



# POSGRADOS | MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

RPC-SO-30-No.508-2019

OPCIÓN DE  
TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

T E M A :

INTERCAMBIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN REDES DE  
DISTRIBUCIÓN DE MEDIO VOLTAJE IMPLEMENTANDO  
UN ALGORITMO DE JUEGOS COOPERATIVOS

A U T O R :

MARÍA JOSÉ CAMPOVERDE CAMPOVERDE

D I R E C T O R :

JORGE LUIS ROJAS ESPINOZA

CUENCA - ECUADOR  
2022

***Autora:***



***María José Campoverde Campoverde***

Ingeniera Electrónica.

Ingeniera Eléctrica.

Candidata a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia por la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca.

[mcampoverdec3@est.ups.edu.ec](mailto:mcampoverdec3@est.ups.edu.ec)

[maria.campoverde@ucuenca.edu.ec](mailto:maria.campoverde@ucuenca.edu.ec)

***Dirigido por:***



***Jorge Luis Rojas Espinoza***

Ingeniero Eléctrico.

Maestro en Administración de la Energía y sus Fuentes Renovables.

[jrojase@ups.edu.ec](mailto:jrojase@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 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 investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2022 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

CAMPOVERDE CAMPOVERDE MARÍA JOSÉ

**INTERCAMBIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIO VOLTAJE IMPLEMENTANDO UN ALGORITMO DE JUEGOS COOPERATIVOS**

# Intercambio de Energía Eléctrica en Redes de Distribución de Medio Voltaje Implementando un Algoritmo de Juegos Cooperativos

María José Campoverde Campoverde, Jorge Rojas Espinoza,  
Maestría en Electricidad, Universidad Politécnica Salesiana  
mcampoverdec3@est.ups.edu.ec  
jrojase@ups.edu.ec

**Resumen**— La inserción de energías no convencionales en los sistemas de distribución ha llevado a que los actores del sector eléctrico pongan especial atención en los procesos y métodos de intercambio de energía que se realizan entre generadores y consumidores en la red eléctrica. El problema de intercambio de energía no es sencillo, puesto que se deben definir parámetros que prioricen el despacho de energía y la compra de la misma entre fuentes y cargas eléctricas. La Teoría de los Juegos Cooperativos se presenta como una herramienta que permite el intercambio de energía en un Sistema de Distribución Eléctrico cuando se considera la inserción de Energías Renovables no Convencionales. El presente proyecto de investigación busca utilizar un algoritmo basado en la Teoría de los Juegos de Coalición que, al agregar una heurística, permite el intercambio de energía entre estaciones de transformación en un alimentador primario en medio voltaje en sistemas de distribución, es decir entre vendedores y compradores que interactúan entre sí y la subestación eléctrica de distribución, buscando reducir las pérdidas de energía en la red eléctrica y alcanzar beneficios (pagos) comunes para todos actores del sistema sin perjudicar el estado de ninguno de ellos, considerando las dimensiones y topología de la red y la ubicación de las estaciones de transformación que serán los prosumidores (jugadores) en el proceso de intercambio de energía.

**Palabras Claves**— Alimentadores Primarios, Generación Distribuida, Intercambio de Energía, Microrredes Eléctricas, Sistemas de Distribución, Teoría de Juegos.

**Abstract**— *The insertion of non-conventional energies in distribution systems has led actors in the electricity sector to pay special attention to the processes and methods of energy exchange that take place between generators and consumers in the electricity network. The problem of energy exchange is not simple, since parameters must be defined that prioritize the dispatch of energy and its purchase between sources and electrical loads. The Theory of Cooperative Games is presented as a tool that allows the exchange of energy in an Electric Distribution System when the insertion of Non-Conventional Renewable Energies is considered. This research project seeks to use an algorithm based on Coalition Games Theory that, by adding a heuristic, allows the exchange of energy between transformation stations in a medium voltage primary feeder in distribution systems that is between vendors and buyers who interact with each other and the electrical distribution substation seeking to reduce energy losses in the electrical network*

*and achieve common benefits (payments) for all actors in the system without harming the status of any of them, considering the dimensions and topology of the network and the location of the transformation stations that will be the prosumers (players) in the energy exchange process.*

**Keywords**— Primary Feeders, Distributed Generation, Energy exchange, coalitions, electrical microgrids, distribution systems and game theory.

## I. INTRODUCCIÓN

El estudio de las Smart Grids y de las Microrredes (como un componente de las mismas) y su aplicación en los sistemas de distribución ha llevado en la actualidad a buscar modelos matemáticos que permitan el intercambio de energía entre las fuentes de generación y las cargas eléctricas en la red eléctrica. El aumento de la demanda energética, la planificación e inversión de las empresas de distribución de energía eléctrica por mejorar sus índices de calidad y confiabilidad, y la inserción de las fuentes no convencionales de energía, exigen se indaguen en alternativas que permitan un intercambio de energía de manera ordenada con ventajas como: abastecer de energía a los consumidores, presentar las menores pérdidas de energía en el sistema, obtener energía eléctrica a menor costo en el instante y lugar indicado [1].

Existen varias herramientas matemáticas que permiten analizar el intercambio de energía en las microrredes generando beneficios para las instituciones y clientes de un sistema de distribución. La Teoría de los Juegos de Coalición se presenta como una de ellas, la misma puede presentar alternativas para que los generadores y consumidores puedan realizar transacciones comerciales de energía en una especie de “mini mercado” en la red de distribución de una empresa de distribución de una determinada región, considerando los costos de generación y las pérdidas de energía presentes en la red eléctrica. En efecto una “Virtual Power Plant” (VPP) puede utilizar las tecnologías de la información y comunicación (ICTs) y el internet de las cosas (IoT) para gestionar el proceso de intercambio en el mercado eléctrico.

Durante las últimas décadas se ha ido desarrollando trabajos cuyo objetivo es establecer reglas que permitan la

compra y venta de energía eléctrica entre Microrredes Eléctricas y Empresas Convencionales de Generación, Transmisión y/o Distribución de Energía. Así en [2] ya se realiza un análisis del intercambio de energía utilizando juegos cooperativos en Microrredes, pero sin considerar ningún tipo de restricción en la red eléctrica, se supone que todas las Microrredes pueden estar conectadas entre sí y con un macroestación; en [1] se indaga en la búsqueda de generar un algoritmo más eficiente considerando restricciones espaciales entre las microrredes en niveles de voltaje mayores a los 50 kV. En el trabajo presentado en [3] las restricciones de red son más estrictas considerando que no todas las Microrredes se encuentran conectadas físicamente pero todavía los niveles de voltaje son mayores a los 50 kV, se modela básicamente a subestaciones de Distribución como Microrredes Eléctricas. Por último, en [4] se lleva el intercambio de energía en Microrredes a un nivel de bajo voltaje (220V, 240V, 202V) donde las Microrredes son prácticamente los clientes conectados a una red pública de energía.

Es así el que siguiente paso es llevar el juego cooperativo a un intercambio de energía en redes de medio voltaje denominados alimentadores, siendo la contribución del presente trabajo modelar y analizar el comportamiento de las estaciones de transformación en una red de Distribución como puntos de enlace entre la red pública y las Microrredes que pueden generarse. El modelo planteado permitirá analizar casos de estudio de alimentadores reales de un sistema de Distribución de una Empresa Eléctrica.

Un problema de los alimentadores primarios son las pérdidas de energía eléctrica que se encuentran presentes en los conductores que llevan la energía desde la Subestación de Distribución hasta las diferentes estaciones de transformación, en donde se encuentran conectados los consumidores a través de líneas de distribución de bajo voltaje. Las estaciones de transformación pueden pertenecer a la Empresa de Distribución o a un Particular quien es un individuo que compra la energía eléctrica en medio voltaje a través de su propio transformador. Estos usuarios, en algún instante de tiempo, podrían tener su propia generación de cualquier naturaleza volviéndoles potenciales vendedores de energía en una red eléctrica, es ahí donde surge la pregunta, ¿qué mecanismos o técnicas se podrían aplicar para dentro de ese alimentador se pueda dar un intercambio de energía que permita satisfacer las necesidades energéticas de vendedores y compradores, siendo el “pago” de una cooperación el minimizar las pérdidas de energía?

La teoría de los juegos cooperativos de coalición es una herramienta matemática que ha sido utilizada en décadas atrás en estudios económicos y de mercado en la planificación de estrategias militares, para la toma de decisiones políticas, para el estudio de problemas sociales, ambientales, entre otros [2]. Dentro de los conceptos de la teoría de juegos se puede presentar dos tipos de juegos: (1) juegos no

cooperativos y (2) juegos cooperativos. Los juegos no cooperativos de manera particular para la toma de decisiones en problemas donde se presentan conflictos entre “jugadores”. Los juegos de naturaleza cooperativa generalmente buscan el bien común de los “jugadores” teniendo como objetivo mejorar alguna característica y obtener mejores pagos sin que ello implique el perjuicio de algún jugador [5].

Dentro de la ingeniería eléctrica, la Teoría de los Juegos puede llegar a ser una herramienta matemática que permite analizar y modelar un intercambio de energía en redes eléctricas que pueden presentar restricciones físicas que imposibilitan un enlace físico entre generadores y consumidores como es el caso de los alimentadores primarios de energía en las redes de distribución. La configuración topológica de un alimentador primario en un sistema de distribución es un limitante durante el proceso de intercambio de energía. La solución a este problema puede estar en el uso de la teoría de juegos cooperativos, permitiendo el intercambio de energía y motivando la inserción de fuentes renovables de energía (solar, eólica, biomasa, etc.). La aplicación de la herramienta matemática debe permitir generar políticas energéticas que concluyan en el desarrollo de estas energías no convencionales e incentivos a vendedores y compradores reduciendo costos de generación y pagos de la energía a consumidores.

El principal interés del trabajo de investigación no es la gestión del intercambio de energía que se puede basar en un mercado eléctrico, transacciones eléctricas en el mercado, ni las políticas públicas que promuevan el uso de fuentes renovables de energía. El principal aporte que se establece en el trabajo es la herramienta matemática que permita el intercambio de energía basado en la compensación de las pérdidas de energía en la red cuando en el alimentador de medio voltaje se encuentran presentes más fuentes de generación eléctrica.

El documento se divide en siete secciones. En la sección I se presenta una breve introducción al trabajo de investigación, en las secciones II y III se describen conceptos de Smart Grids, alimentadores primarios en redes de medio voltaje y la teoría de los juegos. En la sección IV se presenta el algoritmo de intercambio de energía, en la sección V se analiza el caso de estudio de alimentadores primarios urbanos de una Empresa Eléctrica de Distribución, la simulación y sus resultados se muestran en la sección VI, para por último en la sección VII presentar las debidas conclusiones.

## II. REDES DE MEDIO VOLTAJE – ALIMENTADORES PRIMARIOS

Se considera una red de medio voltaje aquella cuyo valor está comprendido entre 0,6 kV a 40 kV. Valores típicos de redes de medio voltaje son de 22 kV, 12.7 kV, 13.8 kV, 6.9 kV en la mayoría de las Empresas Eléctricas de Distribución del Ecuador [6] [7].

Un sistema de distribución generalmente está constituido

por una subestación de distribución que reduce los niveles de voltaje de subtransmisión de 69 kV a niveles de medio voltaje de 22 kV. La subestación eléctrica es el punto de enlace entre la energía proveniente de las centrales de generación, a través de las líneas de transmisión y subtransmisión y las redes de distribución enlazados a los consumidores.

Un alimentador primario, generalmente radial, parte de la subestación de distribución y recorre una región poblada (urbana o rural). Los consumidores se pueden conectar a la red de distribución a través de las estaciones de transformación en un nivel de medio voltaje, permitiendo el desarrollo de las actividades que demanda la sociedad mediante el uso de la energía eléctrica.

La totalidad de individuos conectados a un alimentador primario son consumidores en medio voltaje, y el flujo de potencia se realiza en una sola dirección, desde la subestación hacia los transformadores de distribución conectados a las cargas eléctricas (figura 1). Las redes eléctricas de distribución en la actualidad poseen poca o ninguna inyección de energía en los puntos de las estaciones de transformación. La configuración prácticamente radial de los alimentadores limita los enlaces físicos que pudieran existir entre los transformadores de distribución.

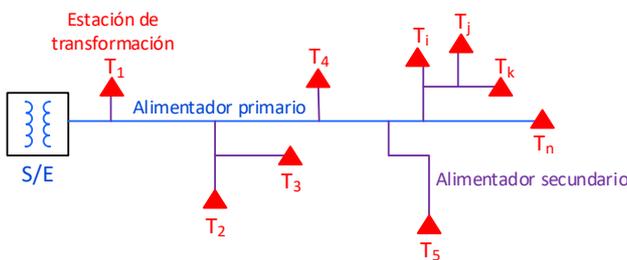


Figura 1: Esquema de un alimentador de distribución convencional.

En un contexto de un Sistema de Distribución Inteligente, se prevé la incorporación de fuentes de energía que pueden transformar a los consumidores en fuentes de energía capaces de realizar “transacciones de energía eléctrica” en un “mercado eléctrico” que, aunque en algunos casos no se pueda realizar el intercambio físico de energía, si permita un intercambio cooperativo de energía con el objetivo de minimizar las pérdidas de energía eléctrica en la red. En el sistema inteligente la DMS (Distribution Management System) será la encargada de la gestión del intercambio y de todos los procesos de negociación es por ello que una red de comunicación y datos es el sistema principal que permitirá la interacción entre fuentes y cargas eléctricas.

El término de “prosumidor” va tomando relevancia en el contexto de las Smart Grids. Un cliente (consumidor) del sistema eléctrico puede convertirse en un elemento activo capaz de tomar decisiones en el marco del intercambio de energía, pudiendo participar en la producción de electricidad.

La concesión de los Sistemas de Distribución Inteligentes presenta desafíos en cuanto a la incorporación de tecnologías, el procesamiento de datos, el control y operación de la red de

distribución eléctrica, etc. La unión de todos estos elementos debe permitir que la red eléctrica sea capaz de: llevar a cabo sus procesos de manera autónoma, tomar decisiones en el instante correcto, mejorar la gestión del mantenimiento, aprovechar los recursos energéticos renovables disponibles en la zona de influencia, permitir el desarrollo de energías limpias y amigables al ambiente, mejorar los índices de calidad y confiabilidad del servicio eléctrico. Cabe recalcar que el uso o no de las “Energías Renovables No Convencionales” (ERNC) no es el limitante en una generación distribuida, porque pequeños motores de combustión interna (diésel, gasolina, etc.) pueden estar presentes, y lo están en sistemas auxiliares de generación; pero las políticas públicas de algunos países van encaminadas al uso de ERNC en los sistemas de distribución modernos.

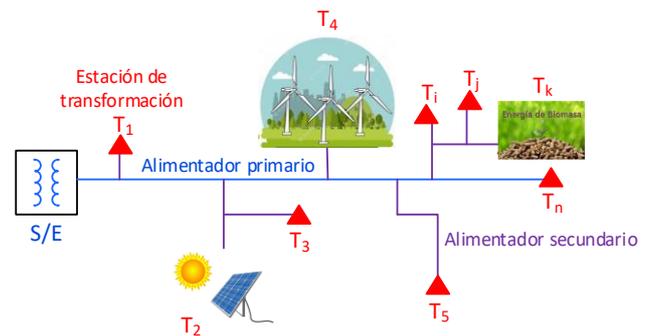


Figura 2: Esquema de un alimentador de distribución con la incorporación de fuentes de energía.

La incorporación de la generación distribuida, donde las energías renovables pasan a jugar un papel protagónico, puede darse en principio en cualquier punto del sistema ya sea en medio o bajo voltaje, (figura 2). Las redes de distribución, en este nuevo sistema, se podría decir que pasan a ser redes “activas”.

### III. JUEGOS COOPERATIVOS

El matemático John Von Neumann y el economista Oskar Morgenstern, en la década de 1930, desarrollaron la Teoría de los Juegos con el objetivo de realizar análisis económicos en procesos de negociación.

En la teoría de los juegos se establece el comportamiento de cada “jugador” y la forma en que compite por el premio o pago. Un pago colectivo ocurre cuando la naturaleza del juego es cooperativo, para ello los jugadores buscan la manera de formar coaliciones mediante la agrupación de algunos o todos los individuos partícipes del juego, siendo el objetivo final el “bien común” con mejores pagos.

Un juego cooperativo se define como un par  $(N, v)$  formado por un conjunto finito  $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  y una función  $v: 2^N \rightarrow \mathfrak{R}$  que asigna a cada subconjunto  $S$  de  $N$  un número real  $v(S)$  con la condición de que  $v(\emptyset) = 0$  [8].

En los juegos de carácter cooperativo los “jugadores”

poseen la suficiente información para tomar la decisión de formar o no coaliciones que llevan a un resultado final de posibles combinaciones de ganancias y pérdidas de cada participante del juego. Cada jugador tiene pleno conocimiento del juego y de sus oponentes, conoce a detalle las reglas del juego, preferencias y creencias de los jugadores, retribuciones de cada oponente y lo que cada participante puede o no hacer.

El jugador tiene un criterio racional para seleccionar lo que le represente mayor beneficio o utilidad. El equilibrio de Nash establece que una decisión tomada no puede empeorar el premio o pago de uno de los jugadores, entonces, en un juego cooperativo, al formar las coaliciones, se busca maximizar los beneficios de cada jugador sin que ello implique un perjuicio de alguno de ellos, lo que se denomina en la teoría de los juegos la orden de Pareto. [8] [9]

El premio o pago del juego se puede establecer utilizando índices, tales como, el valor de Shapley, el índice de Banzhaf o cualquier otro índice que permita determinar un pago justo a cada individuo que participó en la coalición [10].

#### IV. ALGORITMO DE INTERCAMBIO DE ENERGÍA

El intercambio cooperativo de energía está basado en el algoritmo que se presenta en [2] y sobre el cual se ha modificado la coalición de las microrredes eléctricas al considerar la posición geográfica de las mismas que, para el caso de un sistema eléctrico práctico, no cambian en el tiempo, al igual que la topología y demás restricciones geográficas y técnicas del sistema. Las microrredes a las que se hacen referencia corresponderán a las estaciones de transformación (transformadores) conectados a un alimentador de un sistema de distribución.

El primer enfoque que se tiene en cuenta antes de realizar el proceso de intercambio cooperativo es considerar que, en el conjunto de microrredes, la potencia de generación y demanda se encuentra entre los valores de 5 kVA a los 400kVA, que son valores comerciales y reales de las estaciones de transformación en este tipo de redes. Esta primera consideración hace que el algoritmo sea más eficiente al considerar pérdidas que no sobrepasan un porcentaje adecuado de los kVA.

La segunda restricción para considerar es que no es posible realizar una gran coalición, lo que define una distancia umbral (máxima distancia que podrían tener dos estaciones de transformación para que se realice la coalición). Esto permite que el proceso de cálculo y el intercambio de energía entre microrredes que superan esta distancia umbral en la práctica se vean imposibilitados de ser realizadas.

Esta distancia umbral generalmente se encuentra determinada por: el flujo de potencia por el alimentador, calibre del conductor y la longitud entre cada estación de transformación; estos datos (algunos de ellos empíricos) permiten calcular la pérdida de energía máxima que se podría tener presente en la red de distribución.

El modelo plantea considerar un alimentador primario en medio voltaje al cual se encuentran conectados los transformadores de distribución quienes jugaran el papel de microrredes eléctricas (MG). El alimentador se encuentra caracterizado por el tipo de conductor, el número de fases, el número de estaciones de transformación conectadas, las distancias entre transformadores, la posición espacial de cada transformador, la subestación de la que se deriva, entre otras características.

En un instante de tiempo  $t_o$ , la “ $k$ -ésima” microrred ( $MG_k$ ) posee una potencia de demanda ( $D_k$ ) y una potencia de generación ( $P_k$ ). El excedente de la potencia ( $Q_k$ ) define a la  $MG_k$  como vendedora ( $+Q_k$ ) o compradora ( $-Q_k$ ) de energía.

$$Q_k = P_k - D_k \quad (1)$$

En el tiempo  $t_o$  cada transformador se encuentra conectado al alimentador de distribución, quien a su vez se encuentra conectado a la subestación eléctrica. Cada estación de transformación actúa como la MG, de esta manera tiene la capacidad de comprar o vender energía al sistema siendo la única interconexión entre ellas el alimentador de distribución en medio voltaje (figura 3).

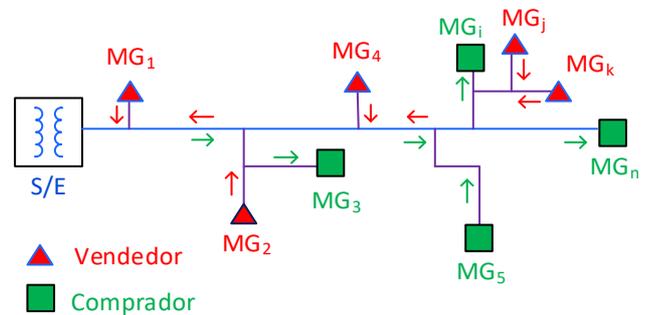


Figura 3: Sistema de distribución. Modelo de intercambio cooperativo de energía.

En el intercambio de energía entre la S/E y la  $MG_k$ , las pérdidas de potencia en las que incurre se representan por (2) [2]:

$$P_{p_k} = R_{SE-k} I^2 + \beta P_k(Q_k) \quad (2)$$

$R_{SE-k}$ : Resistencia [en  $\Omega$ ] del conductor del tramo del alimentador que une a la S/E y la  $MG_k$ .

$I$ : Corriente eléctrica [en A] que circula en el conductor,

$\beta$ : coeficiente de pérdidas en el transformador de la S/E,

$P_k(Q_k)$ : Flujo de potencia entre la S/E y  $MG_k$ .

Las pérdidas de potencia que se incurre, para el flujo de potencia entre una  $MG_i$   $i \in N_b$  y otra  $MG_j$   $j \in N_s$  se puede determinar de la ecuación (3) [2]:

$$P_{p_{ij}} = R_{ij} I_{ij}^2 \quad (3)$$

$R_{ij}$ : Resistencia total [en  $\Omega$ ] del conductor del tramo del alimentador que une la  $MG_i$  con la  $MG_j$ .

Conocidas las pérdidas, los pagos no cooperativos a cada  $MG_k$  perteneciente a la “ $j$ -ésima” coalición se determina de:

$$u(\{k\}) = -w_k \cdot P_{pk} \quad (4)$$

$w_k$  es el precio de la energía de la  $MG_k$  y  $P_{pk}$  es el flujo de potencia entre las  $MG$ s. El pago por el beneficio de la coalición, para cada  $MG$ , será la ecuación (5):

$$\phi_k = \alpha_k \cdot v(S_k) \quad (5)$$

$v(S_k)$  se determina involucrando todas las posibles coaliciones presentes en un momento dado y las pérdidas generadas por el mismo.

$$v(S_k) = -\left(\sum_{i \in S_s} w_{ij} \cdot P_{p_{ij}} + \sum_{k \in S_s} w_k \cdot P_{pk} + \sum_{l \in S_b} w_l \cdot P_{pl}\right) \quad (6)$$

Los pesos  $\alpha_k$  se calculan de la relación del pago individual al pago conjunto de las  $MG$ s [11]:

$$\alpha_k = \frac{u(\{k\})}{\sum_{j \in S_i} u(\{j\})} \quad (7)$$

Basado en este cálculo de pérdidas, al algoritmo en [2] se le añaden restricciones para la simulación y el mismo se resume en los siguientes pasos:

#### Estado Inicial del Sistema de Distribución

La transferencia de energía solo se realiza entre la subestación eléctrica y las estaciones de transformación, quienes actúan solamente como compradoras. Se tiene un pago individual para cada  $MG$ .

#### Elección de vecinos

Se divide a la red en dos subconjuntos disjuntos de compradores y vendedores,  $S = S_s \cup S_b$  con  $S_s \cap S_b = \emptyset$ .

Los transformadores compradores buscan a sus posibles transformadores vendedores en su vecindad. Se forma un primer conjunto de pares vendedor y comprador más cercanos.

#### Formación de coaliciones

Cada  $MG_k$  interactúa con la S/E. El conjunto de pares busca nuevos aliados para formar otro conjunto de coaliciones. En cada iteración en el proceso de formar coaliciones se determina un vector de pagos. Se establecen dos procesos:

- $F = \text{Fusión}(S)$ ; las coaliciones en  $S$  deciden fusionarse con sus vecinos mediante incentivos para mejorar sus pagos.
- $D = \text{División}(F)$ ; las coaliciones en  $D$  deciden

dividirse basados en la orden de Pareto.

El proceso de Fusión – División termina, si cada coalición no puede añadir más vecinos para seguir realizando el proceso.

#### Intercambio de energía

El pago que recibe cada  $MG$  presente en la red depende de minimizar las pérdidas de potencia en la red de distribución, este factor es el beneficio colectivo de los jugadores en el juego cooperativo. Según la Orden de Pareto se selecciona la coalición que ha maximizado sus beneficios y sobre la misma se realiza la transferencia de energía entre los compradores, vendedores y la subestación eléctrica.

El aporte principal al algoritmo de intercambio cooperativo es la introducción de la heurística con restricciones de distancia y potencia de las estaciones de transformación, lo que permite reducir el número de iteraciones que se necesitan para formar las coaliciones. El cálculo de las pérdidas usando solo el flujo de potencia activa, la resistencia de los conductores y el factor de peso de la ecuación (7) [11] para el cálculo de las pérdidas eléctricas constituyen una contribución adicional.

El proceso de intercambio empieza cuando las  $MG$ s vendedoras selecciona a las  $MG$ s compradoras con mayor demanda, siendo la primera prioridad abastecer a dicha carga.

El algoritmo descrito es codificado en MatLab mediante subrutinas que: manejan los datos de entrada que son ingresados desde un archivo Excel, procesan la información y restricciones del sistema, calculan las distancias entre cada  $MG$  y con la S/E, realizan el proceso de coalición, generan el vector de pagos y determinan la solución óptima cuyos resultados nuevamente son presentados en un archivo Excel.

## V. CASO ESTUDIO

Para el proceso de simulación se ha seleccionado una red de distribución de una Empresa Eléctrica Distribuidora que permita observar los beneficios de utilizar la herramienta matemática descrita en la sección anterior.

Se realizará la simulación de tres alimentadores primarios de la S/E 01 pertenecientes a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS) de la ciudad de Cuenca-Ecuador. Las características semejantes de cada sistema de distribución serán:

- Potencia de la S/E, 20 MW con una constante de pérdidas de 0,005 y un precio de la energía de 0,0933 \$/kW.
- Los alimentadores son del tipo subterráneo y se encuentran ubicados en el casco urbano de la ciudad de Cuenca.
- Resistencia del conductor de 1,35  $\Omega/km$ , voltaje del alimentador trifásico primario de 22 kV y de los alimentadores secundarios monofásicos de 12,7 kV.
- Distancias umbrales de 500 m, 150 m y 1000 m para

- los alimentadores 0101, 0102 y 0103 respectivamente.
- Cada transformador perteneciente a la EERCS se considera como una MG compradora, mientras que cada transformador particular presente en la red se considera una MG vendedora, por lo tanto, hay un número  $n$  de vendedores y un número  $m$  de compradores en cada alimentador.
- Los datos de cada MG del alimentador 0101 correspondiente a la potencia de generación, demanda, precio de la energía, y potencia de transformador instalado pueden ser cambiados, dependiendo del caso de estudio. Se considera un factor de potencia unitario para los efectos del cálculo y despreciar los flujos de potencia reactiva en la red de Distribución.

Los valores comerciales de las estaciones de transformación se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1:** Valores comerciales de voltaje y potencia de transformadores para redes de cada MG.

<i>Monofásicos</i>	<i>Trifásicos</i>
5 kVA	30 kVA
10 kVA	45 kVA
15 kVA	50 kVA
25 kVA	60 kVA
37,5 kVA	75 kVA
50 kVA	100 kVA
75 kVA	150 kVA
	200 kVA
	300 kVA
	350 kVA
	400 kVA

Para el alimentador 0101 se tienen 17 estaciones de transformación que se identificarán como microrredes compradoras, mientras que 12 transformadores serán microrredes vendedoras. En el caso del alimentador 0102 se tiene 27 transformadores considerados microrredes compradoras, y 16 transformadores como microrredes vendedoras. Por último, en el alimentador 0103 se considera microrredes compradoras a 8 estaciones de transformación, mientras que 4 transformadores serán microrredes vendedoras.

Se considera adicionalmente que el precio de compra de energía es de 0,093 \$/kWh mientras que se establece para la venta un precio de 0,400 \$/kWh. Los valores son promedios de los pliegos tarifarios de empresas eléctricas de diferentes países de Latinoamérica y el costo de producir energías limpias como solar, eólica, biomasa entre otros [12] [13].

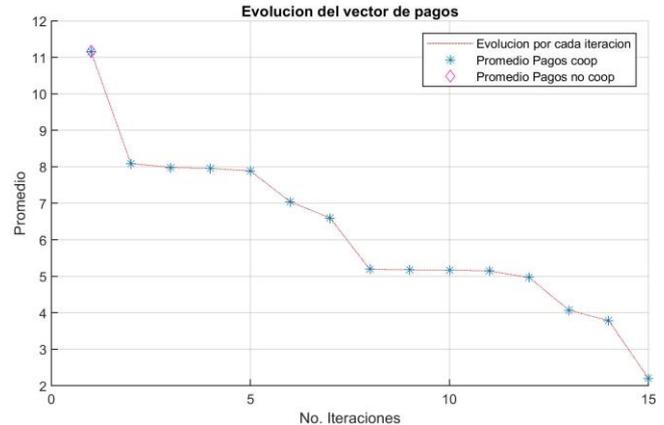
En el proceso de cálculo se establece que cualquier excedente de potencia es absorbido por la S/E de distribución con el objetivo de cumplir con el balance de potencia.

## VI. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En la figura 4 se presenta el proceso de evolución del promedio de pérdidas referenciado al vector de pagos en

función del número de iteraciones durante la formación de coaliciones en el alimentador 0101.

La evolución del vector de pagos de cada MG en cada iteración, por ejemplo, que la MG<sub>2</sub> mejora su pago en la segunda iteración y conserva el mismo hasta la última iteración mientras que otras MGs mejoran sus pagos en siguientes iteraciones. Se cumple las reglas de Fusión – División y el equilibrio de Nash en el juego cooperativo.



**Figura 4:** Evolución del promedio de pérdidas y vector de pagos en función del número de iteraciones del alimentador 0101.

En la tabla 2 se tiene el caso no cooperativo del alimentador 0101, en este estado cada estación de transformación compradora o vendedora realiza las transacciones energéticas exclusivamente con la subestación eléctrica.

**Tabla 2:** Datos del flujo de potencia y el costo de las pérdidas para el alimentador 0101 – estado no cooperativo.

$MG_k$	$Q_k$ (kW)	$L_{k_{\text{optimo}}}$ (kW)	$P_{PS/E-MG}$ (kW)	Costo por pérdidas (\$)
1	-250	251,6235	1,6235	-0,1515
2	275	272,9583	2,0620	-0,8248
3	-160	161,1140	1,1140	-0,1039
4	50	49,7063	0,2957	-0,1183
5	-60	60,3754	0,3754	-0,0350
6	-50	50,2989	0,2989	-0,0279
7	62,5	62,0932	0,4101	-0,1640
8	50	49,6828	0,3196	-0,1279
9	-37,5	37,7251	0,2251	-0,0210
10	-50	50,3223	0,3223	-0,0301
11	350	344,6401	5,5007	-2,2003
12	-400	407,1567	7,1567	-0,6677
13	150	148,3830	1,6442	-0,6577
14	-100	100,9309	0,9309	-0,0869
15	-50	50,3582	0,3582	-0,0334
16	125	124,0095	1,0014	-0,4006
17	-160	161,4363	1,4363	-0,1340
18	150	148,7120	1,3039	-0,5216
19	-100	100,7742	0,7742	-0,0722
20	355	349,3864	5,7670	-2,3068
21	-400	407,2399	7,2399	-0,6755
22	-175	177,0270	2,0270	-0,1891
23	-400	408,1487	8,1487	-0,7603
24	50	49,6554	0,3477	-0,1391
25	-30	30,1879	0,1879	-0,0175

26	50	49,6472	0,3560	-0,1424
27	-75	75,6039	0,6039	-0,0563
28	-45	45,2963	0,2963	-0,0276
29	125	123,8600	1,1554	-0,4621

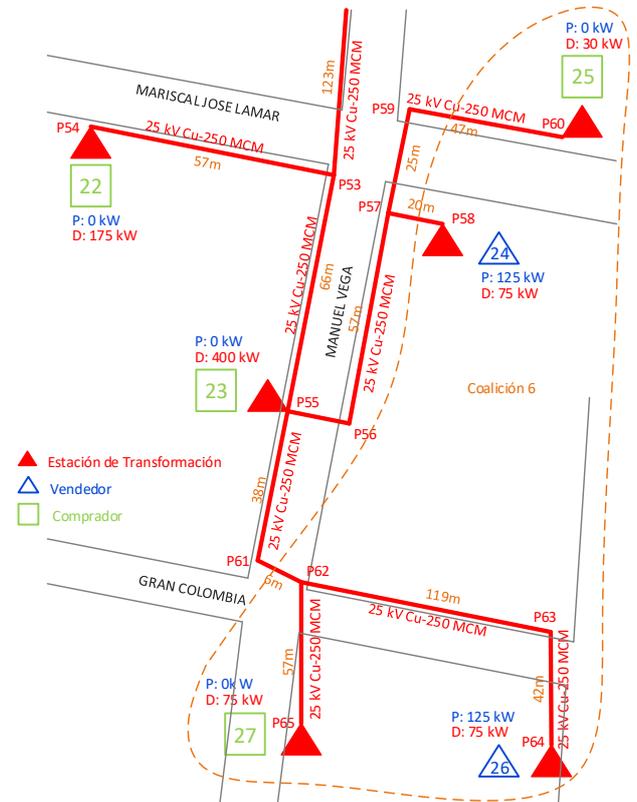
Las pérdidas generadas corresponden al flujo de potencia que viaja entre la S/E y cada MG sea esta compradora o vendedora. La potencia  $L_{k_{\text{óptimo}}}$  corresponde a la potencia que entrega o recibe la S/E para satisfacer la potencia de generación o demanda de la  $MG_k$  más las pérdidas generadas en el intercambio de energía.

Para el caso cooperativo con la formación de coaliciones, el resultado se presenta en la tabla 3 para el alimentador 0101, donde se visualiza la formación de las coaliciones y las pérdidas de potencia que se generan por el proceso. Se muestran las pérdidas de potencia generadas por el intercambio de energía entre MGs o las pérdidas generadas por el intercambio de energía entre la  $MG_k$  y la S/E.

**Tabla 3:** Datos de la formación de las coaliciones y pérdidas para el alimentador 0101 en el juego cooperativo de intercambio de energía.

$MG_s$	$MG_b$	$P_{P_s-b}$ (kW)	$P_{P_s/E-MG_s}$ (kW)	$P_{P_s/E-MG_b}$ (kW)
2	1	0,618402976	0	0
2	0	0	0	0,13472494
0	22	0	0	2,0270149
0	23	0	0	8,14869721
16	17	0,010591507	0	0
0	17	0	0,20602056	0
0	3	0	2,06202344	0
13	14	0,082776178	0	0
13	15	0,020711178	0	0
13	0	0	0	0,00052046
20	21	0,816572778	0	0
18	21	0,046517744	0	0
18	19	0,220179788	0	0
18	0	0	0	0,02236451
4	5	0,021356674	0	0
7	5	0,003870836	0	0
7	6	0,095915435	0	0
7	0	0	0	0,01308392
24	27	0,039279384	0	0
26	27	0,011472558	0	0
26	25	0,011369405	0	0
0	25	0	0,02649262	0
29	12	0,142787436	0	0
11	12	1,056487627	0	0
11	10	0,034574708	0	0
11	28	0,007862742	0	0
8	28	0,011927061	0	0
8	9	0,022033608	0	0
0	9	0	0,04572407	0

La figura 5 presenta la coalición 6 efectuada entre las Microrredes 24, 25, 26 y 27 en el intercambio cooperativo del alimentador 0101.



**Figura 5:** Diagrama de la coalición de Microrredes eléctricas. Coalición 6 de estaciones de transformación del alimentador 0101.

La tabla 4 en cambio muestra las potencias de generación y de demanda de cada MGs después de haber alcanzado el óptimo de Pareto que establece que ninguna MG puede mejorar más su pago a perjuicio de empeorar el mismo de otra MG.

La potencia de generación y de demanda contienen ya las pérdidas que se generan durante el intercambio cooperativo. Se establece el balance de potencia de manera que se cumpla el principio de conservación de la energía.

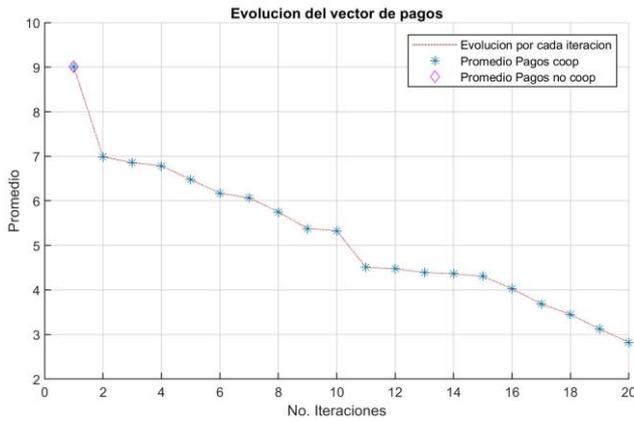
En el proceso de intercambio solo se ha considerado el flujo de potencia activa, puesto que la potencia que consumen las cargas en un alimentador es de naturaleza residencial y comercial. En el caso de un alimentador industrial generalmente son circuitos expresos a los cuales solo se conecta esa carga según las políticas de las Empresas de Distribución.

Una vez que se ha llegado a obtener el estado óptimo de intercambio de energía, se puede apreciar como el promedio de pérdidas de energía disminuye según lo esperado. Las restricciones que se establecieron en el algoritmo presentado en la sección IV permitieron obtener un número menor de iteraciones para llegar a un estado óptimo donde ninguna MG ha empeorado su estado.

**Tabla 4:** Potencias de generación y demanda para las MGs vendedoras y compradoras respectivamente en el alimentador 0101.

$MG_s$	$P_G$ (kW)	$MG_b$	$P_D$ (kW)
2	275,0000	1	250,618403
4	50,0000	3	162,0620234
7	62,5000	5	60,02522751
8	50	6	50,09591544
11	350	9	37,56775768
13	150	10	50,03457471
16	125	12	401,1992751
18	150	14	100,0827762
20	355	15	50,02071118
24	50	17	160,2166121
26	50	19	100,2201798
29	125	21	400,8630905
		22	177,0270149
		23	408,1486972
		25	30,03786203
		27	75,05075194
		28	45,0197898

La tabla 2.2 del Anexo 2 presenta la evolución en el vector de pagos para el alimentador 0102 por cada iteración; mientras que la figura 6 muestra gráficamente la evolución antes citada.



**Figura 6:** Evolución del promedio de pérdidas en función del número de iteraciones del alimentador 0102.

La tabla 5 presenta los datos del estado no cooperativo del alimentador de medio voltaje 0102; al igual que el alimentador 0101, se presenta básicamente las potencias de demanda de cada MG el flujo de potencia y las pérdidas de potencia presentes y el costo por pérdidas de energía del sistema.

**Tabla 5:** Datos del flujo de potencia y el costo de las pérdidas para el alimentador 0102 – estado no cooperativo.

$MG_k$	$Q_k$ (kW)	$L_{k, \text{optimo}}$ (kW)	$P_{PS/E-MG}$ (kW)	Costo por pérdidas (\$)
1	-400	403,9803	3,9803	-0,3714
2	-300	303,1779	3,1779	-0,2965
3	-250	252,9462	2,9462	-0,2749
4	175	173,3218	1,7023	-0,6809
5	-150	151,3907	1,3907	-0,1298
6	37,5	37,2751	0,2264	-0,0906

7	-45	45,2849	0,2849	-0,0266
8	25	24,8580	0,1429	-0,0572
9	162,5	161,0147	1,5053	-0,6021
10	-60	60,3981	0,3981	-0,0371
11	-125	126,0773	1,0773	-0,1005
12	-60	60,4043	0,4043	-0,0377
13	45	44,7177	0,2845	-0,1138
14	-75	75,5477	0,5477	-0,0511
15	87,5	86,8283	0,6788	-0,2715
16	125	123,8824	1,1322	-0,4529
17	-70	70,5145	0,5145	-0,0480
18	125	123,8725	1,1424	-0,4570
19	-75	75,5768	0,5768	-0,0538
20	-50	50,3425	0,3425	-0,0320
21	-25	25,1489	0,1489	-0,0139
22	30	29,8182	0,1832	-0,0733
23	-75	75,5998	0,5998	-0,0560
24	75	74,4109	0,5955	-0,2382
25	-70	70,5547	0,5547	-0,0518
26	-75	75,6133	0,6133	-0,0572
27	-45	45,3127	0,3127	-0,0292
28	-50	50,3652	0,3652	-0,0341
29	-45	45,3171	0,3171	-0,0296
30	200	197,2878	2,7735	-1,1094
31	-100	100,9661	0,9661	-0,0901
32	-160	161,7285	1,7285	-0,1613
33	-75	75,5973	0,5973	-0,0557
34	-200	202,6146	2,6146	-0,2439
35	75	74,4079	0,5985	-0,2394
36	140	138,5487	1,4745	-0,5898
37	25	24,8513	0,1497	-0,0599
38	-30	30,1880	0,1880	-0,0175
39	-50	50,2973	0,2973	-0,0277
40	-150	151,3296	1,3296	-0,1241
41	275	271,7780	3,2825	-1,3130
42	-30	30,1742	0,1742	-0,0163
43	65	64,5283	0,4763	-0,1905

El caso cooperativo del juego se muestra en la tabla 6, donde se observa las coaliciones que se realizaron y las MGs que pertenecen a esa coalición, así como las pérdidas en que se incurre durante el intercambio cooperativo de energía.

**Tabla 6:** Datos de la formación de las coaliciones y pérdidas para el alimentador 0102 para el juego cooperativo de intercambio de energía.

$MG_s$	$MG_b$	$P_{ps-b}$ (kW)	$P_{PS/E-MG_s}$ (kW)	$P_{PS/E-MG_b}$ (kW)
0	1	0	0	3,98034142
0	2	0	0	3,17789591
22	21	0,000478119	0	0
22	0	0	0	0,02605354
0	32	0	0	1,72853171
0	39	0	0	0,29731878
43	0	0	0	0,47625544
13	0	0	0	0,28448674
9	11	0,168891662	0	0
9	10	0,01536646	0	0
0	10	0	0,12566248	0
15	12	0,04090569	0	0
15	0	0	0	0,16237645
16	14	0,053617175	0	0
16	17	0,023892347	0	0

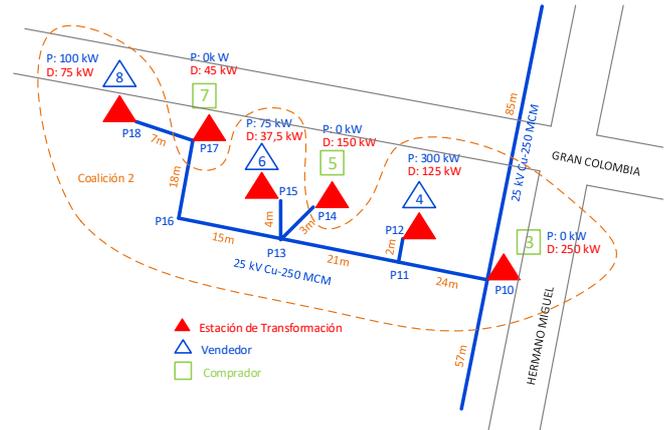
0	17	0	0,11355502	0
18	19	0,028909187	0	0
18	20	0,012851829	0	0
18	0	0	0	0,00020991
24	23	0,006463154	0	0
0	23	0	3,248E-05	0
0	25	0	3,17789591	0
0	27	0	2,94617772	0
30	31	0,027413509	0	0
30	26	0,015422212	0	0
30	28	0,001719927	0	0
0	28	0	0,15375587	0
0	29	0	1,70233627	0
41	40	0,013726407	0	0
41	42	0,000549137	0	0
41	0	0	0	0,70520406
36	34	0,029541556	0	0
37	34	0,000954109	0	0
35	34	0,002676042	0	0
35	33	0,003482232	0	0
0	33	0	0,22401643	0
0	38	0	2,94617772	0
4	3	0,067491331	0	0
6	3	0,00595037	0	0
8	3	0,004531244	0	0
0	3	0	0,06742936	0
0	5	0	3,17789591	0
0	7	0	2,94617772	0

La potencia vendida y comprada por las respectivas MGs se presenta en la tabla 7.

**Tabla 7:** Potencias de generación y demanda para las MGs vendedoras y compradoras respectivamente en el alimentador 0102.

$MG_s$	$P_G$ (kW)	$MG_b$	$P_D$ (kW)
4	175,0000	1	403,980341
6	37,5000	2	303,177896
8	25,0000	3	250,145402
9	162,5	5	153,177896
13	45	7	47,9461777
15	87,5	10	60,1410289
16	125	11	125,168892
18	125	12	60,0409057
22	30	14	75,0536172
24	75	17	70,1374474
30	200	19	75,0289092
35	75	20	50,0128518
36	140	21	25,0004781
37	25	23	75,0064956
41	275	25	73,1778959
43	65	26	75,0154222
		27	47,9461777
		28	50,1554758
		29	46,7023363
		31	100,027414
		32	161,728532
		33	75,2274987
		34	200,033172
		38	32,9461777
		39	50,2973188
		40	150,013726
		42	30,0005491

La figura 7 muestra las estaciones de transformación que forman parte del caso estudio que realizaron la coalición. Las microrredes 3, 4, 6 y 8 realizan el intercambio de energía, mientras que las microrredes 7 y 5 compran la energía directamente a la subestación de distribución.



**Figura 7:** Diagrama de la coalición de Microrredes eléctricas. Coalición de estaciones de transformación del alimentador 0102.

El análisis que sigue es válido para cualquier alimentador, considerando el alimentador 0102 de manera que se pueda interpretar los resultados obtenidos del juego cooperativo para el intercambio de energía y visualizar la ventaja en la disminución de las pérdidas de energía y la mejora en los pagos en las estaciones de transformación.

En el estado no cooperativo (tabla 5) cada transformador que actúa como demanda en el alimentador, compra su energía a la S/E, mientras que cada estación de transformación que genera energía en el alimentador vende la misma a la S/E. Cada  $MG_k$  asume las pérdidas por ese intercambio y paga el respectivo precio por las pérdidas de potencia que se generan.

En el anexo 3, la figura 3.1 muestra la red eléctrica de medio voltaje del alimentador 0102, se identifica las MGs compradoras y vendedoras, la potencia de generación y demanda en cada microrred. De igual manera en la figura 3.1 se muestra las coaliciones realizadas en el intercambio cooperativo de energía.

Para un instante de tiempo, las MGs tiene la suficiente información del sistema, de sus vecinos por lo que se empiezan a producir coaliciones (tabla 6) llegando a un óptimo formando las siguientes coaliciones:

- Coalición 1: Las MGs que forman el subconjunto son 9, 10 y 11. La  $MG_9$ , vende su energía a sus vecinos  $MG_{10}$  y  $MG_{11}$  que actúan como compradoras. La  $MG_{10}$  compra a la S/E el faltante de energía satisfaciendo así su demanda.
- Coalición 2: En este caso la  $MG_3$  compra la energía a las generadoras  $MG_4$ ,  $MG_6$  y  $MG_8$ . El faltante de energía se compra a la S/E de esta manera  $MG_3$

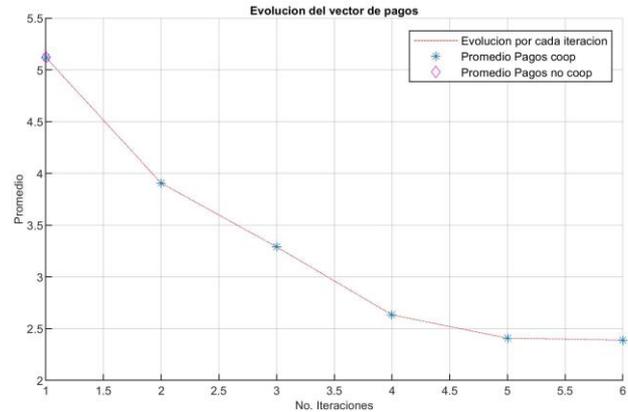
satisface su demanda.

- Coalición 3: La  $MG_{12}$  compra energía a  $MG_{15}$ , el excedente de energía de  $MG_{15}$  es vendido a la S/E, se satisface de esta manera el balance de potencia.
- Coalición 4: La  $MG_{16}$  vende su energía a las  $MG_{14}$  y  $MG_{17}$ . El faltante de energía en  $MG_{17}$  es comprado a la S/E.
- Coalición 5: La  $MG_{18}$  vende su energía a las  $MG_{19}$  y  $MG_{20}$ . El excedente de energía en  $MG_{18}$  es vendido a la S/E para llegar al equilibrio de energía.
- Coalición 6: La generadora  $MG_{22}$  entrega energía la  $MG_{21}$  que ve satisfecha su demanda. El excedente de energía en  $MG_{22}$  es entregada a la S/E.
- Coalición 7: La  $MG_{23}$  compra energía a  $MG_{24}$ . El faltante de energía de la compradora se obtiene de la S/E.
- Coalición 8: Las generadoras  $MG_{35}$ ,  $MG_{36}$  y  $MG_{37}$  venden la energía a la microrred  $MG_{34}$  satisfaciendo su demanda. Por otro lado, la  $MG_{35}$  también vende energía a la  $MG_{33}$ , el faltante de energía en la microrred  $MG_{33}$  es comprado de la S/E.
- Coalición 9: La microrred generadora  $MG_{30}$  vende su energía a las microrredes compradoras  $MG_{26}$ ,  $MG_{28}$  y  $MG_{31}$ . El faltante de energía en la microrred  $MG_{28}$  es comprado a la S/E.
- Coalición 10: La generadora  $MG_{41}$  vende su energía a las microrredes  $MG_{40}$  y  $MG_{42}$ , el excedente de energía en  $MG_{41}$  es vendido a la S/E.
- Las microrredes generadoras,  $MG_{43}$  y  $MG_{13}$  no lograron coalicionar con ninguna otra  $MG_k$ , vendiendo su energía exclusivamente a la S/E.
- Las microrredes de carga:  $MG_1$ ,  $MG_2$ ,  $MG_{32}$ ,  $MG_{39}$ ,  $MG_{25}$ ,  $MG_{27}$ ,  $MG_{29}$ ,  $MG_{38}$ ,  $MG_5$  y  $MG_7$  no lograron coalicionar de igual manera con ninguna otra microrred teniendo que comprar la energía directamente a la S/E.

De esta manera queda satisfecha la demanda de energía y el balance de potencia entre generación, carga y pérdidas de energía.

De la tabla 11 se observa que para el caso del alimentador primario 0102 las pérdidas de potencia se reducen en un 32% en el intercambio cooperativo con respecto al intercambio no cooperativo.

La figura 8 muestra el promedio de pérdidas en función del número de iteraciones que refleja a la vez la cantidad de coaliciones que realizan las MGs hasta llegar a obtener el resultado óptimo en el proceso de cálculo de pérdidas y pagos.



**Figura 6:** Evolución del promedio de pérdidas en función del número de iteraciones del alimentador 0103.

La evolución del vector de pagos para el alimentador 0103 permite apreciar en cada iteración el cambio de los pagos que se van realizando a cada MG según sea el caso, manteniéndose constante o mejorando hasta llegar al óptimo de Pareto.

Por último, las tablas 8, 9 y 10 presentan los resultados del juego no cooperativo, del juego cooperativo, la generación y demanda de potencia así como el intercambio de energía entre MGs y la S/E, del alimentador 0103. Se visualizan las pérdidas de potencia que se generaron en el proceso de coalición.

**Tabla 8:** Datos del flujo de potencia y el costo de las pérdidas para el alimentador 0103 – estado no cooperativo.

$MG_k$	$Q_k$ (kW)	$L_{k_{\text{optimo}}}$ (kW)	$P_{PS/E-MG}$ (kW)	Costo por pérdidas (\$) )
1	-150	151,1343	1,1343	-0,1058
2	-96	96,7271	0,7271	-0,0678
3	-320	325,1909	5,1909	-0,4843
4	350	343,6751	6,5276	-2,6111
5	-30	30,1826	0,1826	-0,0170
6	90	89,2073	0,8029	-0,3211
7	-166	167,9868	1,9868	-0,1854
8	340	333,6956	6,5128	-2,6051
9	-75	75,6505	0,6505	-0,0607
10	-89	89,8192	0,8192	-0,0764
11	221	218,7814	2,2527	-0,9011
12	-138	139,3112	1,3112	-0,1223

**Tabla 9:** Datos de la formación de las coaliciones y pérdidas para el alimentador 0103 para el juego cooperativo de intercambio de energía.

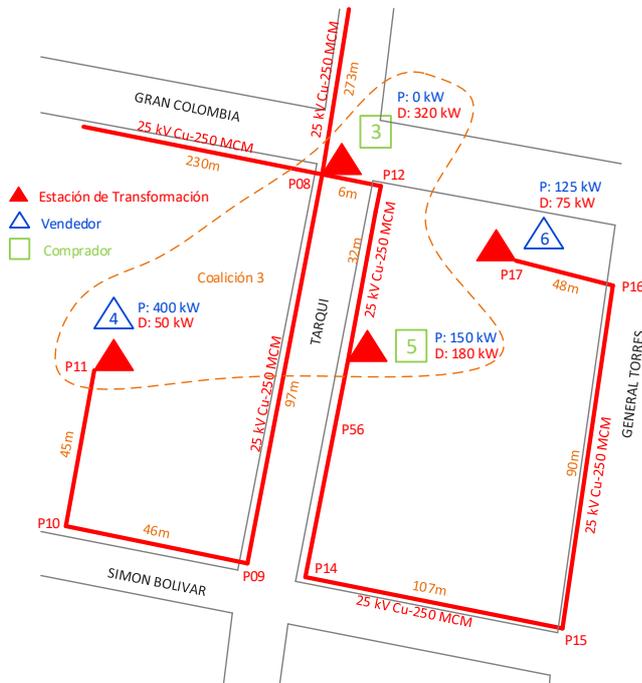
$MG_s$	$MG_b$	$P_{ps-b}$ (kW)	$P_{PS/E-MGs}$ (kW)	$P_{PS/E-MGb}$ (kW)
0	12	0	0	1,31116852
11	1	0,464384148	0	0
11	2	0,10575019	0	0
0	2	0	0,13988463	0
8	7	0,082028201	0	0
8	10	0,023589899	0	0
8	9	0,016753471	0	0
8	0	0	0	0,05514969
4	3	1,609163942	0	0

4	5	0,014272773	0	0
4	0	0	0	0,00826126
6	0	0	0	0,72706996

**Tabla 10:** Potencias de generación y demanda para las MGs vendedoras y compradoras respectivamente en el alimentador 0103.

$MG_s$	$P_G$ (kW)	$MG_b$	$P_D$ (kW)
4	350,0000	1	150,4643841
6	90,0000	2	96,24563482
8	340,0000	3	321,6091639
11	221	5	30,01427277
		7	166,0820282
		9	75,01675347
		10	89,0235899
		12	139,3111685

Un ejemplo del caso estudio de una coalición se muestra en la figura 9 para el alimentador 0103 donde se visualiza a las Microrredes 3, 4 y 5 realizando el intercambio cooperativo de energía. En este caso la Microrred 6 no coaliciona interactuando únicamente con la subestación eléctrica.



**Figura 9:** Diagrama de la coalición de Microrredes eléctricas. Coalición de estaciones de transformación del alimentador 0103.

Mejores resultados se pueden apreciar en el alimentador 0103 donde las pérdidas de potencia se reducen en un 83% cuando las microrredes forman coaliciones para obtener mejores pagos.

En la tabla 11 se presenta el promedio general de pérdidas para los tres alimentadores en estudio, teniendo como principal característica la disminución en el promedio de pérdidas cuando las estaciones de transformación coalicionan entre sí para satisfacer la oferta y demanda de potencia presente en el sistema de distribución.

**Tabla 11:** Resumen del promedio de pérdidas y el porcentaje de reducción de los alimentadores de distribución.

Alimentador	Pérdidas no cooperativas (kW)	Pérdidas cooperativas (kW)	Porcentaje de reducción
0101	1.8373	0.55039	70.04 %
0102	0.99529	0.67313	32.37 %
0103	2.3415	0.37979	83.78 %

## VII. CONCLUSIONES

- La búsqueda de herramientas matemáticas que permitan el intercambio de energía en redes de distribución y en particular en alimentadores primarios, motivado por la inserción de energías alternativas de carácter renovable y de cargas especiales como vehículos eléctricos, lleva a desarrollar métodos y modelos matemáticos que permitan alcanzar ese objetivo.
- La Teoría de los Juegos Cooperativos se presenta como una herramienta para el análisis de microrredes eléctricas, permitiendo un intercambio de energía que conlleva a un beneficio común para la red eléctrica, la disminución de pérdidas de potencia en los conductores de la red y obtener mejores pagos en cuanto a la energía comprada o vendida por cada MG.
- Del análisis de los tres alimentadores primarios obtenidos de la red de distribución de la EERCS se observa la evolución de pagos en pocas iteraciones, debido a las restricciones de distancias y potencia que se ha colocado en el algoritmo de intercambio. Estas restricciones permiten que el proceso de cálculo se acelere para obtener el óptimo de Pareto en un tiempo corto.
- El porcentaje de reducción de pérdidas es significativo cuando se comparan el promedio de pérdidas del juego no cooperativo con el juego cooperativo. Las ventajas de tener cerca la generación de la demanda se ven reflejado en el intercambio cooperativo de energía.
- Aunque se ha desarrollado un flujo de potencia activa, el algoritmo es capaz de adaptarse para determinar también las potencias reactivas en la red, lo cual puede ser de utilidad en el caso de alimentadores cuyos clientes en su mayoría sean del tipo industrial.
- El algoritmo también permite variar los precios de la energía tanto para la venta como para la compra, generando un “mercado eléctrico” que permita realizar transacciones energéticas sin la necesidad que exista un enlace físico entre las microrredes.
- En cualquier escenario de un intercambio de energía

la subestación eléctrica juega un papel importante como el “colchón” que permite compensar el déficit o excedente de energía que pueda tener el sistema de distribución.

## REFERENCIAS

- [1] Sanango J., Desarrollo de un Algoritmo de interrelación para Microrredes de Distribución Eléctrica, Cuenca Junio 2015.
- [2] Saad, W., Han, Z., Poor, H. V., and Basar, T., Game-Theoretic Methods for the smart grid, IEEE Signal Processing Magazine, September 2012.
- [3] León A., Lojano A., Análisis del Intercambio Cooperativo de Energía Eléctrica Adicionando Restricciones en Microrredes Eléctricas, Cuenca 2017.
- [4] Cardoso E., González M., Intercambio de energía eléctrica en baja tensión, implementando un algoritmo de juegos cooperativos, Cuenca abril 2019.
- [5] Saad, W., Han, Z., and Poor, H. V., Coalitional Game Theory for Cooperative Micro-Grid Distribution Networks.
- [6] Resolución Nro. ARCONEL – 018/18, Agencia de Regulación y Control de la Electricidad.
- [7] Regulación Nro. ARCERNR-002/20 “Calidad del servicio de Distribución y comercialización de energía eléctrica”.
- [8] Magaña Nieto, A., Formación de coaliciones en los juegos cooperativos y juegos con múltiples alternativas, Terrasa - Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 1996.
- [9] Fernández Rodríguez, F., Teoría de Juegos: análisis matemático de conflictos Sociedad, ciencia, tecnología y matemáticas, vol. 5, 2005.
- [10] García, R., Juegos Cooperativos, Valor de Shapley y Teorema de Negociación de Nash; OSINERG Oficina de Estudios Económicos, Septiembre 2004.
- [11] Watts, D., Teoría de los Juegos Aplicada al Mercado Eléctrico Chileno. 1998. Santiago de Chile.
- [12] Díaz C., Gómez Y., Silva J., Noriega E S., Estudio comparativo de modelos de mercados eléctricos en países de América Latina, Revista Espacios vol. 38 ISSN: 07981015,2017
- [13] Campo R., Estudio comparativo de modelos de mercado eléctrico, estructura, 2015
- [14] Saad, W., Han, Z., and Poor, H. V., Coalitional Game Theory for Cooperative Micro-Grid Distribution Networks, in Proc. IEEE International Conf. on Comm., Koyto, Japan, vol. May 2011. (Abstract)
- [15] Mondal, A., S. M., Dynamic Coalition Formation in a Smart Grid: A Game Theoretic Approach IEEE, vol. 2013. (Abstract)
- [16] Leiva López, E., SMART GRID: UNA RED ELECTRICA INTELIGENTE, Costa Rica: 2010.
- [17] Sanango J., Samaniego E., Espinoza J.L., Sempértegui R., A study of microgrids through cooperative games including the effect of geographical proximity, IEEE Xplore: 04 December 2017.
- [18] Cabrera J., Veiga M., Arias P., Icaza D., Concepts Theory Applied in Smart Grid, IEEE ANDESCON 2018.
- [19] López J. Study of the present situation of Smart Grids, Universidad e Cantabria, Septiembre 2016.
- [20] Días D., González J., Restrepo H., Isaac I., López G., Esquema de incorporación de las Smart Grids en el Sistema de Potencia de Colombia, Medellín Junio 2011.
- [21] Durán F., La generación distribuida y sus retos frente al nuevo marco legal del mercado eléctrico ecuatoriano, Cuenca 2013.
- [22] Restrepo S., Aproximación a la Teoría de Juegos, Revista Ciencias Estratégicas vol. 17 ISSN: 1794-8347, Medellín diciembre 2009.

## BIOGRAFÍA



**María José Campoverde Campoverde.** Nació en la ciudad de Azogues, provincia del Cañar, el 20 de febrero de 1991. Se graduó de Ingeniera Electrónica en la Universidad Católica de Cuenca sede Azogues en 2014. En el 2020, recibió el título de Ingeniera Eléctrica en la Universidad de Cuenca. Actualmente egresó de la Maestría en Electricidad en la Universidad Politécnica Salesiana. Ejerció profesionalmente en el libre ejercicio en las áreas de telecomunicaciones y Sistemas Eléctricos de Potencia, además se desempeña como docente en la Universidad de Cuenca desde el 2017. Sus áreas de interés son: Los sistemas eléctricos de potencia, las protecciones, las microrredes, la planificación eléctrica y las telecomunicaciones.



**Jorge Luis Rojas Espinoza.** Nació en la ciudad de Azogues, provincia del Cañar en 1987. Recibió el título de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana en 2011. Maestro en Administración de la Energía y sus Fuentes Renovables por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México en 2015. Se desempeña como docente en la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca desde septiembre de 2011. Sus áreas de interés son las energías renovables, eficiencia energética, administración de la energía, sistemas eléctricos de potencia, calidad de la energía y la confiabilidad de los SEPs.