

Diseño de Redes Eléctricas Inteligentes para una Gestión Energética

Ney R. BALDERRAMO VÉLEZ
Departamento Electricidad, Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo, Manabí, Código-Postal 130105/Ecuador

Yolanda E LLOSAS ALBUERNE
Departamento Electricidad, Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo, Manabí, Código-Postal 130105/Ecuador

Luis NEVES
Departamento Energía, Instituto Politécnico de Leiría
Leiría, Código-Postal 2400015/Portugal

Lenin A. CUENCA ÁLAVA
Departamento Electricidad, Universidad Técnica de Manabí
Portoviejo, Manabí, Código-Postal 130105/Ecuador

RESUMEN

Este documento presenta el diseño de una red eléctrica inteligente que permita gestionar de forma eficiente el consumo energético del edificio N° 3 de docentes de la UTM. Por tal razón, se utilizan las técnicas y herramientas de IA e IC con la finalidad de encontrar un sistema que se adapte a las situaciones requeridas por el sistema eléctrico de la edificación. Con las consideraciones antes mencionadas se utilizó una arquitectura de RNA con RBF, la cual analizará los diferentes parámetros eléctricos con la finalidad de brindar los resultados esperados con los que se pueda dar paso a la toma de decisión que tendrá la red eléctrica inteligente. El sistema desarrollado fue implementado en el entorno Matlab 2018a.

Palabras Claves: Gestión energética, red eléctrica inteligente, Inteligencia artificial, inteligencia computacional, red neuronal artificial con función en base radial.

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes problemas que se presentan como un reto a nivel mundial, es la generación y uso de la energía eléctrica, a la vez que se protege el medio ambiente. Es notable que los costos asociados a la energía crecen con el pasar de los años debido a innumerables factores que radican desde la producción de energía. Muchos países con un campo tecnológico muy avanzado y con gran cantidad de utilización de energías alternativas, buscan implementar sistemas inteligentes que le permitan monitorizar, controlar y predecir diferentes anomalías o situaciones adversas en el sistema eléctrico ya sea de generación,

distribución o consumo, tal es el caso de [1], que efectúan un trabajo en el análisis de la problemática que se presenta en la configuración de los sistemas eléctricos de potencia actual y los requerimientos necesarios para la implementación de una red inteligente (Smart Grid), que le brinde mayor inteligencia al sistema con infraestructuras de medición avanzada, modelos de arquitectura de telecomunicaciones y generación distribuida- micro redes, “logrando un mayor aprovechamiento de las energías alternativas, predecir ágilmente los fallos y una adaptación a los vehículos eléctricos”. Los mayores consumidores de energía en el mundo que son Estados Unidos y la Unión Europea han desarrollado un plan para la implementación de una Smart Grid que permita gestionar los recursos energéticos de una forma flexible, limpia, segura, confiable y económica.

Las redes inteligentes, forman parte de un proyecto que busca desarrollar una red eléctrica que puede integrar de manera inteligente las acciones de todos los usuarios conectados a ella, incluidos los generadores, los consumidores y aquellos que realizan ambas acciones para entregar de manera eficiente el suministro de electricidad sostenible, económico y seguro, que por ende mejorará la calidad de servicio del suministro, de acuerdo con los avances de la era digital [2]; [3];[4].

En este trabajo se plantea el diseño de una red eléctrica inteligente para gerenciar la energía en el edificio N° 3 de docentes de la Universidad técnica de Manabí, con la finalidad de tomar como decisor el valor del factor de potencia para conectar la red eléctrica proveniente del transformador, o conectar la fuente de energía proveniente de paneles fotovoltaicos y elemento almacenador de energía ubicados en dicha instalación. Se realiza la programación en la consola del MatLAB, empleando los códigos del mismo, así como los códigos del app designer para obtener la máscara de trabajo.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Una red eléctrica inteligente es capaz de integrar tecnologías avanzadas de medición, monitoreo, comunicación y operación, entre otros, a fin de mejorar la eficiencia, confiabilidad, calidad o seguridad del sistema eléctrico de un área determinada.

El principio básico que está detrás de esta nueva red eléctrica inteligente es el flujo bidireccional de información y de electricidad entre el cliente y la compañía eléctrica [5]. Por tanto, una de las características más importantes que diferencian una red eléctrica inteligente de una tradicional, es su capacidad de soportar un flujo de energía bidireccional, es decir, de pasar del esquema en que el flujo de energía va solo desde las grandes plantas de generación hacia los usuarios finales, particulares o industriales a otro que incorpora y aprovecha la capacidad de almacenamiento y generación distribuida, con un rol activo para los usuarios, en el que son capaces de proveer energía a otros usuarios [3].

Para que las redes eléctricas inteligentes sean una realidad se requiere de herramientas y técnicas fundamentales para su creación y puesta en marcha. Por tal razón, la inteligencia artificial (IA) y la inteligencia

computacional (IC), contienen las herramientas y técnicas necesarias para el desarrollo de una red eléctrica inteligente, tal y como se lo muestra en la figura 1. No obstante, cada sistema inteligente tiene herramientas y metodologías designadas para su obtención o elaboración; en este caso la IA e IC se adaptan a los sistemas por muy complejos que sean. Por tal razón, se procede a exponer las características que brindará la red eléctrica inteligente en conjunto con las técnicas a utilizar para la obtención del sistema inteligente con la incorporación de IA e IC.

Con la IA la red eléctrica inteligente tendrán capacidad de procesamiento de información en eventos complejos, razonamiento cualitativo, razonamiento basado en sentido común, técnicas de planificación, y sistemas multi-agentes.

Las técnicas avanzadas de IC se han aplicado para resolver problemas desafiantes hoy en los sistemas de energía eléctrica. Los métodos de IC pueden contribuir a los sistemas de energía eléctrica y redes inteligentes de varias maneras; utilizando técnicas de identificación y modelado que se basan en técnicas de aprendizaje supervisado, entre las cuales se destacan la lógica difusa, computación evolutiva (evolución artificial), y la red neuronal artificial (RNA).

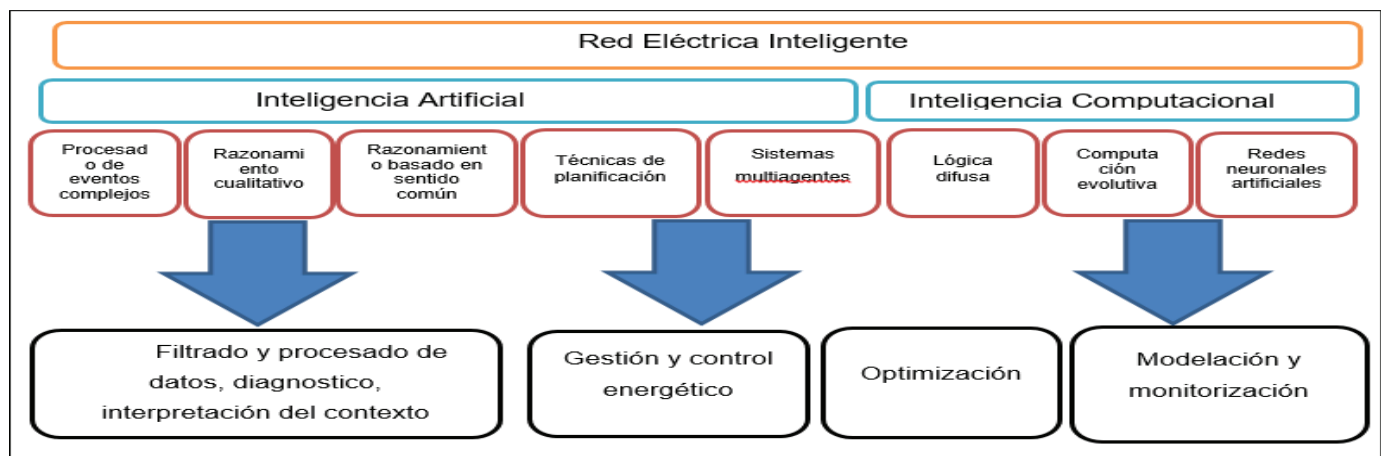


Fig 1. Inteligencia artificial e inteligencia computacional y sus contribuciones a la red eléctrica inteligente [6].

III. COMPARACIÓN Y SELECCIÓN DE LA RUTA DE TRABAJO A EMPLEAR

En este apartado, se procede con el análisis de las técnicas con mayor posibilidad, de ser utilizadas en una red eléctrica inteligente, como es el caso de la lógica difusa y la RNA.

A. Lógica difusa y sus aplicaciones

Básicamente la lógica difusa es una lógica multivaluada que permite representar matemáticamente la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento [7]. Por otra parte se puede decir que la lógica difusa o borrosa, es la que utiliza expresiones que no son ni totalmente ciertas ni completamente falsas, es decir, es la lógica aplicada a conceptos que pueden tomar un valor

cualquiera de veracidad dentro de un conjunto de valores que oscilan entre dos extremos, la verdad absoluta y la falsedad total [8].

Las lógicas difusas, pues de hecho hay que hablar de ellas en plural, son esencialmente lógicas multivaluadas que extienden a las lógicas clásicas [9].

La lógica difusa ha cobrado una gran importancia por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos eléctricos de uso domésticos y de entretenimiento, así como también de sistemas de diagnóstico [9].

Básicamente, cualquier problema del mundo puede resolverse como dado un conjunto de variables de entrada (espacio de entrada), obtener un valor adecuado de variables de salida (espacio de salida). La lógica

difusa permite establecer este mapeo de una forma adecuada, entendiendo a criterios de significado (y no de precisión) [7].

La lógica difusa aplica lógica multivariada a la teoría de conjuntos, estableciendo la posibilidad de que los elementos pudieran tener diferentes grados de pertenencia a un conjunto difuso. La lógica difusa se utiliza cuando la complejidad del proceso en cuestión es muy alta y no existen modelos matemáticos precisos, para procesos altamente no lineales, y cuando se manejan definiciones y conocimientos no estrictamente definidos [10].

En cambio, no es una buena idea usarla cuando algún modelo matemático ya soluciona eficientemente el problema, cuando los problemas son lineales o cuando no tienen solución [11].

B.Red Neuronal Artificial y sus Aplicaciones.

Según el análisis de diferentes autores se observa algunas definiciones de lo que son las RNA.

Una RNA es un modelo matemático inspirado en el comportamiento biológico de las neuronas y en la estructura del cerebro. Esta también puede ser vista como un sistema inteligente que lleva a cabo tareas de manera distinta a como lo hacen las computadoras actuales.

Una RNA es un esquema de computación distribuida inspirada en la estructura del sistema nervioso de los seres humanos. La arquitectura de una RNA es formada conectando múltiples procesadores elementales, siendo éste un sistema adaptivo que posee un algoritmo para ajustar sus pesos (parámetros libres) para alcanzar los requerimientos de desempeño basado en muestras representativas.

En pocas palabras las RNA emulan el comportamiento del cerebro humano, con el fin de obtener sistemas que sean capaces de reaccionar en diferentes medios o escenarios para detectar problemas en sistemas determinados y dar solución los mismos.

Características de las RNA: Las características de las RNA, se direccionan en función al comportamiento de las mismas, en los diferentes medios de utilización. [12] en su investigación, menciona las siguientes características de las RNA:

- Las RNA exhiben capacidades de mapeo, es decir, pueden mapear patrones de entrada a sus patrones de salida asociados;
- Las RNA aprenden con el ejemplo. Por lo tanto, las arquitecturas de RNA se pueden “entrenar” con ejemplos conocidos de un problema antes de que se prueben para su capacidad de “inferencia” en instancias desconocidas del problema. Por lo tanto, pueden identificar nuevos objetos que antes no estaban entrenados;
- Las RNA poseen la capacidad de generalizar. Por lo tanto, pueden predecir nuevos resultados de tendencias pasadas;
- Las RNA son sistemas robustos y tolerantes a fallas. Por lo tanto, pueden recordar patrones completos de patrones incompletos, parciales o ruidosos;
- Las RNA pueden procesar información en paralelo, a alta velocidad y de forma distribuida.

Las características antes mencionadas son fundamentales para entender el comportamiento de las RNA, teniendo en cuenta que esto involucra muchos procesos complejos que ayudan con la obtención de estas características.

Arquitectura de la RNA: Una RNA se define como un sistema de procesamiento de datos que consiste en una gran cantidad de elementos simples de procesamiento altamente interconectados (neuronas artificiales) en una arquitectura inspirada en la estructura de la corteza cerebral del cerebro. Hay varios tipos de arquitectura de RNA. Sin embargo los dos más utilizados son feed-forward networks, y recurrent networks o feedback networks [12].

Feed-forward networks.- Este es el primero y más simple tipo de RNA. En estas redes, la información se mueve en una sola dirección, tal como se lo aprecia en la figura 2. Por tanto, la información se mueve hacia adelante desde los nodos de entrada (input layer), a través de los nodos ocultos (hidden layer) y hacia los nodos de salida (output layer). No hay ciclos o bucles en la red (repetición de proceso). Por otra parte, los ejemplos de RNA de avance son el perceptrón de capas única (SLP), perceptrón multicapa (MLP) y función de base radial (RBF) [13].

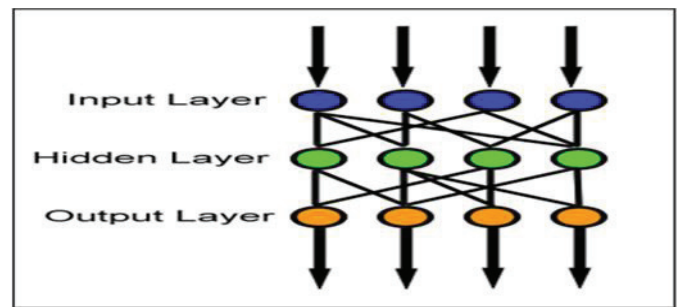


Fig 2. Esquema de feed-forward networks [13].

Recurrent networks o feedback networks.- A diferencia de las redes feed-forward networks, estas redes están conformadas por un modelo de flujo de datos bidireccionales. Por tanto, mientras que una red de retroalimentación propaga los datos linealmente desde la entrada a la salida, RNA, también propaga los datos desde etapas de procesamiento posteriores a etapas más tempranas [13].

La recurrencia se define como el proceso de una neurona que se influencia a si misma por cualquier medio o por cualquier conexión. Las redes recurrentes no siempre tienen neuronas de entrada o salida explícitamente definidas [14]. La figura 3, es un claro ejemplo de lo antes mencionado.

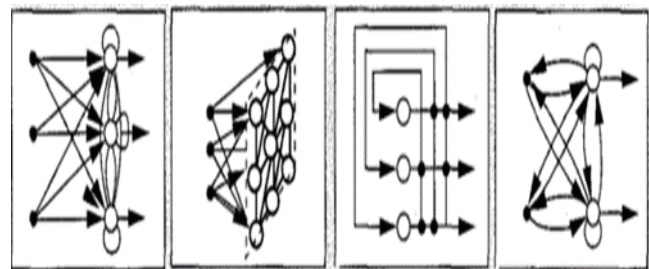


Fig 3. Esquema de recurrent networks o feedback networks [15].

Una vez, analizadas las diferentes estructuras de las RNA, se muestra un claro ejemplo, de la utilización de esta herramienta en el trabajo realizado por [16], el cual utiliza una arquitectura de RNA con RBF, para la detección de fallos en líneas de transmisión de energía eléctrica, dejando muy buenos resultados, que demuestran, la adaptabilidad de

esta arquitectura para sistemas eléctricos, ya que la respuesta a cualquier acción es inmediata y precisa. Es claro visualizar que las RNA con una arquitectura en RBF, es la que mejor se adapta a las situaciones presentes en el sistema que se desea implementar.

IV. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En este apartado se presenta todo el proceso metodológico que se implementó para la obtención de los resultados, con lo cual se genera la orden para el cumplimiento de la gestión de la red eléctrica inteligente. Para ello se desarrolló una RNA con RBF, la cual analiza los datos del comportamiento tanto del edificio como de la mini-central fotovoltaica. Este análisis que realiza la RNA con RBF, será aquel que proporcione la decisión correspondiente para que cualquier escenario entre en funcionamiento o viceversa, esto dependerá del comportamiento que tenga la carga en función con la energía que consume de la red y de la mini-central fotovoltaica.

A. Análisis de los Datos que se ingresarán en las Entradas de la Rna con Rbf.

Para el cumplimiento de esta tarea se analizaron los parámetros de tensión, corriente, factor de potencia, potencias en general, frecuencia y energías en general, estos datos fueron obtenidos del analizador de red PQ-Box 100. Este análisis, se realizó con los datos que fueron recopilados de un periodo que está comprendido desde el 05 al 24 de octubre 2017, obtenidos con un intervalo de muestreo de 10 minutos. Este periodo representa un claro ejemplo del comportamiento que tiene la carga, tanto en días laborales y no laborales. Estos datos se obtuvieron ubicando el analizador de red en las salientes del transformador y de la mini-central fotovoltaica.

Una vez realizado el análisis antes mencionado, se decide tomar la decisión de implementar un sistema de almacenamiento de energía, el cual fue dimensionado en el portal de Sunny web design, dejando como resultado un sistema de almacenamiento de tecnología de litio de alta tensión; con un rango de 120 - 500 V, y con una capacidad de 7 kWh. Este sistema de almacenamiento se lo dimensiono debido a que por las noches el sistema eléctrico presente en el edificio de docente N°3, presenta un factor de potencia por debajo de 0,92, que en este caso está normalizado por el ente regulador ARCONEL [17]. Cabe recalcar, que no se tiene como fin, corregir el factor de potencia de forma directa, si no, de forma indirecta, ya que al implementar este sistema de almacenamiento de energía, pasaría a cubrir parte de la demanda presente en las noches en el edificio, y de esta forma, pasar a desconectar el transformador, disminuyendo pérdidas y dejando de consumir energía proveniente de la red, siempre y cuando este sistema cuente con la capacidad que la edificación requiera en ese instante, caso contrario el transformador sigue en funcionamiento.

Por lo tanto, en la figura 4, se presenta el comportamiento de los parámetros antes mencionados, en un día típico, teniendo en cuenta que estos valores fueron normalizados en un rango de 0 a 1 con la finalidad, que al ingresar a la RNA con RBF, tengan un análisis mucho más rápido, facilitando su interpretación, en las salidas de la RNA.

B. Creación de la RNA con RBF.

La creación de la red se realizó en el software Matlab; utilizando para ello, las herramientas existentes en este software para crear y entrenar la RNA con RBF, así como obtener los resultados esperados.

Para la creación de la RNA con RBF se utilizaron las siguientes órdenes principales, que en este caso, conformarán el corazón de la red:

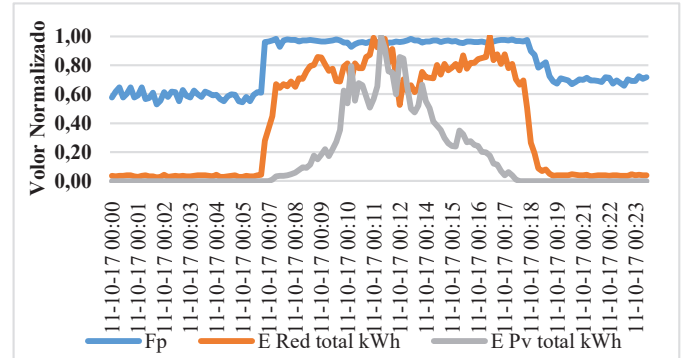


Fig 4. Valores normalizados para las entradas de la RNA con RBF. (Autoría Propia)

Se declara las variables de entrada, con sus respectivos rangos entre (0 1), los cuales representarán cada una de las variables de entrada, conformando vectores, quedando como resultado la siguiente matriz:

- $P = [0 \ 1; 0 \ 1; 0 \ 1; 0 \ 1];$

Se declara la salida esperada, que contendrá valores del rango (0 1):

- $t=[0 \ 1];$

Se realiza el llamado de la RNA con RBF, y se le presentan las variables de entrada (p) y el objetivo esperado (t):

- $net = newrbe(p,t);$

Con los comandos antes mencionados se logra entrenar la red quedando fija para su puesta en marcha. Se ingresa las variables con la que se desea trabajar para la obtención de los resultados:

- $P = [0.98; 1; 0.33; 1];$

Simulamos la red, para que nos presente los resultados esperados con el siguiente comando:

- $Y = sim(net, p)$

Una vez que se obtiene los resultados se analizan y son discriminados para su correcta interpretación. De donde los valores que superen el 0.8, tendrán como salida “1”, que representara la conexión o permanencia del transformador en la carga, caso contrario significará que se tendrá como respuesta “0”, que significa desconectar transformador de la carga para conectar sistema de almacenamiento a la carga. Por tanto, tendremos las siguientes órdenes:

```
if y>=0.8
    salida=1
    disp('conectar transformador, y desconectar batería de la carga. ');
elseif y<0.8
    salida=0
    disp('conectar batería, y desconectar transformador de la carga. ');
end
```

El valor de discriminación, que en este caso es 0,8, surge de un análisis exhaustivo, desde los valores de entrada, con las salidas esperadas que nos brinda la RNA con RBF. Por lo tanto, para escoger este valor se tuvo que analizar, cada uno de los parámetros que conforman las variables de entrada, para de esta forma tener una idea, de cuál sería el comportamiento esperado de la red. De esta manera, se validó el valor de 0,8, como un umbral de decisión partiendo del análisis de correlación de los valores obtenidos en la salida.

C. Estructura y Entrenamiento de la RNA con RBF.

Una vez creada la RNA con RBF, se procede con el entrenamiento de la misma, con la finalidad, de conocer cómo se adapta a las situaciones planteadas para conocer con que margen de error nos brinda los resultados, y de esta forma, tener total seguridad y confiabilidad de los mismos.

En la figura 5 muestra la estructura de la RNA con RBF. Esta red, está compuesta por cuatro neuronas en la capa entrada, con treinta y dos neuronas en la capa oculta, y con una neurona en la capa de salida. El número de neuronas en la capa oculta se define con la condición de $2n$, donde “n” es el número de variables de entrada, aunque esta condición no es estrictamente de obligación, ya que las neuronas en la capa oculta pueden ser más o menos de treinta y dos.

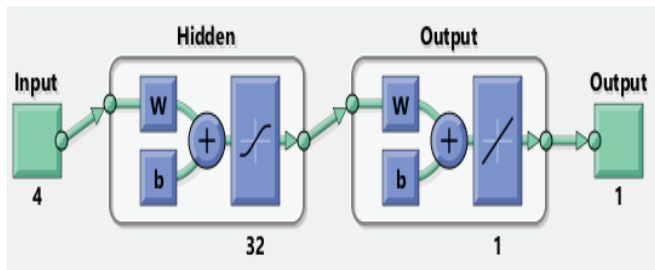


Fig 5. Estructura física de la RNA con RBF (Matlab).

Esta RNA con RBF, presenta un rendimiento de validación de $1,1764e-05$ en la época 41, un excelente valor, que brinda garantía de los resultados obtenidos (ver figura 6). Por otra parte, el entrenamiento, validación y las pruebas que se llevan a cabo en el aprendizaje de la RNA con RBF, demuestran que la red tiene un excelente aprendizaje y adaptación al medio para el cual se ha creado.

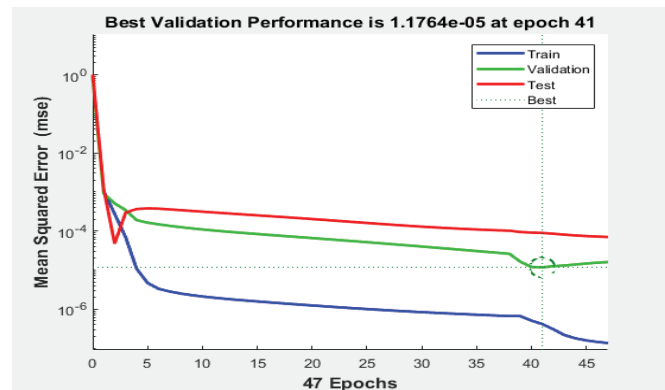


Fig 6. Diagrama de rendimiento y validación de la RNA con RBF (Matlab).

D. Simulación de los Resultados Obtenidos de la RNA con RBF.

Esta simulación representa el comportamiento de la red eléctrica inteligente. Para la obtención de esta simulación se utiliza la herramienta app designer presente en el software Matlab, con la cual se crea una mascarilla para representar de forma visual el comportamiento de la red eléctrica inteligente con su respectiva orden final.

Para tener un mayor entendimiento, se presentan las Figura 7 y 8, en donde podemos observar claramente como está constituida esta mascarilla de simulación. La representación que muestra la mascarilla de la red eléctrica inteligente, tiende a ser didáctica con resultados concretos, ya que se puede observar, desde, las entradas que contiene la red, hasta las salidas en función de una orden a ejecutar. Además, esta misma mascarilla está dimensionada para recibir un cambio de entradas cada 10 minutos, en el caso de estar conectada a un interfaz que le brinde los resultados de forma automática. Por tal razón, en las figuras que se presentan a continuación, se muestra la orden que la red eléctrica inteligente brinda a diferentes horas del día, con valores reales de un día típico, como se lo muestra en la Tabla 1.

TABLA I. Matriz de Entradas.

Valores Normalizados		Entradas			
		P1 (22:00h)	P2 (15:40h)	P3 (09:20h)	P4 (6:40h)
Variables	Fp	0,72	0,95	0,97	0,61
	kWh Red	0,04	0,87	0,85	0,04
	kWh Pv	0,00	0,32	0,02	0,00
kWh Batería		1	1	1	1

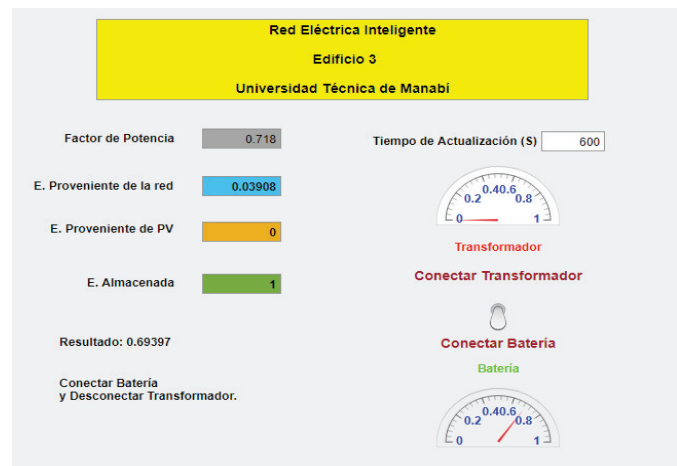


Fig 7. Simulación de red eléctrica inteligente 22:00h (Matlab).

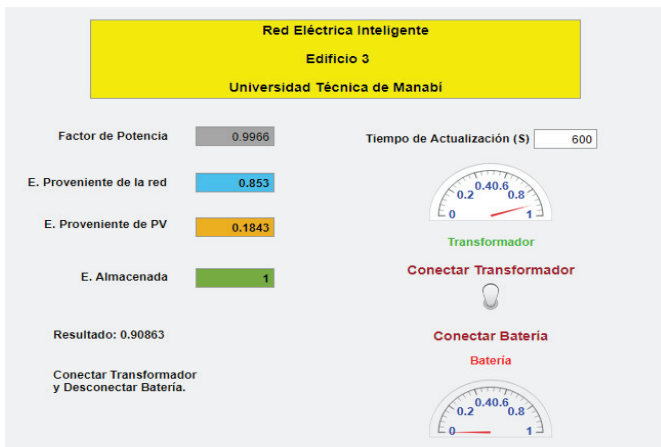


Fig 8. Simulación de red eléctrica inteligente 09:20h (Matlab).

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se utiliza una RNA con RBF, la cual brinda los requerimientos y características necesarias para sistemas eléctricos de distribución. Esto se debe, a su rapidez en el aprendizaje y por ende, rapidez en la obtención de resultados. Esto es de gran beneficio, ya que, la actuación que se requiere en los sistemas eléctricos tiene que ser lo más rápido posible para una respuesta en tiempo.

Los resultados brindados por esta RNA con RBF, mostraron gran confiabilidad y certeza de los mismos, logrando ser el corazón de esta red eléctrica inteligente.

VI. RECOMENDACIONES

Se propone generalizar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación al resto de las edificaciones de la UTM, con la finalidad de lograr mejoras considerables en la gestión energética, con aportaciones a la eficiencia energética de la Universidad, así como complementar el trabajo con la incorporación de una gestión integral de la energía en el edificio docente que se realizó la investigación.

VII. BIBLIOGRAFIA

- [1] A. G. Peralta Sevilla and F. Amaya Fernández, "Evolución de las Redes Eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina," *Rev. Educ. en Ing.*, vol. 8, pp. 1–14, 2013.
- [2] D. B. Etsi, "Smart Grids From the Machine to Machine Perspective," *Energy*, no. April, 2010.
- [3] C. Andrés, D. Andrade, and J. C. Hernández, "Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica-Estado del Arte," vol. 9, pp. 53–81, 2011.
- [4] Á. J. González López, "Gestión de la energía en una red inteligente," 2012.
- [5] S. Martínez Ochoa, "Smart grids : presente y futuro del sistema eléctrico," May 2012.
- [6] 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.
- [7] C. González Morcillo, "Lógica Difusa, una introducción práctica," *Técnicas de Softcomputing*, p. 29, 2011.
- [8] A. Ramirez, A. Barriga, I. Baturone, and S. Sanchez Solano, "Capítulo 2 : Logica difusa Conceptos Fundamentales.," *Libr. Electrónico sobre Lógica Difusa*, pp. 35–59, 2005.
- [9] G. Morales-luna, "Introduccion a la logica difusa," no. November, pp. 1–12, 2002.
- [10] K. Beleño, J. Berrio, A. Pardo, and G. Oscar, "Diseño de una smart grid para un sistema híbrido de energía Design of a smart grid for a hybrid power system," *Prospect*, vol. 11, no. 2, pp. 94–101, 2013.
- [11] C. Gonz, "Lógica Difusa," 2018.
- [12] G. K. Jha, "Artificial neural networks and its applications," no. August, 2007.
- [13] W. Sibanda and P. Pretorius, "Artificial Neural Networks-A Review of Applications of Neural Networks in the Modeling of HIV Epidemic," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 44, no. April, pp. 975–8887, 2012.
- [14] M. Titterington, "Neural networks," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2010.
- [15] A. K. Jain, J. Mao, and K. M. Mohiunffin, "Artificial Neural Networks: A Tutorial," 1996.
- [16] D. J. García, "Diagnóstico de Fallos en Líneas de Transmisión de la Energía Eléctrica Empleando Redes Neuronales Artificiales," *Tesis en opción al título académico Máster. Univ. Oriente, Cuba.*, 2007.
- [17] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, "Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución. Servicio público de energía eléctrica. Periodo: enero - diciembre 2018," 2018.