

**ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
ELÉCTRICO BASADO EN CADENAS DE MARKOV**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
ELÉCTRICO BASADO EN CADENAS DE MARKOV**

**AUTOR:
JAIRO MAURICIO ALARCON VILLEGAS**

**TUTOR:
EDWIN MARCELO GARCÍA TORRES**

Quito, febrero 2017

Jairo Mauricio Alarcón Villegas

**ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
ELÉCTRICO BASADO EN CADENAS DE MARKOV**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2017

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Jairo Mauricio Alarcón Villegas

Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingenierías

Universidad Politécnica Salesiana

jarconv@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Edwin Marcelo García Torres

M.Sc. en Eficiencia Energética

Docente de la Universidad Politécnica Salesiana

Facultad de Ingenierías

egarcia@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2017 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Edwin Marcelo García Torres declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO BASADO EN CADENAS DE MARKOV” realizado por Jairo Mauricio Alarcón Villegas, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, febrero de 2017



Edwin Marcelo García Torres

Cédula de identidad: 180308740-0

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Jairo Mauricio Alarcón Villegas, con documento de identificación N° 171881445-0, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO BASADO EN CADENAS DE MARKOV ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Jairo Mauricio Alarcón Villegas

Cédula: 171881445-0

Fecha: febrero de 2017

DEDICATORIA

A Dios...

Porque Bendito el hombre que confía en el Señor, y pone su confianza en él.
Sera como un árbol plantado junto al agua, que extiende sus raíces hacia la corriente;
no teme que llegue el calor y sus hojas están siempre verdes.
En época de sequía no se angustia y nunca deja de dar fruto. (Jeremías 17:7-8/NVI)

A mis Padres...

Por haberme forjado como la persona que soy, por su apoyo incondicional, porque muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Me formaron con reglas y libertades; pero siempre me impulsaron para alcanzar mis sueños sin importar los obstáculos del camino.

A mi Esposa...

Por tu apoyo incondicional, por ser mí soporte en tiempos difíciles y el impulso necesario en tiempos de buen viento. Porque desde adolescentes compartimos ideales y ahora los alcanzamos juntos; por los nuevos retos a superar y triunfos que compartiré con tigo.

“Stay Hungry
Stay Foolish” (S.J.)

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	2
2. Características del sistema eléctrico de potencia.....	3
3. Árbol de toma de decisiones para un flujo de potencia.	3
4. Comportamiento de la carga en un sistema de distribución	4
5. Cadenas de Markov para un sistema eléctrico de potencia.	4
6. Definición del problema.....	5
6.1 Función objetivo	6
7. Desarrollo del problema.....	6
8. Casos de estudio y análisis de resultados.....	7
8.1 Sistema eléctrico de potencia con demanda base.....	7
8.2 Sistema eléctrico de potencia con demanda de autos eléctricos.....	8
8.3 Sistema eléctrico de potencia con demanda de cocinas de inducción.....	9
8.4 Sistema eléctrico de potencia con sumatoria de cargas representativas.	9
9. Conclusiones.....	10
10. Recomendaciones.....	10
12. Estado del Arte.....	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de funcionamiento del SEP.....	2
Figura 2 Red de distribución eléctrica árbol de expansión.	3
Figura 3 Ejemplo de un árbol de toma de decisiones.....	4
Figura 4 Comportamiento del SEP con demanda base.	8
Figura 5 Comportamiento del SEP con demanda de Autos Eléctricos.....	8
Figura 6 Comportamiento del SEP con demanda de cocinas de inducción.	9
Figura 7 Comportamiento del SEP con sumatoria de cargas representativas.....	10

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Solución del SEP con demanda base en 24 horas de consumo.....	8
Tabla 2 Solución del SEP con demanda de Autos Eléctricos en 24 horas de consumo.	8
Tabla 3 Solución del SEP con demanda de cocinas de inducción en 24 horas de consumo.	9
Tabla 4 Solución del SEP con sumatoria de cargas representativas en 24 horas de consumo..	9

ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICO BASADO EN CADENAS DE MARKOV

Resumen

El presente documento tiene como finalidad analizar la variación de carga que existe en un sistema eléctrico de distribución al incrementar la demanda de consumo de energía eléctrica, abasteciendo cargas representativas tales como: vehículos eléctricos y cocinas de inducción conectadas al sistema de distribución; el análisis se lo realiza mediante el método estocástico de "CADENAS DE MARKOV", en tiempo discreto y en espacio de estados continuos, el cual define los posibles estados de funcionamiento, los cuales son la conexión y desconexión de las cargas por un periodo determinado de tiempo de 24 horas, en el análisis de resultados se observa la variación de carga cada por cada media hora de consumo. Para precisar estos resultados se utiliza el software de simulación matemática "MATLAB" en el cual se resuelve por medio del algoritmo de "Newton Raphson" el flujo de potencia y se optimiza la entrega de energía eléctrica, al final se presentan los análisis de resultados obtenidos de la simulación con sus graficas pertinentes sustentando los casos de estudio propuestos en este documento. Para los fines consecuentes se ha tomado como referencia el sistema eléctrico de potencia de doce barras de la "IEEE", sobre el cual se trabajara en la variación de carga del sistema.

Palabras Clave: Cadenas de Markov, autos eléctricos, cocinas de inducción, flujo de potencia, carga representativa.

Abstract

The purpose of this document is analyze the load variation that exists in an electric power system by increasing the demand for electric energy consumption, supplying representative loads such as: electric cars and induction cookers connected to the distribution system; The analysis is done by means of the stochastic method of "MARKOV CHAINS" a discrete time and space of continuous states, which defines the possible states of operation as is the connection and disconnection of the loads for a determined period of 24 hours, in The analysis of results shows the variation of load for each half hour of consumption. To determine these results, the mathematical simulation software "MATLAB" is used, in which the flow of power is solved by means of the "Newton Raphson" algorithm and the electric power is optimized. Of the simulation with its relevant graphs supporting the case studies proposed in this document. For the pertinent purposes, the twelve-bar power system of the "IEEE" has been taken as a reference, on which the load variation of the system will be worked on.

Keywords: Markov Chains, electric cars, induction cookers, power flow, representative load.

1. Introducción

Un sistema eléctrico de potencia contiene elementos capaces de generar, transformar, transmitir y distribuir energía eléctrica, esta energía debe ser entregada al consumidor final con estándares de calidad, confiabilidad y con costos accesibles.[1][2] Debido al crecimiento de la población a nivel mundial así como la demanda de energía eléctrica, los sistemas eléctricos de potencia han crecido hasta alcanzar diseños complejos de funcionamiento como son sistemas radiales, sistemas en anillos y sistemas que forman una red compleja, por lo cual en la resolución de flujos de potencia la red de distribución eléctrica debe ser analizada como un conjunto de nodos conectados entre sí por medio de líneas y transformadores que cuentan con una fuente general de alimentación de energía eléctrica, de esta red se obtiene información relevante de las condiciones de operación y confiabilidad del sistema eléctrico de potencia tales como: la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada nodo, las potencias reales y reactivas que circulan en cada elemento del sistema además de las pérdidas totales de este.[3]–[5]

Por tal motivo surge la necesidad de analizar el comportamiento de las cargas eléctricas representativas tales como carga por demanda de cocinas de inducción y carga por demanda de vehículos eléctricos, que se pueden encontrar en los sistemas en la etapa de distribución de un SEP y predecir el comportamiento de demanda y consumo de energía eléctrica que estas generan en un periodo de 24 horas como tiempo de análisis, a partir de este panorama se busca un algoritmo matemático lo adecuadamente confiable para predecir los estados de funcionamiento de estas cargas, además que este algoritmo se debe ajustar a las necesidades de los diferentes escenarios de distribución eléctrica.[6][7] Para esta labor es necesario conocer los estados de funcionamiento a través de un proceso

estocástico para lo cual se utiliza las “CADENAS DE MARKOV”, como método de cálculo de los posibles estados de operación de las cargas dentro del SEP, este método permitirá encontrar los puntos de mayor y menor demanda de energía eléctrica a lo largo de las 24 horas de estudio, así como también permite conocer el número de cocinas de inducción y vehículos eléctricos conectados o desconectados del sistema.[8][9] Dentro del estudio de las cargas del sistema eléctrico de potencia la cantidad de cocinas de inducción como la cantidad de autos eléctricos que se conectan a la red son un punto de consideración a la hora de brindar eficiencia y confiabilidad eléctrica en la etapa de distribución, en la **Figura 1** se presenta las distintas etapas que componen un SEP.[10][11]

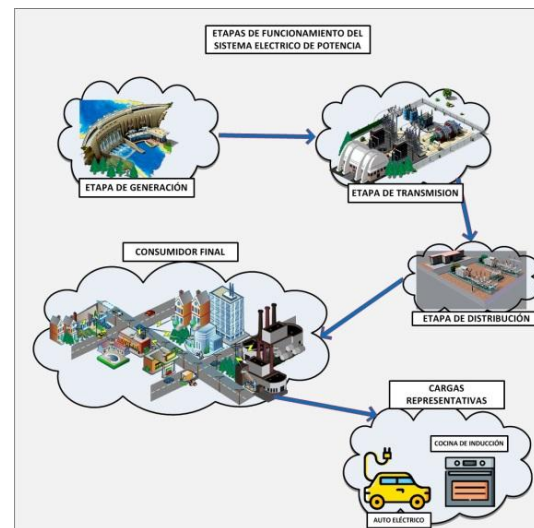


Figura 1 Etapas de funcionamiento del SEP.

En el presente documento en el numeral 2 se explica las características del sistema eléctrico de distribución a ser analizado así como sus particularidades de funcionamiento con respecto a las cargas a las cuales debe abastecer, en el numeral 3 se da a conocer la funcionalidad de un árbol de toma de decisiones para el estudio de un flujo de potencia; dado que el comportamiento de la carga es el principal factor de análisis para la optimización del SEP en el numeral 4 se explica el funcionamiento de la carga en un sistema

de distribución, además del impacto que representa para este a lo largo del tiempo de análisis. Para el análisis de las cargas representativas en el numeral 5 se describe claramente el procedimiento de utilización de las CADENAS DE MARKOV para determinar las cargas conectadas o desconectadas al SEP, en el numeral 6 se define el problema y se expone la función objetivo del mismo, en el numeral 7 se desarrolla el problema planteado con las ecuaciones necesarias para su resolución. Por ultimo en el numeral 8 se realiza el análisis de los casos de estudio planteados y se muestran los resultados encontrados de la solución propuesta al problema, en el numeral 9 se da a conocer las conclusiones de la resolución del problema y en el numeral 10 se da recomendaciones para futuros estudios de los sistemas de distribución.[12]

2. Características del sistema eléctrico de potencia.

Para la resolución del sistema eléctrico de potencia planteado, el cual consiste en analizar el sistema radial de doce barras de la "IEEE", en la etapa de distribución se debe conocer las variables de estado que inciden en la resolución del problema. Estas variables vienen dadas por: La magnitud y ángulo de voltaje de en las barras, la potencia activa y la potencia reactiva que fluye en el SEP. [3][2] Los sistemas de distribución comúnmente son radiales, esto quiere decir que el flujo de potencia normalmente nace de un solo nodo el cual se encarga de abastecer a cada una de las cargas conectadas a lo largo de todo el sistema, en estos tipos de sistemas radiales una falla en la alimentación produce una interrupción en el suministro de energía eléctrica.[2][13] Para el óptimo funcionamiento del SEP se debe considerar que las cargas son de diferente naturaleza, las mismas que por el tipo de consumo que estas generan pueden ser: Residenciales, Comerciales, Industriales y/o Agro industriales para lo cual se tiene en cuenta que tanto la red de distribución como las

cargas se consideran trifásicas balanceadas y se utiliza únicamente el modelo de secuencia positiva de la red para su análisis.[3][14]

La distribución de energía eléctrica se la realiza en media o baja tensión. Las cargas residenciales y comerciales comúnmente se alimentan en la red de baja tensión, a diferencia de las cargas industriales que se alimentan en media o alta tensión dependiendo del tipo de carga y requerimiento del sistema a interconectar a la red, en la Figura 2 se muestra una red de distribución eléctrica mediante un árbol de expansión. [4][2] Dicho esto se debe analizar cada tipo de carga a conectar a la red ya que de acuerdo a sus características estas posee un factor de potencia típico y un comportamiento de operación diferente en cuanto a variación de tensión y temperatura respecto en un periodo de tiempo determinado.[15][16]

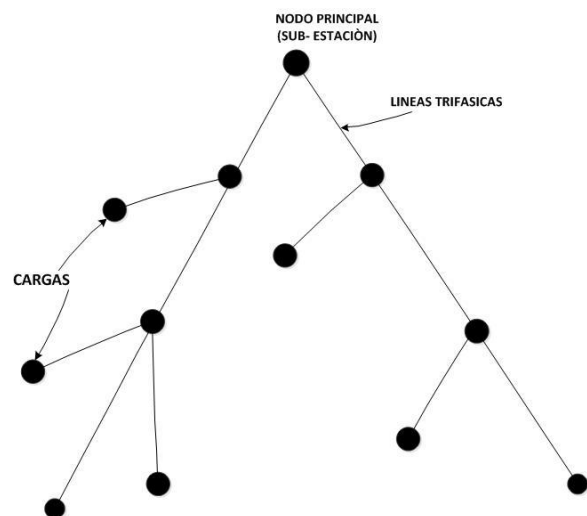


Figura 2 Red de distribución eléctrica árbol de expansión.

3. Árbol de toma de decisiones para un flujo de potencia.

El árbol de toma de decisiones consiste en la resolución de problemas, en el cual se busca la mejor alternativa de solución, empleando un análisis adecuado y una búsqueda metódica, para elegir la mejor opción basada en un proceso de ramificación. Este proceso toma el nombre

de árbol de decisiones que permite valorar parámetros tales como: estimados, consecuencias y hasta costos. [17][18]

En un sistema eléctrico de potencia se debe considerar varios parámetros de funcionamiento a la hora de realizar una distribución y abastecimiento de la energía eléctrica disponible, todo esto en el momento exacto que se requiere entren en funcionamiento los generadores para abastecer la demanda de las diferentes cargas del sistema, para el ejercicio la disponibilidad y la operación del sistema de distribución influirá de manera directa en el orden de funcionamiento de las cargas representativas conectadas al SEP, para lo cual se considera un proceso de toma de decisiones optimo los siguientes parámetros de acuerdo a la Figura 3:[19][20]

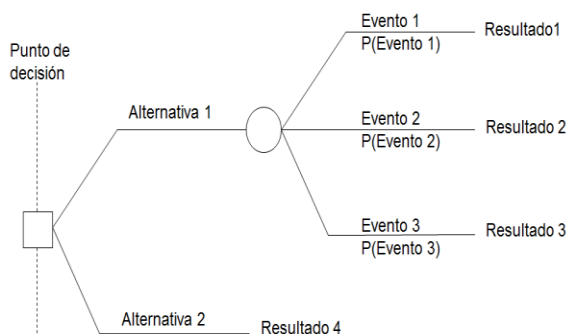


Figura 3 Ejemplo de un árbol de toma de decisiones.

En el momento de tomar un decisión de funcionamiento de nuestro SEP se presentaran varias alternativas de las cuales se tendrá que elegir la más óptima para el despacho de la energía eléctrica disponible, la toma de esta decisión desencadenara en la muestra de varios eventos los cuales tendrán diferentes resultados en su forma de funcionamiento y en su coste económico para el sistema, es decir dependiendo de cuantas líneas de distribución se ocupen el sistema se balanceara en su entrega de energía o se sobrecargara al momento de abastecer la demanda.[17][21]

4. Comportamiento de la carga en un sistema de distribución

Las cargas representativas de un sistema eléctrico de potencia, presentan características puntuales que influyen en el sistema de distribución, ya que estas características expresan el comportamiento del usuario final y conlleva a la definición de la curva de demanda en un tiempo determinado. Esta curva corresponde a los consumos máximos realizados en intervalos de una hora para las 24 horas del día, se analiza y proporciona mayores detalles de la variación durante un periodo de tiempo histórico, además de ser la base para predecir las tendencias de variación de las cargas en el sistema, el porcentaje de estas cargas se las obtiene mediante la siguiente formula (1):[2][22]

$$P.p = \frac{Demanda}{Demanda Maxima} * 100 \quad (1)$$

Dónde: *P.p* es el porcentaje pico de carga conectado al sistema.

Los sistemas de distribución deben cumplir características y parámetros capaces de solventar variaciones de cargas inesperadas en un lapso de tiempo determinado por cuanto un rasgo importante en la etapa de distribución es el desequilibrio de las carga en las fases, para esto se requiere optimizar la distribución de energía eléctrica que fluye por las líneas del sistema de distribución para abastecer cada una de las cargas conectadas sin que se vea afectado el sistema en general y no se produzca un desabastecimiento por una mala optimización de los recursos disponibles.[15][23]

5. Cadenas de Markov para un sistema eléctrico de potencia.

Las CADENAS DE MARKOV se han utilizado en los sistemas eléctricos de potencia para analizar diferentes factores que influyen en la generación, distribución y consumo eléctrico en una red. Se ha estudiado los comportamientos de un SEP

en un lapso de tiempo determinado en los siguientes casos:[8][24]

- CADENAS DE MARKOV para la evaluación de parámetros de fiabilidad y disponibilidad de un SEP.[25]
- CADENAS DE MARKOV para la predicción de corriente y voltaje en líneas de distribución.[24]
- CADENAS DE MARKOV para el análisis de un sistema fotovoltaico dinámico conectado a la red con baterías de almacenamiento.[26]
- Se ha utilizado CADENAS DE MARKOV para pronosticar cada probabilidad de potencia en el periodo de despacho de un SEP.[27]
- CADENAS DE MARKOV en la determinación de fallos de red basados en índices globales conocidos de un SEP. [10]

Tomando en consideración que un proceso estocástico es una composición de variables aleatorias que proporcionan un análisis de la evolución de un determinado fenómeno físico por medio de leyes probabilísticas a través del tiempo, el cual se lo puede representar por la siguiente ecuación (2):[28][29]

$$\{X(t), t \in T\} \quad (2)$$

Donde

$X(t)$ es el estado del proceso en el instante t y T es el conjunto de índices del proceso. Dado esta formulación se obtiene que existen dos tipos de procesos estocásticos los mismos que se explican en las ecuaciones (3) y (4).

Proceso estocástico en tiempo discreto.

$$\{X_n, n = 0,1,2, \dots\} \quad (3)$$

Proceso estocástico en tiempo continuo.

$$\{X(t), t \geq 0\} \quad (4)$$

El presente estudio se centra en encontrar la estabilidad transitoria del sistema frente a la variación de carga producida por diferentes factores de consumo, para un

tiempo discreto y espacio de estados continuos como lo es la demanda de energía eléctrica por cocinas de inducción y vehículos eléctricos como cargas representativas en el sistema, tomando en cuenta sus propias características de cada una de las cargas en un periodo de 24 horas con intervalos de análisis de 1 hora. [30][8] El proceso de cadenas de Markov se lo puede interpretar de la siguiente manera como se expresa en la ecuación número (5).

$$P(X_{n+1} \in A_{n+1}, \dots, X_{n+m} \in A_{n+m} \dots$$

$$| X_n \in A_n, \dots, X_0 \in A_0) = \dots$$

$$P(X_{n+1} \in A_{n+1}, \dots, X_{n+m} \in A_{n+m} \dots$$

$$| X_n \in A_n, \forall n, m) \quad (5)$$

DONDE:

- $\frac{P(X_{n+1} \in A_{n+1}, \dots, X_{n+m} \in A_{n+m} | \text{ESTADO FUTURO})}{X_n \in A_n}$
- $\frac{\text{ESTADO PRESENTE}}{\dots, X_0 \in A_0}$
- $\frac{\text{ESTADO PASADO}}{P(X_{n+1} \in A_{n+1}, \dots, X_{n+m} \in A_{n+m} | \text{ESTADO FUTURO})}$
- $\frac{X_n \in \forall n}{\text{PRESENTE}}$

6. Definición del problema.

El presente documento muestra como alternativa para la optimización de los sistemas de distribución el uso de un proceso estocástico capaz de encontrar los puntos de variación y demanda de las cargas conectadas al sistema, todo esto dependerá del funcionamiento de la carga en el tiempo. [31]Para la resolución del ejercicio se planteó la simulación de un sistema eléctrico de potencia el cual estará

diseñado en forma radial y cuenta con: 2 cargas representativas para el análisis vehículos eléctricos y cocinas de inducción, 12 líneas de distribución y 8 generadores. Para poder abastecer las cargas adecuadamente se utilizara un algoritmo matemático estocástico basado en CADENAS DE MARKOV, el cual analiza la optimización de las líneas de distribución del sistema eléctrico de potencia y define la mejor alternativa de abastecimiento de carga en un tiempo determinado.[32][33] Para esto se utilizara la curva de carga del sistema en intervalos de media hora para cada hora del día durante un periodo de 24 horas, en las cuales se analiza la variación de carga y la distribución de la energía generada del sistema eléctrico de potencia, previniendo desabastecimientos de energía eléctrica y posibles sobrecargas en el sistema, manteniendo estándares de calidad y confiabilidad a la hora abastecer la demanda.[32], [34] Esta toma de decisión de abastecimiento de energía eléctrica responde a los porcentajes obtenidos en la curva de carga, los cuales serán representados como pesos en las ecuaciones demostrativas del algoritmo de solución del problema a través de las CADENAS DE MARKOV, dichos pesos serán cuantificables para poder satisfacer la demanda y tener valores reales de un sistema eléctrico de potencia en funcionamiento.[35][36] La suma de estos pesos dependiendo del caso de estudio dará como resultado la unidad “1”, ya que estos serán obtenidos mediante el cálculo de la probabilidad de conexión y desconexión de las diferentes cargas representativas en el sistema, la ecuación de resolución del problema viene dada por la función objetivo.[37] [36]

6.1 Función objetivo

$$P(X_{n+1} \in A_{n+1} | X_n \in A_n, \dots, X_0 \in A_0) \dots \\ = P(X_{n+1} \in A_{n+1} | X_n \in A_n) \quad (6)$$

Lo cual significa que la distribución de la variable X_{n+1} , depende únicamente del último valor observado A_0 , y no de los valores anteriores.[24], [25], [38]

7. Desarrollo del problema.

La resolución de un SEP para condiciones específicas de carga, generación y distribución permite conocer las variables de estado, para efectuar esta resolución existen modelos matemáticos tales como el método de Gauss Seidel y Newton Raphson, para el presente modelamiento se utiliza el método de Newton Raphson para la resolución del flujo de potencia de acuerdo a las condiciones iniciales propuestas. [3][39] Los datos claves para la resolución de un SEP que se deben conocer son cuatro: Magnitud y ángulo de voltaje de barra, las potencias activas y reactivas ya que estos datos muestran el estado estable del SEP para una condición dada.[35][40] Con estos datos se puede resolver el flujo de potencia a través del método de Newton Raphson el cual es un método iterativo que permite resolver sistemas de ecuaciones no lineales el mismo que puede resolver sistemas $m \times m$ y responde a las siguientes ecuaciones de resolución (7)-(8)-(9)-(10)-(11)-(12)-(13)-(14)-(15)-(16)-(17)-(18)-(19), siendo un sistema de m no lineales con m incógnitas, ecuaciones: [13][2]

$$f_1(X_1, X_2, \dots, X_m) = K_1 \quad (7)$$

$$f_2(X_1, X_2, \dots, X_m) = K_2 \quad (8)$$

⋮

$$f_m(X_1, X_2, \dots, X_m) = K_m \quad (9)$$

Se forma la matriz y se calcula los elementos fuera de la diagonal:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i(G_{ij} \text{SEN} \theta_{ij} - B_{ij} \text{COS} \theta_{ij}) V_j \quad (10)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = -V_i(G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) V_j \quad (11)$$

$$V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} ; \quad V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad (12)-(13)$$

Ecuaciones para el cálculo de potencias activas y reactivas:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) * V_j \quad (14)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) * V_j \quad (15)$$

Se calcula la diagonal del Jacobiano:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -Q_i - B_{ii} * V^2_i \quad (16)$$

$$V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = Q_i - B_{ii} * V^2_i \quad (17)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = P_i - G_{ii} * V^2_i \quad (18)$$

$$V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = P_i + G_{ii} * V^2_i \quad (19)$$

Se calcula las potencias activas y reactivas en cada barra:

$$P_G, Q_G, P_L, Q_L$$

Una vez que se ha resuelto el flujo de potencia, con las condiciones dadas al sistema, se ejecuta el proceso estocástico a través de CADENAS DE MARKOV, para analizar el comportamiento de las cargas cuando entran en funcionamiento de acuerdo a los casos de estudio propuestos, con esto podemos analizar la curva de demanda en el lapso de 24 horas, y determinar los puntos críticos del sistema, para lo cual se ha utilizado el principio de funcionamiento a través de las CADENAS

DE MARKOV con las siguientes ecuaciones (3)-(4)-(5)-(20)-(6):

Función de Probabilidad: Ayuda a determinar la probabilidad de estado de funcionamiento de la carga a analizar en un periodo determinado.[36][41]

$$f(x_i) = p(X = x) \quad (20)$$

Función objetivo Markov:

$$P(X_{n+1} \in A_{n+1} | X_n \in A_n, \dots, X_0 \in A_0) \dots \\ = P(X_{n+1} \in A_{n+1} | X_n \in A_n) \quad (6)$$

Se analiza con CADENAS DE MARKOV en intervalos de media hora durante 24 horas, el comportamiento de la carga teniendo dos estados de funcionamiento los mismos que representan si entra o no en funcionamiento las cargas representativas conectadas al sistema como son las cocinas de inducción y los autos eléctricos y se muestra el comportamiento de estas cargas tanto como valores fijos en el tiempo como valores elegidos por el proceso estocástico que realiza las CADENAS DE MARKOV.[25][10][27]

8. Casos de estudio y análisis de resultados.

Se analizará 4 casos de estudio propuestos los cuales se detallan a continuación:

- Sistema eléctrico de potencia con demanda base.
- Sistema eléctrico de potencia con demanda de autos eléctricos.
- Sistema eléctrico de potencia con demanda de cocinas de inducción.
- Sistema eléctrico de potencia con sumatoria de cargas representativas.

8.1 Sistema eléctrico de potencia con demanda base.

Para el siguiente caso de estudio se ha considerado una demanda diaria promedio que implica cargas residenciales, comercial

e industrial de 2209 MW en un periodo de análisis de tiempo de 24 horas.[42]

En la Tabla 1 se muestran los resultados de solución del SEP, es decir los flujos de potencia de barra a barra y las pérdidas totales del mismo y en la Figura 4 se puede observar que la curva de demanda base cambia a lo largo del tiempo obteniendo picos de demanda en horas puntuales como son: 12:30pm a 13:30 y 19:00pm a 22:30pm, a partir de esta grafica se analiza la variación de carga que existe al ingresar cargas representativas de consumo al sistema.

Tabla 1 Solución del SEP con demanda base en 24 horas de consumo.

FLUJO POR LINEAS Y PERDIDAS									
Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Pérdidas MW	MVar
1	2	237.719	17.610	2	1	-227.918	12.312	9.800	29.922
2	4	206.793	25.956	4	2	-194.540	11.214	12.252	37.171
2	5	39.425	2.961	5	2	-38.561	-0.323	0.864	2.638
3	4	-94.200	27.161	4	3	101.978	-7.311	7.778	19.851
4	7	28.597	-18.134	7	4	-28.597	20.738	0.000	2.604
4	8	16.166	-2.186	8	4	-16.166	3.779	0.000	1.592
5	6	30.961	-32.655	6	5	-30.961	37.508	0.000	4.853
6	11	6.133	0.169	11	6	-6.102	-0.104	0.031	0.065
6	12	13.628	6.053	12	6	-13.500	-5.800	0.128	0.253
7	8	28.597	22.259	8	7	-28.597	-20.785	0.000	1.474
8	9	15.263	5.772	9	8	-14.900	-5.000	0.363	0.772
10	11	-0.000	1.500	11	10	0.002	-1.496	0.002	0.004
Pérdidas totales								31.219	101.199

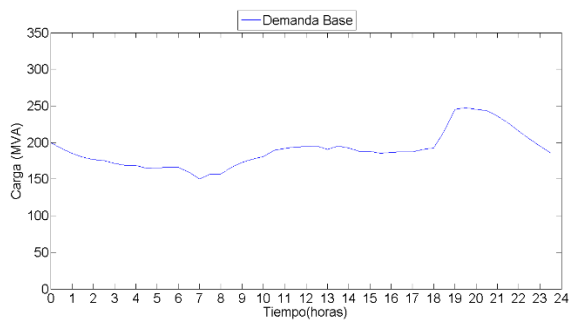


Figura 4 Comportamiento del SEP con demanda base.

8.2 Sistema eléctrico de potencia con demanda de autos eléctricos.

Para el segundo caso de estudio se tomó una muestra de 2000 autos eléctricos con un consumo diario promedio de 37MW, como se puede observar en la Tabla 2 se tiene los resultados de solución del SEP, los flujos de potencia de barra a barra y las

pérdidas totales del mismo y en la Figura 5 la curva de demanda diaria tuvo una variación respecto a la curva de demanda base del sistema ya que se registró un mayor consumo en el periodo de tiempo de: 00:00 am a 06:00am de la mañana y de 19:00pm a 23:30pm, siendo este periodo como periodo de carga del auto eléctrico.[43][44]

Analizando con MARKOV se llega a determina la cantidad de carga que entra en funcionamiento y que se necesita abastecer a través de las líneas de distribución del SEP, por lo que se puede observar, de 06:00am a 07:00am y de 21:00pm a 22:00pm existe una mayor demanda de energía eléctrica, lo que no sucede de 07:00am a 8:00am donde la demanda de energía eléctrica disminuye y se mantiene las horas de consumo punta.

Tabla 2 Solución del SEP con demanda de Autos Eléctricos en 24 horas de consumo.

FLUJO POR LINEAS Y PERDIDAS									
Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Pérdidas MW	MVar
1	2	284.147	26.653	2	1	-270.098	16.239	14.049	42.892
2	4	223.946	12.583	4	2	-209.471	31.330	14.475	43.913
2	5	58.152	4.070	5	2	-56.236	1.780	1.916	5.850
3	4	-94.200	16.581	4	3	101.939	3.173	7.739	19.754
4	7	32.239	-13.240	7	4	-32.239	15.999	0.000	2.758
4	8	18.293	-0.385	8	4	-18.293	2.388	0.000	2.003
5	6	41.236	-35.221	6	5	-41.236	42.563	0.000	7.342
6	11	8.079	-2.968	11	6	-8.016	3.099	0.063	0.131
6	12	15.157	6.110	12	6	-15.000	-5.800	0.157	0.310
7	8	32.239	21.241	8	7	-32.239	-19.534	0.000	1.707
8	9	15.532	5.812	9	8	-15.150	-5.000	0.382	0.812
10	11	0.000	4.737	11	10	0.016	-4.699	0.016	0.038
Pérdidas totales								38.797	127.511

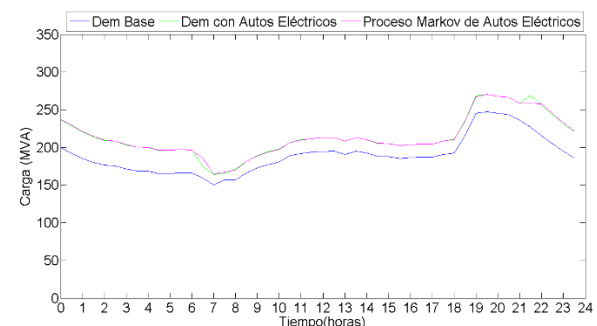


Figura 5 Comportamiento del SEP con demanda de Vehículos Eléctricos.

8.3 Sistema eléctrico de potencia con demanda de cocinas de inducción.

El consumo promedio de una cocina de inducción se encuentra entre los 44kwh, se ha considerado una carga representativa de 12000 cocinas de inducción con un consumo promedio diario de 44 MW, en un periodo de tiempo de 24 horas. [45] Por lo que se observa un cambio significativo en el consumo de energía eléctrica dando como resultado consumos esperados ya que se dan en horarios donde la mayoría de restaurantes, comercios de comida y hogares entran en funcionamiento en cuanto a cocción de alimentos refiere, estos horarios de mayor consumo son: De 05:00am a 08:00am, 10:00am a 13:00pm y de 18:30pm a 22:00pm, como se muestra en la Tabla 3 y Figura 6. En el análisis de Markov para cocinas de inducción se muestra que de 04:00am a 05:00am y de 07:00am a 10:00am existe una mayor demanda de energía eléctrica y un desplazamiento o un alargamiento del consumo de energía eléctrica en el lapso de tiempo de 10:00am a 13:30pm, a diferencia que desde las 19:00pm a 19:30pm y de 21:30pm a 22:00pm donde la demanda de energía eléctrica disminuye.

Tabla 3 Solución del SEP con demanda de cocinas de inducción en 24 horas de consumo.

FLUJO POR LINEAS Y PERDIDAS										
Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Pérdidas MW	MVar	
1	2	266.477	29.654	2	1	-254.077	8.204	12.400	37.858	
2	4	219.547	13.096	4	2	-205.630	29.126	13.918	42.222	
2	5	47.530	-4.787	5	2	-46.243	8.716	1.287	3.929	
3	4	-94.200	21.806	4	3	101.934	-2.066	7.734	19.741	
4	7	32.394	-17.881	7	4	-32.394	20.990	-0.000	3.109	
4	8	18.302	-1.896	8	4	-18.302	3.922	0.000	2.026	
5	6	33.443	-32.477	6	5	-33.443	37.685	0.000	5.208	
6	11	6.133	0.169	11	6	-6.102	-0.104	0.031	0.065	
6	12	11.710	5.997	12	6	-11.610	-5.800	0.100	0.197	
7	8	32.394	22.762	8	7	-32.394	-21.002	0.000	1.759	
8	9	15.996	5.841	9	8	-15.600	-5.000	0.396	0.841	
10	11	0.000	1.500	11	10	0.002	-1.496	0.002	0.004	
Pérdidas totales								35.867	116.959	

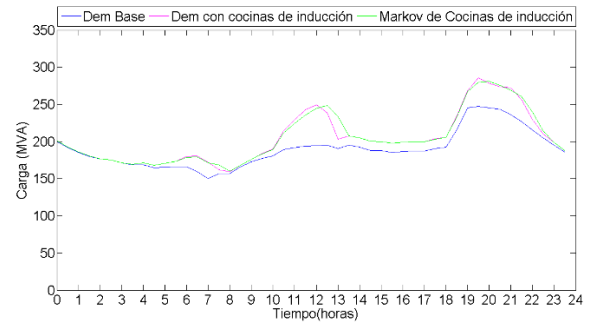


Figura 6 Comportamiento del SEP con demanda de cocinas de inducción.

8.4 Sistema eléctrico de potencia con sumatoria de cargas representativas.

En la Tabla 4 y Figura 7 se representan los resultados de la solución del SEP así como también las curvas de demanda de todos los casos de estudio en el tiempo y la sumatoria de las demandas de cargas representativas con un consumo de energía superior a los 300MW, lo cual significa un impacto considerable al funcionamiento normal del SEP inicial el cual su demanda se ubicaba alrededor de 250MW, es decir hubo un incremento de 50MW de consumo adicional en el SEP.

Tabla 4 Solución del SEP con sumatoria de cargas representativas en 24 horas de consumo.

FLUJO POR LINEAS Y PERDIDAS										
Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Desde Barra	Hacia Barra	P MW	Q MVar	Pérdidas MW	MVar	
1	2	313.209	39.341	2	1	-296.021	13.135	17.187	52.475	
2	4	233.038	22.255	4	2	-216.952	26.546	16.086	48.800	
2	5	67.183	7.609	5	2	-64.554	0.420	2.630	8.029	
3	4	-94.200	28.210	4	3	102.380	-7.332	8.180	20.878	
4	7	36.367	-17.120	7	4	-36.367	20.949	0.000	3.829	
4	8	20.505	-1.308	8	4	-20.505	3.945	0.000	2.636	
5	6	45.754	-37.974	6	5	-45.754	47.175	0.000	9.201	
6	11	8.059	-0.272	11	6	-8.003	0.389	0.056	0.117	
6	12	15.395	6.124	12	6	-15.230	-5.800	0.165	0.324	
7	8	36.367	23.620	8	7	-36.367	-21.421	0.000	2.199	
8	9	17.172	6.004	9	8	-16.700	-5.000	0.472	1.004	
10	11	0.000	1.996	11	10	0.003	-1.989	0.003	0.007	
Pérdidas totales								44.779	149.500	

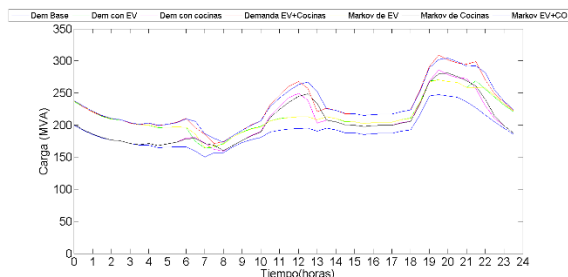


Figura 7 Comportamiento del SEP con sumatoria de cargas representativas.

9. Conclusiones

El análisis de estado de funcionamiento de cargas representativas con CADENAS DE MARKOV, es de gran utilidad dando resultados muy exactos de operatividad del sistema. Considerando el número de cocinas de inducción y autos eléctricos conectados al SEP, se puede concluir que existe un mayor consumo de energía eléctrica en horas punta esta demanda representa un cambio importante en el funcionamiento de la red por lo cual se debe tomar precauciones al momento de dimensionar y proyectar el crecimiento anual de clientes conectados al sistema. Consideraciones como pérdidas en las líneas de distribución, voltajes y corrientes son puntos primordiales de análisis ya que a través de estos podemos saber en qué etapa de nuestro SEP se requiere reforzar el sistema.

10. Recomendaciones

En futuras investigaciones se deberá considerar la opción de análisis de un SEP con diseño en forma de anillo, ya que se podría analizar la redundancia del sistema y el comportamiento del mismo en el momento de una falla generalizada. En futuros análisis se puede tomar en cuenta el impacto económico que significan las cargas representativas en un SEP y para los consumidores finales, así como la reducción del consumo de combustibles fósiles por la utilización de cocinas de inducción.

11. Referencias

[1] I. V. Zimmer, D. Tenfen, I.C.

Decker member, IEEE e F.A.B. Lemos, member, “Three-phase Newton Raphson Power Flow considering Microgeneration,” Brasil, 2010.

- [2] D. Cuevas Bravo, “Calidad de la energia en los sistemas electricos de potencia,” Mexico, 2012, pp. 1-2-3.
- [3] and M. M. Hosein Gholami Khesht, “Instantaneous grid voltage estimation based on the Newton-Raphson optimization for grid connected VSC applications,” Mashhad; Iran.
- [4] J. I. Franco, “Estudio de flujos de potencia y analisis de fallas en sistemas electricos de distribucion radial,” Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2002.
- [5] A. P. Sandoval, “Expansion de la transmision de un sistema de potencia,” Instituto Politecnico Nacional, 2008.
- [6] P. Francisco Gonzalez, Erix J, “Desarrollo de un programa para calculo de flujos de potencia en elsistema de distribucion,” *Congr. Ing. Electr.*, p. 6, 2008.
- [7] E. R. Escudero, “Flujos de carga un metodo alternativo para su solucion,” Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [8] E. I. C.Paida, “State of art, reliability in electrical distribution system based on markov stochastic model,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, p. 6, 2016.
- [9] G. Ayala and E. M. Garcia, “Respuesta de la demanda el{é}ctrica basado en el modelo Markoviano,” Universidad Politecnica Salesiana, 2016.
- [10] X. W. Guangyao Zhou, Zhenshu Wang, “Study on the time variability of load characteristics based on markov chain monte carlo simulation,” *Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Thecnologies*, vol. 5, p. 5, 2015.
- [11] L. Barragan and E. M. Garcia,

- “Modelo multiobjetivo de planificación de transmisión bajo incertidumbre basado en una optima respuesta de la demanda,” Universidad Politecnica Salesiana, 2016.
- [12] E. M. Garcia, “Diagnostico de la demanda de consumo de energía eléctrica en un smart home, enfocado en el sector residencial de Quito, durante el año 2015, Barrió la Kennedy. Caracterización y optimización del consumo de energía eléctrica,” Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2016.
- [13] S. R. Castano, *Redes de distribución de energia*, tercera. Manizales, 2004.
- [14] E. M. Garcia, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, “Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlos algorithms and Markov Chains (MCMC),” in *51st International Universities’ Power Engineering Conference*, 2016, no. Mcmc.
- [15] L. M. Lostauman, “Modelo de ecuaciones de flujos de potencia real y reactiva en sistemas de energia electrica,” *Electron. --- UNMSM*, vol. 6, p. 20, 2000.
- [16] E. M. Garcia and I. Isaac, “Demand response systems for integrating energy storage batteries for residential users,” in *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), IEEE*, 2016.
- [17] U. H. B. Denis C.L. Costa*, Marcus V.A. Nunes, João P.A. Vieira, “Decision tree-based security dispatch application in integratedelectric power and natural-gas networks,” *BRSILIA*, 2016.
- [18] G. L. M. Laura Garach Morcilloa*, Francisco Javier Calvo Poyoa, “Using Decision Trees for Comparing Different Consistency Models,” in *XI Congreso de Ingenieria del Transporte (CIT 2014)*, 2014, p. 10.
- [19] M. M. M. Gholami a, G.B. Gharehpetian a,†, “Online Decision Tree based strategy for power system static security margin improvement using wind farms,” *IRAN*, 2015.
- [20] W. R. and C. F. Yong Sun" b*, Lin Maa, b, “Using Decision Trees in Economizer Repair Decision Making,” *Birsbane/ Australia*, 2010.
- [21] H. Panayiotis Moutis, Nikos D, “Desicion trees aided scheduling for firm power capacity,” *Greece*, 2014.
- [22] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. M. García, and R. Hincapié, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [23] P. Moreno and E. M. Garcia, “Respuesta a la Demanda para Smart Home Utilizando Procesos Estoc{á}sticos,” *I+D Tecnol{ó}gico*, 2016.
- [24] Y. S. W. Chang Liu 1, Hong Wei Liu 3, “Research of Icing Thickness on Transmission Lines Based on Fuzzy Markov Chain Prediction,” *CHINA*, 2013.
- [25] M. L. Du Platis, Agapios, Nikolaos Limnios, “Performability of Electric-Power Systems Modeled by Non-Homogeneous Markov Chains,” *France*, 1996.
- [26] J. Z. 1 LI Ying-zi 1*, NIU Jin-cang 2*, LUAN Ru 1, “Optimal Control for Dynamic Grid- Connected Photovoltaic System Based on Markov Chain,” *CHINA*, 2007.
- [27] L. H. H. Zha, X. S. Han, Y. L. Wang, “An Effective Algorithm of the Power System Probabilistic Optimal Dispatching,” *Nanjin//China*, 2008.
- [28] “3 Funciones de probabilidad y distribución,” *2012*, 2016. .
- [29] B. Oña and E. M. Garcia, “Uso

- eficiente del consumo de energía eléctrica residencial basado en el método Montecarlo,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [30] J. L. Jingwen Sun, Zhihao Yun, “Longitudinal Moment Markov Chain Model of Wind Power and Its Application on Ultra-short-term Prediction,” Changsha//China, 2015.
- [31] M. Ortiz and E. M. Garcia, “Pronóstico de la demanda eléctrica residencial basado en el modelo de regresión adaptativa multivariante spline (MARS),” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [32] L. Francisco M gonzales, “Flujo de potencia,” Santiago//Chile, 2006.
- [33] M. Simbaña and E. M. Garcia, “Optimización mediante el método de Montecarlo de la demanda eléctrica residencial,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [34] C. G. Játiva J., Constante G., “Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia,” Quito--Ecuador, 2014.
- [35] D. O. Q, “Algoritmos de solución del flujo de potencia.” Colombia, p. 16, 2007.
- [36] V. J. Yohai, *Notas de Probabilidades y Estadística*. Argentina, 2008.
- [37] Ö. G. Andrzej Adamczyk, Student Member, IEEE, Mufit Altin, Student Member, IEEE, “Generic 12-Bus Test System for Wind Power Integration Studies.”
- [38] W. N. Hui zhou, Wei wang, “Forecast of residential energy consumption market,” Beijing//China, 2008.
- [39] V. M. Ujjwal Ghatak, “A fast and efficient load flow technique for unbalanced distribution system,” Jharkhand--India, 2016.
- [40] V. M. Ujjwal Ghatak, “An improved load flow technique based on load current injection for modern distribution system,” Jharkhand, India, 2016.
- [41] D. Tasinchana and E. M. Garcia, “Predicción con series de tiempo para la optimización de la demanda eléctrica residencial,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [42] G. del Ecuador, “Arconel,” 2016. [Online]. Available: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/arconel/>.
- [43] Á. R. Mateo, “Evaluación del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución,” Universidad Pontificia Comillas - ICAI, 2010.
- [44] R. S. Zapata, “Impacto en la demanda de energía eléctrica en colombia debido a la penetración de vehículos híbridos eléctricos y eléctricos,” Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2009.
- [45] A. O. Company, “The induction site,” 2016, 2016. [Online]. Available: <http://theinductionsite.com/induction-makers/ge-induction-hobs.php>.