rendimiento, menor frecuencia de mantenimiento y menor uso de material fotovoltaico, la propuesta conceptual se presenta en la Figura VII.

En la Figura VIII se presenta el esquema del convertidor solar reconfigurable, cada elemento requiere un RTU para el formato de DPG Generación Fotovoltaica Distribuida.

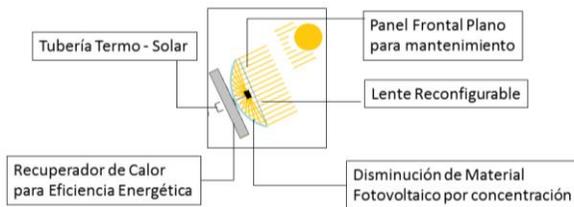


Figura VII.- Propuesta Optimizada del Colector Solar

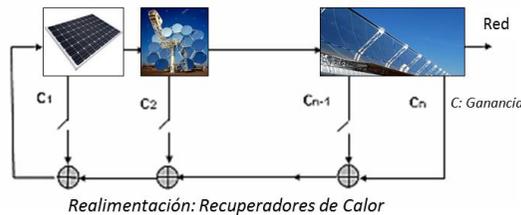


Figura VIII.- Arreglo Reconfigurable de Concatenación de Convertidores Solares

El Convertidor de Energía Solar Reconfigurable – CESR, basado en configuración dinámica de la ganancia C_i del arreglo reflectante y lente de refracción, para óptima eficiencia del convertidor de concentración híbrida (termo-solar y fotovoltaica). Esta propuesta requiere de un soporte de comunicación, para el control de la ganancia configurable (tele-configuración) y parámetros del sistema (control avanzado del convertidor), es por ello que se desarrolla un codificador de canal, sobre la tecnología de hardware reconfigurable, compatible con la electrónica del sistema.

La propuesta considera optimizaciones específicas por fuente de energía renovable, en el caso de convertidores solares reconfigurables, se presenta el modelo híbrido de tecnología solar fotovoltaica, de concentración y termo-solar combinados, con recuperadores de calor para máxima eficiencia, realimentación para los equipos de acondicionamiento, entre otros, como se resume en la Tabla III.

Los criterios considerados en el desarrollo de la propuesta son extrapolados a diversas aplicaciones, en las que se busca establecer un modelo generalizado.

Esquema LFSR Fractal	Características del Diseño de Conversión de Energía Solar Reconfigurable		
Arreglo del Concentrador Solar Reconfigurable (óptica reflexión)	Reflexión	Cilindro Parabólico	Centralizado
		Disco Stirling	Distribuido DPG
Panel Frontal de máxima eficiencia	Refracción	Reconfiguración de eficiencia del Lente	
Tecnología Solar Híbrida	HCPV Concentrador Fotovoltaico		Recuperador de Calor
	Termo-Solar		Realimentación
Concatenación LFCS (n, k)	Ganancia dinámica de los módulos acoplados al arreglo de convertidores		
Esquema de Control / Comunicación	Modelo Neuro-Adaptativo, sistema de seguimiento automático		Tele-Configuración de Ganancia (acceso Remoto)

Tabla III.- Características del Convertidor de Energía Solar Reconfigurable

4.5. Generalización del Modelo Lógico – Matemático.- El modelo comprende la concatenación de convertidores híbridos, en parques tecnológicos sostenibles [34], donde el aporte está dado por el diseño de arreglos dinámicos para optimización del esquema respecto a sistemas estáticos, que puedan ser más costosos en la superficie de material requerido. En la Tabla IV se presenta la propuesta para la gestión inteligente de fuentes de energías renovables diversificadas en la red distribuida.

Tipo de Fuente	Tecnología	Objetivo	Descripción de la Propuesta de Aplicación
Solar	Termo- Solar de Concentración	Aumentar Eficiencia	Diseño de Campos solares con concentradores
		Simplificar Mantenimiento	Concentradores encapsulados con superficie frontal plana
	Fotovoltaica HCPV	Aumentar Eficiencia	Encapsulados en Campos solares híbridos
Cinética	Piezoeléctrica (Presión de contacto)	Mejorar rendimiento	Campos de Futbol con flexibles piezoeléctricos, de habilitación secuencial con control dinámico para optimizar la disposición del material piezoeléctrico.
	Eje giratorio	Uso de movimiento	Gimnasio de entrenamiento en complejos deportivos
Eólica	Vibraciones inducidas	Bajo Impacto ambiental	Alternativa a las turbinas eólicas convencionales, por vibración de eje vertical
Hidráulica	Mareomotriz, micro-HE	Bajo Impacto ambiental	Aprovechamiento de flujo de agua en ambientes no intervenidos
Regenerativa	Biomasa, RSU	Bajo Impacto ambiental	Aprovechamiento de elementos residuales para conversión de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos, compostadores, etc.

Tabla IV.- Propuesta del Sistema Reconfigurable de Conversión de Energías Renovables

En la ecuación 1 se presenta el modelo generalizado en el concepto de redes neuronales de convolución LFCS y arreglos de conversión de energías con el mismo principio.

$$a_i = \sum_{i=0}^n w_i * x_i + a_{i-1} \quad (1)$$

Siendo a_i la salida del arreglo, w_i la ganancia configurable o pesos de la red neuronal, x_i la entrada y a_{i-1} la realimentación de la salida retrasada. En la Tabla V (a) se presenta el código VHDL generalizado para los modelos neuronales, aplicables a los codificadores y decodificadores RS, (b) algoritmos de entrenamiento.

<pre> signal u1: std_logic_vector (11 downto 0); ... U1: Identificador_Sistema Port Map (x1,x2,x3, y1,y2); -- Red Neuronal de modelado de los convertidores para control avanzado U2: Controlador_Neuronal Port Map (u1,d1,y1); -- Red Neuronal del controlador de cada elementos en los IEDS U3: Reed_Solomon Port Map (x1, y1, c1, c2); --Monitoreo Remoto y Tele-configuración de la ganancia en el sistema de potencia </pre>	
<p>Código VHDL de una red neuronal generalizada</p>	
<p style="text-align: center;">Neuro-Código Reed Solomon</p>	
<pre> -- Componentes del Modelo Neuronal con estructura Fractal: M1: Multiplicador port map (xi,wji,xwji); ... Mj: Multiplicador port map (xi,wji,xwji); S1: Sumador port map (xwji,..., b,in1); F1: función_logsig port map (in1,out1); -- Componentes de la Capa: -- unidad básica de la red neuronal N1: Neurona port map (x1,x2,...,xr,w1,w2,...,wr,b,n1); ... NS: Neurona port map (x1,x2,...,xr,w1,w2,...,wr,b,ns); -- Componentes de la SubRed Fractal F1: FRed port map (x1,x2,...,s1); ... FR: FRed port map (x1,c1,...,sR); SF: Sumador port map (s1,...,sR); -- Capas componentes de la red: C1: Capa port map (x1,x2,...,c1); ... CL: Capa port map (x1,c1,...,cl); -- entrada externa, realimentada Net <= c1 & cl; end behavioral; </pre>	<pre> -- Modelo Neuronal / Códigos Reed Solomon / LFC (n,k) -- Concatenación ponderada con realimentación lineal LFC u1: a2<=a1(6 downto 4)&(a1(3)xor a1(7))&(a1(2)xor a1(7))&(a1(1) xor a1(7))&a1(0)& a1(7); -- Generación de términos del LFSR: -- ut: at+1 <= at(i) xor (at(m-1) and p(i) & ... for i=m-1 to 0 -- Definición de los elementos neuronales básicos: yp: in std_logic_vector (7 downto 0); ... d1: TDL port map (in,out); -- Línea de retardo TDL ... -- Adaptación de los pesos wji: alg port map (wd,xi,yi); -- wn+1 <= función_de_aproximación (wn) ... nS: neurona port map (pi,wi,bi,yS); c2: capa_lineal port map (aI, ym); </pre>

Tabla Va .- Código en VHDL del Modelo Neuronal para aplicaciones Smart Grid

Algoritmo Adaptativo en VHDL	Datos del entrenamiento del Modelo Neuronal																																																																
<pre> ENTRENAMIENTO ADAPTATIVO: --Rutina de entrenamiento de los q patrones x(n) <= leer puerto; -- patrón a entrenar (vector de R entradas) q <= q + 1; -- incrementa el número de patrones y(n) <= w(n) *x(n) + b(n); -- calcular la salida de la red e(n)<= t(n) - y(n); -- error de la neurona para el patrón n ea <= e(n) + ea; -- error acumulado -- cálculo del error para el patrón x(n) → t(n) con la matriz de pesos w(n) actual For i=1 to R -- para cada entrada i del patrón n -- F[e(n)], vendrá dado por la derivada de la función de salida para las neuronas de la capa oculta wi(n+1) <= wi(n) + u.*xi(n)*e(n); -- w(n) es el vector de 1 a R elementos b(n+1) <= b(n) + u. e(n); Next </pre>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: left; background-color: #f2f2f2;">Entrenamiento Unidad Básica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Algoritmo</td> <td>de</td> <td>Descenso</td> <td>del</td> </tr> <tr> <td>Aprendizaje</td> <td></td> <td>Gradiente</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Épocas</td> <td>del</td> <td>2000</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Entrenamiento</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante</td> <td>de</td> <td>0.001</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprendizaje</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Error de Validación</td> <td></td> <td>7.24E-7</td> <td></td> </tr> <tr> <th colspan="4" style="text-align: left; background-color: #f2f2f2;">Entrenamiento del Arreglo Neuronal</th> </tr> <tr> <td>Algoritmo</td> <td>de</td> <td>Descenso</td> <td>del</td> </tr> <tr> <td>Aprendizaje</td> <td></td> <td>Gradiente</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Épocas</td> <td>del</td> <td>100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Entrenamiento</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Constante</td> <td>de</td> <td>0.001</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aprendizaje</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Error de Validación</td> <td></td> <td>6.55E-6</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Entrenamiento Unidad Básica				Algoritmo	de	Descenso	del	Aprendizaje		Gradiente		Épocas	del	2000		Entrenamiento				Constante	de	0.001		Aprendizaje				Error de Validación		7.24E-7		Entrenamiento del Arreglo Neuronal				Algoritmo	de	Descenso	del	Aprendizaje		Gradiente		Épocas	del	100		Entrenamiento				Constante	de	0.001		Aprendizaje				Error de Validación		6.55E-6	
Entrenamiento Unidad Básica																																																																	
Algoritmo	de	Descenso	del																																																														
Aprendizaje		Gradiente																																																															
Épocas	del	2000																																																															
Entrenamiento																																																																	
Constante	de	0.001																																																															
Aprendizaje																																																																	
Error de Validación		7.24E-7																																																															
Entrenamiento del Arreglo Neuronal																																																																	
Algoritmo	de	Descenso	del																																																														
Aprendizaje		Gradiente																																																															
Épocas	del	100																																																															
Entrenamiento																																																																	
Constante	de	0.001																																																															
Aprendizaje																																																																	
Error de Validación		6.55E-6																																																															

Tabla Vb .- Código en VHDL del Algoritmo de Entrenamiento del Modelo Neuronal

Los modelos neuronales, acá desarrollados corresponden a la descripción en VHDL de redes neuronales para funciones de modelado, control y comunicación, basadas en teoría de circuitos LFCS, estructuras concatenadas con realimentación lineal. Estos pueden ser implementados con la descripción lógica de un operador de convolución LFC(n,k), de esta manera se pueden combinar los conceptos de LFCS y redes neuronales en un modelo universal, para la definición de funciones aplicadas a redes eléctricas y sistemas distribuidos de energías renovables. El diseño cuenta con capacidad adaptativa, basada en algoritmos de entrenamiento, lo que les da característica de dispositivos electrónicos inteligentes – IEDs, adicionalmente estos modelos son reconfigurables sobre tecnología FPGA. Es así como, se obtiene la descripción en VHDL de los modelos generalizados. En la Tabla VI, se presentan los módulos configurables a partir del neuro-modelo [5], [8].

Funciones Smart Grid		Configuración Neuro-Modelo
AMI	Medidores	RTU Terminal Remota de TX de datos
Inteligentes		
Reconfiguración de Red		Reconocimiento de Equipos
Tolerancia a Fallos		Control Predictivo Red LFCS
Convertidores		Modelado a través de Red NARX
Eólico/Solar		
Comunicación		LFCS Código Reed Solomon (255,k)
Bidireccional		
Control Distribuido		Algoritmos Adaptativos LFCS
DNS		Red Neuronal de Gestión de Demanda

Tabla VI.- Módulos Funcionales del Neuro-Modelo de IDEs

De esta manera, a través de un modelo generalizado LFCS para descripción de los componentes, se pueden definir cada una de las funciones, con una arquitectura dinámica de la red de conversión de energía. Esto considerando las condiciones del entorno, las características de las fuentes de energía renovable y la demanda eléctrica en el tiempo, en el cual se pueden aplicar criterios de control óptimo [39], a través de los objetivos fijados para eficiencia energética. Para la validación de una de las funciones, se definió un conjunto de elementos de radio cognitivo [39] para el soporte de la comunicación en la red eléctrica, en la cual se obtienen los resultados correspondientes a los códigos de comunicación seleccionados. Para el codificador RS(255,239), se validó el comportamiento, donde se obtuvieron los 16 símbolos de redundancia, que se muestran en la Figura IX.

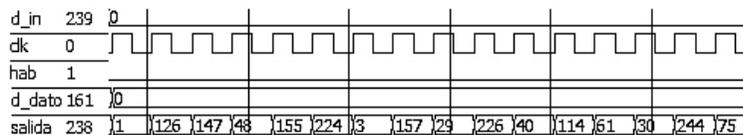


Figura IX.- Resultados del codificador RS (255,239)

De la misma forma se realizó la simulación del codificador RS(255,247) donde se obtienen los resultados mostrados en la Figura X.

Para evaluar el comportamiento del modelo para un valor de $m \neq 8$, se realizó la simulación del RS(127,111), siendo para este caso $m=7$ bits por símbolos y el polinomio generador del campo $P(x)=10001001$, correspondiente a 137 en decimal. Este código presenta 16 símbolos de redundancia, los cuales corresponden teóricamente con el vector [38 81 22 83 107 48 90 67 40 100 33 92 27 110 3 55], en la simulación presentada en la Figura XI, se observa que estos coinciden con los resultados obtenidos.

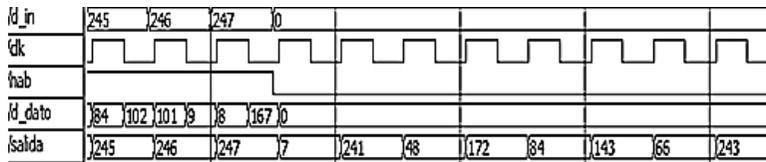


Figura X.- Resultados del codificador RS(255,247)

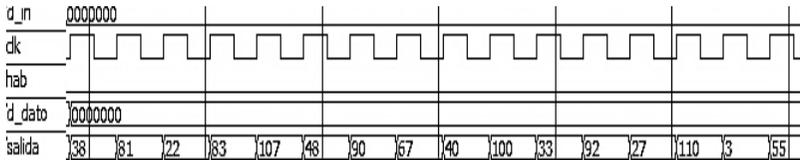


Figura XI.- Resultados del codificador RS(127,111)

Una vez validado el funcionamiento del codificador Reed Solomon para n, k y m variables, se pudo observar que el codificador Reed Solomon parametrizable funciona de acuerdo a la descripción circuital en VHDL. La simulación permite observar que, en la versión secuencial, el número de ciclos de reloj requeridos dependen del parámetro n. La arquitectura del generador de redundancia, implementado con el LFSR (Linear Feedback Shift Register) ha sido definida de forma modular, con lo que los recursos consumidos por el diseño dependen específicamente de las etapas implementadas.

En el análisis de los resultados de los diseños se consideran los reportes de la herramienta de desarrollo correspondientes al análisis de recursos en el modelo del RS (255,k) corresponden a los presentados en la Figura XII.

Estos resultados pueden ser analizados, bien en función del consumo de compuertas lógicas o de componentes de la estructura FPGA, en este caso estudiando el reporte de consumo de LUTs sobre el dispositivo *FPGA xc4vlx15-12sf363*, así como los elementos neuronales para el caso del neuro-decodificador Reed Solomon, como se muestra en la Tabla VII.

4. Conclusiones. - Gracias al modelo VHDL propuesto para configuración dinámica de dispositivos electrónicos inteligentes IEDs, se logra una solución versátil, para la necesidad de modelos flexibles de redes inteligentes de energía, que permitan diseños con tecnología sostenible, orientados a reutilización de recursos de hardware, para su tratamiento con responsabilidad ambiental. Se ha identificado un área de investigación con gran vigencia y cuya importancia radica en desarrollar la capacidad de incorporación de fuentes de energías renovables a la red eléctrica, con arquitectura de control distribuida, basada en un modelo LFCS. Se ha propuesto así un modelo neuronal generalizado para su configuración, de acuerdo a las especificaciones de la aplicación. A la vez, se ofrece un soporte para el desarrollo y actualización de sistemas con dinámica compleja, a través de códigos Reed Solomon para tele-configuración de parámetros en los elementos convertidores, sus diseños y eficiencia. Reportando la simulación y estimación de recursos de hardware, en las que se presenta alta disponibilidad para la implementación de módulos con funciones de control sobre el dispositivo FPGA.

rs255 Project Status (04/01/2018 - 15:00:59)			
Project File:	rs255.ise	Implementation State:	Synthesized
Module Name:	Codificador_RS	• Errors:	
Target Device:	xc4vlx15-12sf363	• Warnings:	
Product Version:	ISE 11.1	• Routing Results:	
Design Goal:	Balanced	• Timing Constraints:	
Design Strategy:	Xilinx Default (unlocked)	• Final Timing Score:	

Device Utilization Summary (estimated values)				[-]
Logic Utilization	Used	Available	Utilization	
Number of Slices	91	6144	1%	
Number of Slice Flip Flops	64	12288	0%	
Number of 4 input LUTs	175	12288	1%	
Number of bonded IOBs	26	240	10%	
Number of GCLKs	1	32	3%	

(a) Reed Solomon (255,247)

Device Utilization Summary (estimated values)				[-]
Logic Utilization	Used	Available	Utilization	
Number of Slices	112	3072	3%	
Number of Slice Flip Flops	128	6144	2%	
Number of 4 input LUTs	209	6144	3%	
Number of bonded IOBs	25	180	13%	
Number of GCLKs	1	4	25%	

(b) Reed Solomon (255,239)

Device Utilization Summary (estimated values)				[-]
Logic Utilization	Used	Available	Utilization	
Number of Slices	271	6144	4%	
Number of Slice Flip Flops	257	12288	2%	
Number of 4 input LUTs	515	12288	4%	
Number of bonded IOBs	18	240	7%	
Number of GCLKs	1	32	3%	

(c) Reed Solomon (255,223)

Figura XII.- Reporte de Consumo de Recursos LFCS para RS(n,k)

De esta manera, a partir de la generalización por modelos del sistema de control no lineal y comunicación bajo el concepto radio cognitiva, las funciones pueden ser descritas en los dispositivos terminales o puntos de acoplado de los equipos de la red. Aplicando redes neuronales, para el modelado y control de los convertidores interconectados a la red, se facilita la integración adaptativa de estos y reconocimiento dinámico, a fin de dotar a la red de capacidad de reconfiguración, que permita ampliar la incorporación de nuevos convertidores de energías renovables al sistema de potencia inteligente.

Implícitamente, se integran conceptos de circuitos LFCS, a las redes eléctricas inteligentes, tratadas como la concatenación ponderada de convertidores, con realimentación lineal. Estos sistemas son configurados a través de elementos electrónicos con algoritmos de entrenamiento adaptativo y soporte de comunicación, a fin de lograr la configuración remota de los esquemas y parámetros del arreglo distribuido, considerando un esquema colaborativo de gestión de la demanda, que permita la mejor asignación de carga, sobre los aportes de micro-redes de energía renovable, bajo criterios de eficiencia y sostenibilidad. Éste emplea tecnología reconfigurable, lo que permite la

actualización dinámica de la red, sin problemas asociados a obsolescencia, con el propósito de reutilizar los dispositivos electrónicos para futuras actualizaciones.

Otras investigaciones en el diseño de IEDs para una micro-red privada [41] desarrollan casos particulares. En este trabajo se ha planteado una propuesta generalizada, a través de la aplicación de redes neuronales configurables sobre FPGA, que permita la adaptación de los dispositivos electrónicos inteligentes, a las características propias de cada arquitectura de concatenación de convertidores, entrenando *on line* las funciones. Lo que es válido para el controlador en cada unidad remota, los módulos de comunicación, direccionamiento de equipos en red, criptografía, entre otros, lo que permita un control distribuido de los elementos de conversión del sistema.

Se logra así una propuesta de innovación correspondiente a redes eléctricas reconfigurables, hacia nuevos modelos sostenibles soportados sobre el eje científico de desarrollo. Así se integran aplicaciones tecnológicas prácticas y un modelo lógico-matemático, basado en operadores de concatenación realimentada – LFC (n,k), para el soporte de funciones de control y comunicación, que ofrecen grandes bondades al área de sistemas distribuidos de energías renovables, con criterios de eficiencia, como se evidencia en los resultados de consumo de hardware de los módulos RS(n,k), para el soporte de la configuración dinámica del sistema de energías renovables y *Smart Grid*, lo que representa una innovación científica, con un amplio campo de estudio, para el desarrollo de tecnologías adaptadas a los requerimientos de este nuevo modelo.

<i>(a) Utilización de Tablas Lógicas den FPGA xc4vlx15-12sf363</i>			
SIM B.	RS(255,247)	RS(255,239)	RS(255,223)
Tablas Lógicas	# LUT2 : 14	# LUT2 : 9	# LUT2 : 25
	# LUT2_L : 5	# LUT3 : 62	# LUT2_D : 1
	# LUT3 : 29	# LUT3_D : 6	# LUT2_L : 13
	# LUT3_D : 2	# LUT3_L : 18	# LUT3 : 81
	# LUT3_L : 5	# LUT4 : 162	# LUT3_D : 11
	# LUT4 : 87	# LUT4_D : 11	# LUT3_L : 15
	# LUT4_D : 16	# LUT4_L : 44	# LUT4 : 286
	# LUT4_L : 17		# LUT4_D : 24
	-		# LUT4_L : 59
	LUTs	175	312

<i>(b) Número de Neuronales según Tipología de la Red</i>		
Arquitectura de la Red	MPL	
Puertos/Capas	Entradas	Capa Oculta
IO / Neuronas	255	8
Función	-	Sigmoide
Tipología de la Red		
Arquitectura de la Red	MPL	
Puertos/Capas	Entradas	Capa Oculta
IO / Neuronas	255	16
Función	-	Sigmoide
Tipología de la Red		
Arquitectura de la Red	MPL	
Puertos/Capas	Entradas	Capa Oculta
IO / Neuronas	255	32
Función	-	Sigmoide

Tabla VII.- Estimación de Recursos de Implementación: (a) LUTs utilizadas en el código RS(n,k) (b) Neuro-decodificador RS(n,k)

Referencias

[1] S. Zekun, “Estudio de funcionamiento y control de micro red,” Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, Sevilla, España, 2016.

[2] C. Sandoval-Ruiz and A. Fedón-Rovira, “Efficient RS (255,k) encoder over reconfigurable systems,” *Rev.Téc.Ing.Zulia*, vol. 37, no. 2, pp. 151–159, 2014.

[3] A. Ghassemi, S. Bavarian, and L. Lampe, “Cognitive Radio for Smart Grid Communications,” in *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*,

- 2010, pp. 297–302.
- [4] L. Humberto, L. H. Berrío, and C. Zuluaga, “Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida : una revisión en el contexto energético mundial,” *Ing. y Desarro.*, vol. 32, no. 2, pp. 369–396, 2014.
- [5] C. Sandoval-Ruiz, “Modelo VHDL de Control Neuronal sobre tecnología FPGA orientado a Aplicaciones Sostenibles,” *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 26, no. 3, pp. 1–9, 2018.
- [6] C. Sandoval-Ruiz, “Modelo Optimizado del Codificador Reed-Solomon (255,k) en VHDL a través de un LFSR paralelizado,” Tesis Doctoral, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2013.
- [7] C. Sandoval Ruiz, “Diseño conceptual de un módulo híbrido para Generación eléctrica,” in *VIII Congreso Nacional y 2do Congreso Internacional de Investigación Universidad de Carabobo*, 2013.
- [8] C. Sandoval-Ruiz, “Modelo Neuro-Adaptativo en VHDL, basado en circuitos NLFSR, para Control de un Sistema Inteligente de Tecnología Sostenible,” *Rev. Universidad, Cienc. y Tecnol.*, vol. 21, no. 85, pp. 140–149, 2017.
- [9] C. Sandoval Ruiz, “Adaptive Control in VHDL Applied to a Solar Oven,” *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, no. 23, pp. 142–147, 2014.
- [10] J. Castellanos, C. Sandoval, and M. Azpurua, “A FPGA implementation of a LMS adaptative algorithm for smart antenna arrays,” *Rev. Técnica la Fac. Ing. la Univ. Zulia, Venez.*, vol. 37, no. 3, pp. 270–278, 2014.
- [11] Real-Calvo, R., Moreno-Munoz, A., Pallares-Lopez, V., Gonzalez-Redondo, M. J., Moreno-Garcia, I. M., and E. J. Palacios-Garcia, “Sistema Electrónico Inteligente para el Control de la Interconexión entre Equipamiento de Generación Distribuida y la Red Eléctrica,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 14, no. 1, pp. 56–69, 2017.
- [12] D. Villa, C. Martin, F. Villanueva, F. Moya, and J. Lopez, “A dynamically reconfigurable architecture for smart grids,” *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 411–419, May 2011.
- [13] T. García, J. Carlos, and L. López, “Técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas a la Red Eléctrica Inteligente (Smart Grid),” *Novótica*, vol. 213, pp. 29–34, 2011.
- [14] R. Real, “Integración de dispositivos electrónicos inteligentes en smart grid,” Tesis Doctoral. Universidad de Cordova, 2016.
- [15] R. G. Harley and J. Liang, “Computational Intelligence in Smart Grids,” *IEEE Symp. Ser. Comput. Intell.*, vol. 1, pp. 1–8, 2011.
- [16] K. Seo, J., Lee, J., & Kim, “Decoding of Polar Code by Using Deep Feed-Forward Neural Networks,” in *In 2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC) IEEE.*, 2018, pp. 238–242.
- [17] J. Todó Bañulus, “Análisis de viabilidad de una MICROGRID con tecnología blockchain y fuente de energía fotosintética: greencoin,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2017.
- [18] D. Amarsingh, A. A., Latchman, H. A., & Yang, “Narrowband power line communications: Enabling the smart grid,” *IEEE Potentials*, vol. 33, no. 1, pp. 16–21, 2014.
- [19] V. Apaza, “Estudio del canal plc (power line communications) para envío de datos a bajo costo en redes eléctricas domiciliarias,” Universidad Católica de San Pablo, Perú, 2017.
- [20] U. Tuntoolavest, N. Sakunnithimetha, and K. Limchaikit, “Reed solomon inner-convolutional outer concatenated code with error-erasure decoding for narrowband and broadband power line communications,” *Songklanakarín J. Sci. Technol.*, vol. 39, no. 5, pp. 601–608, 2017.
- [21] V. Serna, “Comunicaciones a través de la red eléctrica-PLC,” *Comunicaciones*, pp. 62–65, 2011.
- [22] C. Sandoval and A. Fedón, “Codificador y decodificador digital Reed-Solomon programados para hardware reconfigurable,” *Ing. y Univ.*, vol. 11, no. 1, pp. 17–32, 2007.
- [23] C. Sandoval and A. Fedón, “Programación VHDL de algoritmos de codificación para

- dispositivos de hardware reconfigurable,” *Rev.Int.Mét.Num.Cálculo.Dis.ing.*, vol. 24, no. 1, pp. 3–11, 2008.
- [24] C. E. Sandoval-Ruiz, “Logical-Mathematical Model of Encoder 2D-RS for Hardware Description in VHDL,” *Rev. Ing. UC*, vol. 24, no. 1, pp. 28–39, 2017.
- [25] Siemens, “Control eficiente de microredes en redes eléctricas industriales,” Erlangen, Germany, 2015.
- [26] S. Golshannavaz, S. Afsharnia, and F. Aminifar, “Smart Distribution Grid : Optimal Day-Ahead Scheduling With Reconfigurable Topology,” vol. 5, no. 5, pp. 2402–2411, 2014.
- [27] T. Strasser *et al.*, “Online Reconfigurable Control Software for IEDs,” in *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS*, 2013, vol. 9, no. 3, pp. 1455–1465.
- [28] K. Shuaib, E. Barka, N. Al Hussien, M. Abdel-hafez, and M. Alahmad, “Cognitive Radio for Smart Grid with Security Considerations,” *Computers*, vol. 5, no. 7, pp. 1–25, 2016.
- [29] C. Sandoval-Ruiz, “Codificador RS (n,k) basado en LFCS : caso de estudio RS (7,3),” *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, no. 64, pp. 68–78, 2012.
- [30] C. E. Sandoval-Ruiz, “Control de Micro-Redes de Energía Renovable a través de estructuras LFCS Reconfigurables en VHDL,” *Cienc. y Tecnol.*, vol. 18, pp. 1–17, 2018.
- [31] C. E. Sandoval-Ruiz, “Análisis de Circuitos Fractales y Modelado a través de Sistema de Funciones Iteradas para VHDL,” *Rev. Cienc. e Ing.*, vol. 38, no. 1, pp. 3–16, 2017.
- [32] C. Sandoval Ruiz, “Power Consumption Optimization in Reed Solomon Encoders over FPGA,” *Lat. Am. Appl. Res.*, vol. 44, no. 1, pp. 81–85, 2014.
- [33] MathWorks, “Segment Thermographic Image after Edge-Preserving Filtering,” 2018. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/help/images/segment-thermographic-image-after-edge-preserving-filtering.html?searchHighlight=thermographic&s_tid=doc_srchtile.
- [34] D. Steckler, C. Nava, J. Duarte, J. Zambrano, and C. E. Sandoval-Ruiz, “Design of Neural Networks on microcontrollers, applied in functional modules for an eco-park,” *Rev. Ing. uC*, vol. 25, no. 1, pp. 50–60, 2018.
- [35] C. E. Sandoval-Ruiz, “LFC (n,k) Mathematical Operator in Finite Fields based on Fractal Concatenation for GF (2m) - Extended,” *Rev. Proyecciones*, vol. 37, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [36] C. E. Sandoval-Ruiz, “Modelo en VHDL de Redes Neuronales Configurables Aplicadas a Decodificación en Radio Cognitivo,” *Rev. Ing. UC*, vol. 24, no. 3, 2017.
- [37] C. Sandoval, “FPGA prototyping of neuro-adaptive decoder,” *Proc. 9th WSEAS Int.*, pp. 99–104, 2010.
- [38] C. Sandoval-Ruiz, “Modelo de Estructuras Reconfigurables con Registro Desplazamiento, para Lenguaje Descriptor de Hardware VHDL,” *Rev. Fac Ing UCV*, vol. 31, no. 3, pp. 63–72, 2016.
- [39] M. H. Beale, M. T. Hagan, and H. B. Demuth, *Neural Network Toolbox™ Getting Started Guide How to Contact MathWorks*. 2017.
- [40] C. E. Sandoval-Ruiz and A. Fedón-Rovira, “Codificador RS (255,k) en hardware reconfigurable orientado a radio cognitivo,” *Ing. y Univ.*, vol. 17, no. 1, pp. 77–91, 2013.
- [41] I. M. Real-Calvo, R. J., Moreno-Munoz, A., Pallares-Lopez, V., Gonzalez-Redondo, M. J., & Moreno-Garcia, “Design of an Intelligent Electronic Device to control a private microgrid,” in *Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 99–101.