



“II Congreso Argentino de Energías Sustentables”

**Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional.
Universidad Nacional del Sur.
Universidad Nacional del Comahue.**

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE MICRO-REDES INTERCONECTADAS EN UN CONTEXTO DE MERCADO ENERGÉTICO

Loyarte, Ariel*, Clementi, Luis⁽¹⁾, Vega, Jorge⁽¹⁾

*Grupo CySE, Facultad Regional Santa Fe (FRSF), Universidad Tecnológica Nacional (UTN)
aloyarte@frsf.utn.edu.ar*

(1) INTEC, CONICET - Universidad Nacional del Litoral, UTN-FRSF

RESUMEN

En el presente trabajo se propone, como alternativa a las redes convencionales de transmisión de energía eléctrica en alta tensión, la conformación de un mercado eléctrico basado en un sistema interconectado de micro-redes. En el sistema propuesto, cada micro-red dispone de la posibilidad de generar energía, importarla y/o exportarla, con mecanismos de negociación regulados por un agente supervisor de mayor jerarquía que actúa con la finalidad de optimizar los costos de cada transacción. De esta forma, se aprovechan las características del paradigma de micro-redes (micro-generación distribuida) con el objeto de cubrir regiones más amplias. La implementación del sistema completo se efectúa mediante el modelado como sistema de eventos discretos, utilizando el formalismo DEVS (*Discrete Event System Specification*). La ejecución de los modelos se realiza mediante la librería DEVSJAVA y el simulador SimView. Para la valoración de la propuesta se implementan y simulan diferentes casos de estudio que consideran micro-redes interconectadas operando en forma aislada de la red de potencia externa, pero la extensión de la propuesta para incorporar esa conexión a la red externa es factible.

Palabras Claves: micro-redes, modelado, formalismo DEVS

1. INTRODUCCIÓN.

El paradigma de las micro-redes eléctricas surge como contrapartida de los sistemas tradicionales de transmisión de energía eléctrica, basados en redes de gran extensión y altas tensiones de operación. Las micro-redes comprenden regiones más reducidas, como una ciudad, un pueblo o un parque industrial, y un funcionamiento en baja o media tensión. A su vez, una micro-red (MR) puede operar en forma aislada o interconectada con otra/s, e incluso vinculada a una red de mayor porte [1].

En una MR, la necesidad de inclusión de generadores de baja potencia incentiva el empleo de fuentes basadas en recursos renovables. La generación distribuida en baja potencia mejora sustancialmente las condiciones de competitividad de generadores renovables, comprometida seriamente en el caso de redes tradicionales, motivo de los altos costos de inversión. La bibliografía especializada destaca la generación mediante parques solares (fotovoltaicos) y eólicos, como las fuentes renovables más utilizadas [1,2]. Además, otras formas de generación alternativas pueden verse beneficiadas por las mismas razones; entre ellas, las celdas de combustible (generación alternativa, aunque no renovable) constituyen el medio más habitual [3]. En tanto que la generación tradicional suele darse a partir del empleo de generadores accionados por motores diésel y micro-turbinas de gas [2,3].

Por otro lado, es necesario montar una estructura de comunicaciones que actúe como complemento de toda red de transmisión, debido al requerimiento de toma de mediciones y emisión de señales de consigna. En su contraste con redes tradicionales de transmisión, la reducida extensión de una MR facilita la implantación de un sistema de comunicaciones de mayor complejidad.

Sin embargo, ante la necesidad de abarcar regiones más amplias, la aplicación de micro-redes resulta en una alternativa más compleja y de difícil implementación. Para el caso, es factible la conformación de un sistema interconectado de MR, asociado a un mercado de importación y exportación de energía.

Un sistema interconectado de MR incrementa el área de cobertura, mejora las condiciones de seguridad en el suministro e incorpora una nueva alternativa de ingresos. El mercado eléctrico así constituido, requiere de una estructura de comunicaciones que puede implementarse en un esquema con dos niveles de jerarquía. En un primer nivel, cada MR dispone de una red de comunicación interna cuyo controlador opera localmente, con la finalidad de mantener el estado de operación en su nivel óptimo, generalmente asociado a la minimización de los costos de generación; aunque en el ámbito de las MR son eventualmente considerados otros criterios, como la reducción de emisiones contaminantes y/o la reducción de caídas de tensión [4]. En un nivel jerárquico superior, el controlador de cada MR se vincula a un controlador global (CG) del sistema, que funciona como agente supervisor del mercado, y asigna las correspondientes órdenes de compra-venta para un mercado *spot*, dadas las políticas estipuladas para la formación de precios. Para una MR con requerimientos de importación, su objetivo consiste en determinar las potencias a adquirir desde cada una de las restantes MRs del sistema, minimizando el costo de la transacción.

Admitiendo que una MR cualquiera está diseñada para operar a sus menores costos posibles (inferiores a cualquier alternativa de importación desde otra MR), las circunstancias de importación/exportación son originadas en casos en que una MR no dispone de la capacidad de potencia suficiente como para abastecer su demanda local. En este contexto, tales acontecimientos, como así también aquellos de fallas que puedan originarlos y las mismas operaciones de compra-venta, son considerados como eventos de tipo discreto. Asimismo, si bien los consumos corresponden a variables continuas, es posible interpretarlos como una sucesión de eventos discretos de demanda. Desde esta perspectiva, el sistema interconectado y el nivel jerárquico superior del esquema de comunicaciones descripto pueden modelarse en su totalidad como un sistema de eventos discretos [5].

En el presente trabajo, se propone una política de formación de precios en un mercado *spot* constituido por un sistema de MRs interconectadas, cuyas transacciones son monitoreadas y ordenadas por un agente controlador global. Este agente supervisor considera, a cada instante, el estado de operación de cada MR integrante del sistema y, en función de ello y de los esquemas de formación de precios, imparte órdenes de importación/exportación, decidiendo sobre las magnitudes de las potencias involucradas. De este modo, se minimiza el costo de la compra de energía eléctrica desde una MR a otra. Tanto el esquema de interconexión, como la lógica de la red de comunicación asociada, son modelados como un sistema de eventos discretos. Para el caso, se ha optado por el uso del formalismo DEVS (*Discrete Event System Specification*), como un conjunto de reglas orientadas a facilitar el modelado y la representación de sistemas de las características previamente descriptas. Entre sus puntos a favor se destaca la característica de ordenado del proceso de modelado, dado el diseño jerárquico de estructuras complejas (modelos atómicos y acoplados). La implementación en software es llevada a cabo mediante la librería DEVSJAVA (para el lenguaje Java) [6] y el simulador SimView [7]. Se incluyen también detalles sobre el mecanismo de formación de precios. Se presentan ejemplos de simulación, que permiten

visualizar cronológicamente las decisiones tomadas por el controlador central a efectos de optimizar el funcionamiento del sistema interconectado de MRs.

2. SISTEMA INTERCONECTADO.

2.1. Conformación estructural del sistema.

La Figura 1 esquematiza el sistema propuesto. En una primera instancia de estudio, no se considera conexión a una red externa de potencia (por ej., a la red interconectada nacional). Sin embargo, la generalización del presente estudio al caso con conexión a una red externa puede implementarse fácilmente mediante el reemplazo de una de las MR del sistema por la correspondiente conexión a la red, incluyendo su propio criterio de mercado.

Cada MR dispone de un controlador local (CL) vinculado por medio de una red de comunicación con el controlador global (CG) del sistema. Este último comanda los interruptores de una estación transformadora de acoplamiento que funciona como un centro de distribución. A partir de ésta se logra la adaptación de los niveles de tensión, la incorporación de los debidos sistemas de protección y el direccionamiento correspondiente de los flujos de potencia.

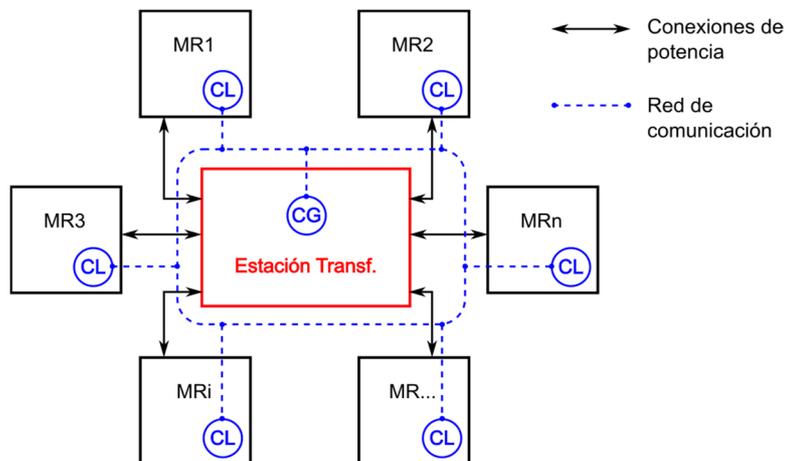


Figura 1 Estructura de un sistema interconectado de micro-redes.

2.2. Mecanismo de formación de precios.

La constitución del sistema interconectado propuesto requiere un mecanismo de formación para los precios de comercialización. La Ecuación (1) representa una propuesta para la conformación del precio de exportación de la energía (f_e) en una MR dada del sistema, cuando otra red adquiere desde la primera una potencia activa P .

$$f_e [US\$/kWh] = C_{G,\max} + k_a \frac{G_{\lim} - G_{\exp}}{G_{\lim}} C_{G,\min} + k_b \frac{P}{G_{\exp}} C_{G,\min} \quad (1)$$

El valor $C_{G,\max}$ es un precio de referencia alto; define el costo mínimo de exportación de la MR. Un posible criterio para su adopción consiste en igualarlo al costo operativo (costo de generación) del generador más costoso que incluye la MR. Su inclusión como término independiente en la Ecuación (1) permite, siempre que haya sido cuantificado con un criterio adecuado, evitar que la MR comercialice energía a un costo inferior al de su producción.

Por otro lado, el segundo término representa la componente del precio que sirve de penalización al hecho de comprometer la capacidad de reserva de la MR exportadora. En éste, G_{\lim} es la capacidad límite de generación interna de la MR, mientras que G_{\exp} corresponde a la capacidad de potencia disponible para ser exportada. La diferencia entre ambas (se utiliza una diferencia normalizada) se incrementa cuando la potencia exportada por la MR crece, incrementando el costo de venta. El factor $C_{G,\min}$ es un costo de referencia bajo y se emplea para uniformar unidades.

La capacidad límite de generación representa una proporción de la capacidad instalada Cap de la MR, es decir, puede obtenerse de acuerdo a la Ecuación (2), con un factor k_{\lim} positivo y menor a la unidad. Así, k_{\lim} será tanto menor cuando mayor sea la capacidad de reserva y/o cuanto mayor sea la actividad de mantenimiento que reduzca la capacidad real disponible.

$$G_{\lim} = k_{\lim} \cdot Cap \quad (2)$$

Para un instante dado, siendo G_{int} la potencia generada internamente por los generadores de la MR, la potencia factible de ser exportada (G_{exp}) puede obtenerse de la Ecuación (3).

$$G_{\text{exp}} = G_{\text{lim}} - G_{\text{int}} \quad (3)$$

$$G_{\text{exp}} = k_{\text{lim}} \cdot \text{Cap} - G_{\text{int}} \quad (4)$$

El valor G_{int} considera tanto la potencia producida por la MR para abastecer su carga local (demanda y pérdidas de transmisión), como la exportada al mercado.

Finalmente, el tercer término en la Ecuación (1) incorpora una componente al costo de venta asociada a la potencia (P) comercializada. De este modo, el costo de venta de la energía será tanto más alto cuanto mayor sea el flujo energético pretendido (potencia). El término considera un esquema de normalización a partir de G_{exp} y uniformización de unidades por medio de $C_{G,\text{min}}$.

Los coeficientes k_a y k_b actúan como factores de peso, y su cuantificación será parte de la estrategia de una MR en su interacción con las restantes redes del sistema. De esta forma, tanto k_a y k_b , como los costos de referencia ($C_{G,\text{min}}$ y $C_{G,\text{max}}$), influirán sensiblemente en las condiciones de competencia de cada MR en el mercado.

2.3. Transacción óptima de compra.

El costo instantáneo de exportación (f) debe ser función de la potencia comercializada. Debe representar el costo horario por manutención de una potencia exportada P , de modo que puede calcularse a partir del costo por unidad de energía (f_e), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f[\text{US\$}/kW] = f_e \cdot P \quad (5)$$

En consideración de las Ecuaciones [1-5], el costo instantáneo de exportación puede expresarse de una forma más compacta, a partir de las Ecuaciones [6-8].

$$f = A \cdot P^2 + B \cdot P \quad (6)$$

$$A = \frac{k_b \cdot C_{G,\text{min}}}{k_{\text{lim}} \cdot \text{Cap} - G_{\text{int}}} \quad (7)$$

$$B = C_{G,\text{max}} + \frac{k_a \cdot G_{\text{int}}}{k_{\text{lim}} \cdot \text{Cap}} \cdot C_{G,\text{min}} \quad (8)$$

En un sistema con n micro-redes, el costo total de importación asumido por la j -ésima MR ($f_{\text{imp},j}$) podrá calcularse a partir de la potencia P_i importada desde cada una de las restantes, de acuerdo con la Ecuación (9).

$$f_{\text{imp},j}[\text{US\$}/kW] = \sum_{i=1, i \neq j}^n (A_i \cdot P_i^2 + B_i \cdot P_i) = \sum_{i=1, i \neq j}^n (A_i \cdot P_i^2 + B_i \cdot P_i) - (A_j \cdot P_j^2 + B_j \cdot P_j) \quad (9)$$

Ante dicha transacción de compra, el CG intervendrá en la regulación, de modo de decidir sobre las magnitudes P_i , con el objeto de minimizar la función de la Ecuación (9). Es decir, ante la imposibilidad de una MR de abastecer su demanda y la consecuente decisión de importación, las potencias adquiridas en el mercado y desde cada una de las restantes micro-redes del sistema, surgen del problema de optimización planteado en las Ecuaciones [10-12].

$$\min_{P_i (i \neq j)} f_{\text{imp},j} \quad (10)$$

s.a.

$$P = \sum_{i=1, i \neq j}^n P_i \quad (11)$$

$$0 \leq P_i \leq k_{\text{lim},i} \cdot \text{Cap}_i - G_{\text{int},i} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (i \neq j) \quad (12)$$

La restricción de la Ecuación (11) representa un balance entre la potencia total P importada por la j -ésima MR y las adquiridas desde cada una de las restantes (P_i). Por otro lado, la Ecuación (12)

establece que la potencia que puede ser comercializada por cada MR responde a su capacidad disponible de exportación.

En consideración de la restricción de igualdad y de un escalar λ , el Lagrangiano Γ resulta:

$$\Gamma(P_i, \lambda) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n (A_i \cdot P_i^2 + B_i \cdot P_i) - \lambda \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n P_i - P \right) \quad (13)$$

La metodología de multiplicadores de Lagrange implica el procesamiento de la Ecuación (13) a partir de la conformación del sistema (lineal, en este caso) de la Ecuación (14), mediante sus derivadas parciales igualadas a cero. La solución del sistema permite identificar la selección óptima de potencias P_i , dada la convexidad de $f_{imp,j}$, garantizada por los parámetros positivos incluidos en las Ecuaciones (7,8).

$$\begin{bmatrix} 2A_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 2A_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \dots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 2A_i & \dots & 0 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 2A_n & -1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_1 \\ -B_2 \\ \vdots \\ -B_i \\ \vdots \\ -B_n \\ P \end{bmatrix} ; (i \neq j) \quad (14)$$

Además:

$$\left. \frac{\partial \Gamma}{\partial P_i} \right|_{P_i} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial P_i} \right|_{P_i} - \lambda = 0 \quad (15)$$

$$\Rightarrow \lambda = \left. \frac{\partial f_i}{\partial P_i} \right|_{P_i} \quad (16)$$

Debe notarse que las derivadas en la Ecuación (15), evaluadas en las condiciones de compra óptima, pueden ser expresadas también como función de los costos marginales de exportación. La Ecuación (16) permite concluir en que la transacción óptima de compra se realiza cuando los costos marginales de venta expuestos por las redes exportadoras son iguales entre sí, y toman el valor de λ .

3. MODELADO CON EVENTOS DISCRETOS

3.1. Eventos de interacción.

La implementación del modelo de MRs interconectadas se realiza mediante el uso del formalismo DEVS. Su aplicación implica la construcción del modelo por medio de bloques interconectados a partir de un mecanismo de comunicación mediante puertos. El bloque de mayor relevancia en el esquema será aquel que represente a una MR.

La disposición de puertos permite el envío y recepción de paquetes de información, de modo que un envío representa la ocurrencia de un evento (discreto). Para el caso se han definido varios tipos de eventos, de forma que cada uno de ellos es asociado a una serie de datos transmitidos entre bloques del esquema DEVS (típicamente, entre micro-redes). A continuación se detallan los tipos de eventos considerados.

3.1.1. Evento "Estado".

La aplicación de la metodología descrita en la sección 2.3, con vistas a decidir sobre una transacción óptima de compra, sólo puede realizarse si se conoce el estado de operación (instantáneo) de cada MR integrante del sistema. En efecto, la valoración de cada función de precio de exportación (f_i) está sujeta a las condiciones de consumo, pérdidas, capacidad de generación, importación y exportación, que definen consecuentemente a la generación interna (G_{int}) y a la capacidad de generación disponible para exportar (G_{exp}), de cada MR. Asimismo, los costos de referencia ($C_{G,max}$ y $C_{G,min}$) y los factores de ponderación (k_a y k_b) podrán eventualmente actuar como parámetros variantes y ser modificados durante la operación del sistema.

En consecuencia, el modelo requiere de un registro del estado de operación de cada MR, que además se encuentre permanentemente actualizado. En el esquema propuesto, cada bloque representativo de una MR dispone de un puerto de salida "outEst" que permite la emisión de eventos tipo "Estado", consistentes en paquetes de información actualizada sobre su estado interno de operación, incluyendo: capacidad (Cap), generación interna (G_{int}), pérdidas de transmisión (P_L), potencia activa demandada por la carga local (P_C), potencia exportada (P_e), potencia importada (P_i) y el conjunto de parámetros de la Ecuación (1). También se incluye el detalle sobre las magnitudes de potencia importadas (exportadas) desde (hacia) cada una de las restantes redes del sistema. Una MR emitirá un evento "Estado" cada vez que alguna de sus variables o alguno de sus parámetros es modificado.

3.1.2. Evento "Falla".

Un evento "Falla" es enviado a una MR con el objetivo de notificarle sobre una falla que ha incurrido en una modificación de su capacidad instalada (Cap). Así, es posible simular la existencia de una falla que conlleve la restricción en la capacidad operativa de un generador, o incluso la desconexión del mismo. La magnitud (potencia) de la reducción es enviada como información contenida en el evento; un valor negativo permite simular la recuperación de la falla.

3.1.3. Evento "Consumo".

Si la curva de carga para una MR se representa en forma discreta, como una sucesión secuencial de eventos de carga, cada uno de éstos representaría a un evento tipo "Consumo". Así, cada MR dispone de un puerto "cons" por el que recibe eventos de "Consumo" cada vez que su demanda local se modifica. De esta manera, el evento funciona como notificación del cambio de demanda interna. La magnitud (potencia activa) de dicha demanda se incluye en el evento.

3.1.3. Evento "Compra".

Ante la ocurrencia de eventos tipo "Falla" y/o "Consumo", una MR se verá obligada a modificar su estado de operación, alterando convenientemente el valor de G_{int} . En caso de haber alcanzado su capacidad límite (G_{lim}), recurrirá a importar lo necesario desde el mercado. En estas condiciones, los resultados del criterio de transacción óptima darán lugar a la conformación de un evento "Compra", emitido hacia las restantes MR del sistema. En este evento, la red importadora indica las potencias que serán adquiridas desde cada una de las restantes MR, en adición a otros datos de relevancia estadística, como los precios unitarios exhibidos por las MR exportadoras y el costo marginal de la transacción.

3.1.4. Evento "Abortar".

Cuando la potencia de importación requerida por una MR para satisfacer su demanda local es superior a la disponible en el mercado (fijada por la capacidad de exportación de cada una de las MR restantes), la MR emitirá un evento "Abortar" que permitirá cancelar la ejecución de las simulaciones, debido a la imposibilidad de resolver el problema.

3.2. Modelo interno de una MR.

La Figura 2 representa un diagrama de estados para el modelo interno de una MR, que consiste conceptualmente en un modelo atómico, de acuerdo a lo establecido por las especificaciones del formalismo DEVS.

Cada MR parte desde un estado inicial *pasivo* y evoluciona hacia un estado *optimizando* siempre que reciba un evento en alguno de sus puertos de entrada (transición externa). Allí será factible recibir notificaciones de eventos tipo "Falla", "Consumo", "Estado" y/o "Compra". Debe notarse que es posible la recepción de múltiples eventos en simultáneo, dado el aprovechamiento del concepto de *DEVS paralelo*.

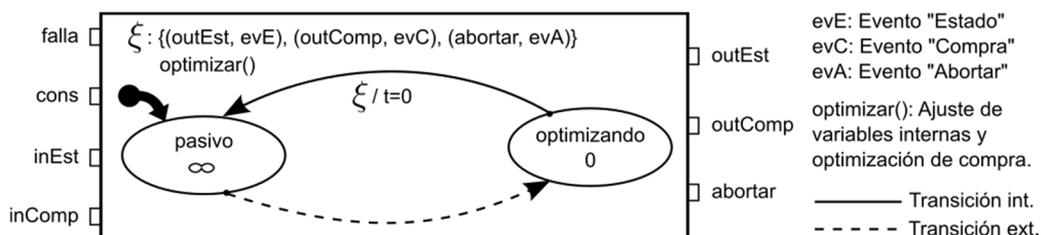


Figura 2 Diagrama de estados para una MR (modelo DEVS).

En el estado *optimizando*, la MR estudia la modificación de su generación interna (G_{int}), con el objetivo de restablecer el balance energético tras los cambios indicados por los eventos recibidos en puertos de entrada. El resultado de dicho análisis podrá eventualmente concluir en la importación de energía. En este caso, la MR ejecutará un algoritmo **optimizar()** que resuelve el

problema de la transacción óptima y permite la conformación del correspondiente evento "Compra". Finalizado dicho proceso, la MR evoluciona sin otros retardos (tiempo nulo de transición interna) nuevamente a su estado *pasivo*, a la espera de nuevas notificaciones. La función de salida ξ , asociada a la transición interna, representa la emisión de los correspondientes eventos "Estado", "Compra" o "Abortar", a partir de los respectivos puertos de salida "outEst", "outComp" o "abortar", en función de lo obtenido al finalizar los cálculos del estado *optimizando*.

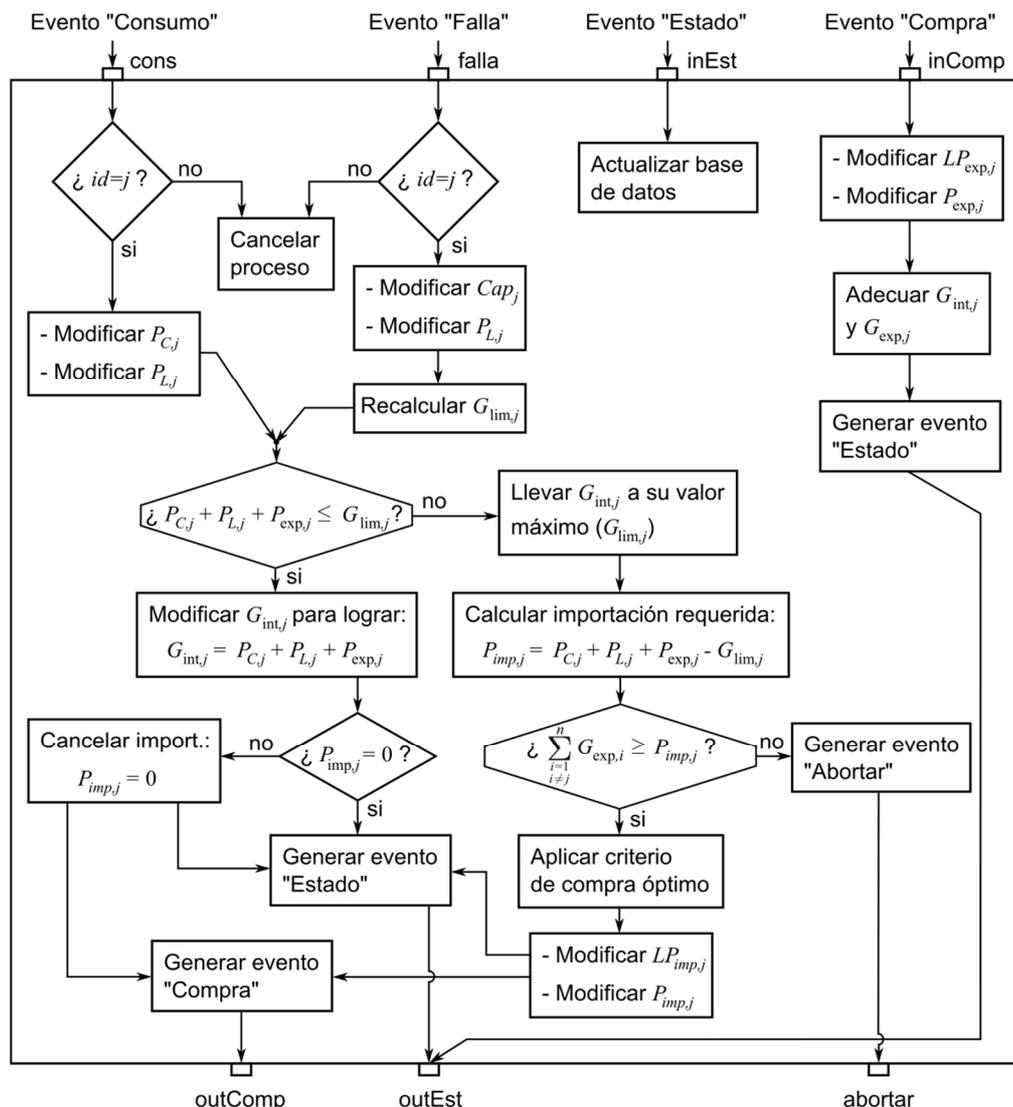


Figura 3 Lógica de operación para la j -ésima MR del sistema.

La Figura 3 esquematiza la lógica descrita para la j -ésima MR del sistema, en la forma de un diagrama de flujo. Ante la recepción de eventos de "Consumo" o "Falla", las operaciones correspondientes serán ejecutadas sólo si se verifica que un atributo id , contenido en el mismo evento, indica correspondencia con la red que lo recibe. De esta forma, la información es enviada a todas las MRs del sistema, pero sólo será procesada por aquella a la cual es específicamente dirigida. De la misma manera, todo evento "Estado", "Compra" o "Abortar" dispondrá de un atributo indicador de la MR que lo envía.

Ante eventos tipo "Consumo" o "Falla", las posibles consecuencias son idénticas. En primera instancia, la MR analiza la posibilidad de abastecer su demanda (P_{Cj}), pérdidas (P_{Lj}) y compromisos de exportación (potencia total P_{expj}) en función de su capacidad límite de generación interna (G_{limj}). Si es factible, adecuará G_{intj} a la debida magnitud para lograr dicho balance y emitirá un evento "Estado" dirigido hacia las restantes redes del sistema, para notificar de su cambio. Además, si hasta ese momento se encontraba importando una potencia total P_{impj} , pero sus cálculos demuestran que la compra es ahora innecesaria, las importaciones serán canceladas, debiendo emitir el correspondiente evento "Compra" para notificar los cambios al mercado.

Si por el contrario, no es posible lograr el balance energético recurriendo únicamente a generación local, la MR modificará G_{intj} a su valor límite (G_{limj}) e importará la diferencia desde el mercado. Es posible que en alguna circunstancia las capacidades de exportación de las restantes MRs del sistema ($G_{exp,i}$) sean insuficientes para la cantidad P_{impj} demandada por la j -ésima MR; en cuyo

caso un evento “Abortar” dará aviso del problema, con el objeto de detener la simulación. Si no sucede dicho inconveniente, el criterio de optimización de la compra se aplica para generar una lista $LP_{imp,j}$ con las potencias a importar desde cada red del sistema. Esta especificación es incluida en el evento “Compra” resultante. Dichos cambios exigen la emisión de un evento “Estado”, con la finalidad de dar aviso al sistema sobre el nuevo estado alcanzado.

Por otro lado, ante la recepción en puertos de entrada de eventos “Estado”, la MR identificará a la red emisora (acceso al atributo id) y registrará dicha información en su base de datos. Dicha base de datos es requerida por la MR cada vez que la misma requiera determinar las características de una transacción en el mercado y/o las capacidades de importación de las restantes MRs.

La recepción de un evento “Compra” (puerto “inComp”) implicará para la MR modificar sus variables de: potencia total exportada ($P_{exp,j}$), lista de potencias exportadas hacia cada una de las restantes MRs ($LP_{exp,j}$), generación interna ($G_{int,j}$) y capacidad de exportación ($G_{exp,j}$). Estos cambios también deberán ser informados al sistema mediante un evento “Estado”.

Es importante destacar que las políticas estipuladas para las relaciones comerciales entre MRs implican que dada la lista LP_{exp} de potencias exportadas por una MR, ésta no podrá modificar tales magnitudes por decisión propia. De modo que la participación en el mercado requiere el cumplimiento de dicha restricción a modo de compromiso con la estabilidad y previsibilidad del sistema. Consecuentemente, la potencia intercambiada entre dos MRs podrá ser modificada sólo cuando la MR importadora lo indique a partir del correspondiente evento “Compra”, tal como lo sugiere el diagrama de la Figura 3.

3.3. Modelo del sistema interconectado.

La Figura 4 muestra la conformación de un sistema interconectado de MRs (ejemplificado con sólo 3 MRs). Su estructura corresponde a un modelo acoplado que resulta de vincular cada bloque representativo de una MR con los restantes, haciendo uso del mecanismo de comunicación mediante puertos. Así, cada puerto de salida, emisor de eventos tipo “Estado”, se vincula a todos los puertos de entrada asignados a la recepción de eventos del mismo tipo. El mismo esquema de interconexión es utilizado para cada uno de los tipos de eventos definidos.

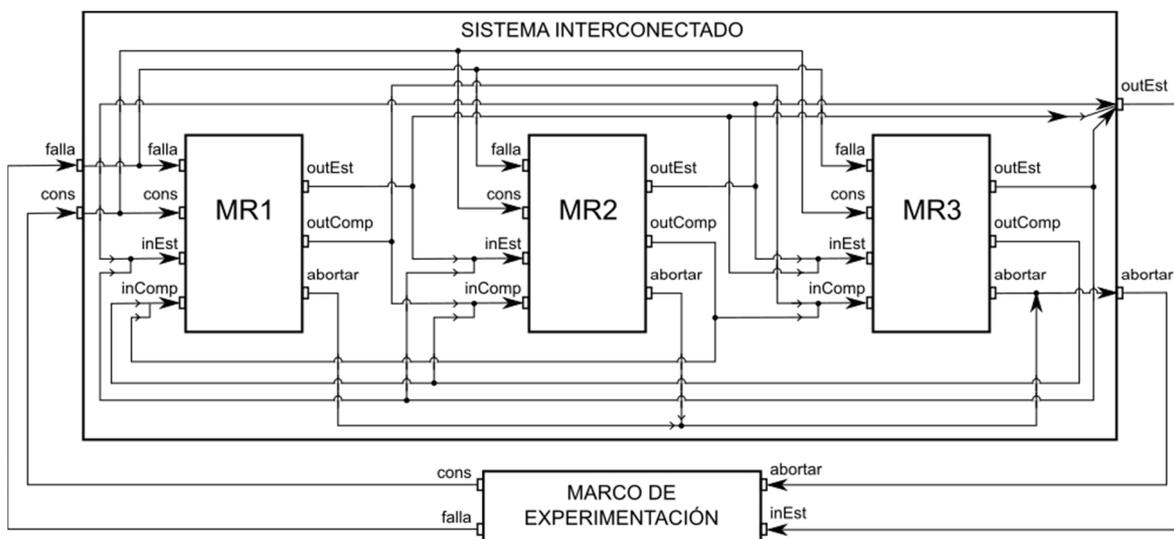


Figura 4 Modelo acoplado de 3 MRs interconectadas.

El *Marco de Experimentación* representa un agente externo al sistema que inyecta secuencialmente sobre el mismo, eventos tipo “Consumo” y “Falla”. De este modo, el experimento a realizar consiste en una lista programada de eventos “Consumo” y “Falla”, ordenados en el tiempo. Asimismo, el *Marco de Experimentación* registra la ocurrencia de todos los eventos manifestados en el sistema y almacena convenientemente dicha información en archivos externos de salida, con el objetivo de permitir el posterior procesamiento de los resultados del ensayo. Cada evento “Consumo” y “Falla”, programado como parte de la experiencia, debe disponer del correspondiente atributo identificador de la MR hacia la cual es dirigido (id).

4. IMPLEMENTACIÓN Y DICUSIÓN DE CASOS SIMULADOS.

4.1. Herramientas de software.

La implementación en software se realiza mediante la librería DEVJSJAVA (para el lenguaje Java) y el simulador SimView. Se utiliza el concepto de *polimorfismo*, de modo que el modelo se constituye generando una librería derivada de la librería DEVJSJAVA, la cual hereda las

características necesarias para su interpretación por parte del simulador SimView. Por su parte, SimView dispone de una interfaz gráfica sencilla que esquematiza cada componente del modelo como un bloque, identificando sus puertos y conexiones.

A continuación se presentan dos casos de estudio, implementados para evaluar el rendimiento del sistema desarrollado.

4.2. Caso de estudio I.

Un caso sencillo de estudio se propone a partir de la conformación de un sistema de 3 MRs interconectadas. Para los parámetros del modelo se ha optado por factores fijos $k_a=k_b=0,5$ y $k_{lim}=0,85$, en todos los casos.

Se establecieron costos de referencia $C_{G,max}=\{0,40; 0,38; 0,60\}$ y $C_{G,min}=\{0,10; 0,15; 0,12\}$ [$US\$/kWh$], para las micro-redes MR1, MR2 y MR3, respectivamente. Asimismo, se suponen condiciones iniciales a partir de las cuales cada MR abastece su demanda local, sin vínculos iniciales de importación/exportación, y se asume una aproximación para las pérdidas de transmisión (P_L), como equivalentes a un 1,5% de la potencia activa demandada por la carga (P_C).

El experimento simulado consiste en la ocurrencia de los siguientes eventos: i) Transcurridas 5 unidades de tiempo ($u.t.$) desde el estado inicial, el consumo de la MR2 se incrementa en 50 [kW]; ii) 3 [$u.t.$] después, la MR3 experimenta una falla de cortocircuito que es despejada por el sistema de protecciones, desconectando de la red a un generador de 200 [kW] nominales; iii) luego de 2 [$u.t.$], el consumo de la MR3 se incrementa en 40 [kW]. Las capacidades y consumos iniciales de cada red, como así también los resultados de las operaciones de importación/exportación, pueden observarse en la Figura 5.

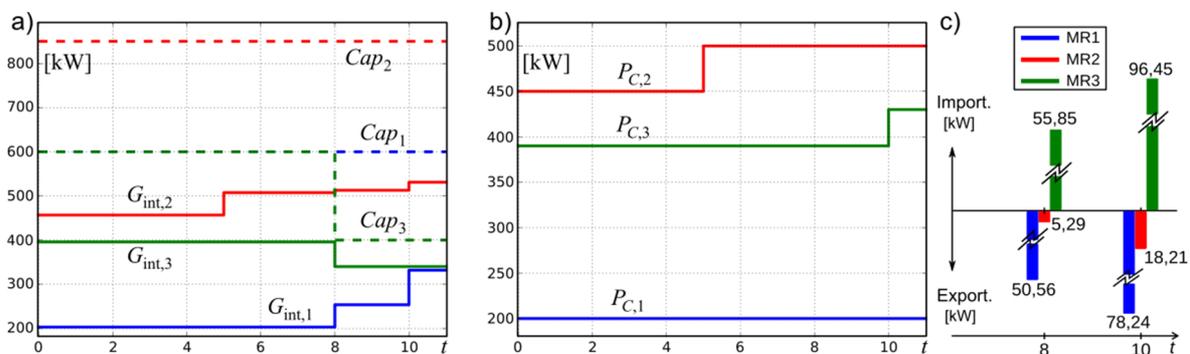


Figura 5 Caso de estudio I: Simulación sencilla.
a) Generación y capacidades. b) Consumos. c) Importación y exportación.

En i), la MR2 es capaz de compensar el incremento de su demanda con generación local, pues dispone de la capacidad remanente suficiente. En consecuencia, ante el aumento en la demanda la MR2 no requiere de importación de energía. En ii), la MR3 ve disminuida su capacidad nominal, reduciéndose de 600 a 400 [kW]. Sin embargo, la capacidad real de la red es algo inferior, puesto que eventualmente pueden presentarse restricciones operativas en determinados componentes de las instalaciones de generación, u otras restricciones asociadas a operaciones de mantenimiento. Además, es posible que alguna proporción reducida de la capacidad nominal sea destinada a circunstancias de emergencia. Tales condiciones son contempladas por el factor k_{lim} , de modo que la capacidad real disponible de la MR3 es $G_{lim,3}=k_{lim}\cdot Cap_3=340$ [kW], inferior a su demanda local, que es cercana a los 400 [kW]. En este contexto, la MR3 requiere importar la diferencia (55,85 [kW]) desde el mercado. Dicha transacción de mercado es gestionada por el controlador global del sistema, bajo la aplicación del criterio de compra óptimo. En este caso, las MRs exportadoras (MR1 y MR2) se diferencian en la capacidad de potencia disponible para ser comercializada ($G_{exp,i}$) y, fundamentalmente, en los costos de referencia ($C_{G,max,i}$ y $C_{G,min,i}$), que determinan las condiciones de competitividad de cada una de ellas en el mercado.

Es de destacar que la decisión de importación desde MR1 o MR2 no presenta una estrategia dominante (de evidente conveniencia), puesto que $C_{G,max,1}>C_{G,max,2}$, pero $C_{G,min,1}<C_{G,min,2}$, de modo que la decisión de compra no dispone de una solución trivial. Estas relaciones sugieren alta competitividad en precios de exportación. Los resultados de la optimización se observan en la Figura 5c, para 8 [$u.t.$]. Claramente, la MR1 exhibe una componente de energía exportada de mayor magnitud que MR2.

Posteriormente, para 10 [$u.t.$], la demanda de la MR3 se ve incrementada en 40 [kW], perjudicando aún más sus condiciones de abastecimiento. Mientras que se considera un incremento extra del 1,5%, representativo del consecuente incremento en las pérdidas de transmisión. Un nuevo problema de optimización para la importación es resuelto por el controlador, arribando a los resultados indicados por el gráfico. Es importante notar que si bien en ambas operaciones de compra se concluye en la importación de una potencia superior desde la MR1, en ii) la potencia

adquirida desde la MR1 representa un 90,5% del total involucrado en la transacción (9,5% se importa desde la MR2); mientras que en iii) esta proporción disminuye a un 81,1% (19,9% se compra a la MR2). Tales apreciaciones refieren a la relevancia de los parámetros $C_{G,max,i}$ y $C_{G,min,i}$, y su afección a las condiciones mencionadas de competitividad.

4.3. Caso de estudio II.

La Figura 6 muestra, para el mismo sistema de 3 MRs, un caso de estudio más complejo y sus resultados. Cada MR debe abastecer una carga que responde a una curva de demanda diaria, discretizada cada intervalos de una (1) hora. Dichas curvas fueron conformadas a partir de combinaciones lineales de perfiles típicos de consumos residenciales e industriales, escalados de los propuestos en [8].

En el experimento, la MR3 ve disminuida su capacidad en 160 [kW] luego de la hora 10 y, posteriormente, en otros 120 [kW] luego de la hora 12, como puede apreciarse en la curva de Cap_3 de la Figura 6a. En tales circunstancias, la MR3 no dispone de capacidad suficiente para abastecer su demanda local, accediendo al mercado para importar la diferencia requerida desde MR1 ($P_{i,1}$) y MR2 ($P_{i,2}$), de acuerdo con la Figura 6c. Es de destacar aquí, que en casos extremos la totalidad de la potencia importada puede eventualmente devenir desde una única MR exportadora.

El caso prevé la posible variación horaria de la demanda para cada MR del sistema y, consecuentemente, la ocurrencia simultánea de eventos. Más aún, para un mismo instante es factible la ocurrencia de sendos eventos de consumo, como eventos de falla y otros asociados a una transacción en el mercado. En tal caso, el simulador DEVS considera al conjunto de eventos convergentes a los puertos de entrada de un bloque (una MR, por ejemplo), y los procesa secuencialmente de acuerdo a la lógica implementada en el modelo, sin avanzar en el tiempo simulado (sistema *DEVS paralelo*). Así, el estado final de variables y parámetros de cada bloque (MR) es definido luego de que la totalidad de eventos simultáneamente concurrentes haya sido contemplada. A continuación, el simulador avanza en el tiempo hasta un instante posterior, para cual se prevea la ocurrencia de algún otro evento.

El procesamiento paralelo de eventos permite incrementar la complejidad de los modelos estudiados y representar el comportamiento de un mercado spot como el propuesto. Asimismo, la concurrencia temporal de diferentes sucesos en un sistema es habitual en un esquema de redes interconectadas como el ejemplificado, y el formalismo DEVS demuestra ser una herramienta de utilidad para simular su comportamiento.

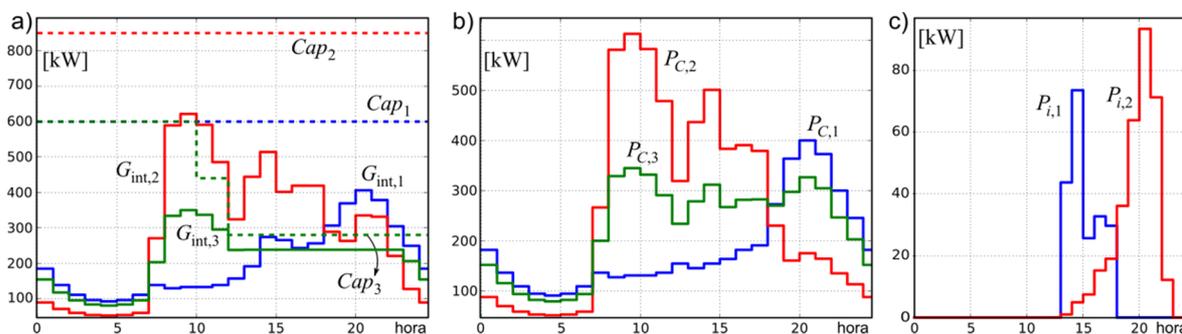


Figura 6 Caso de estudio II: Simulación con curvas de demanda diaria.
a) Generación y capacidades. b) Consumos. c) Importación de MR3.

5. CONCLUSIONES.

Se desarrolló un modelo de mercado eléctrico correspondiente a un sistema de MRs interconectadas. El modelo presenta un diseño flexible, que permite definir el número de MRs a estudiar y sus parámetros (potencias instaladas, curvas de carga, etc.).

Si bien el presente estudio considera un sistema de MRs aislado de una red de potencia externa de mayor porte (como por ejemplo, del Sistema Interconectado Nacional), la generalización al caso interconectado es directa. La estructura jerárquica propuesta, derivada de la utilización del formalismo DEVS, permite extender las capacidades del modelo con facilidad, permitiendo la incorporación de otros componentes/eventos al esquema planteado.

El modelo de simulación permite estudiar el desenvolvimiento de una MR en el contexto de un sistema interconectado. Los resultados mostraron que, ante eventos de consumo y otros representativos de restricciones operativas a las capacidades de generación en una MR, y en casos de requerimientos de importación, el algoritmo de optimización logró obtener en forma rápida las potencias a ser adquiridas desde las restantes MRs del sistema. Además, la ejecución de las simulaciones ha demostrado obtener soluciones coherentes. Más aún, ante casos de estudio más complejos que los aquí presentados, las soluciones obtenidas han resultado

satisfactorias. Los tiempos de cómputo asociados son extremadamente bajos (inferiores al segundo en una PC de prestaciones estándares).

4. REFERENCIAS.

- [1] Chowdhury, S.; Chowdhury, S.P.; Crossley, P. (2009). *Microgrids and Active Distribution Networks*. London. First Edition. The Institution of Engineering and Technology. London, United Kingdom.
- [2] Faisal, Mohamed. (2008). "Microgrid modeling and online management". Thesis (Ph. D.). Helsinki University of Technology. Helsinki, Finland.
- [3] Faisal, Mohamed; Heikki, Koivo. (2010). "System modelling and online optimal management of MicroGrid using Mesh Adaptive Direct Search". *Electrical Power and Energy Systems*. vol. 32, 5, pp. 398-407.
- [4] Loyarte, Ariel; Clementi, Luis; Vega, Jorge. (2015). "Operation of a Microgrid with Optimal Assignment at the Generation Nodes". *IEEE PES Conference Proceedings on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT-LA)*, pp. 726-731. Montevideo, Uruguay.
- [5] Nutaro, James; Teja Kuruganti, Phani; Miller, Laurie; Mullen, Sara; Shankar, Mallikarjun. (2007). "Integrated Hybrid-Simulation of Electric Power and Communications Systems". *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-8. Tampa, USA.
- [6] Mather, Jeff. (2003). "The DEVSJAVA simulation viewer: A modular GUI that visualizes the structure and behavior of hierarchical DEVS models". Thesis (Ph. D.). The University of Arizona. Tucson, USA.
- [7] Kim, Sungung; Sarjoughian, Hessam S.; Elamvazhuthi, Vignesh. (2009). "DEVS-suite: a simulator supporting visual experimentation design and behavior monitoring". *Proceedings of the 2009 Spring Simulation Multiconference (SpringSim)*, pp. 1-7. San Diego, USA.
- [8] Jardini, José Antonio; Tahan, Carlod M.V.; Se Un Ahn, Gouvea. (2000). "Dialy Load Profiles for Residential, Commercial and Industrial Low Voltage Consumers". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, 1, pp. 375-380.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), al grupo de Control y Seguridad Eléctrica (CySE) de la UTN-FRSF y al CONICET, por el apoyo financiero recibido.