

Sistema automatizado para la predicción de flujo de carga en subestaciones eléctricas mediante redes neuronales artificiales

(Automated system for load flow prediction in power substations using artificial neural networks)

Arlys Michel Lastre Aleaga¹, Erik Fernando Méndez Garcés¹, Alexis Cordovés García¹

Resumen:

El flujo de carga tiene gran relevancia en la asistencia del proceso de toma de decisiones y planificación de la generación, distribución y transmisión de energía eléctrica. El desconocimiento de los valores de este indicador, así como su inadecuada predicción, dificulta la toma de decisiones y eficiencia del servicio eléctrico, además puede ocasionar situaciones indeseadas tales como; la sobre demanda, el sobre calentamiento de los componentes que integran una subestación, y la no correcta planificación de los procesos de generación y distribución eléctrica. Dada la necesidad de predicción de flujo de carga eléctrica de las subestaciones en el Ecuador la presente investigación propone la concepción para el desarrollo de un sistema automatizado de predicción empleando el uso de Redes Neuronales Artificiales.

Palabras clave: Predicción; Carga Eléctrica; Redes Neuronales Artificiales.

Abstract:

The load flow is of great importance in assisting the process of decision making and planning of generation, distribution and transmission of electricity. Ignorance of the values in this indicator, as well as their inappropriate prediction, difficult decision making and efficiency of the electricity service, and can cause undesirable situations such as; the on demand, overheating of the components that make up a substation, and incorrect planning processes electricity generation and distribution. Given the need for prediction of flow of electric charge of the substations in Ecuador this research proposes the concept for the development of an automated prediction system employing the use of Artificial Neural Networks.

Keywords: Prediction; Electric Charge; Artificial Neural Networks.

1. Introducción

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso del ser humano. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí para producir un estímulo de salida (Mitchel, 1997) .En inteligencia artificial es frecuente referirse a ellas como redes de neuronas o redes neuronales.

El flujo de cargas (también flujo de potencias) es la herramienta fundamental para estudiar un sistema de transporte o de distribución de energía eléctrica en régimen permanente, y para poder tomar las medidas oportunas, tanto desde el punto de vista de la explotación (simulación de

¹Universidad Tecnológica Equinoccial, Sto. Domingo de los Tsáchilas - Ecuador ({arlys.lastre, mgef506202, alexis.cordoves} @ute.edu.ec)

acciones sobre un sistema existente), como desde el punto de vista de la planificación y simulación de planes de expansiones futuras (Barrero, 2004, pág. 155).

En ingeniería eléctrica el uso de redes neuronales artificiales es relativamente nuevo, aunque en la última década ha tenido un avance sustancial. Los antecedentes teóricos y prácticos existentes que relacionen las RNA y la predicción de flujo de carga eléctrica son muchas veces incompletos en su estructura, ya que algunos no integran una GUI (Interfaz gráfica de usuario) que permite presentar sistemas dinámicos de cálculo y predicción con el usuario.

Cabe recalcar que varias universidades han desarrollado como parte de sus investigaciones varios modelos de predicción con redes neuronales artificiales, de esto se pueden destacar varias investigaciones realizadas en países de habla hispana como España, Perú y Colombia.

En la presente investigación se propone el desarrollo de un sistema automatizado de predicción empleando el uso de redes neuronales artificiales para determinar de manera fiable y precisa el flujo de carga en subestaciones eléctricas, considerando las exigencias técnicas y de demanda características de cada una de ellas. Para lograr este fin se utilizarán los datos históricos de potencia de una subestación eléctrica de la empresa estatal "Transelectric EP" como caso de estudio para estos fines.

La predicción de este índice energético es de gran importancia para la toma de decisiones en la planificación de la generación de electricidad donde el "Centro Nacional de Control de Energía" (CENACE) es el ente regulador principal para este propósito, de la misma forma, el flujo de potencia es necesario para asegurar la fiabilidad energética, favorece el correcto y oportuno mantenimiento, y la asistencia en la toma de decisiones en la distribución de energía eléctrica que demanda la "Corporación nacional de electricidad" (CNEL EP).

Las interpolaciones, extrapolaciones y cualquier método de aproximación existente en la actualidad, no permiten conocer con precisión cuál será la demanda futura en una subestación eléctrica. Por ello, es necesario disponer de un método capaz de predecir, de manera fiable, veraz, y con un mínimo error de cálculo.

Es por eso y teniendo conocimiento de la problemática a la hora de predecir el flujo de carga se plantea: desarrollar un sistema que permita predecir este índice energético aplicando los principios de las redes neuronales artificiales. Por consiguiente se debe reconocer que para el desarrollo del sistema de predicción se deberá integrar la programación lógica del mismo, haciendo uso de herramientas informáticas que permitan dar solución a dicho problema.

2. Metodología

La energía es la capacidad que poseen los cuerpos para poder efectuar un trabajo a causa de su constitución (energía interna), de su posición (energía potencial) o de su movimiento (energía cinética). Es una magnitud homogénea con el trabajo, por lo que se mide en las mismas unidades, es decir en Julios en el Sistema Internacional.

Según la forma o el sistema físico en que se manifiesta, se consideran diferentes formas de energía: térmica, mecánica, eléctrica, química, electromagnética, nuclear, luminosa, etc. (Nuclear, 2014).

La potencia se transmite o se transfiere cuando existe flujo de electricidad, es un índice energético que tiene una estrecha relación, específicamente la potencia se define como el trabajo realizado por unidad de tiempo por lo que sus dimensiones en el sistema internacional se expresan en Joules (J) sobre segundo (s) tal y como se referencia en la *Ecuación 1*, (Segui, Sanchez, & Orts, 2002).

$$P = \frac{T(\text{Trabajo})}{t(\text{tiempo})} \quad (1)$$

A partir de esa definición general se puede representar y dar forma a la potencia eléctrica que no es nada más que la relación del trabajo eléctrico o energía que se disipa por unidad de tiempo.

En corriente continua la potencia es igual al producto de la tensión (Voltios) por la corriente (Amperios) que circula por el circuito, pero en cambio analizando la corriente senoidal o corriente alterna se obtiene la integración del tiempo, y en adición a las cargas resistivas habituales que se integran en la corriente continua, se deben incluir dos cargas más para el análisis, generalmente las cargas se dividen en:

- Cargas lineales o cargas resistivas
- Cargas no lineales o cargas inductivas y capacitivas.

En la *Figura 1* se detalla la relación de ambos tipos de cargas por medio de un triángulo denominado "Triángulo de potencias" en el análisis de la corriente alterna.

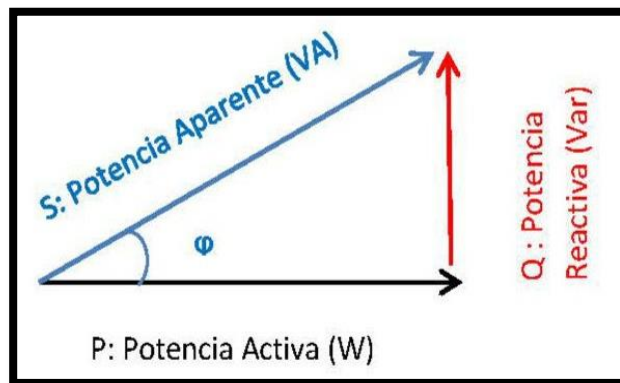


Figura 1. Triángulo de las potencias en la corriente alterna

En Weedy (Weedy, 2012, pág. 4), se define potencia como:

“Los sistemas de suministro de energía eléctrica modernos son invariablemente trifásicos. La red de distribución se proyecta de forma que su funcionamiento normal es razonablemente próximo al de las tres fases equilibradas y con frecuencia basta con estudiar las condiciones eléctricas de una sola fase para obtener un análisis completo. Se asegura la carga igual de las tres fases de una red haciendo, siempre que sea posible, que las cargas domésticas se repartan por igual entre las fases de las líneas de distribución de baja tensión; normalmente las cargas industriales son siempre trifásicas.”

En (Weedy, 2012) específicamente se habla de la forma en la que se transmite actualmente la energía en un sistema eléctrico. Es muy importante recalcar el medio de transmisión ya que en este mismo proceso y con datos efectivos resultantes del mismo se pueden orientar procesos de mayor relevancia como la producción o generación de energía eléctrica y mantenimiento de servicios de un sistema eléctrico.

Flujo de potencia o flujo de carga

En el lenguaje convencional de los sistemas eléctricos de potencia se emplea el término flujo de carga para expresar una solución de estado en régimen permanente de la red objeto de estudio. Esta solución ha de aportar como información los valores de las tensiones en todos sus nudos, los flujos de potencias activa y reactiva por cada línea, así como corrientes, factores de potencia, etc. (Coto Aladro, 2002, pág. 119).

El análisis del flujo de cargas concierne no solo al mecanismo físico que controla el flujo de potencias en una red sino también permite la búsqueda de la configuración óptima de flujo de todas las posibles.

Dentro del subsistema de distribución, los centros de transformación tienen como función reducir la tensión de la red de distribución a los valores de consumo doméstico (120, 230 y 400 V), es decir a baja tensión.

Un sistema eléctrico es el corazón energético de un país, haciendo posible que el consumidor final, las personas, puedan aprovechar de manera fiable, eficiente y con un alto nivel de confiabilidad la energía eléctrica obtenida y transportada por procesos variados que generalmente, varían en cada país, adecuándose a las características de producción de la energía.

La transmisión de energía eléctrica tiene un rol fundamental a la hora de trasladar la energía generada desde las plantas generadoras hasta los puntos de distribución siendo estos generalmente el consumidor final. En la transmisión eléctrica debemos considerar varios aspectos que enmarcan el papel fundamental que tiene este subsistema en el desarrollo energético de un país.

El mundo tiende al uso de las fuentes de energía renovables para producir lo que denominamos energía limpia. Así, el estado ecuatoriano está invirtiendo recursos para poder obtener una matriz energética basada en fuentes energéticas renovables (Robalino Quito, 2012).

El Ecuador es un país con características topográficas muy variadas, de gran diversidad climática y condiciones únicas que le confieren un elevado potencial de energías renovables y limpias, las cuales no pueden quedar al margen del Inventario de los Recursos Energéticos para Producción Eléctrica, pues las condiciones de cobertura y satisfacción de la demanda que se presentan en la actualidad, demuestran un estrecho vínculo especialmente con la electrificación y energización rural.

En los últimos 15 años el país ha tenido una gran demanda por fuentes de generación de energía relacionadas con combustibles fósiles, en el país según la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, en su plan del buen vivir, el 43.3 % de la energía es proveniente de la generación eléctrica por medio de combustibles fósiles, y el 45.3% proviene de las empresas hidroeléctricas ya en ejecución. El otro porcentaje restante es proveniente de fuentes de generación alterna y de la importación de energía.

Con el paso de los años y acorde con el nuevo plan nacional del “Buen vivir” (2013-2017) en su punto 5 “Planificamos el futuro” menciona que progresivamente se reducirá el uso de fuentes de energía que integren fuentes no renovables como lo son los combustibles fósiles que no son amigables con el medio ambiente, y pasar a hacer uso ya de las fuentes renovables que el país dispone en materia de producción de energía eléctrica como son las generadoras hidroeléctricas y los proyectos alternos de producción de energía, como la generación de energía solar, eólica, biomasa, mareomotriz, entre otros (ver *Tabla 1*).

Tabla 1. Producción anual de energía eléctrica en el Ecuador según su fuente energética.

			Medidas							Variación (%)	
			Energía (GWh)								
			Tipo Central							Tipo Central	
Año	Tipo de Energía	Sub tipo Central	↕Todos	↕Biomasa	↕Eólica	↕Hidráulica	↕Interconexión	↕Solar	↕Térmica	↕Todos	
Todos	Todos	Todos	269.995,02	2.263,41	143,99	141.098,13	12.256,22	15,42	114.217,84		
1999	Todos	Todos	10.331,88			7.176,73		23,76	3.131,39		
2000	Todos	Todos	10.612,44			7.611,23			3.001,21	2,64 %	
2001	Todos	Todos	11.072,03			7.070,65		22,23	3.979,15	4,15 %	
2002	Todos	Todos	11.943,86			7.524,26		56,30	4.363,30	7,30 %	
2003	Todos	Todos	12.665,74			7.180,42		1.119,61	4.365,71	5,70 %	
2004	Todos	Todos	14.226,46	3,24		7.411,70		1.641,61	5.169,90	10,97 %	
2005	Todos	Todos	15.127,47	102,86		6.882,64		1.723,45	0,01	6.418,51	5,96 %
2006	Todos	Todos	16.686,32	145,56		7.129,49		1.570,47	0,01	7.840,79	9,34 %
2007	Todos	Todos	18.197,52	218,75	0,96	9.037,66		860,87	0,02	8.079,27	8,30 %
2008	Todos	Todos	19.108,69	208,32	2,68	11.293,33		500,16	0,03	7.104,16	4,77 %
2009	Todos	Todos	19.385,37	216,52	3,20	9.225,41		1.120,75	0,01	8.819,48	1,43 %
2010	Todos	Todos	20.382,76	235,56	3,43	8.636,40		872,90	0,00	10.634,46	4,89 %
2011	Todos	Todos	21.838,73	278,20	3,34	11.133,09		1.294,59	0,06	9.129,45	6,67 %
2012	Todos	Todos	23.086,16	296,35	2,40	12.237,72		238,20	0,33	10.311,16	5,40 %
2013	Todos	Todos	23.872,40	295,79	56,70	11.038,82		662,34	3,66	11.815,08	3,29 %
2014	Todos	Todos	21.457,19	262,25	71,26	10.508,58		548,97	11,30	10.054,83	-11,26 %

Fuente: CONELEC (Consejo nacional de electricidad)

La empresa pública encargada de la generación y transmisión de la energía eléctrica en el Ecuador es la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC). Actualmente, se encuentra conformada por 8 unidades de generación hidroeléctrica (Enerjubones, Enernorte, Hidroagoyan, Hidronacion, Hidropaute, Hidrotoapi, Hidronacion, Hidroazogues), 4 de generación térmica (Electroguayas, Termoesmeraldas, Termopichincha, Termogas Machala), una de generación eólica (Gensur), y una unidad de transmisión eléctrica (Transelectric).

Con una inversión de 4.983 millones de dólares, nuevos proyectos aumentarán a 6.779 megavatios de potencia la capacidad instalada en el país, que ahora es de 3.770 megavatios. Los principales proyectos en ejecución son Coca-Codo-Sinclair (con una capacidad de 1.500 megavatios), Toachi-Pilatón (253 megavatios) y Sopladora con 487 megavatios.

Con respecto a la transmisión eléctrica en el país la empresa encargada es "TRANSELECTRIC", una división de "CELEC EP" es responsable de operar el Sistema Nacional de Transmisión, y su objetivo fundamental es el transporte de energía eléctrica, garantizando el libre acceso a las redes de transmisión a los agentes del Mercado Eléctrico Mayorista, compuesto por generadores, distribuidores y grandes consumidores. Cabe recalcar que el transmisor no puede comercializar energía eléctrica.

Es necesario también enunciar algunos datos de interés del sistema de transmisión ecuatoriano para así comprender la realidad general del trabajo de investigación. A continuación en la *Tabla 2* se citan características variadas del sistema.

Tabla 2. Características generales del Sistema Nacional de Transmisión

Subestaciones:	47 a nivel nacional. (Incluye 3 subestaciones móviles)
Capacidad instalada de Transformación:	9.370 MVA
Red de Telecomunicaciones:	3.567 km de cable con fibra óptica tipos OPGW y ADSS (Con 2 salidas internacionales)
Capacidad Total Instalada: (STM -1/4/16/64):	153,8 Gbps (Tecnología SDH) Red con tecnología DWDM, sistema que soporta 40 lambdas de 10 Gbps. Red con tecnología OTN, sistema que soporta 80 lambdas de 10 Gbps.

Fuente: TRANSELECTRIC

El documento habilitante para la toma de decisiones y planificación de energía eléctrica en el Ecuador es el Plan Maestro de Electrificación (PME) que constituye una herramienta integral e intersectorial de planificación que permite determinar las inversiones orientadas a garantizar el normal abastecimiento de energía eléctrica a la demanda nacional, a través del desarrollo de proyectos de generación, expansión, distribución y transmisión a corto, mediano y largo plazo.

Una visión integral del país, que toma en consideración las realidades y políticas de todos los sectores de la economía, entre ellos la matriz productiva, el desarrollo del sector minero y la prestación del servicio al sector hidrocarburífero, implica necesariamente considerar la expansión de toda la cadena de suministro. La proyección de la demanda, constituye el elemento integrador sobre el cual se desarrolla la planificación de la expansión del sistema con una visión global.

La planificación de la generación y distribución eléctrica es tratada como un problema de optimización para encontrar la estrategia óptima en la hoja de ruta de inversión y construcción de nuevas fuentes de generación, a la vez que se satisfacen las restricciones técnicas y económicas del problema de Despacho Económico Hidrotérmico y de la demanda proyectada futura para el Sistema Nacional Interconectado del Ecuador (límites de embalses, disponibilidad de generación y costos variables). En la actualidad debido al cambio producido en la estructura del mercado eléctrico ecuatoriano en base a una estructuración vertical con mayoritaria participación del Estado, la prioridad no está en el beneficio financiero de una inversión, lo primordial es el beneficio social, la capacidad de autoabastecimiento y la soberanía energética.

El propósito de la planificación es proveer de una herramienta de decisión que permita la toma de decisiones en la ejecución de proyectos de generación eléctrica futura. El análisis se centra en determinar “opciones reales” en contextos probables de ocurrencia, lo que significa insertar al análisis, incertidumbres que podrían provocar no siempre que un escenario óptimo financieramente sea el más adecuado.

Importancia de la predicción de flujo de carga

El desarrollo del sector eléctrico es estratégico; por lo tanto, debe garantizar el abastecimiento energético, principalmente mediante el incremento de la participación de la generación hidroeléctrica debido a las características topográficas del Ecuador que permitirá reducir progresivamente la generación termoeléctrica; así también, debe fortalecer la red de transmisión y sub-transmisión, adaptándolas a las actuales y futuras condiciones de oferta y demanda de electricidad.

Esto se complementa con la inserción paulatina del país en el manejo de otras fuentes de energía renovable como: energía solar, eólica, geotérmica, de biomasa, mareomotriz; estableciéndose como las principales alternativas sostenibles en el largo plazo para la generación de energía eléctrica.

Dentro de este contexto, la proyección de la demanda se convierte en el eje fundamental a partir del cual se desarrolla la planificación, debido a que considera una serie de hipótesis debidamente sustentadas que contemplan la evolución histórica de la demanda eléctrica a nivel nacional, los impactos producidos por la incorporación de cargas especiales al sistema, variables políticas, económicas, sociales, ambientales y tecnológicas que se reflejan en el comportamiento de la demanda eléctrica.

Como parte de los lineamientos establecidos por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, MEER, respecto a la demanda eléctrica, se señala que: "... la proyección de la demanda, que constituye el elemento básico y fundamental sobre el cual se desarrolla la planificación de la expansión del sistema, debe considerar además del crecimiento tendencial de la población y del consumo, la incorporación de importantes cargas en el sistema, como son los proyectos mineros, la Refinería del Pacífico, el cambio de la matriz energética productiva del país; y, fundamentalmente, la migración de consumos de GLP y derivados de petróleo a electricidad, una vez que el país cuente con la producción de los proyectos de generación que hoy se ejecutan. También se deben considerar los efectos de las acciones que se desarrollan para mejorar la eficiencia energética en los sectores residencial y productivo." (MEER, 2013)

Para evaluar y ver la factibilidad de implementación de un modelo de predicción es necesario considerar diversos aspectos. Las características más importantes, necesarias para la predicción (Lei, Shiyang, Chuanwen, Hongling, & Yan, 2009) son: variables de predicción, entradas del modelo, tipo de modelo, horizonte y tiempo de muestreo, criterio para evaluar el resultado y los respectivos resultados.

3. Materiales y métodos

Quizás la parte más difícil en la construcción de un buen modelo de red neuronal es la relacionada con selección y recogida de la información que alimentará al mismo en la fase de entrenamiento.

A partir de investigaciones realizadas y consultas a expertos, se ha podido recolectar la data histórica de mediciones de demanda de carga eléctrica en la subestación eléctrica en Santo Domingo de los Tsáchilas, a partir de la cual se ha realizado todo el proceso de análisis para la comprobación de la integridad y limpieza de los datos.

Resulta necesario establecer las variables de entrada para determinar la arquitectura del sistema. En el caso de estudio, a partir de la información histórica disponible, se determinan como variables de entrada, los valores correspondientes a hora, día y mes; como variable de salida la carga eléctrica demandada en el periodo correspondiente.

A partir de la definición del periodo de predicción, el sistema entregará los resultados que describan detalladamente los consumos de cargas asociados. Para ello se ha determinado el nivel de información necesario, según el periodo de predicción (ver *Tabla 3*).

Teniendo en cuenta los tipos de datos y la información necesario a entregar, según el periodo de predicción, se desarrolló el algoritmo que describe el proceso general, desde la entrada de datos hasta la generación de reportes predictivos (ver figuras 2, 3 y 4).

Tabla 3. Entrega de resultados según el periodo de predicción

Periodo a Predecir	Entrega de Resultados
Diario	(Día, hora 1) (Día, hora 23)
Mensual	(mes, Día 1, MediaDia1) (mes, Día n MediaDian)
Todo el año	(mes 1, Día 1, MediaDia1) (mes 12, Día n MediaDian)

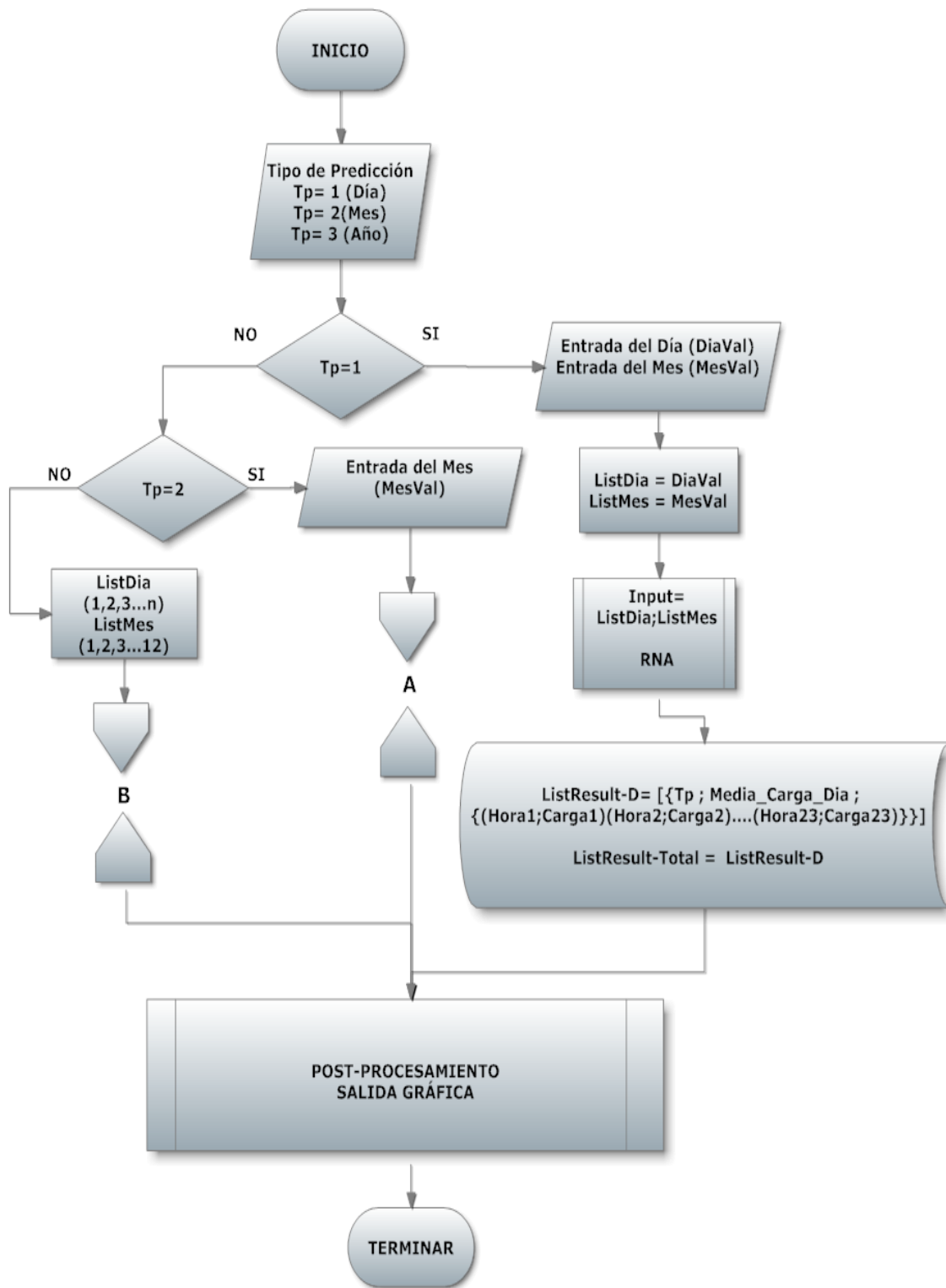


Figura 2. Algoritmo general del sistema.

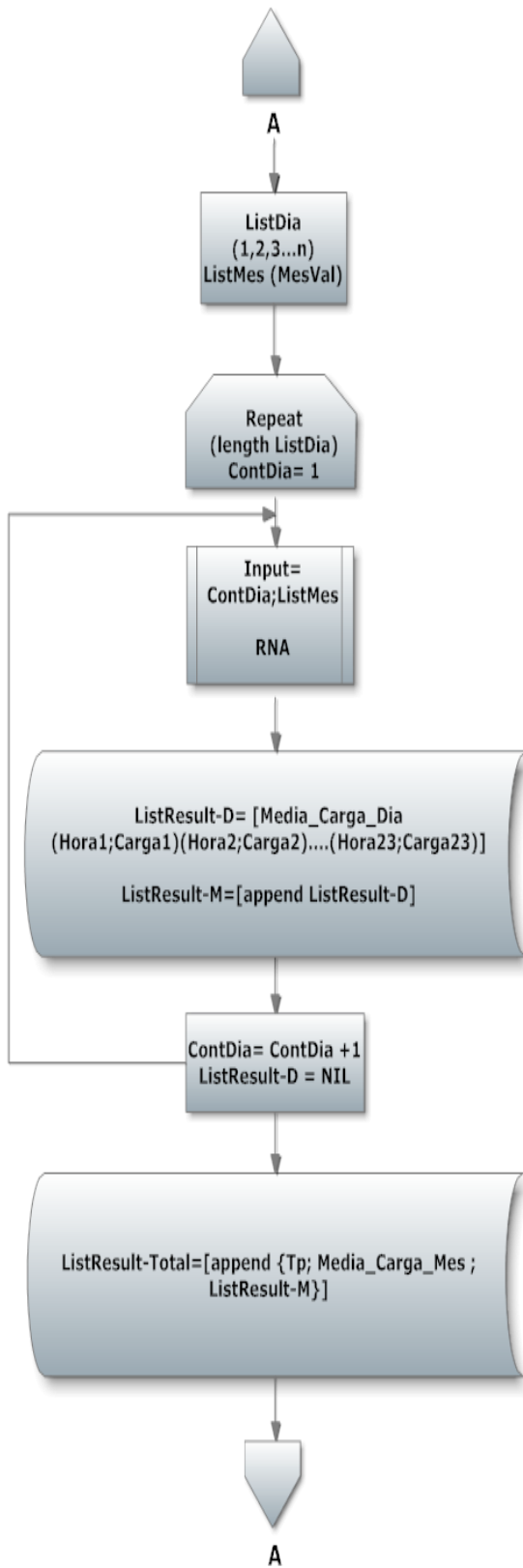


Figura 3. Subrutina A. Ciclo de llamadas para estimar el pronóstico del mes.

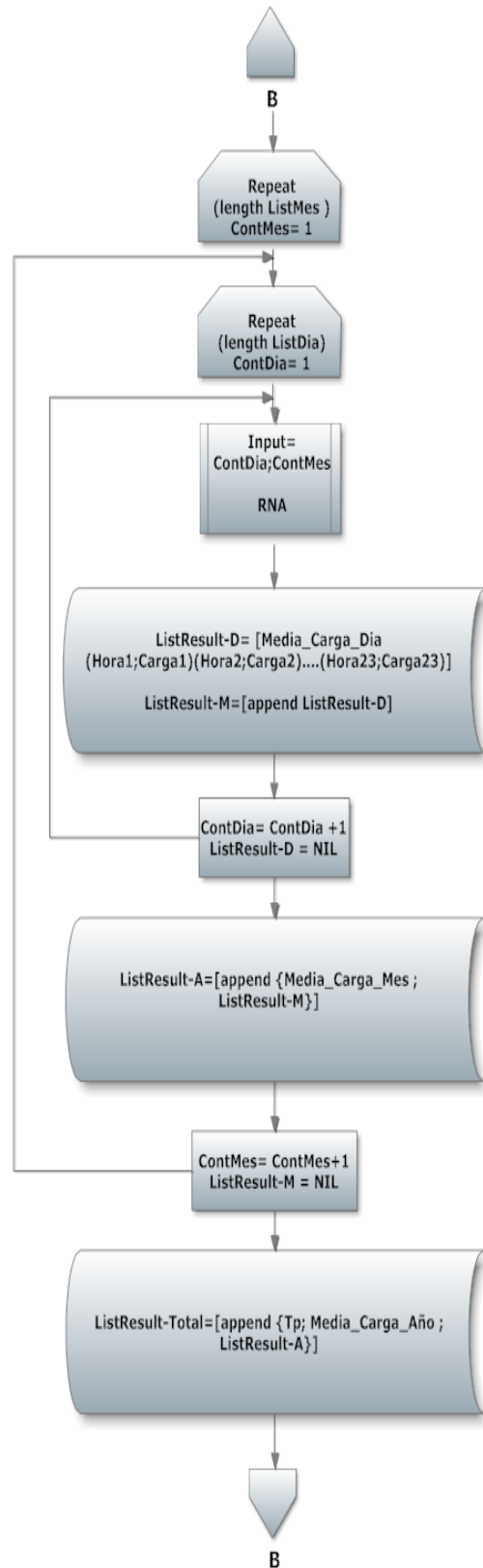


Figura 4. Subrutina B. Ciclo de llamadas para estimar el pronóstico del año.

4. Resultados y discusión

Para la evaluación de los resultados, se compararon datos referentes a la predicción del sistema automatizado de ciertos días del mes de Septiembre, y de todo el mes en general, cabe recalcar que la RNA se modelo en función de los siguientes datos reales de la subestación “Santo Domingo”, estos son:

- Datos de carga (potencia aparente) del mes de Junio del 2014
- Datos de carga (potencia aparente) del mes de Julio del 2014
- Datos de carga (potencia aparente) del mes de Agosto del 2014

Los registros históricos adicionales obtenidos de Septiembre de 2014 permitieron la comparación “Predicción” vs “Real” del presente sistema automatizado, a continuación se enumeran distintos casos de evaluación de días aleatorios del mes de Septiembre, y adicional a estos una comparativa mensual del mes antes mencionado.

Análisis del día 3 de Septiembre de 2014

El presente análisis se hizo considerando los datos del día 3 de Septiembre haciendo una comparativa con los datos reales registrados en la subestación eléctrica de transmisión “Santo Domingo” con los datos de predicción del sistema automatizado, los resultados se muestran en la *Figura 5*.

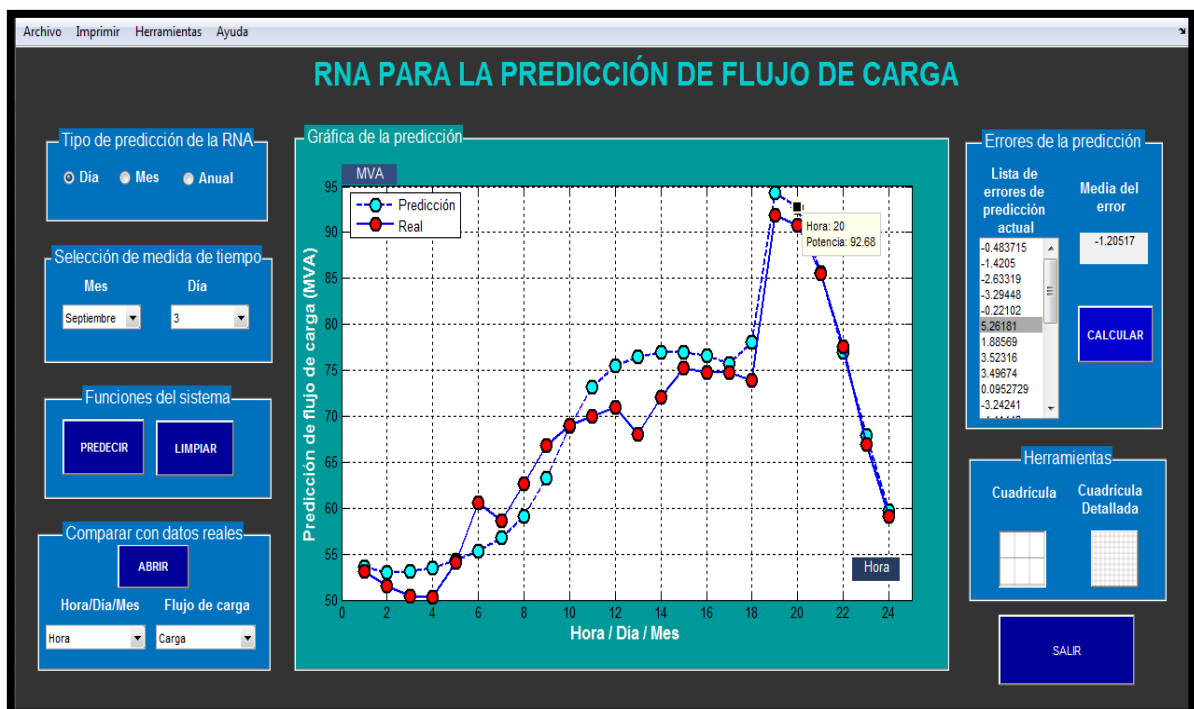


Figura 5. Resultados de comparación del día de 3 de Septiembre de 2014

De los datos obtenidos se destacan los resultados de fiabilidad máxima, mínima y media de la predicción realizada por la RNA, las generalidades se destacan a continuación:

- La fiabilidad máxima de predicción fue de **99.90%** donde el error mínimo obtenido fue de 0.095% a las 10:00 am del presente día.
- La fiabilidad mínima de la predicción fue de **94.74%** donde el error obtenido fue de 5.26% a las 6:00 am del presente día.
- La fiabilidad total de la predicción de la RNA fue de **98.8%**, donde la media del error del presente día fue “1.2%”.

Los resultados se catalogan como “muy satisfactorios” denotando nuevamente la fiabilidad y capacidad de la RNA en la predicción de flujo de carga (Potencia aparente).

Análisis del día 6 de Septiembre de 2014

El presente análisis se hizo considerando los datos del día 6 de Septiembre haciendo una comparativa con los datos reales registrados en la subestación eléctrica de transmisión “Santo Domingo” con los datos de predicción del sistema automatizado, los resultados se muestran en la *Figura 6*.

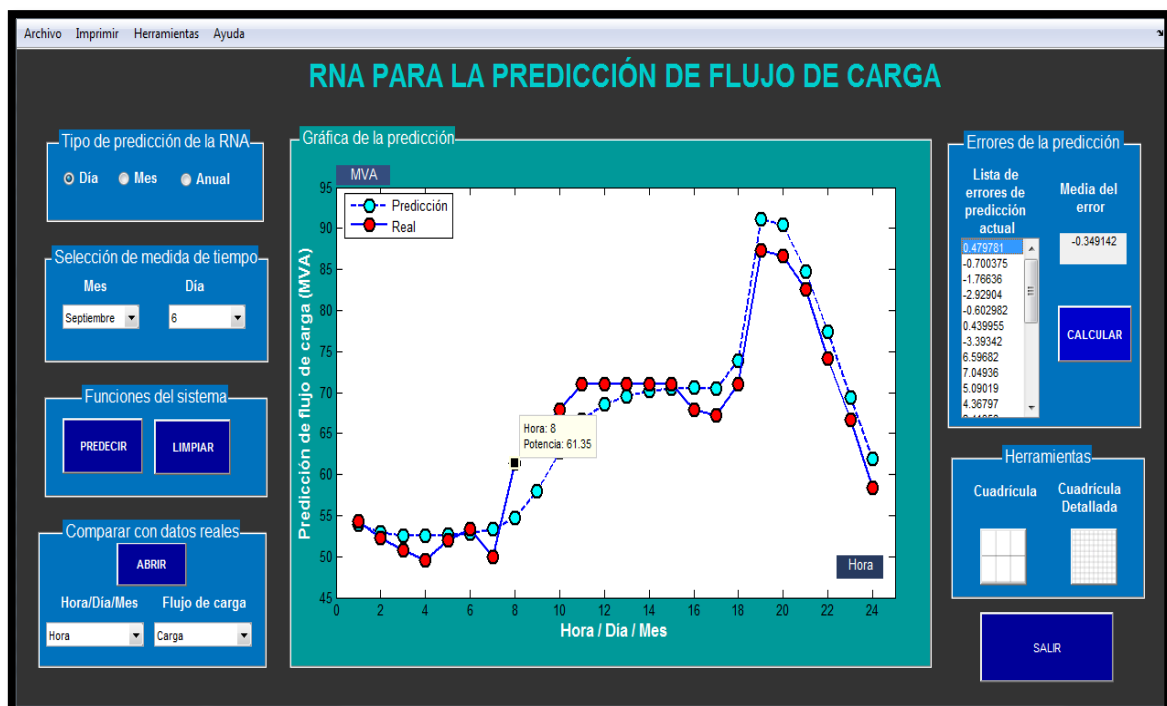


Figura 6. Resultados de comparación del día de 6 de Septiembre de 2014

De los datos obtenidos se destacan los resultados de fiabilidad máxima, mínima y media de la predicción realizada por la RNA, las generalidades se destacan a continuación:

- La fiabilidad máxima de predicción fue de **99.57%** donde el error mínimo obtenido fue de 0.43 % a las 6:00 am del presente día.

- La fiabilidad mínima de la predicción fue de **92.96%** donde el error obtenido fue de 7.049 % a las 9:00 am del presente día.
- La fiabilidad total de la predicción de la RNA fue de **99.66%**, donde la media del error del presente día fue “0.34%”.

Los resultados se catalogan como “muy satisfactorios”, con una fiabilidad mayor (**99.66%**) en comparación al análisis anterior denotando nuevamente la confiabilidad y capacidad de la RNA en la predicción de flujo de carga (Potencia aparente).

Análisis de resultados el mes de Septiembre de 2014

El presente análisis se hizo considerando los datos de las medias aritméticas diarias del mes de Septiembre haciendo una comparativa entre los datos reales registrados en la subestación eléctrica de transmisión “Santo Domingo”, y los datos referentes a la predicción del sistema automatizado, los resultados se muestran en la *Figura 7*.

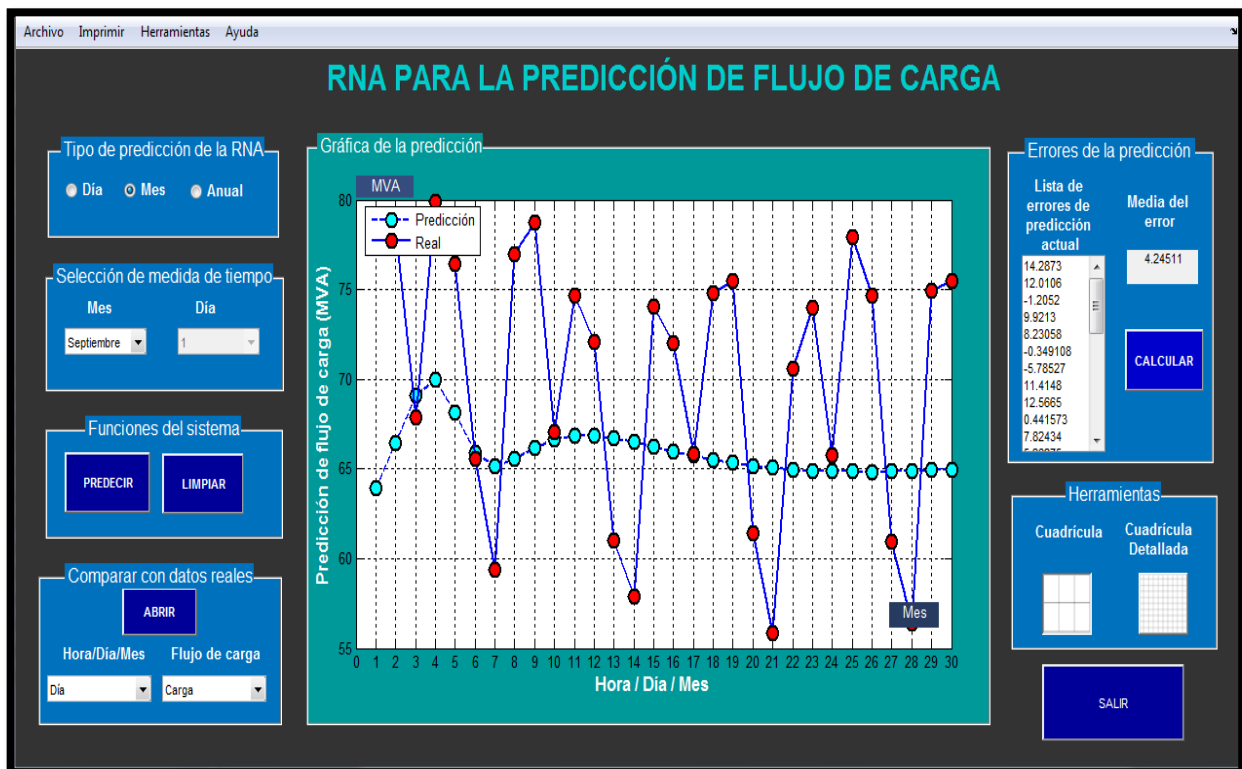


Figura 7. Resultados de comparación mensuales (Septiembre)

De los datos obtenidos se destacan los resultados de fiabilidad máxima, mínima y media de la predicción realizada por la RNA, las generalidades se destacan a continuación:

- La fiabilidad máxima de predicción fue de **99.93%** donde el error mínimo obtenido fue de 0.062 % del día 17 del presente mes.
- La fiabilidad mínima de la predicción fue de **85.72%** donde el error obtenido fue de 14.28 % del primer día del presente mes.

- La fiabilidad total de la predicción de la RNA fue de **95.76%**, donde la media del error del mes fue “4.24%”

5. Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- El estudio de las series históricas de carga es el primer paso de gran importancia para un modelo de previsión de carga. Es a partir de ella que se llegó a una determinación de la arquitectura del modelo a ser utilizada, pues basada en este se definieron parámetros importantes para la topología del modelo, tales como un sistema para cada día, mes y anual.
- La metodología de las redes neuronales aplicada a la previsión de demanda eléctrica, puede representar una herramienta de gran utilidad, permitiendo alcanzar un adecuado nivel de confiabilidad.
- A fin de encontrar un patrón de carga adecuado para el día en que la carga horaria será prevista, se puede construir una red neuronal que permita identificar aquellos días con patrón de carga similar, agrupándolos en clases. Este modelo neuronal evitaría la entrada de datos redundantes que no influyen en el comportamiento, además de los posibles problemas que causarían en el proceso de previsión debido a la complejidad adicional que se exige.
- El desarrollo de un sistema de predicción de flujo de carga en el Ecuador que integre redes neuronales artificiales es algo innovador, ya que relaciona dos campos de las ciencias exactas, la informática con las poderosas herramientas de cálculos que permiten el desarrollo de modelaciones matemáticas más precisas en la predicción, y por otra parte la integración de la ingeniería eléctrica siendo uno de los ejes de desarrollo del país, tal y como la indica la “Matriz productiva” en su lineamiento “10.9.a”
- La propuesta de un algoritmo como conceptualización del sistema, no excluye el estudio de otras metodologías aplicables a la estimación de carga. Las sugerencias de trabajos futuros para la previsión de carga utilizando técnicas de inteligencia computacional, tales como modelos híbridos neuro-fuzzy, entre otros.

Recomendaciones

- La necesaria implementación de la concepción propuesta y el estudio de contraste correspondiente para evaluar el nivel de respuesta del sistema de predicción.

- Se recomienda realizar una futura investigación de redes neuronales artificiales para la predicción considerando más variedades de índices energéticos, desarrollando sistemas automatizados, que mejoren aún más la fiabilidad de la predicción, y puedan retroalimentarse en tiempo real con los datos de subestaciones eléctricas del país para mejorar la planificación energética, esto se conseguiría si se incorpora el concepto de “Minería de datos” para futuras investigaciones.

Bibliografía

Barrero, F. (2004). *Sistemas de energía eléctrica*. Madrid: Paraninfo.

Coto Aladro, J. (2002). *Análisis de sistemas de energía eléctrica*. Oviedo: Universidad de Oviedo.

Lei, M., Shiyan, L., Chuanwen, J., Hongling, L., & Yan, Z. (2009). A review on the forecasting of wind. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 915-920.

MEER. (2013). *Plan Maestro de Electrificación*. Quito.

Mitchel, T. (1997). *Machine Learning*. McGraw Hill.

Nuclear, F. (2014). *Foro Nuclear*. Obtenido de <http://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-1>

Robalino Quito, R. A. (9 de Julio de 2012). Fuentes de generación eléctrica. Loja, Loja, Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.

Segui, S., Sanchez, C., & Orts, S. (2002). *Fundamentos básicos de la electrónica de potencia*. Valencia: Repraval, S.L.

Weedy, B. M. (2012). *Electric Power Systems*. UK: Wiley .