

# Planificación de Coaliciones para Compra y Venta de Energía entre Micro-Redes Eléctricas Cooperativas

**Resumen:** En este trabajo se presenta un modelo de planificación de estructuras de coaliciones comerciales de potencia entre Micro Redes eléctricas de generación distribuida para un horizonte de tiempo especificado. En bibliografía, se han propuesto modelos de formación de coaliciones que determinan la cantidad de potencia a comercializar entre Micro Redes. Estos modelos fueron diseñados para trabajar de forma reactiva, lo cual no permite disponer de una proyección para un horizonte de tiempo, dificultando la toma de decisión y la respuesta ante eventos disruptivos. Para dar respuesta al problema señalado se propone un modelo basado en un pronóstico de generación y requerimiento de cada Micro Red, utilizando un algoritmo para formación de coaliciones y otro para la optimización de estructuras de coaliciones y asignación de pagos, basado en la teoría de juegos coalicional. Para validar la propuesta se diseñó un caso de estudio con 3 Micro Redes con diferentes generadores distribuidos.

**Palabras Claves:** micro-redes cooperativas; compra-venta de energía; teoría de juego coalicional; planificación de coaliciones.

**Abstract:** In this paper, we propose a planning model for commercial power coalition structures between distributed generation electric micro-grids for a specific time horizon. Many researchers have proposed models of coalition formation. In the literature, the coalition formation models proposed determine the amount of power to be commercialized between micro-grids. These models were designed to work in a reactive way, which does not allow to have a projection for a time horizon and makes decision making and the response to disruptive events difficult. In order to respond to the problem, a model based on a forecast of generation and requirement of each micro-grid is proposed, using an algorithm for coalition formation and another algorithm for the optimization of coalition structures and payment allocation based on coalitional game theory. To validate the proposal, a case study was designed with 3 micro-grids with different distributed generators.

**Keywords:** cooperative micro-grids, energy sale-purchase, coalitional game theory, coalitions planning.

**Pedro Querini<sup>1,2</sup>, Federico García<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>UTN-Facultad Regional Rafaela. M. Acuña 49, Rafaela (Santa Fe) – Tel. 03492-432702 – correo@frfa.utn.edu.ar

<sup>2</sup>UTN-Facultad Regional Santa Fe, Lavaise 610, Santa Fe (Santa Fe) – Tel. 0342-4601579 – webmaster@frsf.utn.edu.ar

Mail: pedro.querini@frfa.utn.edu.ar, federicoalfredogarcia@gmail.com

Dirección: Dr. Omar Chiotti, Dra. Erica Fernández.

## 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 funcionan 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 eólica, 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 (Hatziaargyriou et al., 2007).

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 el balance energético (Sanseverino et al., 2011), (Mohammadreza et al., 2014), (Geetha et al., 2015). 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 distribución. Como solución alternativa se han propuesto otros modelos que permiten definir el conjunto de coaliciones más conveniente entre MRs para un escenario específico (datos actuales de cargas y generación renovable de cada MR) (Saad et al., 2011), (Alam et al., 2012), (Chakraborty et al. 2015). Una coalición es un conjunto de MRs que coordinan la transferencia de energía entre ellas para satisfacer su demanda 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 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. Información que es 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.

En este trabajo se propone 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 puede generar 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.

En lo que sigue, el trabajo se organiza del siguiente modo: en la Sección 2 se presenta el modelo de planificación de coaliciones; 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.

## MODELO DE PLANIFICACIÓN DE COALICIONES

Se considera una red de distribución compuesta de una 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. Las MRs deben mantener su balance energético y maximizar su beneficio, esto es, la potencia a transmitir, minimizando las pérdidas por transformación de energía (cuando compra o vende energía a red principal a través de la ME) y por transmisión de energía entre ellas o con la ME.

**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 para 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  $MR_i \in N$  vendedora y una  $MR_j \in N$  compradora.

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  $II$ , denominado estructura de coaliciones, donde cada  $MR_i \in N$  forma parte de una y solo una coalición  $S \in II$  siendo  $S \subset N$ . El objetivo es lograr una estructura de coaliciones  $II$  de modo que cada  $MR_i \in N$  que participa de una coalición  $S \in II$  obtenga el máximo beneficio. Para formar estructuras de coaliciones se han propuesto diferentes algoritmos tales como Anytime (Chalkiadakis et al., 2012), Split & Merge (Saad et al., 2011), 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.

**Optimización y distribución de utilidades**

Cuando una  $MR_i \in N$  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 ( $P_{i0}^{loss}$ ) por transferencia y transformación entre la  $MR_i \in N$  y la ME (Ecuación 1).

$$P_{i0}^{loss} = R_{i0} * I_0^2 + \beta * P_i(Q_i) \tag{1}$$

$$P_{i0}^{loss} = \frac{R_{i0} * P_i(Q_i)^2}{U_0^2} + \beta * P_i(Q_i)$$

Donde  $R_{i0}$  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  $MR_i \in N$  y ME (Ecuación 2).

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

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

$$C_i = P_{i0}^{loss} + P_{i0}^{Requerida}$$

$$C_i = \frac{R_{i0} * C_i^2}{U_0^2} + \beta * C_i + |Q_i| \quad (3)$$

La Ecuación 3 puede admitir una, dos o no tener solución, depende de la tensión  $U_0$ , la resistencia del conductor  $R_{i0}$  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 (Saad et al., 2011). 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.

$$u(S) = w * \left( \sum_{i \in S_s, j \in S_b} P_{ij}(Q) + \sum_{i \in S_s} P_{i0}(Q) + \sum_{j \in S_b} P_{j0}(Q) \right) \quad (5)$$

Donde  $P_{ij}(Q)$  es la cantidad de potencia a comercializar entre una  $MR_i \in N$  (vendedora) y una  $MR_j \in N$  (compradora).  $P_{i0}$  y  $P_{j0}$  se calcula 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).

$$v(S) = \max u(S) \quad (6)$$

Una coalición  $S \subset N$  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 Entera Mixta) o modelos heurísticos (Búsqueda Tabú, Algoritmos Evolutivos, etc.).

Obtenido el mejor valor de utilidad para una coalición  $S \subset N$  se debe realizar una distribución de pagos entre las  $MR_i \in S$ . La división queda definida a través de un vector distribución de pagos  $\bar{O}(S) = \{\bar{O}_1, \bar{O}_2, \dots, \bar{O}_n\}$  en el que cada elemento representa el pago justo para cada  $MR_i \in S$ . con base en la contribución de cada  $MR_i \in S$ . 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  $II$  que se pueden formar para un conjunto  $N$  de MRs, el valor de la función utilidad  $v^{(s)}$  de cada coalición  $S \in II$  y el pago recibido por cada  $MR_i \in S$ . Para seleccionar la estructura de coaliciones  $II$  final (más conveniente) para un periodo de tiempo del horizonte de planificación, se utiliza el criterio de Orden de Pareto. Según este criterio, la estructura de coaliciones  $II$  final será aquella en la cual ninguna  $MR_i \in N$  se vea tentada a no participar de la coalición  $S \in II$ , 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).

### Planificación de estructura de coaliciones

La metodología descrita en la Sección 2.1 y 2.2 se debe repetir sistemáticamente para cada periodo del horizonte de planificación. El resultado es un plan que define una estructura de coaliciones comerciales para cada período de tiempo que maximiza las utilidades para todas las MRs participantes (Figura 1).

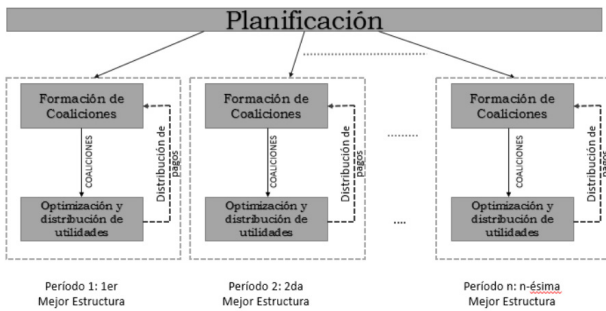


Fig. 1: Modelo de planificación de coaliciones.

### 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 SE ME presentan en la Tabla 1. En la misma tabla 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  $0.306 \Omega/km$ .

		Distancias entre MR [Km]			ME [ohm]
Resistencia del conductor entre MR [ohm]	MR	1	2	3	---
	1	-	6	14	9
	2	2	-	8	15
	3	4,7	2,7	-	23
ME [Km]	---	3	5	7,7	

Tabla 1: Distancias y resistencias.

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 la Figura 2 se muestra una representación esquemática de las MRs. En los

Gráficos 1 y 2 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.

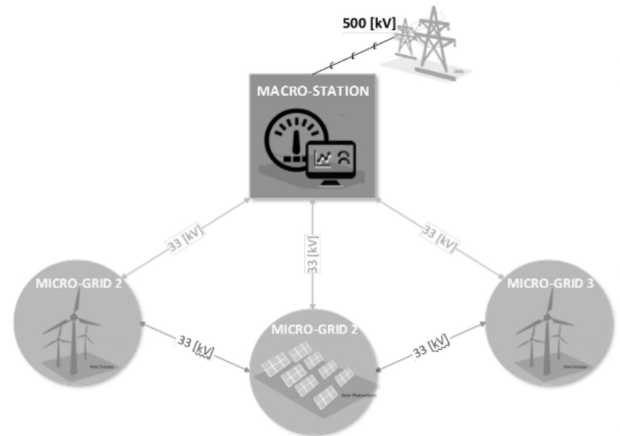


Fig. 2: Representación esquemática de las MRs.

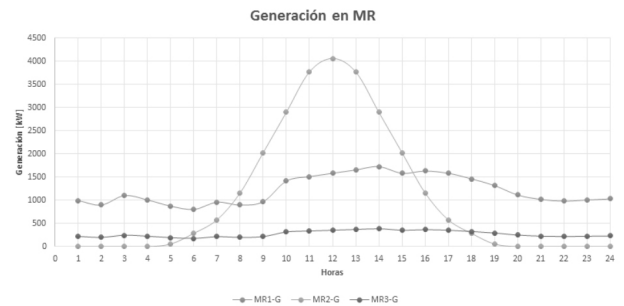


Gráfico 1: Pronóstico de generación de cada MR para 24 horas.

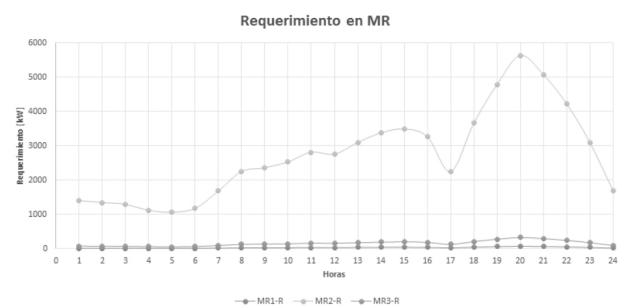


Gráfico 2: Pronóstico de carga de cada MR para 24 horas.

### 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

2, el número total de estructuras de coaliciones que se pueden formar es cinco. Por ello, para obtener la estructura de coaliciones final 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).

La Tabla 2 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.

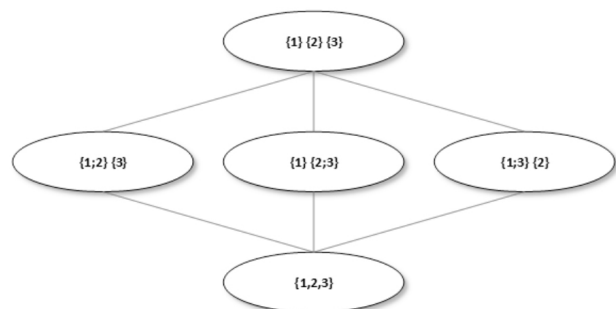


Fig. 3: Diagrama de Hasse.

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.

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

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 Tabla 3 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. Se muestra para cada período el valor que Shapley asigna como pago a cada MR en el caso de coaliciones individuales (no cooperación), y el valor asignado a cada MR en el caso de participar de la estructura de coalición final (cooperación) y la diferencia entre dichos valores.

En la Figura 4 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.

### Análisis de resultado

Del análisis de las Tablas 2 y 3, 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 estruc-

MR	Estado	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Q1 [kW]	976	881	1086	992	861	787	936	868	938	1380	1472	1545
2	Q2 [kW]	-1409	-1353	-1296	-1127	-1013	-894	-1111	-1095	-337	364	952	1298
3	Q3 [kW]	141	122	172	160	134	111	116	69	79	168	173	193
MR	Estado	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	Q1 [kW]	1612	1680	1534	1585	1552	1412	1252	1036	948	924	964	1008
2	Q2 [kW]	670	-482	-1464	-2109	-1675	-3374	-4733	-5636	-5073	-4227	-3100	-1691
3	Q3 [kW]	189	189	149	174	223	112	13	-83	-71	-29	43	132

Tabla 2: Estado de las MRs en cada periodo de tiempo.

Periodo	MG1			MG2			MG3			ESTRUCTURA
	Individual \$	Coalición \$	Diferencia \$	Individual \$	Coalición \$	Diferencia \$	Individual \$	Coalición \$	Diferencia \$	
1	\$ 953,7	\$ 977,9	\$ 24,2	\$ -1.447,7	\$ -1.419,7	\$ 28,0	\$ 137,7	\$ 141,1	\$ 3,4	{1;2;3}
2	\$ 860,9	\$ 882,7	\$ 21,8	\$ -1.389,4	\$ -1.364,4	\$ 25,1	\$ 119,8	\$ 122,8	\$ 2,9	{1;2;3}
3	\$ 1.060,5	\$ 1.086,4	\$ 25,9	\$ -1.331,2	\$ -1.300,7	\$ 30,5	\$ 168,0	\$ 172,0	\$ 4,0	{1;2;3}
4	\$ 969,3	\$ 991,2	\$ 21,9	\$ -1.156,6	\$ -1.130,6	\$ 26,0	\$ 156,7	\$ 159,1	\$ 2,4	{1;2;3}
5	\$ 841,5	\$ 861,3	\$ 19,8	\$ -1.038,7	\$ -1.015,5	\$ 23,2	\$ 130,9	\$ 133,9	\$ 3,0	{1;2;3}
6	\$ 769,7	\$ 786,7	\$ 17,1	\$ -915,8	\$ -896,0	\$ 19,8	\$ 108,5	\$ 110,2	\$ 1,7	{1;2;3}
7	\$ 914,7	\$ 936,7	\$ 21,9	\$ -1.139,7	\$ -1.114,8	\$ 24,9	\$ 113,5	\$ 116,1	\$ 2,6	{1;2;3}
8	\$ 848,4	\$ 868,9	\$ 20,5	\$ -1.122,8	\$ -1.100,5	\$ 22,3	\$ 67,6	\$ 69,2	\$ 1,6	{1;2;3}
9	\$ 917,0	\$ 920,8	\$ 3,8	\$ -344,7	\$ -339,2	\$ 5,5	\$ 76,9	\$ 77,9	\$ 1,0	{1;2;3}
10	\$ 1.346,9	\$ 1.346,9	\$ -	\$ 355,8	\$ 355,8	\$ -	\$ 164,8	\$ 164,8	\$ -	{1}{2}{3}
11	\$ 1.436,3	\$ 1.436,3	\$ -	\$ 928,6	\$ 928,6	\$ -	\$ 169,6	\$ 169,6	\$ -	{1}{2}{3}
12	\$ 1.507,1	\$ 1.507,1	\$ -	\$ 1.264,4	\$ 1.264,4	\$ -	\$ 188,7	\$ 188,7	\$ -	{1}{2}{3}
13	\$ 1.572,3	\$ 1.572,3	\$ -	\$ 654,6	\$ 654,6	\$ -	\$ 185,0	\$ 185,0	\$ -	{1}{2}{3}
14	\$ 1.638,3	\$ 1.643,8	\$ 5,5	\$ -492,8	\$ -482,9	\$ 9,8	\$ 184,5	\$ 187,1	\$ 2,6	{1;2;3}
15	\$ 1.496,9	\$ 1.517,0	\$ 20,1	\$ -1.505,1	\$ -1.480,9	\$ 24,2	\$ 146,3	\$ 149,2	\$ 2,9	{1;2;3}
16	\$ 1.546,7	\$ 1.590,3	\$ 43,6	\$ -2.174,5	\$ -2.130,8	\$ 43,6	\$ 169,9	\$ 169,9	\$ -	{1;2}{3}
17	\$ 1.514,1	\$ 1.553,5	\$ 39,4	\$ -1.722,7	\$ -1.683,3	\$ 39,4	\$ 218,1	\$ 218,1	\$ -	{1;2}{3}
18	\$ 1.378,0	\$ 1.426,1	\$ 48,1	\$ -3.500,4	\$ -3.448,0	\$ 52,4	\$ 110,1	\$ 113,8	\$ 3,7	{1;2;3}
19	\$ 1.222,3	\$ 1.275,1	\$ 52,8	\$ -4.945,1	\$ -4.891,7	\$ 53,4	\$ 13,0	\$ 13,6	\$ 0,5	{1;2;3}
20	\$ 1.011,9	\$ 1.061,5	\$ 49,6	\$ -5.916,9	\$ -5.867,4	\$ 49,6	\$ -81,0	\$ -81,0	\$ -	{1;2}{3}
21	\$ 926,2	\$ 968,7	\$ 42,5	\$ -5.309,6	\$ -5.267,0	\$ 42,5	\$ -69,5	\$ -69,5	\$ -	{1;2}{3}
22	\$ 902,9	\$ 940,0	\$ 37,1	\$ -4.405,3	\$ -4.368,1	\$ 37,1	\$ -28,3	\$ -28,3	\$ -	{1;2}{3}
23	\$ 941,9	\$ 974,6	\$ 32,6	\$ -3.212,0	\$ -3.177,8	\$ 34,2	\$ 42,4	\$ 43,8	\$ 1,4	{1;2;3}
24	\$ 984,9	\$ 1.011,3	\$ 26,4	\$ -1.739,7	\$ -1.709,6	\$ 30,2	\$ 129,3	\$ 132,6	\$ 3,3	{1;2;3}

Tabla 3: Asignación de pagos por hora para cada MR. Comparación con caso no cooperativo.

Coalicion	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. 4: Esquema de planificación de estructuras de coaliciones que maximiza la potencia transmitida entre MRs.

tura 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 Tabla 3 para las 14-15 horas son los mejores resultados entre 3 opciones estudiados 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.

Es de destacar que en caso de un mayor número de MRs, el estudio exhaustivo de los diferentes escenarios para cada estructura de coalición no es posible realizar, en cuyo caso será necesario utilizar un modelo de optimización (Sección 2.2).

## CONCLUSIONES

El modelo de planificación propuesto permite generar las estructuras de coaliciones comerciales entre MRs para un horizonte de tiempo especificado. Como todo proceso de planificación, 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; 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); y se trabajará en el desarrollo de modelos de optimización para encontrar la distribución óptima de energía dentro de cada coalición.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los directores y en especial a la UTN Facultad Regional Rafaela por su constante apoyo y seguimiento para que este trabajo se pueda hacer posible.



## REFERENCIAS

N. Hatziargyriou, H.Sano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids: An overview of ongoing research development and demonstration projects", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 22, pp.78-94, Aug. 2007.

Saad W., Zhu Han, H. Vincent Poor. (2011). "Coalitional Game Theory for Cooperative Micro-Grid Distribution Networks". *IEEE Power and Energy Magazine*.

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.

Alam M., Sarvapali D. Ramchurn and Alex Rogers. (2012). "Cooperative Energy Exchange for the Efficient Use of Energy and Resources in Remote Communities". *Autonomous Agents and Multiagent Systems*.

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.

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.

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.

Chalkiadakys G., Elkind E., Wooldridge M. Capitulo 6. *Computational Aspects of Cooperative Game Theory*". Morgan & Claypool.