

Identificación del Trabajo	
Área:	Energía
Categoría:	Doctorando
Regional:	Santa Fe

Gestión Eficiente de Micro-Redes Eléctricas Interconectadas. I. Modelado Mediante el Formalismo DEVS

Ariel LOYARTE

Grupo de Control y Seguridad Eléctrica (CySE), Facultad Regional Santa Fe (Lavaise 610, Santa Fe), UTN

E-mail de contacto: aloyarte@frsf.utn.edu.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Jorge Vega, en el marco del proyecto "Modelado, optimización, estimación y control de una micro-red eléctrica" (código ENUTIFE0002405TC).

Resumen

En el presente trabajo, se desarrolla el modelo de simulación de un sistema de micro-redes eléctricas interconectadas, interpretado como sistema de eventos discretos, en un contexto de relaciones comerciales (importación/exportación de energía). Un controlador global actúa como monitor del sistema, designando las potencias involucradas en las operatorias de importación con objeto de minimizar el costo de la transacción. Se propone un mecanismo de formulación de precios de compra-venta que permite que las relaciones comerciales se realicen en el marco de un mercado spot. El modelo se constituye aplicando el formalismo DEVS. Mientras que la implementación en software se realiza a partir de la librería DEVJSJAVA y el simulador SimView.

Palabras Claves: micro-redes; modelado; formalismo DEVS

1. Introducción

1.1. Contextualización

Las redes de transmisión de energía eléctrica son conformadas tradicionalmente por redes de gran extensión, que cubren porciones importantes de la superficie de un país, así como por elevadas tensiones de operación. Como contrapartida surge el paradigma de las micro-redes, que comprenden regiones más reducidas, como una ciudad, pueblo o parque industrial, y funcionamiento en baja o media tensión. Una micro-red (MR) puede operar en forma aislada o interconectada con otra/s, e incluso vinculada a una red de mayor porte (Chowdhury et al., 2009).

En una MR, un controlador recibe las mediciones adecuadas y envía a cada generador las consignas de potencia y tensión para mantener en todo momento a la misma operando en su estado óptimo. Éste suele definirse como aquel que minimiza el costo total de generación. Aunque en el caso de micro-redes pueden también ser considerados otros indicadores, tales como las emisiones contaminantes, o las desviaciones de tensión en los nodos de carga (Loyarte, 2014).

La consideración de otros criterios adicionales, más allá de los económicos, responde a las mayores facilidades de implantación de un sistema de comunicaciones de mayor complejidad, frente al caso de redes tradicionales de gran extensión. Una estructura de comunicaciones debe ser montada como complemento de toda red de transmisión, puesto al requerimiento de toma de

mediciones y emisión de señales de consigna. El tamaño reducido de una MR favorece la implementación de sistemas de comunicación más completos y que permitan, por ende, controlar la operación de la misma bajo criterios más estrictos.

Sin embargo, ante la necesidad de abarcar regiones más amplias, la aplicación de micro-redes resulta en una alternativa más compleja y de dificultosa implementación. Deberán ser conformadas varias micro-redes para incrementar la superficie de cobertura, siendo dos opciones las posibles: i) micro-redes operando en forma aislada; ii) micro-redes interconectadas. La opción i) puede ser descartada, puesto a que la alternativa ii) ofrece la ventaja de la conformación de un mercado de importación y exportación de energía.

Un sistema interconectado de micro-redes incrementa el área de cobertura, mejora las condiciones de seguridad e incorpora una nueva alternativa de ingresos. La estructura de comunicaciones puede implementarse en un esquema con dos niveles de jerarquía. En primera instancia, 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 (Loyarte et al., 2015). En un nivel jerárquico superior, el controlador de cada MR se vincula a un controlador global (CG) del sistema, que funciona como monitor de las variables más relevantes y de los eventos de falla que puedan ocurrir. Ante este panorama y un adecuado sistema de conformación de precios de compra-venta para un mercado spot, el CG emitirá las eventuales órdenes de importación/exportación y la magnitud de las potencias involucradas, de acuerdo a la necesidad o conveniencia de las redes integrantes del sistema. La decisión más adecuada es aquella que minimiza el costo total de la operación.

Los acontecimientos de falla que provoquen circunstancias de importación/exportación, y las mismas operaciones de compra-venta, son eventos de tipo discretos. Por otro lado, si bien el consumo interno de una MR se corresponde con una variable continua (una curva de carga, por ej.), puede también ser interpretada como una sucesión de eventos (discretos) de cambios de la demanda. Así, el sistema interconectado y el nivel jerárquico superior del esquema de comunicaciones pueden modelarse como un sistema de eventos discretos.

El formalismo DEVS (Discrete Event System Specification) ha demostrado ser una herramienta de buen desempeño para modelar sistemas de eventos discretos, en muchos casos orientados a redes de comunicación (Nutaro et al., 2007). 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), y la disponibilidad de una buena cantidad de herramientas de software para la implementación y ejecución de simulaciones. Esto último fundamentalmente a partir de librerías desarrolladas para los lenguajes de programación más comunes en el ámbito científico (Kim et al., 2009).

1.2. Objetivos

En el contexto de un sistema de micro-redes interconectadas, se propone:

- Desarrollar una política de formulación de precios de acuerdo al estado de operación de cada MR integrante del sistema.
- Elaborar un criterio de decisión de compra con la finalidad de reducir al mínimo los costos en toda transacción de importación.
- Modelar el sistema mediante la aplicación del formalismo DEVS, considerando a una sucesión programada de eventos de falla y consumo, como excitación.
- Implementar el modelo de simulación en un software apropiado.

Los eventos de falla permiten simular la desconexión (y vuelta al servicio) de un generador, o la desconexión de una línea de transmisión; mientras que los eventos de consumo representan la variabilidad de la demanda. De esta manera, el modelo permite analizar el desenvolvimiento de cada MR en un contexto de relaciones comerciales.

La implementación en software es realizada mediante la librería DEVJAVA y el simulador SimView (Mather, 2003).

2. Metodología

2.1. Interacción de importación/exportación

Considérense los esquemas de la Figura 1, representantes de un sistema de n micro-redes interconectadas, donde toda MR se vincula con cada una de las restantes. Tales vínculos permiten la importación y exportación de energía eléctrica. Con el objeto de que dichas transacciones puedan realizarse en cualquier instante en que se considere necesario (o eventualmente conveniente), es excluyente la existencia de una política de formación de precios de compra-venta con la que toda MR deba cumplir.

Si el mecanismo de formulación de precios es único y considera el estado de operación de las micro-redes, el controlador global CG de la Figura 1b podrá decidir cuáles deben ser las potencias a importar para toda operatoria de compra, de modo que el costo de la operación sea mínimo (problema de optimización). De tal manera que tanto las acciones de monitoreo como la aplicación de la lógica de optimización pueden ser llevadas a cabo por el mismo CG.

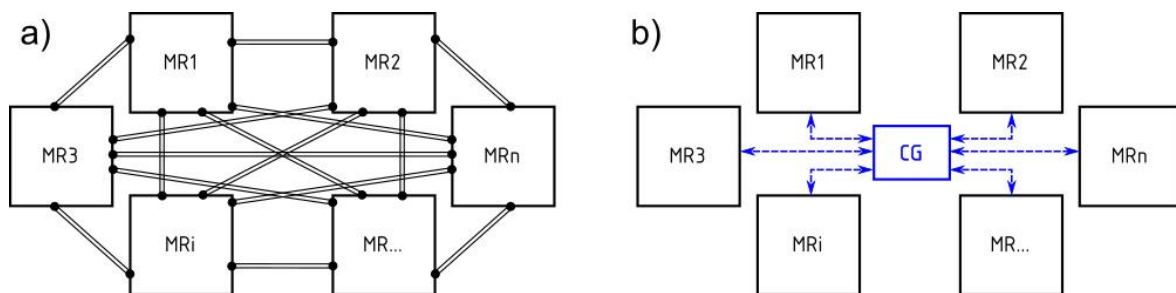


Figura 1. Sistema interconectado. a) Conexiones de potencia. b) Red de comunicación.

2.2. Precio de compra-venta de energía

Se propone una metodología de formación de precios que considere el estado momentáneo de cada MR. Un mecanismo adecuado debe cumplir con los siguientes lineamientos:

- i. El costo de venta no debe ser inferior a un determinado costo de referencia $C_{G,max}$, que represente un valor típico elevado; por ej. el costo del generador en operación más costoso, obtenido para cuando éste desarrolla su potencia nominal. Esto asegura que una MR no venda energía a un costo inferior al costo marginal de generación.
- ii. La capacidad disponible en una MR suele ser inferior a la capacidad instalada Cap (suma de potencias nominales de generadores no renovables). Los motivos refieren a condiciones de mantenimiento y operación de los equipos involucrados en cada centro de generación, y a cuestiones de reserva. Así, la generación límite G_{lim} de una MR queda limitada a un valor $G_{lim} = k_{lim} \cdot Cap$, con k_{lim} un factor positivo menor a la unidad.

- iii. El costo de venta debe ser tanto mayor cuanto menor sea la potencia disponible para exportar, de acuerdo al límite G_{lim} y la generación interna G_{int} de la MR. Dicha relación responde a que la venta de potencia compromete la capacidad de reserva de la MR.
- iv. De acuerdo a ley de oferta y demanda, el costo de compra dispondrá de una componente que será menor cuando se solicite una potencia P mayor, y viceversa.

La Ec. (1) define el precio f_u por unidad de energía, cuando P es la potencia exportada ante una operación de venta, donde k_a y k_b son pesos positivos menores a la unidad (factores de ponderación), y $C_{G,min}$ es un precio bajo de generación (precio de referencia). La Ec. (1) cumple con los lineamientos anteriores y puede, por tanto, ser aplicada en cualquier circunstancia para determinar el costo unitario de una transacción entre dos micro-redes.

$$f_u \left[\frac{U\$S}{kWh} \right] = C_{G,max} + k_a \cdot \frac{G_{lim} - (G_{lim} - G_{int})}{G_{lim}} \cdot C_{G,min} + k_b \cdot \frac{G_{lim} - G_{int} - P}{G_{lim} - G_{int}} \cdot C_{G,min} \quad (1)$$

Nótese que si se exporta hacia más de una MR del sistema, P es el total exportado. Las Ecs. [2-4] representan a la Ec. (1) en una forma más compacta.

$$f_u = A \cdot P + B \quad (2)$$

$$A = - \frac{k_b \cdot C_{G,min}}{k_{lim} \cdot Cap - G_{int}} \quad (3)$$

$$B = C_{G,max} + \left(\frac{k_a \cdot G_{int}}{k_{lim} \cdot Cap} + k_b \right) \cdot C_{G,min} \quad (4)$$

2.3. Criterio de decisión de compra

En un sistema de n micro-redes, si la k -ésima pretende importar una potencia P_{imp} , siendo P_i la adquirida desde la i -ésima MR (de costo unitario de venta $f_{u,i}$), el costo total f de la compra resulta en el indicado por la Ec. (5).

$$f[U\$S/h] = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n (f_{u,i} \cdot P_i) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n (A_i \cdot P_i^2 + B_i \cdot P_i) \quad (5)$$

El criterio a considerar para realizar la compra consiste en seleccionar la combinación de potencias P_i ($i=1,2,\dots,n; i \neq k$) tal que el costo f de la operación sea mínimo. Es decir, minimizar la función de la Ec. (5), sujeta a las restricciones de las Ecs. (6, 7).

$$P_{imp} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n P_i \quad (6)$$

$$0 \leq P_i \leq k_{lim,i} \cdot Cap_i - G_{int,i} \quad i = 1,2,\dots,n ; i \neq k \quad (7)$$

A partir de la Ec. (6) puede formularse la función de restricción h y generarse el Lagrangiano F , con λ un escalar positivo.

$$h = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n P_i - P_{imp} \quad (8)$$

$$F = f - \lambda \cdot h \quad (9)$$

El procesamiento de la Ec. (9) mediante el método de multiplicadores de Lagrange, resulta en la conformación final del sistema de Ecs. (10).

$$\begin{bmatrix} 2 \cdot A_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 2 \cdot A_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 2 \cdot A_i & \dots & -1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 2 \cdot A_n & -1 \\ 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_1 \\ -B_2 \\ \vdots \\ -B_i \\ \vdots \\ -B_n \\ P_{imp} \end{bmatrix} ; \quad (i \neq k) \quad (10)$$

Dado que cada ecuación del sistema sólo depende de la i -ésima potencia a importar y la incógnita λ , no se requieren métodos numéricos particulares para determinar eficientemente la solución, en cuanto a recursos y velocidad de cómputo, aún para un número importante de micro-redes participantes. Sin embargo, determinadas las potencias P_i , debe verificarse el cumplimiento de la Ec. (7). Si en algún caso ocurriera $P_i < 0$, entonces se asigna $P_i = 0$, se elimina la correspondiente ecuación del sistema y se determina la nueva solución. De forma análoga se procede si resulta $P_i > k_{lim,i} \cdot Cap_i - G_{int,i}$, en cuyo caso se asigna $P_i = k_{lim,i} \cdot Cap_i - G_{int,i}$.

Debe notarse que los coeficientes A_i y B_i , y la restricción de la Ec. (7), dependen del estado momentáneo de cada MR, de acuerdo a la generación interna $G_{int,i}$ y los parámetros $k_{lim,i}$ y Cap_i .

Por otro lado, las primeras $n-1$ filas de la Ec. (10) representan genéricamente a la expresión $2 \cdot A_i \cdot P_i - B_i = \lambda$, cuyo primer miembro es coincidente con la derivada del i -ésimo costo de venta (i -ésimo término de la función de la Ec. (5)). Consecuentemente, se demuestra:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial P_i} \right|_{P_i} = \lambda \quad ; \quad (i \neq k) \quad (11)$$

Siendo $\partial f / \partial P_i$ el costo marginal de importación desde la i -ésima MR, la Ec. (11) establece que el óptimo de la transacción se logra cuando el costo marginal de importación sea el mismo para todas las micro-redes desde las cuales se compra, y su valor es λ .

2.4. Modelo como sistema de eventos discretos

Se propone modelar un sistema de micro-redes interconectadas como sistema de eventos discretos, cuya evolución dependa de una sucesión de eventos programados en el tiempo (experimento específico), dados por la ocurrencia de fallas y variaciones de potencia demandada. Se ha escogido al formalismo DEVS para su representación.

En un sistema como el propuesto, la evolución en las fases de cada componente individual (modelos atómicos) depende de la ocurrencia de eventos externos, comúnmente interpretados como *mensajes*. Para el caso, se han utilizado de cinco (5) tipos de mensajes diferentes, interpretados como *objetos*, de acuerdo al paradigma de Orientación a Objetos. Esto permite que un mismo mensaje almacene más de un dato concreto, como si de atributos distintos del mismo mensaje se trataran. Se describen a continuación cada uno de los mensajes contemplados.

2.4.1. Mensaje “Estado”

Almacena la información que resume el estado de operación de una MR. Incluye los factores k_a , k_b y k_{lim} , los costos de referencia $C_{G,max}$ y $C_{G,min}$, la capacidad Cap , la generación interna G_{int} , la potencia P_L disipada como pérdidas de transmisión, la potencia activa P_C demandada internamente por la carga, la potencia exportada P_e , y una lista LP_i que indica las potencias importadas desde cada una de las micro-redes vecinas.

Además se incluye un entero id ($1 \leq id \leq n$) que permite identificar a la MR que ha emitido el mensaje y, por lo tanto, a la MR que se corresponde con dicho estado de operación.

2.4.2. Mensaje “Falla”

Brinda información correspondiente a una falla que implique la apertura de una línea de transmisión o la desconexión de un generador. Almacena la potencia P_{desc} representativa de la cantidad a descontar de la capacidad Cap por efecto de la falla, el valor de las pérdidas P_L inmediatamente después de la misma, y el id que identifica a la MR que manifiesta el evento.

2.4.3. Mensaje “Consumo”

Representa un cambio en la potencia P_C demandada como consumo de una MR. Contiene la magnitud P_C , las pérdidas P_L luego del cambio de carga, y el id de la MR a la que refiere.

2.4.3. Mensaje “Compra”

Representa una solicitud de compra por parte de la MR identificada con el atributo id . Almacena en una lista P_{compra} las potencias a importar desde cada una de las redes vecinas.

2.4.3. Mensaje “Abortar”

Mensaje emitido por una MR cuando la potencia que ésta requiere importar para satisfacer su demanda local es superior a la disponible para comprar desde las restantes redes del sistema. Señala a partir del atributo id a la MR que ha padecido el problema.

2.4.4. Modelo de una MR

La Figura 2 representa un diagrama de fases (State Chart) del modelo de una MR. Cada MR almacena internamente los parámetros y variables asociados a los estados de operación de todas las micro-redes del sistema. Esto se logra mediante una lista de objetos tipo “Estado”.

Inicialmente la MR se encuentra en una fase “pasivo”, y sólo evoluciona hacia la fase “optimizando” cuando recibe un mensaje “Falla”, “Consumo”, “Estado” o “Compra”, en alguno de los puertos de entrada “falla”, “cons”, “inEst” o “inComp”, respectivamente.

En el estado “optimizando” (con tiempo de transición interna $t=0$), la MR identifica el tipo de mensaje recibido y actúa en consecuencia. Si recibe un mensaje “Estado”, lo registrará en su base de datos, con objeto mantener actualizada su información respecto de la operación del sistema. Si el objeto recibido es de tipo “Falla” y el atributo id indica correspondencia, alterará en función de éste la capacidad Cap y actualizará las pérdidas en función del atributo P_L . Si se trata de un mensaje “Compra”, esto indica que una MR ha decidido importar energía (comprar), por lo que

deberá interpretar sus atributos y modificar convenientemente la variable P_e , representativa de la potencia exportada, y la generación interna G_{int} , que se incrementará en la misma cantidad. Mientras que en el caso de un objeto “Consumo”, si el id indica correspondencia, se modificarán las variables internas P_c (potencia demandada) y P_L (pérdidas).

Previo a la transición interna que logra la evolución nuevamente a la fase “pasivo”, se ejecuta la función de salida ξ . Si alguna variable interna de la MR fue modificada durante la ocurrencia de la fase “optimizando”, dicha función implicará la emisión de un mensaje “Estado” por el puerto “outEst” y dirigido a los puertos “inEst” de las restantes micro-redes, con el objeto de que éstas tomen registro de tales cambios.

Por otro lado, ante la recepción de mensajes “Falla” o “Consumo” y las modificaciones pertinentes, en la fase “optimizando” la MR determina si aún es posible abastecer su demanda local. Si esto no ocurriera, la diferencia entre su capacidad disponible ($k_{lim} \cdot Cap$) y la potencia necesaria (consumo interno P_c y potencia exportada P_e) constituye la cantidad que requerirá importar; en cuyo caso aplica el criterio de compra desarrollado en secciones anteriores, con fin de decidir las cantidades a adquirir desde cada red vecina y, con ello, conforma un objeto “Compra”. En ese caso, la función ξ se utiliza para emitir dicho mensaje a través del puerto “outComp” y hacia los puertos “inComp” de las restantes micro-redes. Cuando no fuera posible resolver matemáticamente el problema, se emite un mensaje “Abortar” por el puerto “abortar”.

Nótese que la optimización del precio de compra requiere de conocer el estado actual de toda MR del sistema. En ello se justifica la base de datos de objetos “Estado”.

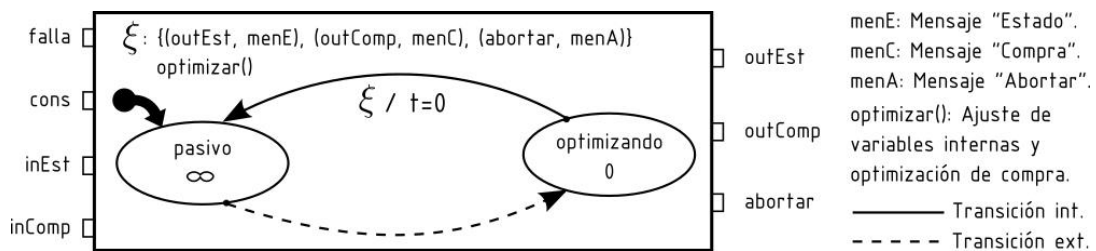


Figura 2. State Chart del modelo de una MR.

2.4.4. Marco de experimentación

El “Marco de Experimentación” constituye el complemento necesario al modelo para su posterior implementación en un esquema de simulación, mediante un software adecuado. Se ha conformado a partir de un modelo acoplado, constituido por tres (3) modelos atómicos interconectados como se indica en la Figura 3. El “Generador de eventos” emite los eventos que hayan sido programados para el experimento. De modo que un experimento se concibe como una lista de mensajes tipo “Consumo” y “Falla”, asociados a un tiempo de ocurrencia.

El “Transductor” actúa como monitor del sistema. Toma registro de todo evento “Falla”, “Consumo” o “Estado” y almacena ordenadamente esta información en archivos de salida, de forma que sea posible su procesamiento durante o finalizada la simulación.

El módulo “Aceptor” envía una señal de parada al “Generador de eventos” cuando hayan sido finalizados los eventos programados. Asimismo, este último detiene su ejecución cuando recibe un mensaje “Abortar” desde alguna MR del sistema.

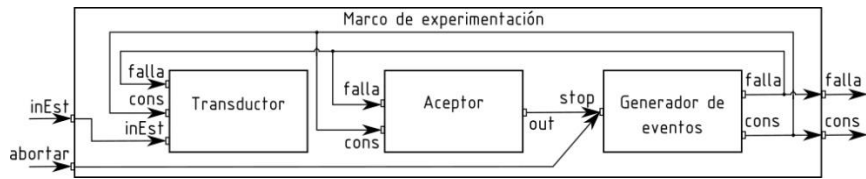


Figura 3. Marco de experimentación.

3. Resultados

El modelo ha sido implementado en software mediante el uso de la librería DEVJAVA (para el lenguaje Java) y el simulador SimView; herramientas disponibles en forma gratuita.

DEVJAVA utiliza el concepto de *polimorfismo*; el modelo se implementa como un paquete Java que contiene la definición de las clases representantes de cada componente (atómico o acoplado) y de cada tipo de mensaje. Todo componente debe ser derivado de componentes básicos provistos por la librería (se utiliza el concepto de *herencia de clases*).

Por su parte, SimView dispone de una interfaz gráfica que permite corroborar el correcto desempeño del modelo para simulaciones sencillas, al mismo tiempo que ayuda al proceso de depurado del mismo, permitiendo detectar ciertos errores en la programación.

Con el objeto de disponer los resultados de la simulación para su posterior análisis, se ha programado al bloque “*Transductor*” para exportar dicha información a archivos CSV. Luego, es posible importar su contenido desde programas de cálculo o planillas de cálculo.

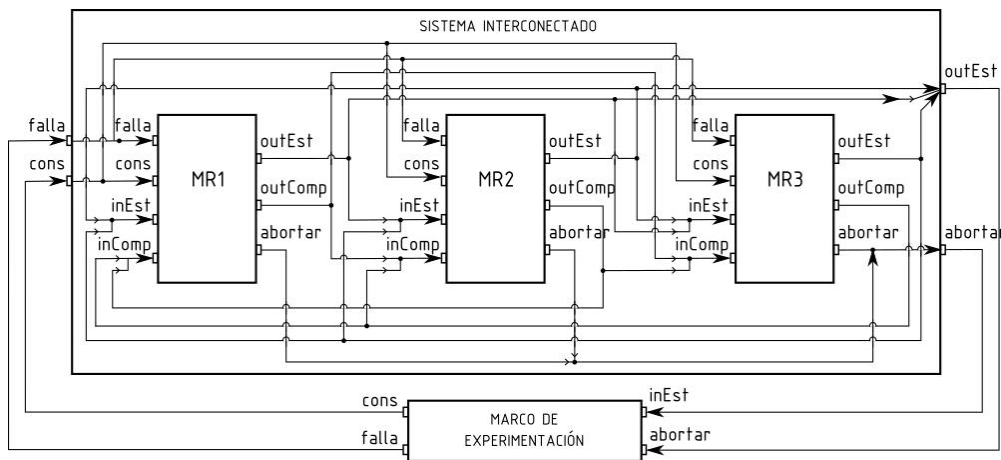


Figura 4. Modelo con tres (3) micro-redes interconectadas.

La Figura 4 muestra la estructura de un sistema de tres (3) micro-redes interconectadas. A modo de prueba sencilla se ha simulado su desempeño bajo un experimento que 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].

Ante los eventos ii) y iii), la MR3 no puede abastecer su demanda interna, por lo que debe generar al límite de su capacidad real, e importar la diferencia desde MR1 y MR2, de acuerdo a la aplicación del criterio de compra óptimo. Las condiciones de partida y los resultados obtenidos en

función del tiempo t de simulación, se exhiben en la Figura 5. En todos los casos se consideró $k_a=k_b=0,5$ y $k_{lim}=0,85$, mientras que las pérdidas de transmisión (P_L) se aproximaron a un 1,5% del consumo local (P_C). Los costos de referencia se indican en la Tabla I.

Tabla I. Costos de referencia para el ejemplo.

Costos de referencia	MR1	MR2	MR3
$C_{G,min}$ [U\\$/kWh]	0,10	0,15	0,12
$C_{G,max}$ [U\\$/kWh]	0,45	0,47	0,65

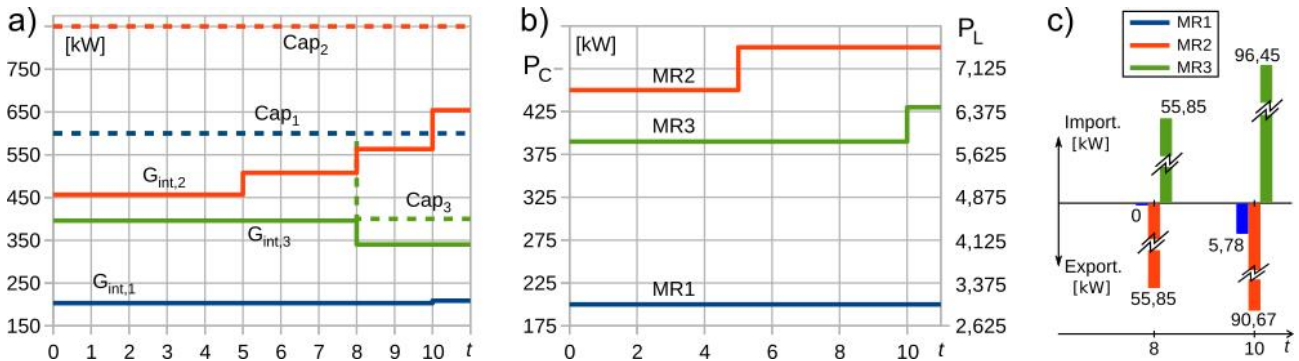


Figura 5. Resultados de la simulación.

a) Generación y capacidades. b) Consumos y pérdidas. c) Importación y exportación.

4. Discusión

La ejecución de las simulaciones ha demostrado obtener soluciones correctas tanto en casos sencillos, como el ejemplificado, como en casos más complejos, con multiplicidad de eventos. Los tiempos de cómputo se consideran bajos en una PC estándar, de modo que se admite cualquier experimento de simulación, sin restricciones de complejidad.

DEVJSJAVA emplea el concepto de *DEVJS paralelo*, permitiendo la ocurrencia simultánea de eventos en los puertos de entrada de cualquier componente, como así también la emisión simultánea de multiplicidad de mensajes en puertos de salida. Esta característica fue explotada en el modelado, de forma de obtener un grado de versatilidad máximo.

El modelo de simulación puede ser utilizado para estudiar el contexto en que se desenvuelve una MR ante un sistema interconectado y la posibilidad de relaciones de comercialización de energía. Se propone y parametriza el sistema, se especifican condiciones iniciales, se ejecuta la simulación, y los resultados que afectan a una MR en particular pueden ser empleados posteriormente como perturbaciones en un modelo detallado de la misma MR. En un trabajo previo (Loyarte et. al, 2015) se ha modelado una MR típica, incluyendo modelos de cada centro de generación. Asimismo, se propuso una metodología que determina la asignación óptima de potencias y tensiones de generación, de acuerdo a un funcional que cuantifica el estado de operación de la red. No obstante, se trata de una MR operando en forma aislada. La combinación de los modelos y algoritmos desarrollados en aquella oportunidad, con el modelo de simulación aquí propuesto, puede permitir estudiar la forma de optimización de la MR, considerando otros acontecimientos externos (importación, exportación, fallas), con la red en modo interconectado.

Se plantea a futuro incorporar la distinción de la generación interna (G_{int}) entre los distintos tipos de fuentes contenidas en la red (grupos diesel, celdas de combustible, parques eólicos, etc.).

En primera instancia, se plantea distinguir la generación convencional de la renovable. Se dispone de un antecedente (Loyarte, 2014) en cual se han estudiado modelos estáticos de generadores eólicos y fotovoltaicos, en cuanto a la dependencia de la potencia obtenida y las condiciones climatológicas. En consecuencia, se propondrá la inclusión de eventos representativos de variaciones en las condiciones ambientales (viento, temperatura y radiación solar).

El procedimiento mediante el cual se configura el sistema (parámetros y condiciones iniciales) y se conforma el experimento a simular, es discutido en una segunda parte del trabajo: *Gestión Eficiente de Micro-Redes Eléctricas Interconectadas. II. Análisis de Escenarios Simulados*. En ésta, dicho procedimiento y el correspondiente análisis de resultados se realiza a partir de casos sencillos de estudio. En el corto plazo, se prevé incorporar características que faciliten la simulación de escenarios más complejos, añadiendo, por ej., opciones de discretización de curvas de demanda y algoritmos de post-procesamiento de resultados.

5. Conclusiones

El modelo desarrollado presenta un diseño flexible, y es posible constituir un sistema con un número a elección de micro-redes alterando simplemente una opción de configuración.

Además, su estructura jerárquica (motivo del uso del formalismo DEVS) permite extender sus capacidades con facilidad, incorporando otros componentes al esquema.

Por otro lado, disponer de una estructura de formación de precios y comercialización de energía para un sistema interconectado como el propuesto, y su correspondiente modelo de simulación, puede a futuro permitir la combinación de lo aquí presentado con algoritmos más ampliamente difundidos, y que estudian la optimización de recursos internos de una MR. De esta manera, el objetivo consistiría en ofrecer una solución para sistemas de micro-redes que admitan la cobertura de regiones más extensas, y con beneficios en términos de seguridad y mercado.

Bibliografía

- Chowdhury, S., Chowdhury, S.P., Crossley, P. (2009). *Microgrids and Active Distribution Networks*. London: The Institution of Engineering and Technology.
- Kim, S., Sarjoughian, H.S., Elamvazhuthi, V. (2009). DEVS-suite: a simulator supporting visual experimentation design and behavior monitoring. *Proceedings of the 2009 Spring Simulation Multiconference, SpringSim* (págs. 1-7). San Diego: Society for Modeling & Simulation International.
- Loyarte, A., Clementi, L., Vega, J. (2015). Asignación Óptima de Potencias de Generación en una Micro-Red Eléctrica con Demanda Distribuida Variable. *V Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial MACI* (págs. 273-276). Tandil: N. Biedma, P. A. Lotito, L. Parente, A. Rubiales (Eds.).
- Loyarte, A. (2014). Propuesta de micro-red eléctrica para estudios de operación y optimización. Topología, generación y demandas. *Jornada de Jóvenes Investigadores Tecnológicos 2014*. Rosario.
- Mather, J. (2003). *The DEVSJAVA simulation viewer: A modular GUI that visualizes the structure and behavior of hierarchical DEVS models*. Ph. D. Thesis. The University of Arizona.
- Nutaro, J., Kuruganti, P.T., Miller, L., Mullen, S., Shankar, M. (2007). *Integrated Hybrid-Simulation of Electric Power and Communications Systems*. IEEE Power Engineering Society General Meeting (pags. 1-8). Tampa: IEEE.