

LA TEORÍA DE JUEGOS NO COOPERATIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ESTRATEGIA ÓPTIMA DE DEFENSA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA SOMETIDOS A ATAQUES INTENCIONALES

CÉSAR A. YAJURE R.¹ Y CLAUDIO M. ROCCO S.²

¹Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio. e-mail: cyajure@gmail.com

²Universidad Central de Venezuela. Escuela Básica de Ingeniería. e-mail: croccouv@gmail.com

Recibido: agosto 2011

Recibido en forma final revisado: agosto 2012

RESUMEN

En este trabajo se presenta un enfoque basado en la teoría de juegos no cooperativos para determinar las estrategias que debería seguir el administrador de una red eléctrica para minimizar el efecto que se presentaría si la red es sometida a un ataque intencional. Se usa la optimización multiobjetivo para generar el conjunto de soluciones no dominadas que conformarían las posibles estrategias que se deberían seguir, tanto por el administrador como por el atacante de la red, considerando simultáneamente el número de elementos a ser puestos fuera de operación y la carga servida. El problema de decisión presentado proporciona la estrategia óptima a seguir para defender la red, o las estrategias mixtas en el caso de que no se llegue al “equilibrio de Nash”. Para ilustrar el enfoque propuesto, se emplean dos casos utilizados en anteriores investigaciones por otros autores.

Palabras clave: Ataque intencional, Interdicción determinista, Optimización multiobjetivo, Teoría de juegos.

NON COOPERATIVE GAME TO DETERMINE THE OPTIMAL STRATEGY TO DEFEND POWER ELECTRICAL SYSTEMS SUBJECT TO INTENTIONAL ATTACKS

ABSTRACT

The approach used in this paper is based in the non-cooperative game theory for determining the strategies that an electrical net administrator must follow to lower the effect of an intentional attack. The use of multi objective optimization algorithms is proposed to generate the set of non-dominated solutions that would shape the possible strategies to follow not only by the administrator but also by the net attacker. The main idea is to simultaneously consider the number of components to be put out of service and the load served. The decision problem determines the optimal strategy to defend the net or the mixed strategies in case that this does not lead to a Nash equilibrium. To illustrate the proposed approach, two common systems described in the literature of power systems are evaluated.

Keywords: Intentional attack, Deterministic interdiction, Multiobjective optimization, Game theory.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es un elemento primordial para el desarrollo y funcionamiento de un país. En caso de ataques por algún agente externo, la cantidad de carga que deja de ser suplida va a depender de la magnitud del ataque (elementos que quedan fuera de servicio después del ataque) y sus efectos. El conocimiento de la magnitud de carga que deja de ser suplida, para un tipo de ataque particular, permitiría a los administradores de la red eléctrica, preparar, con antelación, medidas para minimizar el daño al sistema: por ejemplo, mediante acciones de redundancia en la red. Este hecho motiva el desarrollo de una metodología que permita

a los administradores del sistema eléctrico determinar cuál es la estrategia óptima de defensa contra ataques intencionales.

Los posibles ataques al sistema eléctrico de potencia podrían incluir ataques a los generadores, a las subestaciones, a las barras, a las líneas de transmisión, a los transformadores o a cualquier combinación de estos elementos. Arroyo & Galiana, (2005:792), consideran que “las líneas de transmisión son los elementos más desprotegidos y representan un blanco relativamente fácil para un agente destructivo”.

En este trabajo se presenta un enfoque para la determinación de una estrategia de defensa óptima de sistemas de potencia cuando son sometidos a ataques intencionales, basado en el concepto de interdicción determinista de grafos (IDG), la optimización multiobjetivo y la teoría de juegos no cooperativos.

De acuerdo con Rocco et al. (2009:173), “La IDG aplicada a los sistemas de potencia permite entender la relación que existe entre la puesta fuera de servicio de los componentes que lo forman (ya sea debido a fallas aleatorias o acciones intencionales) y la carga que es racionada”. Por otra parte, la teoría de juegos no cooperativos proporciona la herramienta para decidir qué opciones deben considerarse para proteger adecuadamente el sistema bajo estudio. Una extensión natural del concepto de interdicción determinista, consiste en suponer la existencia simultánea de dos entes contrapuestos, el interdicator y el administrador, quienes actúan sobre un mismo sistema. Este enfoque permite hacer uso de la teoría de juegos no cooperativos para modelar la situación planteada.

Algunos autores han planteado un modelo tipo defensor/atacante, a través de la teoría de juegos. Por ejemplo, Bell et al. (2008) presentaron un enfoque basado en la teoría de juegos para analizar una red de carreteras. El enfoque propone escenarios de ataques o fallas predefinidos y luego considera cómo utilizar la red de carreteras para minimizar la máxima pérdida esperada en el caso de que alguno de estos escenarios ocurra. A diferencia de un juego con estrategias puras, los autores plantean un enfoque con estrategias mixtas en las que las próximas decisiones del atacante son desconocidas para el defensor, y viceversa. Por su parte, Mishkovski et al. (2008), plantean la existencia de dos jugadores, el “enrutador” cuyo objetivo es encontrar caminos de costo mínimo a través de la red, y un “probador” cuyo objetivo es maximizar dicho costo. El juego presentado es de estrategias mixtas en la que hay probabilidades de selección de caminos, y probabilidades de falla de los enlaces.

De igual manera, Satayapiwat et al. (2008) presentan un análisis de vulnerabilidad de redes estocásticas multiflujo, utilizando la teoría de juegos.

Plantean el enfrentamiento de dos jugadores racionales, el administrador de la red, denominado enrutador de la red, y el atacante de la red, y como matriz de pagos definen una matriz de capacidades alcanzables. El objetivo del enrutador es encontrar el camino óptimo para la transmisión de bienes a través de la red, maximizando la capacidad alcanzable, mientras que el objetivo del atacante es obstruir

tal transmisión, minimizando la capacidad alcanzable.

El presente artículo plantea el uso de la teoría de juegos no cooperativos para proponer una metodología que permita determinar la estrategia óptima o robusta que el administrador del sistema, sometido al ataque intencional, deberá implantar para minimizar o eliminar el efecto de dicho ataque. El resto del trabajo está dividido de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan los conceptos básicos necesarios para presentar el enfoque presentado. En la sección 3 se aplica la metodología propuesta a dos sistemas eléctricos de potencia utilizados en anteriores investigaciones. Finalmente en la sección 4 se presentan las conclusiones.

CONCEPTOS BÁSICOS

El problema de la Interdicción Determinista

De acuerdo con el Diccionario Oxford (2000), la interdicción consiste en detener, generalmente con el uso de la fuerza, algún elemento que esté fluyendo desde un lugar hasta algún otro lugar en un sistema determinado. De acuerdo con Pan (2005: s/n) “los modelos matemáticos que representan la interdicción de redes pueden proporcionar tácticas y estrategias para atenuar las actividades de un adversario que esté operando en un sistema modelado a través de una red, con nodos y arcos.”

En ese sentido, se ha utilizado el concepto de interdicción de redes para encontrar las posibles alternativas que podrían seguir los administradores de una red eléctrica, ante posibles ataques intencionales a la misma. El objetivo del interdicator es minimizar el máximo flujo que puede circular entre dos nodos específicos de la red y hacerlo a un costo mínimo, lo que implica entonces un problema de optimización de múltiples objetivos.

De acuerdo con Wood (1993;2), “el problema de interdicción de redes más sencillo es aquel en el que un enemigo intenta circular desde un nodo fuente s hasta un nodo destino t en una red dirigida, mientras que el interdicator trata de romper los arcos de la red para eliminar todos los posibles caminos al enemigo”.

Sea $G=(N, A)$ el grafo asociado con una red, en donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos tales que $(i,j) \in A$, si y sólo si hay un arco desde el nodo i al nodo j . Sea s el nodo fuente y t el nodo terminal. Cada arco (i,j) tiene una capacidad de u_{ij} unidades y requiere de c_{ij} unidades de recurso para ser puesto fuera de servicio. Sea C la cantidad total de recursos de las que dispone el interdicator.

Se define la variable de decisión $x_{ij}=0$ si el arco (i,j) es inutilizado por el interdicator y $x_{ij}=1$ en el caso contrario. El problema matemático de interdicción se formula entonces como: determinar el conjunto de enlaces que deben ser inutilizados de forma de minimizar el máximo flujo que atraviesa la red, desde s hasta t , al menor costo posible, sujeto a las restricciones de: balance de conservación de flujo en los nodos y flujo a través de cada arco (el flujo no puede ser superior a su capacidad máxima). Las soluciones que se obtienen al resolver el modelo matemático se denominan en la literatura como estrategias de interdicción y, en general, tienen un costo asociado. Por tanto, en el problema clásico de interdicción, para cada estrategia de interdicción, es necesario evaluar el máximo flujo en la red. En la literatura existen varios enfoques para determinar este máximo flujo, en este trabajo se utiliza el algoritmo conocido con el nombre de Ford-Fulkerson (Ford & Fulkerson, 1962).

Si el costo de interdicción se mide en función de los elementos que se colocan fuera de servicio, entonces, si el costo mínimo es igual a 1, implica que se coloca fuera de servicio un enlace. Si el costo mínimo es igual a 2 unidades, entonces se obtendrá el par de enlaces que, al ser inhabilitado, hace que el flujo máximo sea mínimo.

La solución óptima al problema planteado sería aquella en la que el flujo máximo en la red es mínimo, y el costo de interdicción es mínimo. Estos son dos objetivos opuestos, es decir, minimizar el costo implica disminuir la cantidad de arcos interdictados, lo que por lo general trae como consecuencia un mayor flujo a través de la red. Entonces, se tiene un problema de optimización multiobjetivo.

La adaptación del concepto de interdicción a un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) requiere que dicho sistema se estructure primero como una red de múltiples fuentes (generadores) y múltiples demandas (cargas). En ese sentido, Armbruster et al. (2005), presentan un procedimiento para modelar sistemas de potencia a través de redes. El conjunto de nodos N estará representado por las barras del sistema eléctrico de potencia, el conjunto de arcos A estará conformado por los elementos de transmisión existentes entre cada par de barras (nodos).

A continuación:

- Todos los nodos de generación g se conectan a un súper nodo s . La capacidad máxima del enlace entre un generador g y s es igual a la capacidad de generación del generador g .
- Todos los nodos de carga d se conectan a un súper nodo

t . La capacidad máxima del enlace entre una carga d y el nodo t es igual a la carga asociada d .

Bajo estas condiciones, el máximo flujo entre s y t corresponde a la demanda máxima que puede ser suplida por el sistema de potencia.

Es importante resaltar que el uso de modelos de redes y los algoritmos de solución basados en la determinación del flujo máximo, no son condiciones necesarias para aplicar el concepto de IDG. La IDG presentada está basada en un modelo particular para evaluar el desempeño de la red, a través del algoritmo de flujo máximo. Sin embargo, es posible el uso de diferentes modelos para evaluar el desempeño de un sistema de potencia, tales como flujo de carga o flujo de carga óptimo AC/DC. Evidentemente modelos más reales requerirán mayor esfuerzo computacional. La IDG basada en flujo máximo ha mostrado proporcionar resultados iguales o muy parecidos en varios sistemas de potencia (Rocco et al. 2011).

Optimización Multiobjetivo

En problemas de optimización con un solo objetivo, se busca encontrar los valores de un conjunto de variables de decisión de manera tal de optimizar una función objetivo (maximizándola o minimizándola), sujeta a un conjunto de restricciones, mientras que el espacio de soluciones está por lo general bien definido. Cuando hay varios objetivos a ser optimizados, y son contradictorios entre sí, no habrá una solución óptima única sino que se tendrá un conjunto de posibles soluciones de igual calidad.

Para obtener la solución óptima, habrá un conjunto de soluciones compromisos óptimas entre los objetivos en conflicto.

El problema de optimización multiobjetivo referido por Tan et al. (2005:1-2), “consiste en encontrar un vector de variables de decisión el cual satisfaga las restricciones y optimice un vector de funciones cuyos elementos representen las funciones objetivos. Estas funciones forman una descripción matemática de los criterios de desempeño, los cuales usualmente están en conflicto entre ellos. Por consiguiente, el término optimizar significa encontrar una solución tal que dé los valores de todas las funciones objetivos aceptables para el diseñador.”

Una solución, vector de variables de decisión, es óptima si no es dominada por ninguna otra solución en el espacio de decisión. Cuando una solución no es dominada, no es peor en ninguno de los objetivos, y es mejor en al menos uno

de los objetivos. De acuerdo con Marler & Arora (2004), a la solución no dominada se le llama *óptimo de Pareto*, y al conjunto de tales soluciones compromiso óptimas se le conoce como el *conjunto óptimo de Pareto*, mientras que su imagen en el espacio de objetivos se le conoce como *frente de Pareto*.

El vector de variables de decisión se puede establecer como: $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, tales que satisfacen M restricciones de desigualdad, P restricciones de igualdad y están limitadas entre un límite superior y un límite inferior, y optimiza el vector de funciones objetivos. El modelo matemático, de acuerdo con Guliashki et al. (2009), es:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar/Maximizar } f(X) = [f_1(X), \dots, f_k(X)]^T \\ & \text{sujeto a:} \\ & g_i(X) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, M \\ & h_i(X) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, P \\ & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

En el problema de interdicción planteado en este trabajo, el conjunto de Pareto obtenido proporciona entonces el conjunto de posibles alternativas que ejecutaría el interdictor con el fin de impedir el correcto funcionamiento de la red, proporcionándole la mayor cantidad de daño posible. Por otra parte, partiendo de que el administrador de la red es un ser racional, y que pudiera tener a su disposición el conjunto óptimo de Pareto, podría seleccionar de este conjunto la estrategia óptima de defensa que minimice el daño que pudiera infringir el interdictor con su ataque al sistema.

En el SEP, la combinación de las posibles estrategias, que proporciona el conjunto de Pareto, junto con las posibles consecuencias, en términos de la magnitud de la carga dejada de servir, permite plantear un modelo de juego no cooperativo de dos jugadores, el interdictor y el administrador, para la búsqueda de una solución óptima.

Teoría de Juegos no Cooperativos

De acuerdo con Thierauf (2004:248), “la *teoría de juegos* se refiere a *condiciones de conflicto* de negocios en el transcurso del tiempo, en el que los competidores emplean *técnicas matemáticas* y el *pensamiento lógico* a fin de descubrir la mejor estrategia posible, con la finalidad de vencer a sus competidores”. En los juegos no cooperativos como el definido en la sección anterior, aparece el concepto de “suma cero” en el que la ganancia de un jugador o grupos de jugadores es igual a lo que pierde el otro jugador o grupo de jugadores, de manera tal que las “ganancias netas” son

cero. Cada jugador tendrá a su disposición un conjunto de alternativas, y al conjunto de las alternativas que tomarán los jugadores en cada instante del juego se le conoce como estrategias.

Se supone que todos los jugadores son racionales, es decir, tomarán la mejor decisión en cada instante correspondiente, teniendo como criterio maximizar su utilidad (ganancias), o en el peor de los casos minimizar sus pérdidas. Adicionalmente, cada jugador tiene información completa, es decir, conoce todas las posibles alternativas del otro jugador así como los beneficios que se derivan de ellas.

El modelo matemático de un juego no cooperativo, suponiendo dos jugadores, incluye el concepto de matriz de pagos. En ella se presenta cada alternativa de cada uno de los jugadores, así como los pagos de cada jugador asociados con cada una de sus alternativas. Estos pagos no son más que las consecuencias numéricas que se derivan de la combinación de cada alternativa jugada por el interdictor con cada alternativa jugada por el administrador. En el problema definido en este trabajo, estos pagos corresponden con el flujo máximo en la red, o en forma equivalente, la carga dejada de servir por la acción del interdictor.

González & Otero (2007) plantean que el juego se podría resolver utilizando el criterio de la *eliminación iterativa de estrategias estrictamente dominadas (EIEED)*, o aplicando el criterio del *equilibrio de Nash*.

Gibbons (1992) define una estrategia estrictamente dominada como aquella estrategia que es dominada por al menos otra estrategia. El procedimiento de solución aplicando el criterio EIEED consiste en ir eliminando las estrategias estrictamente dominadas hasta que eventualmente sólo queda una de estas estrategias, la cual será la solución del juego.

Por otra parte, de acuerdo con González & Otero (2007:112), el criterio del *equilibrio de Nash* consiste en “encontrar una estrategia que representa la mejor respuesta para cada jugador. Una vez que se alcanza el equilibrio ninguno de los jugadores tendrá incentivos de desviarse fuera de él.”

Existen situaciones en las que aplicando el criterio EIEED, o el criterio del Equilibrio de Nash, no se llega a una solución de una sola estrategia óptima. González & Otero (2007) indican que esto sucede debido a que se tienen varios equilibrios de Nash, y plantean que se escogerá aquel equilibrio que sea el más eficiente, menos riesgoso y que esté exento de posibilidades de coalición. Sin embargo, debido a que estas características para el equilibrio deben

cumplirse para los dos jugadores, es de esperarse que se requiera algún tipo de comunicación entre ellos, lo cual no es posible en los casos que trata esta investigación, es decir, los ataques intencionales.

Metodología Propuesta

La metodología propuesta en este trabajo consiste en obtener el frente de Pareto del problema multiobjetivo desde el punto de vista del interdicator, es decir, cuando se desea minimizar la carga servida y simultáneamente minimizar los costos de interdicción. El frente de Pareto proporciona las posibles alternativas de ataque de la red, y de igual manera puede proporcionar las posibles alternativas de defensa que implementaría el administrador de la red. Para esta actividad se requiere conocer la topología del sistema bajo estudio, las capacidades de cada uno de los elementos así como los valores de generación y carga y poseer una herramienta de cálculo que proporcione el frente de Pareto o en su defecto una aproximación a éste.

Con las alternativas de interdicción, las alternativas de defensa y con la carga que puede ser servida en el sistema, para cada combinación de alternativas, se genera una matriz de pagos que se utiliza en un juego no cooperativo donde los jugadores son el interdicator y el administrador.

El resultado de este juego no cooperativo determinará la estrategia óptima que implementarán ambos jugadores de forma de maximizar su utilidad o minimizar sus pérdidas.

CASOS DE ESTUDIO

A continuación se aplica la metodología propuesta en la sección anterior a dos sistemas de potencia utilizados anteriormente en otros trabajos de investigación. En ambos casos, el costo asociado a las opciones de los jugadores se considera unitario.

Caso 1. Sistema de 5 barras

El sistema de potencia a ser estudiado fue utilizado por Arroyo & Galiana (2005) en su generalización del “problema del terrorista”. La Figura 1 presenta la red eléctrica asociada con este caso, con cinco barras y seis líneas de transmisión. Cada uno de los generadores tiene un límite inferior de 0 MW y un límite superior de 150 MW. La capacidad de cada una de las líneas de transmisión es de 100 MW, y la carga total en la red es de 640 MW. En la Figura 2 se presenta el modelo de red de este sistema de potencia.

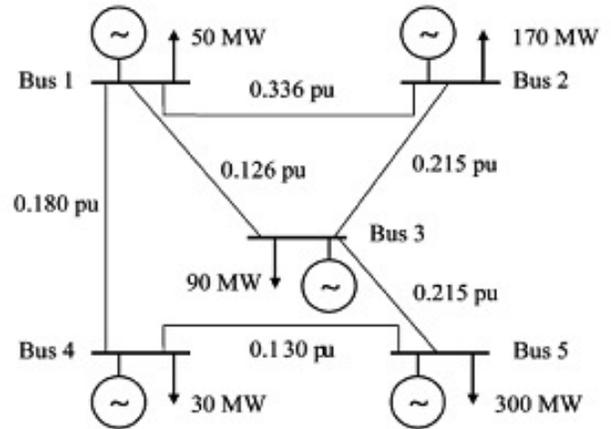


Figura 1. Caso de Estudio. Sistema de 5 barras

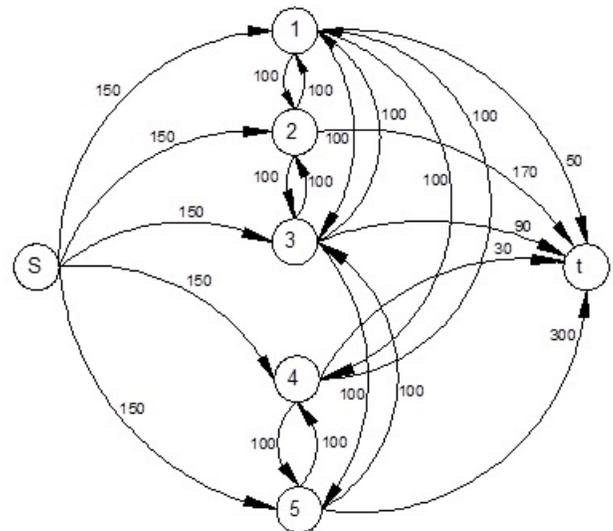


Figura 2. Sistema de 5 Barras. Modelo de Red

Por ser un sistema relativamente pequeño (definido en términos del número de líneas de transmisión que pueden ser interdictadas), se pueden considerar todas las combinaciones posibles de elementos de transmisión a interdictar (o a proteger). En total se evalúan la 64 (2^6) posibles combinaciones de estrategias de interdicción y para cada una de éstas se calcula el flujo máximo. La información del número de elementos interdictados y su respectivo flujo máximo se muestran en la Figura 3. La componente vertical de cada punto representa la cantidad de líneas interdictadas, mientras que la componente horizontal representa la carga máxima servida en la red al ejecutarse esa estrategia de interdicción. Por ejemplo, el punto (640, 0) representa el caso en el que no se interdicta ninguna de las líneas de transmisión, y la carga servida de la red sería de 640 MW. Mientras que el punto (490,2) representa el caso en el que se interdictan dos líneas de transmisión y se obtiene una carga servida de 490 MW.

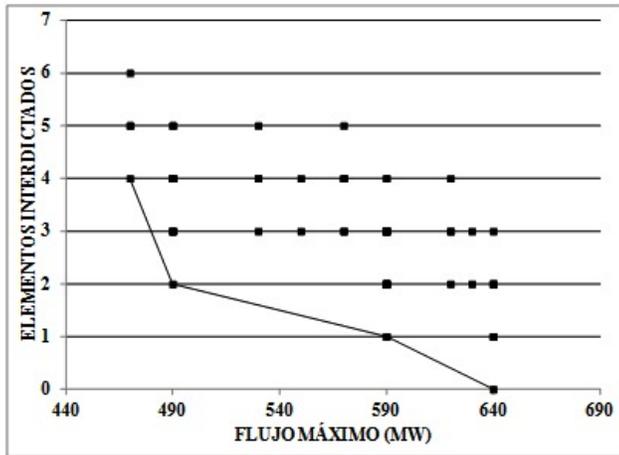


Figura 3. Frente de Pareto. Sistema de 5 barras

En la Tabla 1 se muestran las combinaciones de líneas de transmisión interdictadas que maximizan la carga que deja de ser servida. Para cada número de líneas interdictadas se muestra la carga servida, la carga racionada correspondiente, y la combinación de líneas asociada con el número de líneas interdictadas. Estos resultados son idénticos a los obtenidos por Arroyo & Galiana (2005), quienes utilizaron en su investigación un flujo de carga óptimo DC y un modelo de optimización no lineal.

Se puede advertir que en la Figura 3 no se observan todas las posibles combinaciones. Esto se explica al considerar que, en algunos casos, las combinaciones del número de líneas interdictadas se repiten. Por ejemplo, en la Tabla 1 se puede observar que la combinación “tres líneas interdictadas y flujo máximo de 490 MW” se presenta cuatro veces, es decir, el punto (490,3) representa 4 de las 64 posibles combinaciones.

Tabla 1. Combinaciones de líneas interdictadas

Nro. de Líneas Interdictadas	Carga Servida (MW)	Carga Racionada (MW)	Peor Combinación de líneas interdictadas
1	590	50	3-5 4-5
2	490	150	3-5, 4-5
3	490	150	1-2, 3-5, 4-5 1-3, 3-5, 4-5 1-4, 3-5, 4-5 2-3, 3-5, 4-5
4	470	170	1-2, 2-3, 3-5, 4-5
5	470	170	1-2, 1-3, 2-3, 3-5, 4-5 1-2, 1-4, 2-3, 3-5, 4-5
6	470	170	1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 3-5, 4-5

Los cuatro puntos unidos por las líneas continuas que se muestran en la Figura 3, representan aquellas estrategias de interdicción que no son dominadas, es decir, son los óptimos de Pareto.

Estos cuatro puntos representan las posibles alternativas a ser implementadas por el interdictor, y a la vez las alternativas de defensa que implementaría el administrador de la red. Se supone en este ejemplo que tanto el interdictor como el administrador poseen suficientes recursos para atacar o defender cualquier cantidad de elementos. En la Tabla 2 se presentan las distintas combinaciones de líneas que representan los cuatro puntos no dominados. En la primera columna se presenta la cantidad de líneas de transmisión interdictadas para cada estrategia de interdicción no dominada, luego se presentan la carga máxima servida, la carga racionada, la combinación de líneas interdictadas, y por último se coloca una letra de identificación para cada una de las estrategias de interdicción no dominadas. Obsérvese en la Tabla 2 que la fila correspondiente a una línea interdictada representa dos posibles combinaciones de interdicción: línea 3-5 o línea 4-5.

La información de la Tabla 2 se utiliza para definir las alternativas de cada jugador así como la matriz de pagos, requisitos para el desarrollo del juego no cooperativo. Dicha matriz de pagos se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2. Combinaciones de Líneas Interdictadas

Nro. de Líneas Interdictadas	Carga Servida (MW)	Carga Racionada (MW)	Peor Combinación de líneas interdictadas	Letra
0	640	0	Ninguna	A
1	590	50	3-5 4-5	B C
2	490	150	3-5, 4-5	D
4	470	170	1-2, 2-3, 3-5, 4-5	E

Tabla 3. Matriz de Pagos Caso 5 Barras

		ADMINISTRADOR				
		A	B	C	D	E
INTERDICTOR	A	640	640	640	640	640
	B	590	640	640	640	640
	C	590	640	640	640	640
	D	490	590	590	640	640
	E	490	570	570	620	640

Los valores de cada una de las celdas representan la carga máxima servida en la red para cada una de las alternativas del interdicator-administrador. Por ejemplo, la alternativa D para el interdicator consiste en colocar fuera de servicio las líneas de transmisión 3-5 y 4-5. La misma alternativa D para el administrador consistirá en colocar líneas de transmisión redundantes a 3-5 y 4-5, pero de una manera tal que el interdicator no pueda atacar a dichas líneas redundantes, por ejemplo en estructuras o líneas de paso distintas. Bajo esta condición la carga servida o pago es de 640 MW.

De la Tabla 3 se puede observar que, desde el punto de vista del interdicator, la alternativa E domina a cada una de sus otras alternativas (para cada alternativa del administrador). Es decir, cada uno de los valores asociados a la fila E son menores, o a lo sumo iguales, a cada uno de los valores correspondientes de las otras filas (recuerde que el interdicator busca minimizar el máximo flujo en la red). Por consiguiente, las estrategias dominadas A, B, C y D pueden ser eliminadas de la matriz de pagos, para obtener los resultados mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Matriz de Pagos Simplificada

		ADMINISTRADOR				
		A	B	C	D	E
INT	E	490	570	570	620	640

Ahora, el administrador buscará una estrategia que le proporcione un flujo máximo. De las estrategias que tiene disponible (A, B, C, D y E), la que le proporciona el máximo flujo es la alternativa E, es decir, las alternativas A, B, C, y D, son dominadas por la estrategia E. Si el administrador es un jugador racional, sabrá que el interdicator jugará la alternativa E y como él busca maximizar la carga servida, entonces también jugará la alternativa E.

Entonces, la solución del juego es que el interdicator ataque las líneas de transmisión 1-2, 2-3, 3-5 y 4-5, y el administrador de la red refuerce esas mismas líneas de transmisión. La carga máxima servida se mantiene en 640 MW. El mismo resultado se obtiene si el análisis de estrategias dominadas se inicia desde el punto de vista del administrador.

Ahora, si se calcula la carga servida máxima del sistema, con el administrador de la red aplicando la alternativa E, y para cada una de las 64 posibles estrategias de interdicción, se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 4.

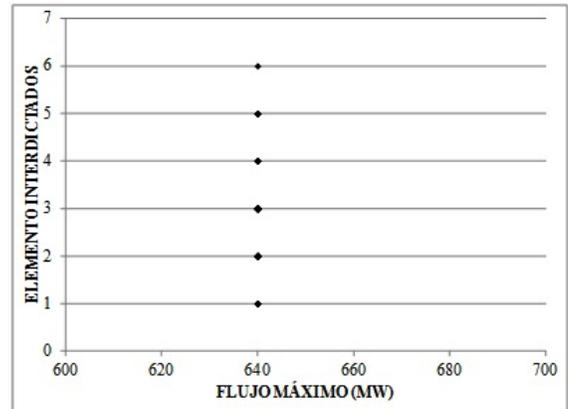


Figura 4. Carga Máxima Servida. Alternativa E

De la Figura 4 se puede observar que cuando el administrador implementa la alternativa E, el flujo máximo es de 640 MW, independientemente de la estrategia que implemente el interdicator. Este flujo coincide con el que habría en el sistema cuando no hay interdicción y el administrador no aplica ninguna estrategia de defensa, lo que demuestra que la solución es óptima. Esto implica que si el interdicator es racional, debería decidir no atacar la red puesto que el administrador tiene una estrategia que evita cualquier magnitud de racionamiento de carga.

Caso 2: Sistema IEEE RBTS

El sistema IEEE RBTS (Rocco et al. 2011) está conformado por 24 barras, 38 elementos de transmisión (33 líneas), 32 unidades de generación y 17 barras de carga. El flujo máximo cuando todos los elementos están operativos (sin interdicción) es de 2850 MW. Para el estudio se considera que se pueden poner fuera de servicio solo las líneas de transmisión, y cada una de ellas es un elemento propenso a ser interdictado. En la Figura 5 se presenta la red eléctrica asociada a este caso.

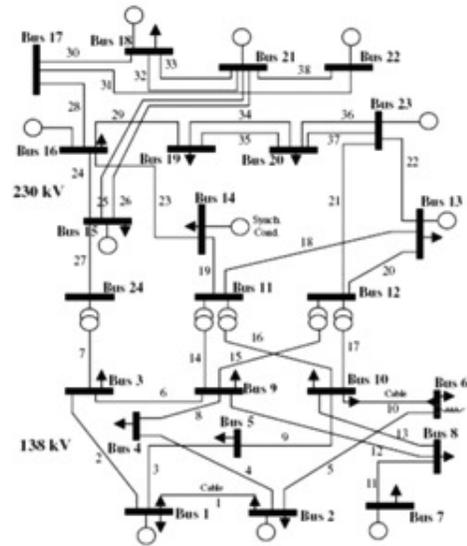


Figura 5. Sistema IEEE RBTS

En Rocco et al. (2011) se obtiene la aproximación del frente de Pareto para este caso, mediante el uso de un algoritmo evolutivo multiobjetivo. La Figura 6 muestra la aproximación obtenida.

El punto (2850,0) de la Figura 6 representa el caso en el que no hay interdicción, puesto que no hay enlaces fuera de servicio. El punto (2656,2) representa el caso en el que se tienen dos enlaces interdictados y el máximo flujo es de 2656.

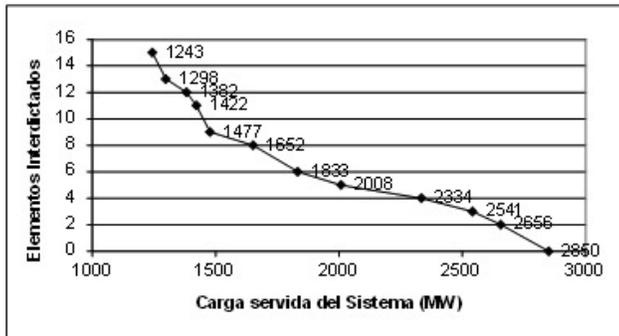


Figura 6. Frente aproximado de Pareto. IEEE RBTS

De igual manera, se pueden leer los otros puntos de esta frontera de Pareto. En la Tabla 5 se presenta un resumen de los elementos interdictados en cada estrategia, así como el flujo máximo que habría en el sistema para cada una de estas estrategias.

Como en el caso anterior se aplicará la teoría de juegos no cooperativo para encontrar la estrategia óptima de defensa del sistema. Sin embargo ahora se supone que tanto el interdictor como el administrador tienen recursos disponibles para actuar sobre hasta cinco líneas de transmisión, es decir, no se consideran las estrategias que involucren más de cinco líneas de transmisión. En ese sentido, la matriz de pagos correspondiente se presenta en la Tabla 6.

Tabla 5. Elementos Interdictados Sistema IEEE RBTS

Nro. Enlaces	Flujo Máximo (MW)	Elementos Interdictados
0	2850	
2	2656	19,23
3	2541	29,36,37
4	2334	7,21,22,23
5	2008	7,18,20,21,23
6	1833	7,11,18,20,21,23
8	1652	18,20,21,25,26,28,36,37
9	1477	11,18,20,21,25,26,28,36,37
11	1422	11,18,20,21,23,24,25,26,29,36,37
12	1382	1,4,5,11,18,20,21,25,26,29,36,37

Nro. Enlaces	Flujo Máximo (MW)	Elementos Interdictados
13	1298	2,3,4,5,11,18,20,21,25,26,29,36,37
15	1243	2,3,4,5,11,18,20,21,23,24,25,26,29,36,37

Al observar las opciones del interdictor se puede notar que para la alternativa 5 (cinco líneas de transmisión interdictadas), cada uno de los valores de las celdas es menor, o a lo sumo igual, que los correspondientes valores de las celdas de las otras filas (las otras alternativas). Por lo anterior, y debido a que el objetivo del interdictor es minimizar el máximo flujo en la red, se concluye que la estrategia 5 del interdictor domina a sus otras estrategias y en consecuencia éstas se pueden descartar de la matriz de pagos. La matriz de pagos actualizada por la acción del interdictor se muestra en la Tabla 7.

Tabla 6. Matriz de Pagos Caso IEEE RBTS

		ADMINISTRADOR				
		0	2	3	4	5
INTERDICTOR	0	2850	2850	2850	2850	2850
	2	2656	2850	2656	2850	2850
	3	2541	2541	2850	2541	2541
	4	2334	2834	2334	2850	2850
	5	2008	2508	2008	2850	2850

Al observar las opciones del interdictor se puede notar que para la alternativa 5 (cinco líneas de transmisión interdictadas), cada uno de los valores de las celdas es menor, o a lo sumo igual, que los correspondientes valores de las celdas de las otras filas (las otras alternativas). Por lo anterior, y debido a que el objetivo del interdictor es minimizar el máximo flujo en la red, se concluye que la estrategia 5 del interdictor domina a sus otras estrategias y en consecuencia éstas se pueden descartar de la matriz de pagos. La matriz de pagos actualizada por la acción del interdictor se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Matriz Simplificada Caso IEEE RBTS

		ADMINISTRADOR				
		0	2	3	4	5
INT	5	2008	2508	2008	2850	2850

Como el objetivo del administrador es maximizar el flujo en la red, entonces debería escoger la estrategia que le permita alcanzar o acercarse a su objetivo. Como las estrategias 4 ó 5 permiten obtener el mismo máximo flujo en la red, el administrador debería escoger una de estas estrategias.

Dado que es un jugador racional, de las dos estrategias escogerá aquella que le sea menos costosa desde el punto de vista de la cantidad de líneas que deberá proteger, es decir, selecciona la estrategia 4.

Entonces, la solución del juego es tal que el interdlector ataca cinco líneas de transmisión (7, 18, 20, 21, 23), y el administrador protegerá cuatro líneas de transmisión (7, 21, 22, 23), con una carga servida de 2850 MW. Es interesante notar que, a diferencia del ejemplo anterior, ahora las estrategias de ataque y defensa son distintas.

CONCLUSIONES

El artículo presenta una metodología para determinar la estrategia óptima de defensa de un sistema eléctrico de potencia sometido a ataques intencionales, que combina los conceptos de interdicción determinista de grafos, la optimización multiobjetivo y la teoría de juegos no cooperativos. El enfoque propuesto parte de la definición de la frontera de Pareto del interdlector y de aquí se genera la matriz de pago de las posibles acciones a ser ejecutadas por el interdlector y por el administrador. Por tanto la determinación de esta frontera es un punto fundamental en la metodología. En algunos casos, la frontera de Pareto puede encontrarse por enumeración total (ejemplo 1) mientras que en otros es necesario aproximar dicha frontera (ejemplo 2).

Para cada uno de los casos estudiados se determinó una estrategia óptima de defensa, la cual mantiene nula la carga racionada para cualquier estrategia de ataque, dentro de los óptimos de Pareto, que implemente el interdlector. Esto siempre sucede si las acciones de defensa están de acuerdo con las opciones determinadas por la frontera de Pareto y las opciones tienen el mismo costo de implantación.

En el caso del sistema de cinco barras, la solución óptima para el administrador de la red correspondió al caso en el que éste debe colocar la mayor cantidad de líneas de transmisión redundantes, en comparación con sus otras alternativas. Esta solución coincide con el extremo superior de la frontera de Pareto, y supone que el administrador posee suficientes recursos para implementar la solución óptima.

En caso de restricciones en el número de acciones que se puedan tomar, la solución para el administrador no es tan evidente. Como se mostró en el caso del sistema IEEE RBTS, la solución encontrada para el administrador de la red no consiste en proteger el máximo número de líneas, sino un subconjunto de éstas.

El enfoque propuesto puede ser ampliado para considerar que cada opción de defensa (ya sea a través de elementos redundantes u otro tipo de esquema dinámico) tiene un costo monetario y/o que las pérdidas que se pudieran generar en el sistema, por carga no servida, tienen un costo asociado. Adicionalmente, sería de utilidad considerar los efectos cascada que se pudieran originar ante la puesta fuera de servicio abrupta de un componente del SEP.

La metodología presentada puede aplicarse también a otro tipo de sistemas, distintos al eléctrico y utilizando funciones de desempeño particulares.

Por otra parte, el enfoque de juegos no cooperativos supone que la información es completa, es decir que tanto el atacante como el administrador poseen la información de las posibles acciones a desarrollar. Este hecho se traduce en que ambos jugadores conocen el Pareto asociado al sistema. Sin embargo esta situación puede no ser real. Para el enfoque propuesto, el atacante debe conocer la topología del sistema, las capacidades de los elementos y los valores de generación y carga en los respectivos nodos. Pero el administrador posee la información completa del sistema por lo que el Pareto que el administrador conoce puede ser más exacto que el del atacante. Esta disparidad de información pudiera ser analizada mediante las técnicas de juegos que contemplan la existencia de información no completa.

REFERENCIAS

- ARMBRUSTER, A., GOSNELL, M., MCMILLIN, B., CROW, M. (2005). The Maximum flow algorithm applied to the placement and distributed steady-state control of FACTS devices. *Proceedings Of The 37th Annual North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 77–83.
- ARROYO, J.M. & GALIANA, F.D. (2005). On the solution of the bilevel programming formulation of the terrorist threat problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 789-797.
- BELL, M., KANTURSKA, U., SCHMÖCKER, J., FONZONE, A. (2008). Attacker-Defender Models and road network vulnerability. *Phil. Trans. R. Soc. A* 366, 1893–1906, doi:10.1098/rsta.2008.0019. Published online 6 March 2008.
- FORD, L. & FULKERSON, D. (1962). *Flows in networks*. Princeton. Univ. Press, Princeton, NJ.
- GIBBONS, R. (1992). *A primer in game theory*. Prentice Hall, Financial Times.

- GONZÁLEZ, M. & OTERO, I. (2007). Curso básico de teoría de juegos. Primera Edición. Ediciones IESA. Caracas.
- GULIASHKI, V., TOSHEV, H., KORSEMOV, C. (2009). Survey of evolutionary algorithms used in multiobjective optimization. Problems of Engineering, Cybernetics and Robotics. Bulgarian Academy of Sciences.
- MARLER, R.T. & ARORA, J.S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Struct Multidisc Optim 26, 369–395.
- MISHKOVSKI I., FILIPOSKA, S., GRAMATIKOV, S., TRAJANOV, D., KOCAREV, L. (2008). Game theoretic approach for discovering vulnerable links in complex networks. In Proceedings of TeNe'2008. pp.211-216.
- OXFORD UNIVERSITY. (2000). Advanced learner's dictionary. Oxford University Press.
- PAN, F. (2005). Stochastic network interdiction: models and methods, doctoral dissertation. The University of Texas at Austin, s/n.
- ROCCO, C. M., RAMÍREZ-MÁRQUEZ, J. E., SALAZAR, D. E., YAJURE, C. (2011). Assessing the vulnerability of a power system through a multiple objective contingency screening approach. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 60, Nro. 2, June.
- ROCCO, C.M., SALAZAR, D.E., RAMÍREZ-MÁRQUEZ, J.E. (2009). Multiple-objective deterministic network interdiction using evolutionary algorithms. IEEE The Annual Reliability and Maintainability Symposium, USA, pp. 170-175.
- SATAYAPIWAT, P., SUKSOMBOON, K., ASWAKUL, C. (2008). Vulnerability analysis in multicommodity stochastic networks by game theory. Proceedings of ECTI-CON 2008.
- TAN, K.C., KHOR, E.F., LEE, T.H. (2005). Multiobjective evolutionary algorithms and applications. Springer Editorial. London.
- THIERAUF, R. (2004). Toma de decisiones por medio de la investigación de operaciones. Editorial Limusa. México.
- WOOD, K. (1993). Deterministic network interdiction. mathematical & computer modelling, Vol. 17, pp. 1-18.