

## Modelo de optimización de coaliciones en micro-redes eléctricas

Querini, Pedro<sup>1</sup>; García, Federico<sup>2</sup>; Fernández, Erica<sup>1,2</sup>; Chiotti, Omar<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Depto. Ing. Industrial, FRRRA, UTN.  
M. Acuña 49, Rafaela, Argentina, S2300ADA  
[pedro.querini@frra.utn.edu.ar](mailto:pedro.querini@frra.utn.edu.ar)

<sup>2</sup> GEMPRO – UTN FRSF. [erica.fernandez@frra.utn.edu.ar](mailto:erica.fernandez@frra.utn.edu.ar), [federicoalfredogarcia@gmail.com](mailto:federicoalfredogarcia@gmail.com)

<sup>3</sup> INGAR – CONICET

<sup>4</sup> CIDISI- UTN FRSF. [chiotti@santafe-conicet.gov.ar](mailto:chiotti@santafe-conicet.gov.ar)

**Resumen.** Las Micro Redes eléctricas (MRs) son sistemas que vinculan recursos de generación distribuida (paneles solares, turbinas eólicas, etc) con la red principal. Con el propósito de disminuir costos y mejorar la eficiencia, se han propuesto modelos que permiten operar un conjunto de MRs en forma interconectada con la red principal a efectos de comercializar energía para satisfacer sus balances energéticos y/o; definir coaliciones convenientes entre MRs para un período de tiempo específico. Dichos modelos son eficientes pero no permiten disponer una proyección para un horizonte de tiempo determinado de sucesivas coaliciones que deberán formarse. En este trabajo se propone un modelo de formación y optimización de coaliciones comerciales entre MRs para un horizonte de 24hs minimizando pérdidas por transmisión y transformación de energía entre MRs. Para validar la propuesta se utiliza como caso de estudio 3 MRs interconectadas y se evalúan los resultados obtenidos con y sin el modelo propuesto.

### 1 Introducción

Una Micro-Red (MR) es una red de transmisión y distribución de energía eléctrica que incluye, principalmente, generadores distribuidos tales como eólicos, solares y biomasa; y puede operar en forma aislada o interconectada con la red principal, e incluso estar vinculada a otras MRs. Se caracterizan por aportar energía con fuentes de generación renovables, cubrir demandas de localidades pequeñas y funcionar en baja o media tensión.

La diversidad de fuentes de energía renovables tiende a generar MRs inestables en términos de suministro energético debido a las fluctuaciones e incertidumbre en su proceso de generación. Por ejemplo, si se consideran como fuentes de generación la solar y fotovoltaica, las condiciones climáticas podrían afectar la capacidad de generación de energía de algunos nodos ocasionando déficit o exceso de energía en distintos momentos del día [1].

Para dar respuesta a dicha problemática se han propuesto modelos que incluyen un conjunto de MRs que operan en forma interconectada con la red principal a efectos de realizar operaciones de compra/venta de energía para satisfacer sus balances energéticos ( $\text{Generación} + \text{Compra} - \text{Venta} = \text{Demanda} + \text{Pérdidas}$ ) [2-4]. Si bien dichos modelos son eficientes, producen una sobrecarga en el sistema de comunicación con la red principal y un incremento en los costos por pérdidas de transformación y transmisión de energía en las líneas de distribución. Como solución alternativa se han propuesto otros modelos que permiten definir el conjunto de coaliciones más convenientes entre MRs para un período de tiempo específico (por ejemplo, 1 hora), teniendo en cuenta datos actuales de cargas y generación renovable de cada MR [5-7]. Una coalición es un conjunto de MRs que coordinan la transferencia de energía entre ellas para satisfacer sus demandas e interactúan con la red principal solo cuando poseen un déficit de energía que no puede ser satisfecho entre ellas o hay un exceso de generación de energía. De este modo se reducen las pérdidas por transformación y transmisión de energía en las líneas de distribución. Estas propuestas fueron ideadas para trabajar de forma reactiva, lo cual no permite disponer de una proyección para un horizonte de tiempo (por ejemplo, para las próximas 12 o 24 horas) de las sucesivas coaliciones que deberán formarse. Ésta información resulta necesaria para anticiparse a los cambios que podrían tener lugar en el horizonte de tiempo considerado y mejorar así los procesos de toma de decisión y la capacidad de respuesta a potenciales eventos disruptivos.

Para dar una respuesta a la problemática señalada se propuso un modelo de planificación de estructuras de coaliciones comerciales entre MRs para un horizonte de tiempo especificado. Con base en un pronóstico de producción y de demanda de energía de cada MR, el modelo genera el conjunto de estructuras de coaliciones más conveniente para cada período del horizonte de planificación. El resultado es un plan de estructuras de coaliciones comerciales para el horizonte de tiempo.

Las MRs que integran una coalición coordinan la transferencia de energía entre ellas o con la red principal utilizando una función de utilidad que reduce las pérdidas de transformación y de transmisión en las líneas de distribución. Una coalición puede tener distintas utilidades dependiendo de la combinación de líneas de distribución que se utilice para transmitir la potencia a comercializar dando como resultado diferentes escenarios. Para seleccionar el mejor de estos escenarios se pueden utilizar modelos de programación matemática (Programación No Lineal) o modelos heurísticos (Búsqueda Tabú, Algoritmos Evolutivos, etc.). En este trabajo se presenta un modelo de programación matemática que permite seleccionar como escenario óptimo aquel que minimiza las pérdidas por transmisión y transformación de energía entre las MRs de una coalición y la red principal.

En lo que sigue, el trabajo se organiza del siguiente modo: en la Sección 2 se presenta el modelo de planificación de coaliciones y el modelo de optimización propuesto; en la Sección 3 se describe un caso de estudio y, finalmente, en la Sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo y trabajo futuro.

## 2 Modelo de planificación de coaliciones

Se considera una red de distribución compuesta de una red principal conectada a través de la Macro-Estación (ME) y un conjunto  $N$  de MRs que poseen generadores solares y/o eólicos. Las MRs se encuentran interconectadas a media tensión entre ellas y con la ME. La ME está vinculada mediante un transformador a la red principal que opera a alta tensión. Cada MR deben mantener su balance energético y maximizar su beneficio minimizando las pérdidas por transformación de energía (cuando compra o vende energía a la red principal a través de la ME) y por transmisión de energía entre ellas o con la ME.

### 2.1 Formación de coaliciones

En cada período de un horizonte de tiempo especificado, una  $MR_i \in N$  genera una potencia  $P_i$  que se utiliza para satisfacer una demanda  $D_i$ . La diferencia entre la potencia generada  $P_i$  y la demanda  $D_i$ , define un valor  $Q_i = P_i - D_i$ . Si  $Q_i > 0$ , la  $MR_i \in N$  posee un exceso de energía que puede vender y su rol es “vendedora”, caso contrario si  $Q_i < 0$ , la  $MR_i \in N$  posee un déficit de energía y necesita comprar para satisfacer su requerimiento, siendo su rol “compradora”.

Cuando una  $MR_i \in N$  posee un exceso o déficit de energía puede tomar dos decisiones: 1- no cooperar, esto es vender o comprar energía (Potencia  $Q_i$ ) a la red principal a través de la ME, ocasionando pérdidas por transferencia y transformación; 2- cooperar, esto es formar coaliciones entre MRs y dar intervención a la ME solo para compensar el déficit o exceso de energía de la coalición, reduciendo así las pérdidas por transformación. Una coalición  $S \subset N$ , se formará si cada  $MR_i \in N$  obtiene un beneficio por participar de dicha coalición y debe existir al menos una  $MR_i \in MR_v$ ,  $MR_v \subset N$ , donde  $MR_v$  es el conjunto de MRs vendedoras y una  $MR_i \in MR_c$ ,  $MR_c \subset N$ , donde  $MR_c$  es el conjunto de MRs compradoras.

En principio, se podría establecer una coalición completa,  $S = N$ , sin embargo, las MRs no necesariamente obtienen el máximo beneficio de esta coalición debido a que las pérdidas de energía dependen de la distancia entre las MRs, la potencia a transmitir y el tipo de conductor. Esto da lugar a que se proceda a dividir la coalición completa en un conjunto de coaliciones  $\Pi$ , denominado estructura de coaliciones, donde cada  $MR_i \in N$  forma parte de una y solo una coalición  $S \in \Pi$  siendo  $S \subset N$ . El objetivo es lograr una estructura de coaliciones  $\Pi$  de modo que cada  $MR_i \in N$  que participa de una coalición  $S \in \Pi$  obtenga el máximo beneficio. Para formar estructuras de coaliciones se han propuesto diferentes algoritmos tales como Anytime [8], Split & Merge [5], entre otros. Estos algoritmos proponen diferentes criterios para formar estructuras de coaliciones que luego serán evaluadas para determinar la utilidad aportada por cada una de ellas a sus participantes.

## 2.2 Función de valor de una coalición

Cuando una MRi  $\in N$  decide no cooperar, la utilidad representa el beneficio económico obtenido por la cantidad de energía a comercializar con la ME. Para determinar la cantidad de energía se deben calcular las pérdidas ( $P_{im}^{loss}$ ) por transferencia y transformación entre la MRi  $\in N$  y la ME, Ecuación (1).

$$\begin{aligned} P_{im}^{loss} &= R_{im} * I_m^2 + \beta * P_i(Q_i) \\ P_{im}^{loss} &= \frac{R_{im} * P_i(Q_i)^2}{U_m^2} + \beta * P_i(Q_i) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $R_{im}$  es la resistencia del conductor y  $\beta$  es la fracción de pérdida de potencia en el transformador de la ME.  $P_i(Q_i)$  representa la potencia a transmitir entre la MRi  $\in N$  y ME, Ecuación (2).

$$P_i(Q_i) \begin{cases} Q_i & \text{si } Q_i > 0 \\ C_i & \text{si } Q_i < 0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

Donde  $C_i$  es la cantidad de potencia que debe transmitirse para que la MRi  $\in N$  reciba la potencia requerida ( $Q_i < 0$ ) y se obtiene utilizando la Ecuación (3).

$$\begin{aligned} C_i &= P_{im}^{loss} + P_{im}^{Requerida} \\ C_i &= \frac{R_{im} * C_i^2}{U_m^2} + \beta * C_i + |Q_i| \end{aligned} \quad (3)$$

La Ecuación (3) puede admitir una, dos o no tener solución, depende de la tensión  $U_m$ , la resistencia del conductor  $R_{im}$  y la distancia. Cuando se obtienen dos resultados,  $C_i$  = menor valor. Cuando no tiene solución se asume que la ME, en este caso, generará  $C_i = \frac{(1-\beta) * U_0^2}{2 * R_{i0}}$  lo cual garantiza la potencia a recibir por la MR [5].

Cuando las MRs no cooperan la función de utilidad se obtiene con la Ecuación (4), donde  $w$  es el costo por unidad de potencia a comercializar con la ME.

$$u(\{i\}) = w * P_i(Q_i) \quad (4)$$

Cuando las MRs deciden cooperar, la función de utilidad de una coalición  $S \subset N$  se obtiene mediante la Ecuación (5).

$$u(S) = w * \left( \sum_{i \in MRv, j \in MRc} P_{ij}(Q) + \sum_{i \in MRv} P_{im}(Q) + \sum_{j \in MRc} P_{jm}(Q) \right) \quad (5)$$

Donde  $P_{ij}(Q)$  es la cantidad de potencia a comercializar entre una MRi  $\in MRv$  (vendedora) y una MRj  $\in MRc$  (compradora).  $P_{im}$  se calcula a través de la Ecuación (1) y  $P_{jm}$  a través de la Ecuación (3). La función de valor  $v(S)$  de una coalición  $S \subset N$

representa el mínimo costo que se abona por las pérdidas incurridas en la línea de distribución, Ecuación (6).

$$v(S) = \max_{u(S)} \quad (6)$$

Para obtener una coalición  $S \subset N$  que posea la máxima utilidad,  $v(S)$ , se deben analizar todas las posibles combinaciones de líneas de distribución entre las MRs que se pueden utilizar para transmitir la potencia a comercializar ya que depende de la tensión, la resistencia del conductor y la distancia, obteniendo diferentes escenarios para dicha coalición. El modelo de optimización que se presenta en la Sección 2.3 selecciona el escenario óptimo minimizando las pérdidas por transmisión y transformación de energía entre las MRs de una coalición y la red principal.

### 2.3 Modelo de optimización de las coaliciones

#### 2.3.1 Variables y parámetros del modelo

**Tabla 1.** Parámetros y variables del modelo.

<u>Variables</u>	<u>Parámetros</u>
<b>S</b> : coalición de MRs $\in N$ .	<b>Q<sub>k</sub></b> : potencia ofrecida o requerida por MR $k \in S$ donde $k=i$ o $k=j$ .
<b>MR<sub>v</sub> <math>\in S</math></b> : conjunto de MRs vendedoras que poseen excedente de potencia y participan de la coalición S (MR <sub>v1</sub> , MR <sub>v2</sub> , ..., MR <sub>vn</sub> ).	<b>RU<sub>ij</sub> = R<sub>ij</sub>/U<sup>2</sup></b> . Resistencia del conductor que une la MR i con la MR j dividido por la tensión al cuadrado.
<b>MR<sub>c</sub> <math>\in S</math></b> : conjunto de MRs compradoras que poseen déficit de potencia y participan de la coalición S (MR <sub>c1</sub> , MR <sub>c2</sub> , ..., MR <sub>cn</sub> ).	.
<b>MR<sub>v</sub> <math>\cap</math> MR<sub>c</sub> = <math>\emptyset</math></b>	<b>RU<sub>im o mj</sub> = R<sub>im o mj</sub>/U<sup>2</sup></b> Resistencia del conductor que une la MR con la ME dividido por la tensión al cuadrado
<b>ME = {m}</b> : conjunto de Macro Estaciones.	<b><math>\beta</math></b> = fracción de pérdida de potencia en el transformador de la ME.
<b>P<sub>im(Q)</sub></b> : Potencia recibida por $m \in ME$ desde $i \in MR_v$ .	
<b>P<sub>mi(Q)</sub></b> : Potencia recibida por $j \in MR_c$ desde $m \in ME$ .	
<b>T<sub>im</sub></b> : Potencia transferida de $i \in MR_v$ a $m \in ME$ .	
<b>T<sub>mj</sub></b> : Potencia transferida desde $m \in ME$ a $j \in MR_c$	

#### 2.3.2 Función objetivo

La función objetivo, Ecuación (7), minimiza las pérdidas por transformación y transferencia entre MR<sub>v</sub>, MR<sub>c</sub> y ME para una coalición S.

$$\text{Min } z = \sum_{i \neq j \in S} [RU_{ij} * T_{ij}^2] + \sum_{i \in S} [RU_{im} * T_{im}^2] + \sum_{j \in S} [RU_{mj} * T_{mj}^2] + \beta * (\sum_{i \in MR_v} T_{im} + \sum_{j \in MR_c} T_{mj}) \quad (7)$$

### 2.3.3 Restricciones

Potencia recibida por  $j \in \text{MRc}$  desde  $i \in \text{MRv}$ , Ecuación (8).

$$P_{ij}(Q) = T_{ij} - RU_{ij} * T_{ij}^2 \quad \forall i \in \text{MRv}, \forall j \in \text{MRc} \quad (8)$$

Potencia recibida por  $m \in \text{ME}$  desde  $i \in \text{MRv}$ , Ecuación (9).

$$P_{im}(Q) = T_{im} - RU_{im} * T_{im}^2 - \beta * T_{im} \quad \forall i \in \text{MRv}, \forall m \in \text{ME} \quad (9)$$

Potencia recibida por  $j \in \text{MRc}$  desde  $m \in \text{ME}$ , Ecuación (10).

$$P_{mj}(Q) = T_{mj} - RU_{mj} * T_{mj}^2 - \beta * T_{mj} \quad \forall j \in \text{MRc}, \forall m \in \text{ME} \quad (10)$$

Balance de potencia para  $i \in \text{MRv}$ , Ecuación (11).

$$T_{im} + \sum_{j \in \text{MRc}} T_{ij} = Q_i \quad \forall i \in \text{MRv} \quad (11)$$

Balance de potencia para  $j \in \text{MRc}$ , Ecuación (12)

$$P_{mj}(Q) + \sum_{i \in S} P_{ij}(Q) = Q_j \quad \forall j \in \text{MRc} \quad (12)$$

### 2.4 Distribución de utilidades

Obtenido el mejor valor de utilidad para una coalición  $S \subset N$  se debe realizar una distribución de pagos entre las  $\text{MRi} \in S$ . La división queda definida a través de un vector distribución de pagos  $\varnothing(S) = \{\varnothing_1, \varnothing_2, \dots, \varnothing_n\}$  en el que cada elemento representa el pago justo para cada  $\text{MRi} \in S$  con base en la contribución de cada  $\text{MRi} \in S$  al valor de utilidad de la coalición  $S$ . Existen diferentes métodos propuestos para calcular el vector distribución de pagos tales como Shapley, Nucleolus, Core, entre otros.

Finalmente, se tiene una lista completa de todas las posibles estructuras de coaliciones  $\Pi$  que se pueden formar para un conjunto  $N$  de MRs, el valor de la función utilidad  $v(S)$  de cada coalición  $S \in \Pi$  y el pago recibido por cada  $\text{MRi} \in S$ . Para seleccionar la estructura de coaliciones  $\Pi$  final (más conveniente) para un período de tiempo del horizonte de planificación, se utiliza el criterio de Orden de Pareto. Según este criterio, la estructura de coaliciones  $\Pi$  final será aquella en la cual ninguna  $\text{MRi} \in N$  se vea tentada a no participar de la coalición  $S \in \Pi$ , dado que la participación en cualquier otra coalición  $S' \subset N$  siendo  $S' \neq S$  (incluida la individual) no mejora el pago a recibir (beneficio).

### 2.5 Planificación de estructura de coaliciones

La metodología descrita desde la Sección 2.1 hasta la 2.4 se debe repetir sistemáticamente para cada período del horizonte de planificación. El resultado es un plan que define una estructura de coaliciones comerciales  $\Pi$  para cada período de tiempo que maximiza las utilidades para todas las MRs participantes (Figura 1).

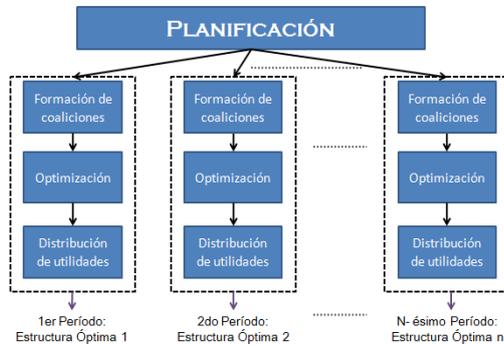


Fig. 1. Modelo de planificación de coaliciones.

### 3 Caso de estudio

Se utilizó el modelo propuesto para planificar las estructuras de coaliciones tres MRs constituidas por generadores distribuidos renovables que alimentan la carga local. Las mismas están conectadas a una Macro-Estación (ME) que las vincula con la red principal de alta tensión. Las distancias entre las MRs y la ME se presentan en la Figura 2, representación esquemática del conjunto de MRs. También se muestran los valores de la resistencia de los conductores que las unen. Los conductores son de aleación/acero de sección 95/15 con una resistencia de  $0.306 \Omega / km$ .

La MR1 cuenta con 3 aerogeneradores AN BONUS 600/44 de 600 kW cada uno, la MR2 posee paneles solares en 5,8 hectáreas con 4000 kW de potencia instalada y la MR3 cuenta con 1 aerogenerador MICON M750-400/100 de 750 kW. En las Figuras 3 y 4 se muestra, en un horizonte de 24 horas, el pronóstico de generación y el de carga de cada MR. Se tomó como precio de la energía 1 \$/kW.

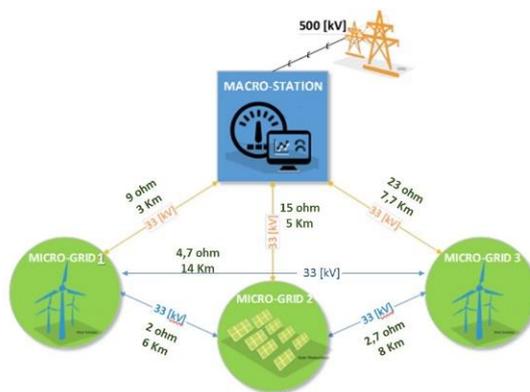


Fig. 2. Representación esquemática de las MRs.



Fig. 3. Pronóstico de generación de cada MR para 24 horas.



Fig. 4. Pronóstico de carga de cada MR para 24 horas.

### 3.1 Generación del plan de estructuras de coaliciones

Dado que en el caso de estudio sólo participan tres MRs, según muestra el Diagrama de Hasse de la Figura 5, el número total de estructuras de coaliciones que se pueden formar es cinco. Por ello, para obtener la estructura de coaliciones final  $\Pi$  correspondiente a cada período de tiempo se realizó una evaluación exhaustiva de todas las estructuras de coaliciones posibles de formar. Cuando el número de MRs es mayor, para formar las estructuras de coaliciones será necesario recurrir al uso de algoritmos apropiados (Sección 2.1).

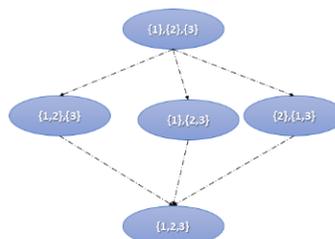


Fig. 5. Diagrama de Hasse.

La Figura 6 muestra el estado ( $Q_i$ ) de energía para cada período (24 horas) en cada MR. Un estado de déficit ( $Q_i < 0$ ) implica que la MR en ese período actúa como compradora, mientras que para el caso en que la MR posea un estado de exceso ( $Q_i > 0$ ) actuará como vendedora.

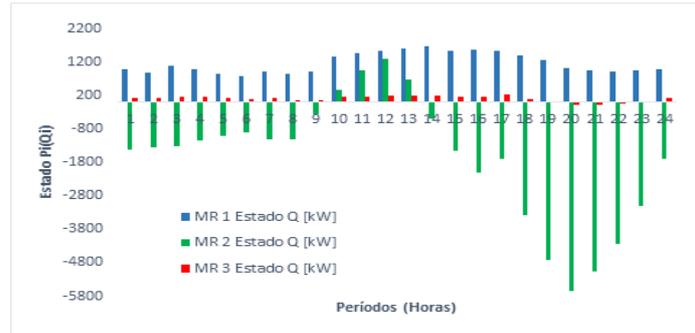


Fig. 6. Estado de las MRs en cada período de tiempo.

El criterio utilizado para distribuir las utilidades entre los participantes de cada coalición  $S \in \Pi$  es el valor de Shapley (Sección 2.2) el cual se calcula mediante la Ecuación 7.

$$\Phi_i[v] = \sum_{\substack{S \subset \Pi \\ i \in S}} \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!} [v(s) - v(s \setminus \{i\})] \text{ para cada } i \text{ en } S \in \Pi \quad (7)$$

Para cada coalición  $S \in \Pi$  se obtuvo el vector distribución de pagos, el cual permite evaluar y contrastar las deferentes estructuras de coaliciones a efectos de seleccionar la coalición más conveniente para las tres MR en base al criterio de Orden de Pareto (Sección 2.2).

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos del proceso de formar las estructuras de coaliciones, optimizar la transferencia de energía, calcular el valor de la coalición, obtener el vector distribución de pagos y elegir la estructura de coaliciones final  $\Pi$  de cada período. La optimización en la transferencia de energía se realizó, en este caso, mediante una búsqueda de la mejor solución, mientras que en la Figura 8 se presentan los resultados de la asignación de pagos por hora para cada MR utilizando el modelo de optimización de las coaliciones presentado en la sección 2.3. En ambos casos la distribución de pagos individuales se calculó mediante la Ecuación 7.

En la Figura 9 se muestra el Diagrama de Gantt que resulta de la planificación de estructuras de coaliciones para el horizonte de 24 horas. En el mismo se puede observar el plan de estructuras de coaliciones finales (óptimas) a utilizar en cada período de tiempo.

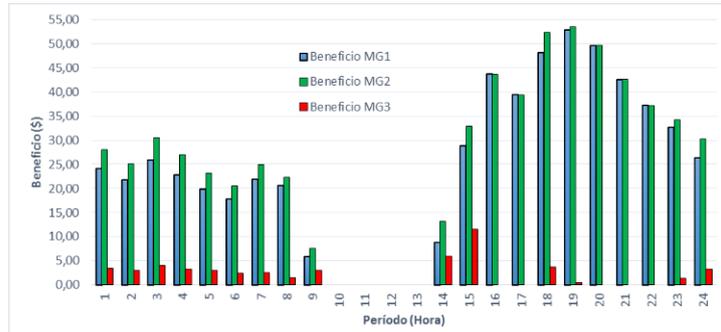


Fig. 7. Asignación de pagos por hora para cada MR. Comparación con caso no cooperativo. Búsqueda heurística de la mejor solución.

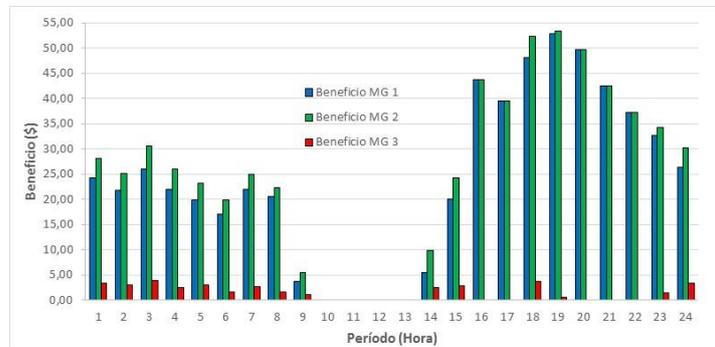


Fig. 8. Asignación de pagos por hora para cada MR. Comparación con caso no cooperativo. Optimización utilizando el modelo propuesto.

Coalición	Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
{1;2;3}		█	█	█	█	█	█	█	█	█					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█
{1;2}{3}																									
{1;3}{2}																									
{1}{2;3}																									
{1}{2}{3}											█	█	█	█											

Fig. 9. Esquema de planificación de estructuras de coaliciones que maximiza la potencia transmitida entre MRs.

### 3.2 Análisis de resultado

Del análisis de las Figuras 7 y 8, se puede observar que desde la hora 1 hasta la hora 9 la estructura de coaliciones óptima a utilizar es la coalición global. Ante la situación que la MR2 se encuentra en estado de déficit, pero la suma de los excesos que pueden vender las MR1 y MR3 no satisfacen toda la demanda de MR2, no existe otra coalición que signifique una mejor oportunidad para ninguna de las 3.

Un caso contrapuesto es desde las 10 hasta las 13 horas, donde todas las MRs poseen exceso de energía y su mejor opción es vender los excesos a la ME en forma individual.

El caso que se presenta para las 14 y las 15 horas es particular, ya que MR2 posee déficit de potencia y las restantes MRs poseen exceso, pero con la particularidad que se puede cubrir la demanda de MR2 de varias maneras. Una opción es que MR1 satisfaga a MR2 y que venda el resto a la ME, mientras que MR3 venda todo su exceso a la ME. Esta opción corresponde a la estructura de coaliciones {1,2}, {3}. Otra opción es que MR3 venda a MR2 todo su exceso, que MR1 termine de cubrir la demanda y que luego venda el resto de exceso a la ME. Por último, una tercer opción sería que MR3 venda a MR2 una porción de su exceso y lo restante a la ME y que MR1 cubra la demanda restante de MR2 y venda el resto a la ME. Estas dos últimas opciones corresponden a la estructura de coaliciones {1, 2, 3}.

Todos estos escenarios, al ser una cantidad reducida de opciones fueron estudiados de forma exhaustiva y valorados en la mejora de la distribución de pagos, por lo que los resultados presentados en la Figura 7 para las 14-15 horas son los mejores resultados entre 3 opciones estudiadas para cada hora. Desde las 18 hasta las 19 y desde las 23 a las 24 horas el comportamiento de las MRs es similar al que sucede entre las horas 1 a 9. Para las horas 20, 21 y 22 la MR2 y MR3 tienen déficit y solo la MR1 tiene exceso, por lo que debe evaluar si conviene cumplir primero la demanda de MR2 o MR3, o bien satisfacerlas en cierto porcentaje. Nuevamente, para conocer la estructura en la cual ninguna MR tiene incentivo de cambiar, se realizó un análisis exhaustivo de todos los escenarios y la comparación de los valores del vector asignación de pagos.

Evaluando la Figura 8 en relación a los resultados arrojados por la búsqueda de la mejor solución de la Figura 7, se pueden observar que el modelo de optimización propuesto genera el mismo plan de estructura de coaliciones, pero mejora el beneficio de las MRs en algunos períodos en particular donde la mejor solución encontrada por métodos con base en heurísticas no es la óptima.

En la Figura 10 se comparan los resultados obtenidos con modelo de optimización y con la búsqueda del mejor resultado (sin modelo de optimización) y se observa claramente que con el modelo de optimización propuesto los resultados que se obtienen en la diferencia entre el pago que otorga Shapley por participar de una coalición y el pago que obtendría la MRi individualmente son mejores o iguales.

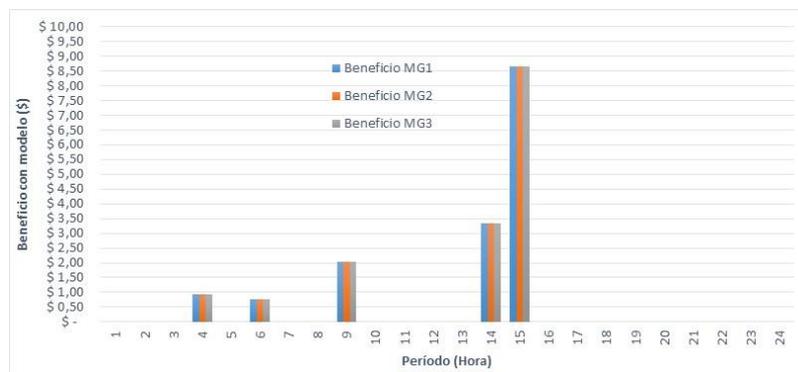


Fig. 10. Comparación de resultados.

## 4 Conclusiones

El modelo de optimización con base en programación matemática propuesto en este trabajo permite encontrar la distribución óptima de energía dentro de cada coalición. Esto permitió mejorar los beneficios de cada una de las MRs que participan de una coalición, en comparación a los beneficios obtenidos cuando la distribución de energía dentro de cada coalición se realizó con base en una búsqueda heurística de la mejor solución, la cual no resultó ser la óptima en los casos en que se presentaron escenarios alternativos de distribución de la energía para una coalición.

El resultado final es un plan óptimo de estructuras de coaliciones comerciales entre MRs para un horizonte de tiempo especificado. El beneficio principal es que provee la información necesaria para anticiparse a los cambios que podrían tener lugar en el horizonte de tiempo considerado y mejorar así los procesos de toma de decisión y la capacidad de respuesta a potenciales eventos disruptivos.

Como trabajo futuro, se analizará la conveniencia de utilizar períodos de tiempos variables y se trabajará en el desarrollo de algoritmos de formación de coaliciones eficientes que puedan facilitar esta tarea en el caso en que la cantidad de MRs participantes sea elevado (diez o más MRs).

## Referencias

1. Hatziaargyriou, Nikos; Sano, Hiroshi; Iravani, Reza; Marnay, Chris. (2007). "Microgrids: An overview of ongoing research development and demonstration projects". IEEE Power and Energy Magazine, vol. 22, pp.78-94.
2. Sanseverino, Eleonora Riva; Di Silvestre, Maria Luisa; Ippolito, Mariano Giuseppe; De Paola, Alessandra, Lo Re, Giuseppe. (2011). "An execution, monitoring and replanning approach for optimal energy management in microgrids". Energy. Vol. 36, pp. 3429-3436.
3. Mohammadreza, M.; Zakariazadeh, Alireza; Jadid, Shahram; Siano, Pierluigi. (2014). "Integrated scheduling of renewable generation and demand response programs in a microgrid". Energy Conversion and Management. Vol. 86, pp. 1118-1127.
4. Geetha K., Sharmila Debe V., Keerthivasan K. (2015). "Design of economic dispatch model for Gencos with thermal and wind powered generators". Electrical Power and Energy Systems. Vol.68, pp. 222-232.
5. Saad, W.; Zhu, Han; H. Vincent Poor. (2011). "Coalitional Game Theory for Cooperative Micro-Grid Distribution Networks". IEEE Power and Energy Magazine.
6. M, Alam; Ramchurn, Sarvapali D.; Rogers, Alex. (2012). "Cooperative Energy Exchange for the Efficient Use of Energy and Resources in Remote Communities". Autonomous Agents and Multiagent Systems.
7. Chakraborty, S.; Shin, Nakamura; Toshiya, Okabe. (2015). "Real-time energy Exchange strategy of optimally cooperative microgrids for scale-flexible distribution system". Expert System with Applications. Vol. 42, pp. 4643-4652.
8. Chalkiadakys, G.; Elkind, E.; Wooldridge M. (2012). Computational Aspects of Cooperative Game Theory". Morgan & Claypool, Capítulo 6.