

PROPUESTA REMUNERATIVA PARA LAS PLANTAS QUE PRESTAN EL SERVICIO COMPLEMENTARIO DE RESTABLECIMIENTO DEL SIN

S. X. Carvajal Quintero, J. Serrano Luna, J. F. Gutiérrez Gómez

Resumen— Este artículo presenta una propuesta para remunerar las plantas que estén disponibles para prestar el servicio de restablecimiento del sistema eléctrico colombiano. Primero se hace una conceptualización teórica donde se explican aspectos técnicos del servicio de restablecimiento, luego se presenta la propuesta técnica y económica para la prestación del servicio de “Black Start” o arranque autónomo en el SIN. Dicha propuesta es simulada mediante la utilización de dinámica de sistemas.

Palabras Claves— Dinámica de sistemas, restablecimiento del sistema de potencia sistemas de potencia.

I. INTRODUCCIÓN

EN los años 2003 y 2004 países como Italia, Suiza, Estados Unidos y Londres, sufrieron cortes de energía fortuitos debido a fallas parciales o totales en sus sistemas de potencia. Lo anterior evidencia que los sistemas interconectados de potencia están expuestos a condiciones anormales tales como: desmembramientos, formaciones de islas o desconexiones parciales o totales del sistema.

El servicio de arranque autónomo o “Black Start” es un servicio que contribuye a la seguridad de los sistemas interconectados de potencia, dándole la posibilidad de recuperarse con la mayor rapidez y eficiencia posible, después de una falla generalizada y severa [1].

Este servicio en Colombia a la fecha no está reglamentado por la CREG, los agentes generadores no reciben ninguna remuneración por prestar el servicio de “Black Start”.

En este artículo se plantea una propuesta remunerativa que involucre los aspectos técnicos y económicos en relación con la prestación del servicio complementario de “Black

S. X. Carvajal Universidad Nacional de Colombia (e-mail: scarvajalq@gmail.com)

J. Serrano Luna Expertos en Mercado (XM) – Centro Nacional de Despacho (CND) (e-mail: jserranol@xm.com)

J. F. Gutiérrez Gómez Universidad Nacional de Colombia (e-mail: jfernando@ieec.org).

Start” o arranque autónomo, orientado a cubrir el vacío que actualmente existe en la legislación sobre los servicios complementarios. Dicha propuesta fue simulada utilizando dinámica de sistemas.

II. PROPUESTA REMUNERATIVA PARA EL SERVICIO DE “BLACK START” EN EL SIN

Para poder reglamentar el servicio complementario de “Black Start” es necesario tener en cuenta tantos los aspectos comerciales como los técnicos, con el fin de garantizar la recuperación rápida segura y confiable del sistema de potencia después de un apagón parcial o total.

A. Restricciones técnicas

Entre las restricciones técnicas que deben cumplir las plantas que deseen prestar el servicio de “Black Start” en el sistema colombiano están:

- Ser capaz de operar en condiciones de red aislada dentro de los 30 minutos siguientes a la instrucción impartida por el operador.
- Tener la disponibilidad de arrancar, de ser necesario, por lo menos 3 veces en menos de 24 horas.
- Contar con reserva de combustible para operar por lo menos 24 horas continuas.
- Mantener la frecuencia dentro de los rangos prescritos (59,8 a 60,2 Hz) y controlar la tensión a través del manejo de potencia reactiva [6].

B. Ofertas para prestar el servicio de “Black Start”

Los agentes generadores que deseen prestar el servicio de arranque autónomo y resulten elegibles debido a la aprobación de las pruebas de certificación, deberán presentar al operador del sistema sus aspiraciones económicas.

El servicio de “Black Start” es remunerado en el ámbito internacional teniendo en cuenta además de los gastos

incurridos por la prestación del servicio, la disponibilidad de las plantas con “Black Start”, puesto que este servicio no es utilizado periódicamente y por lo tanto se presentarían señales de poca inversión en adquisición y mejoras de equipos con arranque autónomo.

Los elementos que los agentes generadores deben considerar para poder cuantificar el precio de prestar el servicio de “Black Start” son:

- Gastos por depreciación de equipos.
- Gastos de administración, operación y mantenimiento.
- Tasa de retorno a la inversión.

1) Gastos por depreciación de equipos

Entre los tipos de generación auxiliar más utilizados en el mundo se encuentran:

- Máquinas diesel de velocidad media.
- Pequeñas turbinas de gas de ciclo abierto.
- Generadores auxiliares dotados con imanes permanentes.
- Pequeñas centrales hidroeléctricas que se pueden asociar a plantas grandes por su cercanía [7].

2) Gastos de administración, operación y mantenimiento (AOM)

Una forma de normalizar el AOM es estimarlo como un porcentaje de la inversión, dicho porcentaje no debe superar el 5% debido a la baja utilización esperada.

No se deben incluir los gastos cuando se requiera el sistema de arranque autónomo puesto que son despreciables, debido a que este servicio se requiere muy pocas veces, estadísticamente se dice que un apagón que conlleve a la utilización de “Black Start” en el país, ocurre cada 10 años.

3) Tasa interna de retorno (TIR)

El administrador del sistema será el ente encargado de definir el valor adecuado para la implementación del servicio en cada área de análisis y el operador del sistema con base en las ofertas de los agentes generadores y en parámetros técnicos deberá definir cuales son los agentes a los cuales se les adjudicará los contratos.

Para optimizar la evaluación de las ofertas, se deberá adicionar al criterio de evaluación un estudio por área

operativa que determine la porción del sistema que cada planta “Black Start” puede ayudar a restablecer. Esta información es muy importante, puesto que aumenta la confiabilidad al remunerar las plantas que por localización y/o características propias aseguran más estabilidad en caso de un colapso.

Los agentes generadores que por diferencias económicas no sean seleccionados para prestar el servicio de “Black Start” y cumplan con todas las pruebas requeridas podrán ser parte de la provisión de reserva. Esta provisión será repartida en varias plantas “Black Start”, con una proporción máxima del 50% de la cantidad de MW necesaria en caso de que ocurra un desmembramiento de la demanda total.

C. Determinación del monto del contrato

La metodología propuesta en este artículo, está basada en la utilización de contratos bilaterales por cada área operativa, puesto que se hizo un análisis previo de las experiencias internacionales, el cual mostró que los contratos bilaterales eran la estructura de mercado que mejor se adaptaba a las características del servicio de “Black Start”, entre las que se encuentran la poca frecuencia que se usa este servicio y la necesidad de invertir en equipos especiales, los cuales necesitan mantenimiento permanente.

Para determinar este valor se deberá realizar un estudio de las características específicas de cada área operativa, entre las cuales se encuentran:

- Cantidad de demanda existente, porcentaje de tipo residencial, comercial e industrial, así como el crecimiento anual de la misma.
- Tipo de generación predominante entre las plantas con “Black Start”, con el fin de poder valorar la potencia de los servicios auxiliares.
- Costos fijos incurridos por los agentes generadores que deseen prestar el servicio de arranque autónomo.

La fórmula general es mostrada en la ecuación (1):

$$MONTO_{it} (\$) = \left[(DISBST_{it} * PDISBS_{it}) + (CBST_{it}) \right] * (1 + Fm) \quad (1)$$

Donde:

$DISBST_t (MW)$ = Disponibilidad de “Black Start” requerida por el área operativa, en el periodo contratado t.

$PDISBS_t (\$/MW)$ = Precio al que se pagará la disponibilidad en “Black Start” en el área operativa i, en el periodo contratado t.

$CBST_i(\$)$ = Costos incurridos por los agentes generadores por estar disponibles para poder prestar el servicio de "Black Start" en el área operativa i , en el periodo contratado t .

F_m = Factor relacionado con la porción del sistema que cada planta con arranque autónomo puede ayudar a restablecer, este factor deberá ser evaluado por el operador del sistema.

1) Energía suministrada en caso de colapso

El contrato bilateral sólo tiene en cuenta la remuneración por disponibilidad en "Black Start", en caso de que ocurra un colapso, la energía suministrada será pagada al precio de reconciliación. La ecuación 2 muestra la manera de calcular dicho precio:

$$PR(\$ / MWh) = \text{Máx}[PBolsa, POferta] \quad (2)$$

Donde:

$PR(\$ / MWh)$ = Precio de reconciliación aplicado a la unidad generadora que suministró energía en momentos de colapso.

$PBolsa(\$ / MWh)$ = Precio de la bolsa establecido por el mercado mayorista de electricidad en condiciones de operación normal del STN

$POferta(\$ / MWh)$ = Último precio de oferta entregado por el agente generador al mercado mayorista de electricidad.

2) Penalizaciones

Los agentes generadores a los cuales se les adjudicó el contrato deberán estar expuestos a que el operador del sistema realice pruebas periódicas, donde se confirme el buen funcionamiento de las plantas "Black Start". Si se encuentra alguna anomalía, el agente generador no podrá recibir ningún pago hasta que por medio de otra prueba se verifique su condición actual, además será penalizado económicamente pagando el servicio prestado por la unidad o unidades que tuvieron que reemplazarlo en la prestación del servicio.

III. MODELADO DE LA PROPUESTA REMUNERATIVA UTILIZANDO DINAMICA DE SISTEMAS

El proceso de modelado consiste en el conjunto de operaciones mediante el cual, se analiza toda la información que se dispone con relación al proceso, luego se depura creando un modelo mental llamado diagrama causal, el cual debe ser adaptado a un lenguaje formal propio de la herramienta computacional y por último se

realiza el análisis las simulaciones y se somete a varios criterios de aceptabilidad [9].

A. Diagrama causal

El diagrama causal de esta investigación está compuesto por cuatro bucles principales de realimentación, de los cuales tres son bucles de balance y uno es de refuerzo. A continuación se explicará cada bucle con el fin de justificar el comportamiento hipotético de las variables que los componen. La figura 1 muestra el diagrama causal completo.

1) Bucle monto del contrato - agentes prestadores del servicio:

Este primer bucle es un bucle de balance debido a que si el monto del contrato es alto, los agentes que prestan el servicio de arranque autónomo van a querer seguir prestando el servicio y por lo tanto en un nuevo periodo de contratación del servicio querrán volver a participar. Este comportamiento trae dos cambios en el sistema, el primero es la disminución en un nuevo periodo de contratación de los costos por la prestación del servicio y el segundo es el aumento en disponibilidad en "Black Start", estos dos aspectos influirían en el monto total del contrato, debido a que a más disponibilidad el monto del contrato bajaría debido a la sobre oferta y en el caso de los costos, el cambio en el monto sería directamente proporcional puesto que es un factor determinante en la elaboración de la propuesta de remuneración.

2) Bucle monto del contrato - agentes nuevos que quieran prestar el servicio:

Este bucle es un bucle de balance puesto que si el monto del contrato es alto, los agentes que quieren prestar el servicio de arranque autónomo pero que no fueron favorecidos en un primer contrato, querrán intentarlo de nuevo si el negocio trae buenas entradas económicas, este aspecto motiva la competencia en cada convocatoria lo que se traducirá en una rebaja en el monto del contrato. Bucle tiempo del contrato - agentes prestadores del servicio.

3) Bucle monto del contrato - agentes nuevos que quieran prestar el servicio:

Este tercer bucle, es un bucle de balance puesto que a medida que el tiempo del contrato sea más extenso, los agentes que ganaron los contratos bilaterales se sentirán con

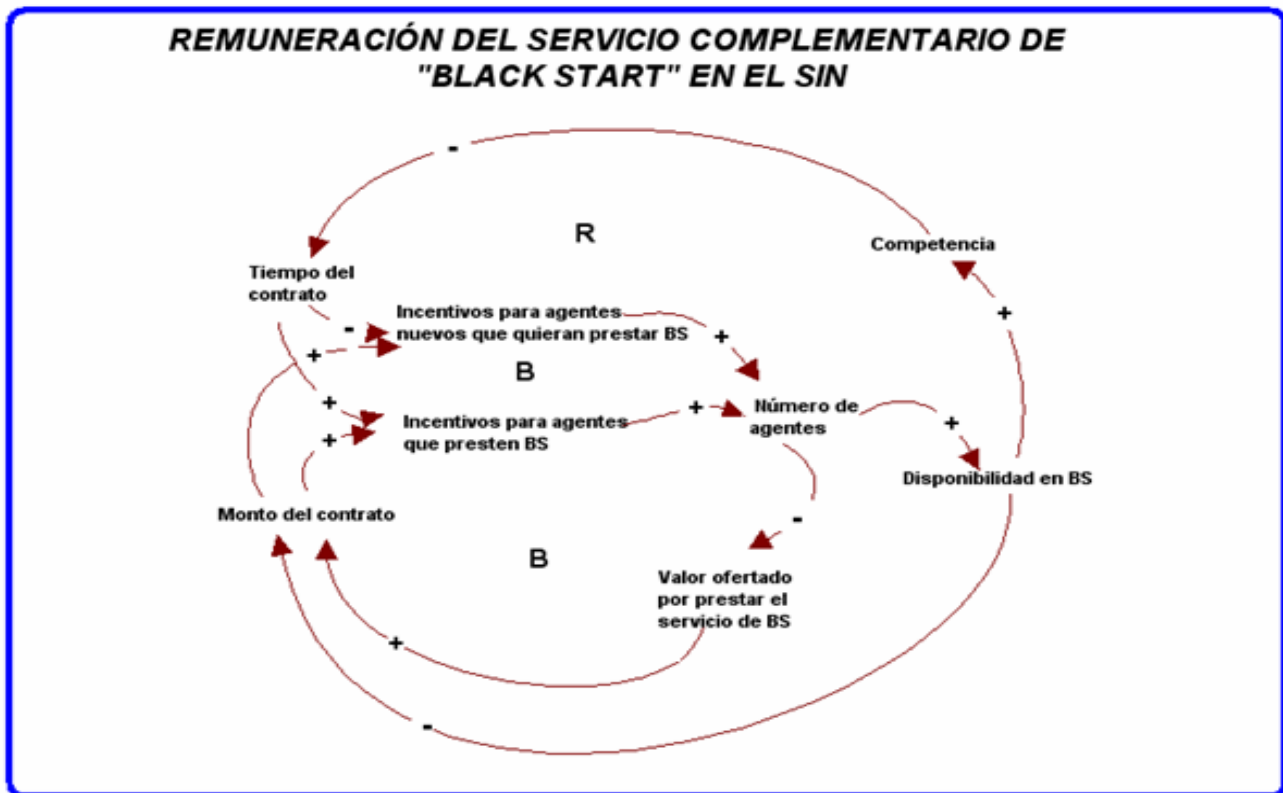


Fig. 1. Diagrama causal del modelo para la remuneración del servicio complementario de "Black Start"

más holgura y por lo tanto más motivados para participar en un nuevo periodo de contratación, sin embargo la duración de los contratos es muy importante para asegurar un número adecuado de participantes en cada periodo de convocatoria por lo tanto la competencia será la causante de que el tiempo del contrato no siga extendiéndose y a medida que transcurran los periodos de contratación, el regulador llegará a un momento en que encuentra el punto de equilibrio.

4) Bucle tiempo del contrato - incentivos nuevos agentes:

Este cuarto bucle está conformado por 4 variables, es un bucle de refuerzo puesto que entre mayor sea el tiempo del contrato adjudicado, a corto plazo será un estímulo negativo para los agentes que quieran competir por prestar el servicio de "Black Start" por primera vez o los que no fueron favorecidos por diferentes circunstancias.

B. FORMALIZACIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia, el servicio complementario de arranque autónomo o "Black Start" no ha sido reglamentado entonces no existe ningún registro de comportamiento de los agentes generadores, por tanto en la simulación se considero: las experiencias internacionales y la similitud con otros servicios.

La Zona Caribe, hace parte de las seis áreas operativas en las que está dividido el SIN (Sistema Interconectado Nacional). El área está interconectada con el centro del país por medio de dos circuitos de 500kV, estos dos circuitos se ven afectados continuamente debido a acciones terroristas, por lo que esta Zona queda aislada del Sistema Interconectado Nacional y depende del servicio arranque autónomo para restablecer el servicio de energía eléctrica, por esta razón fue seleccionada para simular la propuesta remunerativa. A continuación se explica cada modulo en que fue dividido para su mejor comprensión el modelo formal.

1) Módulo del tiempo del contrato

Para modelar el tiempo del contrato, se consideraron varios aspectos fundamentales, como son la competencia, la cantidad necesaria de arranque autónomo en la zona, el tiempo de ajuste utilizado por el administrador del sistema, el tiempo mínimo y el tiempo máximo de contratación.

El tiempo del contrato deberá ser determinado por el administrador del sistema, teniendo como base que por área operativa se consiga una participación aceptable de los agentes generadores y unos costos razonables por concepto de negociación, contratación y los menores traumatismos posibles al buen funcionamiento del SIN debido a las pruebas técnicas relacionadas con la apertura de un nuevo periodo de contratación.

2) Módulo monto del contrato

El monto del contrato es una variable muy importante dentro del dinamismo del mercado. Los agentes generadores prestadores del servicio y los agentes generadores con aspiraciones de serlo antes de revisar cualquier requerimiento dentro del marco remuneratorio, analizan que el monto del contrato satisfaga sus proyecciones de rentabilidad durante el tiempo de prestación del servicio.

El administrador del sistema tendrá que realizar un estudio por cada área operativa, pero además deberá tener en cuenta el índice de competencia presente para garantizar dinamismo en el mercado y que la necesidad básica de "Black Start" sea satisfecha, con el fin de que el SIN este preparado para una contingencia en cualquier Zona del país.

3) Módulo del número de agentes generadores que quieren prestar el servicio de "Black Start"

El número de agentes dependerá de las políticas que adopte el administrador del sistema hacia la regulación de la remuneración del servicio complementario de "Black Start". Existirán agentes que según el monto del contrato estipulado para un primer periodo de contratación, no les interesa participar en la prestación de este servicio, sin embargo si este comportamiento se generaliza para varios agentes y por lo tanto no se alcanza a suplir la necesidad básica de arranque autónomo del área operativa, el administrador del sistema deberá aumentar el monto del contrato para que con el nuevo precio aumente la oferta.

Pero puede ocurrir que sea el tiempo del contrato, debido a lo extenso lo que desmotive a nuevos agentes a presentarse en un nuevo periodo de contratación, puesto que le implicaría costos de mantenimiento durante todo ese tiempo sin ninguna remuneración.

C. EVALUACIÓN DEL MODELO

Se utilizó una serie de escenarios que permitieron evaluar el impacto de remunerar el servicio de "Black Start" utilizando como estrategia de mercado los contratos bilaterales. A continuación se analizan los resultados más relevantes observados en las simulaciones.

1) Tiempo del contrato

En la Figura 2 y en la Figura 3 se pueden observar los comportamientos cuando es utilizado como duración del contrato primero, la máxima duración de los contratos firmados en el MEM (Mercado Eléctrico Mayorista) el cual es de 6 años y el valor mínimo utilizado en las negociaciones en el ámbito internacional el cual es de un año, el modelo se estabiliza de igual manera para los dos casos el tiempo del contrato se estabiliza en el mismo valor, aproximadamente en 5 años.

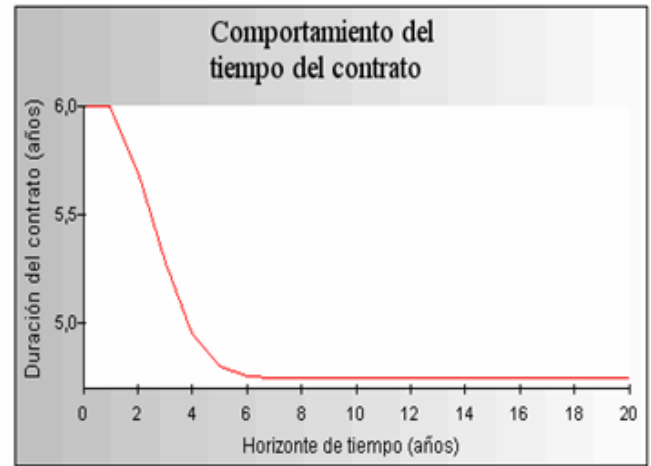


Fig. 2. Comportamiento del tiempo el contrato tomando como valor inicial seis años



Fig. 3. Comportamiento del tiempo el contrato tomando como valor inicial un año.

2) Discrepancia

La discrepancia es una variable que relaciona la necesidad de arranque autónomo del área operativa en estudio y la disponibilidad de "Black Start" que se tiene debido al comportamiento del sistema remunerativo dinámico, por lo tanto el valor deseado sería cero para poder garantizar que en cualquier tipo de escenario, la Zona Caribe puede ser restablecida exitosamente. Utilizando valores extremos se puede observar que el valor final de la discrepancia para un tiempo inicial de un año no es el valor deseado, debido a que se estabiliza en 19.9 W y el comportamiento es muy similar para el caso de un tiempo inicial de seis años con un valor de discrepancia de 18.4W.

La necesidad de arranque autónomo de la Zona Caribe es de 170 MW, por lo tanto aunque con valores de tiempo del contrato extremos no se alcanza el comportamiento ideal, si se satisface en gran proporción las necesidades de arranque autónomo del área en estudio.

Para poder alcanzar una discrepancia igual a cero se debe aumentar el número de agentes que estén prestando el

servicio de arranque autónomo con el fin de que aumente la disponibilidad de "Black Start". Con el diagrama causal se hizo un análisis del comportamiento hipotético de los agentes generadores que desean prestar el servicio de arranque autónomo, más concretamente en el bucle de refuerzo se tenía que un aumento el número de agentes, repercutía en un aumento de la competencia y a su vez el tiempo del contrato se iba a disminuir, con el fin de incentivar a los agentes nuevos que quieran prestar el servicio de arranque autónomo en un nuevo periodo de contratación.

3) Monto del contrato

El monto del contrato tiene un comportamiento ascendente hasta que partir del segundo periodo de contratación empieza a estabilizarse, debido a que la disponibilidad en arranque autónomo va a incrementarse con el aumento de los agentes generadores que quieren prestar el servicio de "Black Start" pero el administrador del sistema tiene claro cual es la necesidad de arranque autónomo en cada Zona por lo que habrá un momento en que la disponibilidad llega al valor ideal.

El valor en el que se estabiliza el modelo es de 103.780,59 USD, este valor fue utilizado como el valor inicial del primer contrato bilateral y así poder observar los cambios del monto del contrato, cuando ya el administrador del sistema tiene en cuenta la índice de competencia para aumentar o disminuir el monto del contrato en cada área operativa. En la figuras 4 y 5 se puede observar el comportamiento descrito anteriormente.

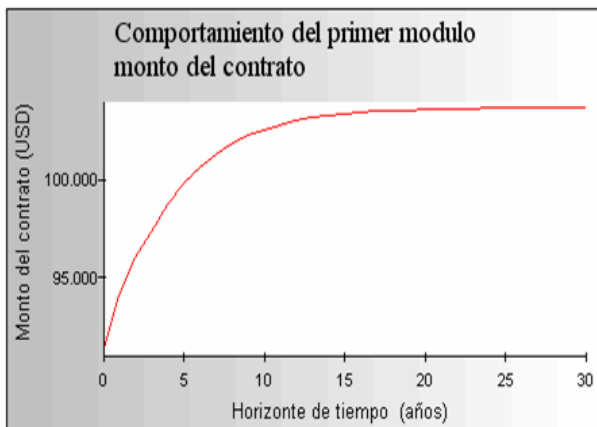


Fig.4 Comportamiento del monto del contrato

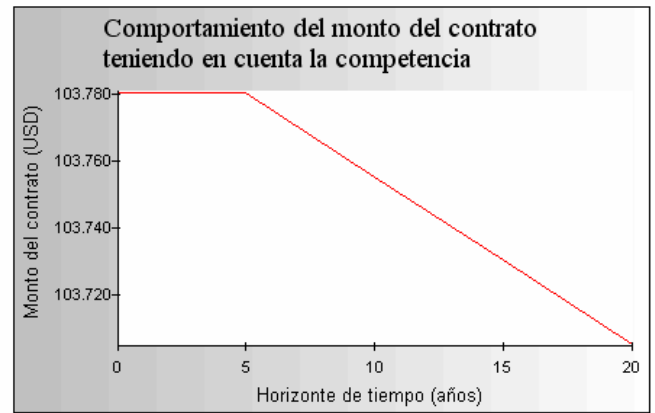


Fig. 5. Comportamiento del monto del contrato cuando se tiene en cuenta el comportamiento de los agentes generadores frente a la propuesta remunerativa

IV. CONCLUSIONES

- El servicio complementario de "Black Start" está orientado a restablecer el sistema de potencia después de que ocurre un apagón debido a una falla parcial o total. Un corte de energía fortuito trae un gran impacto negativo en cualquier sociedad, por lo tanto es imperativo tener una combinación de estrategias técnicas como financieras que permitan asegurar la prestación correcta del servicio.
- Debido a la poca ocurrencia de una falla donde se requiera el servicio de "Black Start", se debe tener en cuenta en el momento de la remuneración, no solo los costos incurridos por prestar el servicio, además se debe incentivar la disponibilidad del servicio con un monto adicional.
- Los contratos bilaterales son la estructura del mercado más utilizada en el mundo para remunerar el servicio complementario de "Black Start", debido a que por área operativa sólo se necesita una cantidad determinada de MW para restablecer el sistema, por lo tanto no es económicamente eficiente pagarle a todas las plantas que acrediten tener "Black Start".
- Garantizar unas condiciones aceptables de contratación que hagan atractivo el negocio de prestar el servicio de "Black Start" en el SIN, asegura que para un nuevo periodo de contratación tanto los agentes prestadores del servicio como nuevos agentes estarán interesados en mantener sus equipos auxiliares en óptimas condiciones con el fin de poder presentarse a una nueva convocatoria.
- La competencia dentro de cualquier mercado energético aporta equidad y dinamismo al sistema, además de ventajas económicas debido a que los agentes querrán reducir sus ofertas con el fin de aumentar su participación en el mercado.

V. REFERENCIAS

- [1] J. Willson, "System restoration guidelines: how to set-up, conduct, and evaluate a drill" *IEEE Trans. on power system* , 1996, vol. 11 pp. 1619.
- [2] B. Kirby and E. Hirst, "New Black Start standards needed for competitive markets", Edison Electric Institute, Washington,DC, Noviembre 1998.
- [3] E. Hirst, "Allocating costs of ancillary services: contingency reserves and regulation" pdf. USA, 2003.
- [4] CREG, Comisión de regulación de energía y gas, Resolución 064 de 2000, Página Web , www.creg.gov.co/eléctrica/info.html.
- [5] B. Kirby and E. Hirst, "SysNew standards needed for system Black Start in competitive bulk power markets", Edison Electric Institute, Washington,DC, Noviembre 1998.
- [6] J. Serrano, "Propuesta de Remuneración para las plantas que prestan el Servicio y Guía Operativa de Restablecimiento de un Área del SIN". Tesis (Maestría en Ingeniería Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, p. 200.
- [7] H. Rodriguez, " Propuesta Técnica, Económica y Regulatoria para la prestación del servicio",Universidad Pontífice Bolivariana. Facultad de Ingenierías.Medellín 2005.
- [8] NEEMCO, "Review of system restart ancillary service arrangements" pdf, National Electricity Market Management Company Limited Australia 2005.
- [9] I. Dyrer, Dinámica de Sistemas y simulación continúa en el proceso de planificación. Bogotá: Copiloto, 1993, p. 160.

VI. BIOGRAFIAS

Sandra Ximena Carvajal Magíster en ingeniería eléctrica. Universidad Nacional de Colombia,

Jairo Serrano Luna Magíster en potencia eléctrica. Universidad Tecnológica de Santander. Actualmente trabaja en el CND (Centro Nacional de Despacho).

Jorge Fernando Gutiérrez Gómez Magíster en potencia eléctrica. Universidad Tecnológica de Santander. Actualmente trabaja como profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia.