

EVALUACIÓN DEL IMPACTO ECONÓMICO DE LOS SAGS EN USUARIOS INDUSTRIALES EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

Economic impact of SAGS for industrial consumers in a distribution system

RESUMEN

Las industrias modernas utilizan equipos que son altamente sensibles a las fluctuaciones en la tensión de suministro, conocidas como SAGS, que causan fallas y salidas de funcionamiento de varios minutos y hasta horas. Es conveniente contar con una metodología que permita identificar, evaluar y, si es posible, penalizar a los responsables de los daños que puedan causar los SAGS dentro de la industria. Este artículo propone la utilización de redes bayesianas para la identificación, clasificación y evaluación de las pérdidas económicas ocasionadas por los SAGS en las industrias. Finalmente se presenta un caso de aplicación de la metodología a un sistema eléctrico de la industria de malta.

PALABRAS CLAVES: Redes bayesianas, Regulación de calidad de la potencia, SAGS, Sistema eléctrico industrial.

ABSTRACT

Modern industries use equipments that are highly sensitive to fluctuations in voltage supply, known as SAGS, which cause failures and outages of several minutes, and even hours. It is convenient to take into account a methodology which permits to identify, evaluate, and if possible, penalize the responsible entities of the damages that SAGS can cause in the industry. This paper proposes the use of Bayesian networks for the identification, classification, and evaluation of the economic losses caused by SAGS in the industries. Finally, it is presented a case of applying the methodology to a power system in the malting industry.

KEYWORDS: *Bayesian Networks, Power Quality Regulation, SAGS, Electric industrial System.*

1. INTRODUCCIÓN

Problemas como cortos circuitos, maniobras, arranque de cargas sin control, entre otros, causan problemas de calidad eléctrica como las Sags, ocasionando pérdidas en los procesos productivos de la industria.

Un SAGS puede definirse como la caída del valor RMS entre 0.1p.u y 0.9 p.u del voltaje. Este fenómeno ocurre en un período muy corto de tiempo, y pueden ser clasificados según la disminución de la magnitud o también según el tiempo de duración [1]. Ante esto, cada industria presenta un comportamiento totalmente diferente lo que dificulta plantear una metodología general para la identificación y valoración de las pérdidas, así como, el establecimiento de criterios regulatorios. Estudios como el de costos de racionamiento de la Unidad de Planeación Minero-Energética Colombiana (UPME) [2] valoran las pérdidas ocasionadas por paradas no programadas comparando los niveles de producción en condiciones normales y bajo la interrupción del suministro. Con la metodología de las redes Bayesianas, aquí planteada, es posible descomponer un fenómeno en causas y efectos y mediante la asignación de probabilidades, valorar los problemas de producción que se generan debido al fenómeno bajo estudio.

Fecha de Recepción: 26 de Enero de 2009.

Fecha de Aceptación: 17 de mayo de 2009.

DIEGO A. SALAMANCA

Ingeniero Eléctrico, Ingeniero Electrónico, Universidad de Los Andes.

ÁNGELA I. CADENA

Ingeniera Eléctrica, Ph.D. Profesora Asociada Universidad de los Andes acadena@uniandes.edu.co

GUSTAVO A. RAMOS

Ingeniero Electricista, Ph.D. Profesor de Cátedra Universidad de los Andes gramos@uniandes.edu.co

La sección 2 presenta la normatividad existente sobre los SAGS. La sección 3 presenta la metodología propuesta usando modelo de redes Bayesianas (sección 4). La sección 5 presenta un ejemplo de aplicación y en la sección 6 las conclusiones del trabajo.

2. NORMATIVIDAD DE LOS SAGS

En el caso Colombiano, la resolución CREG 024-2005 [3], recomienda utilizar el indicador de perceptibilidad de un equipo (PST) o sistema ante fluctuaciones de tensión durante un período de tiempo corto (10 minutos). Tiene ciertas ventajas, entre las cuales está la medición de Sags, Swells y Flickers, medición armónica midiendo THDV, posibilidad de comparación con las curvas CBEMA y EPRI [4]. En la misma resolución se definen los Sags o hundimientos, como la fluctuación de tensión caracterizada por producir una depresión transitoria de tensión respecto de la onda estándar, en un punto del Sistema Interconectado Nacional. En términos generales, la CREG propone un esquema de autorregulación o autocontrol, sugiriendo a los usuarios que indiquen a la Comisión las posibles mediciones acerca de los problemas que se relacionen con el indicador PST. No se establece una metodología para cuantificar las pérdidas,

identificar a los causantes del fenómeno y cobrar o penalizar el problema causado en los usuarios finales.

3. BASES CONCEPTUALES PARA LA METODOLOGÍA

El fenómeno de los SAGS en usuarios industriales se puede descomponer en causas y consecuencias, estableciendo relaciones entre ellas. La Fig. 1 muestra el mecanismo utilizado para descomponer los SAGS de manera práctica e intuitiva.

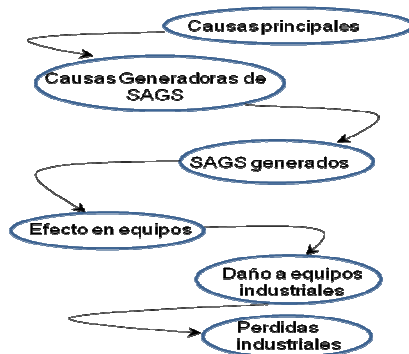


Figura 1. Metodología Implementada.

1) Requerimientos de la Metodología, para evaluar casos reales se requiere que la metodología sea:

- Probabilística dada la incertidumbre al estudiar el comportamiento del fenómeno en los equipos.
- Simple en su modelamiento y entendimiento, para poder conectar la parte económica con la parte técnica.
- Clara y entendible para personal técnico u operativo de plantas industriales, los cuales no tengan conocimientos sobre los problemas de calidad.
- Llegar a una respuesta puntual, para que la empresa pueda tomar la decisión de invertir en correctivos.

2) Relaciones causa efecto. Una red bayesiana se puede definir como una relación causa-efecto de manera gráfica, estas relaciones se establecen con una probabilidad de un evento mediante el teorema de Bayes, lo cual permite calcular la probabilidad de una consecuencia. En cada relación se establece la probabilidad de tener una consecuencia debido a las causas las cuales tienen unos estados definidos y conocidos, llegando a entender el comportamiento de una consecuencia de manera probabilística.

3) Causas generadoras. Las causas generadoras de los SAGS pueden ser: corto circuito, maniobras de la red, arranque de cargas. Al analizar los cortocircuitos, estos pueden ser generados por: descargas atmosféricas, accidentes naturales y humanos [5].

Cuando se establecen las diversas características de los tipos de SAGS se tiene en cuenta que cada una de ellas puede causar un efecto diferente a la industria, por ejemplo, un SAGS de larga duración, alta magnitud y distancia corta al usuario tendrá un efecto mucho mayor que cualquier otro; estas relaciones se denominan efecto

de SAGS. Cuando se establecen los efectos de los SAGS se vinculan las relaciones entre los equipos y las posibles fallas que se puedan llegar a presentar, si se tiene un SAGS el cual es generado con efecto alto en la industria tendrá una gran probabilidad de detener un motor y una probabilidad mayor de detener los dispositivos electrónicos, un efecto bajo puede causar una desaceleración del motor sincrónico y puede dañar los componentes, pero con una probabilidad mucho menor que la del efecto alto.

4) SAGS Generados. Según la red de distribución se pueden generar diferentes SAGS según el corto circuito, por ejemplo si se tiene un corto monofásico cerca a la fuente y generando un SAGS tipo B al pasar por un transformador Yd, se crea un SAGS tipo C. Los SAGS analizados fueron de 3 tipos A, C y D [1].

El efecto del sag en la carga dependerá de su duración, magnitud y distancia de ocurrencia en el sistema de distribución, considerando así todas las posibles combinaciones a la hora de la ocurrencia de un SAGS.

5) Equipos analizados. Dada la alta diversidad de los equipos de la industria cada uno de ellos tiene un comportamiento completamente diferente; por eso para analizarlos se clasifican en:

- Fuentes conmutadas: Son las más sensibles y en especial a los de disminución de una sola fases.
- Variador de velocidad: Poseen una mayor resistencia a los SAGS especialmente a las variaciones de una sola fase como los tipo B o D.
- Controladores: Equipos como los PLC, contienen fuentes conmutadas.
- Motores: Los motores sincrónicos pueden tener una sensibilidad a los SAGS relativamente más baja que los anteriores equipos, pero por cuestiones de sincronismo los SAGS pueden afectarlos de una manera relativa, deteniendo el funcionamiento del mismo.

6) Pérdidas de producción y de comunicaciones.

Cuando se tiene una falla en un equipo puede ocurrir una parada en la producción de una empresa. Si se conoce el número de equipos de una empresa se pueden establecer las relaciones de pérdidas entre el equipo y la producción, pero este trabajo puede ser dispendioso dado que incluso las mismas empresas desconocen la clase de equipos que tienen de un tipo u otro; además los equipos pueden tener un comportamiento diferente entre sí, es decir, dos equipos que contengan una fuente conmutada pueden tener curvas de daño diferente.

Por ejemplo, para una industria que tiene 4 máquinas o motores y estos mantienen la línea de producción constante. Como se muestra en la Fig. 2a, las máquinas presencian el SAGS todas al mismo tiempo, la primera máquina al presenciar el SAGS puede seguir operando, pero la segunda máquina puede romper su operación debido a que tiene cierta sensibilidad a los cambios de voltaje. Como se muestra en la Fig. 2b, si el proceso es

en serie, al detenerse cualquiera de las máquinas se detiene el proceso de producción por lo cual la máquina más sensible a los SAGS sería la que más afectaría el proceso productivo. Si ninguna maquina se ve afectada por el SAGS la recuperación de la industria estaría dada por su velocidad de producción y/o por la velocidad de recuperación de la máquina a su estado de operación. Las industrias pueden clasificarse en 4 tipos como se aprecia en Fig. 3, al analizar las empresas con fenómeno o sin fenómeno basado en los estudios de costos de racionamiento [2]:

- Industria tipo 1: No se ve afectada en ningún momento por presencia frente el fenómeno.
- Industria tipo 2: La producción se detiene únicamente durante el periodo de duración del fenómeno.
- Industria tipo 3: La producción se detiene durante el fenómeno y un tiempo después, que puede deberse a la velocidad de recuperación de los equipos y del proceso.
- Industria tipo 4: La industria tiene un daño en un equipo, y por tanto se incluye un tiempo de reparación.

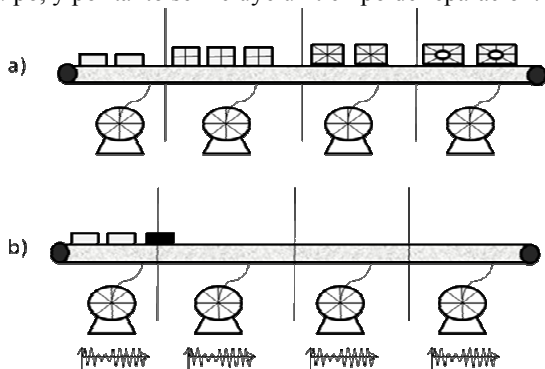


Figura 2. a) Línea de producción de una industria serie, b) efecto de un SAGS en una industria serie.

Por ejemplo, si una industria genera una unidad de producto final cada 3 horas, al presenciar un SAGS en la segunda hora de producción ésta perderá la producción total, y deberá comenzar todo el proceso nuevamente; si retoma la producción de manera instantánea el producto estará listo en 3 horas que sumadas a las 2 horas de interrupción totalizarán 5; así, la condición sin fenómeno son 3 horas y la condición con el fenómeno presente 5 horas, esta industria puede ser de tipo 3, pero si presenta un daño en equipos es de tipo 4.

Las pérdidas de cada tipo de industria pueden expresarse:

$$\begin{aligned}
 \text{Per}_1 &= 0 \\
 \text{Per}_2 &= (\text{Prod}) (t\text{SAGS}) - \text{Recu} \\
 \text{Per}_3 &= (\text{Prod}) (\text{trec}) - \text{Recu} \\
 \text{Per}_4 &= (\text{Prod}) (\text{trep}) - \text{Recu} + \text{RE}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Donde: PerX: Pérdidas para la industria tipo X, X=1, 2, 3, 4. Prod: Producción, en el tiempo de producción de la industria. Recu: La materia prima recuperable u otro elemento que pueda ser vendido y que no se pueda

utilizar en el proceso nuevamente. RE: Valor del repuesto (promedio de todas las máquinas). tSAGS: Tiempo de duración del fenómeno del SAGS. trec: Tiempo de recuperación de cada industria al fenómeno. trep: Tiempo de reparación de los equipos de cada industria.

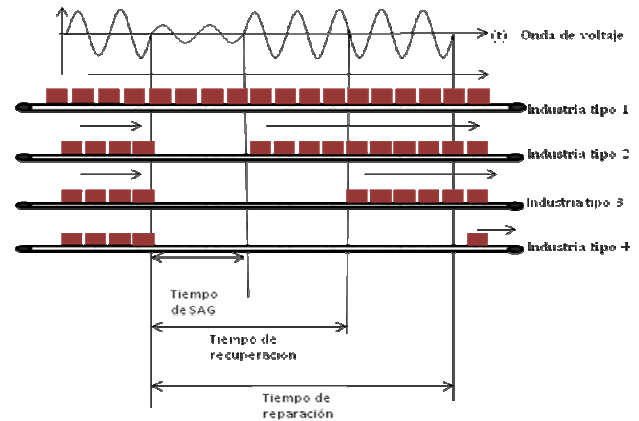


Figura 3. Tipos de industria según el tipo de comportamiento ante SAGS.

Sin embargo, las industrias no son seriales y tienen varios procesos simultáneos y puede que algunos de ellos tengan maquinaria altamente sensible a los SAGS. Como se muestra en la Fig. 4a, el resultado final del proceso general es la suma de cada proceso de la empresa; si alguno de ellos es afectado por los SAGS la producción se ve disminuida pero no trancada. Cada proceso en serie se comportaría como una industria de un cierto tipo. Por ejemplo, de la Fig. 4b se tiene un primer proceso que sería igual a la industria de tipo 2, mientras que el segundo proceso sería igual a la industria tipo 4 y las pérdidas estarían dadas por la disminución individual de cada proceso. Analizar con esta metodología es complicado porque se requiere identificar los procesos en paralelo, luego la susceptibilidad de las máquinas de cada proceso a los SAGS y determinar cuál de ellas es la más susceptible y/o más lenta.

Al observar el comportamiento de las industrias de proceso en paralelo, se puede estimar que cada industria tiene una única salida de la línea de producción. Por ejemplo, si una industria tiene 2 procesos que se combinan para crear un producto final, uno de los procesos es detenido al final de la producción se verá disminuida, tal como pasa con la industria tipo 2 o 3. Al decir que la industria tipo textil tiene una probabilidad del 35% de ser del tipo 1 se puede afirmar que la industria con esta probabilidad no tendrá pérdidas, pero si tiene una probabilidad del 15% de ser del tipo 3, con esta probabilidad su maquinaria se verá afectada y tendrá paradas en producción.

De otra parte, las pérdidas en comunicaciones se establecen como la pérdida de archivos o el no tener acceso a estos desde cualquier punto de la empresa, estas

pérdidas pueden ser en internet, intranet. Este tipo de pérdidas está ligado a las fuentes conmutadas pero la valoración de estas puede ser complicada, dado a que diversas empresas tienen diversas políticas sobre el manejo de la información. Al establecer que con una probabilidad se puede perder información, las empresas pueden adoptar políticas diferentes sobre el manejo de las comunicaciones dentro de la misma.

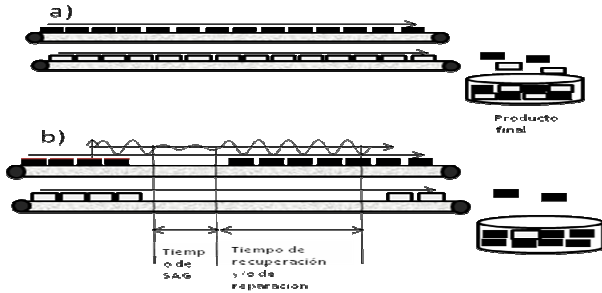


Figura 4. Industrias en Paralelo

4. MODELO DE LA RED BAYESIANA

La red bayesiana que se plantea, en términos generales, describe los fenómenos de calidad de la potencia desde su generación hasta el momento que afectan el proceso industrial. La Fig. 5 muestra la red bayesiana completa que contiene todas las relaciones causa-efecto descritas en la sección 3. El nodo de RED_CORTO_CIRCUITO realmente es la red que contiene la información sobre los efectos de descargas, los accidentes naturales y los accidentes humanos.

Los nodos de SAGS A, C y D contienen la información relacionada a este tipo de SAGS. Por último, en el nodo de producción se obtiene la probabilidad con la cual puede decirse que la industria se clasifica en uno u otro de los tipos ya descritos.

La herramienta utilizada para la implementación de la red bayesiana es el software Hugin [7], el cual permite la implementación de la red de una manera fácil y práctica. Además maneja casos aleatorios sobre la red bayesiana refinando los valores de la misma.

5. EJEMPLO DE UTILIZACIÓN DE LA RED BAYESIANA

1) Implementación de los datos conocidos. La red bayesiana se desarrolla para cada industria específica. Como ejemplo, se escogió una empresa de la cual se conocieron la mayoría de datos posibles, para el caso una empresa de malteadas y malta, con código CIU 3133. Según [8] y [9] se tomaron las probabilidades que al ocurrir un evento como una descarga atmosférica, ésta produzca un corto circuito y que este corto circuito sea trifásico, bifásico, bifásico a tierra o monofásico. Para conocer los daños a los equipos se consultaron las curvas CBEMA [3], [6], [8] y se llevaron a cabo consultas a expertos que generaron los datos para cargar el comportamiento de cada equipo con respecto a los diversos SAGS planteados.

Se realizó el levantamiento de información de los procesos de la industria de Maltas y, a su vez, se clasifican según el comportamiento de cada uno con respecto a los SAGS de voltaje. Se asumió que la pérdida de información para este proceso es poca, dado que aunque esta se maneja en servidores, la información es salvada en computadores de escritorio que crean una copia de seguridad cada 30 minutos [1].

Con estos datos en la red, la simulación arroja que esta empresa puede tener una probabilidad de 5,21% al ocurrir un SAGS de comportarse como una industria tipo 4, mientras que con una probabilidad de 10,09% se comportaría del tipo 3, con una probabilidad de 21,39% del tipo 2 y con una probabilidad de 63,31% dicha industria no tendrá pérdidas.

Con estos resultados obtenidos de la simulación de la red bayesiana, y suponiendo que las pérdidas por producción son de USD\$0.1 que para este sector son razonables[6], usando (1) y el valor esperado de las pérdidas, sin incluir la materia recuperable, tiene un resultado de USD\$16,1 que se obtiene de multiplicar la probabilidad de que la empresa este en un tipo de industria y las pérdidas que pueden tener si está en ese mismo tipo.

Para las comunicaciones se obtiene que la probabilidad de pérdida de información y de equipos de comunicación dentro de la industria sea baja; esto era de esperarse ya que como se mencionó, los equipos de comunicación en esta industria son computadoras de escritorio.

2) Datos desconocidos para la red Bayesiana. Si por alguna razón no se conocieran los datos de producción de la empresa se podrían generar casos aleatorios sobre la red bayesiana. Como la sensibilidad de los equipos dentro de la industria es poca, se supone entonces una hipótesis para las industrias del 60%, 25%, 10% y 5% respectivamente. Esta fue planteada por expertos en el tema industrial basándose en hechos como que la mayoría de los motores de estas industrias son de baja o mediana capacidad, y los pocos existentes de alta capacidad poseen protecciones de respaldo.

Con un algoritmo MAR "Missing at random" se generaron 100 casos aleatorios sobre la red bayesiana, generando así los casos que se presentan en la Tabla 1. Usando un algoritmo EM (expectation maximization) se obtienen los resultados de la Fig. 6. El EM supone los parámetros de las distribuciones basado en los datos obtenidos de los casos generados para calcular las probabilidades de un grupo de datos y con ellas recalculan las distribuciones de cada grupo de datos [10]. Dado que la hipótesis está sujeta a subjetividad, se pueden plantear varias visiones, como por ejemplo: la visión técnica, operativa y gerencial dentro de una empresa.

Por tanto, se generaron 3 casos uno en el cual los SAGS tienen el menor efecto posible que será optimista, otro donde su efecto es normal o neutral y un tercero pesimista en donde el efecto es muy alto. Igual que en el caso anterior se asumió una probabilidad de comportamiento por medio de especialistas en el tema planteando las hipótesis de la Tabla 2. En ésta también se presentan los resultados los cuales indican que cada visión desde el punto de vista que se tome genera resultados distintos si se tiene incertidumbre con respecto al comportamiento del fenómeno con respecto a la producción.

Falla del equipo	Motor Asincr	Motor sincr	fuelle conmutada	Variación de velocidad
Torque	14	19	N/A	N/A
Parada	15	17	22	N/A
Instan.	N/A	N/A	30	N/A

Tabla 1. Resultados de los casos Generados

CASO	HIPOTESIS		RESULTADOS	
Optimista	In. tipo 1	70%	In. tipo 1	73.52%
	In. tipo 2	15%	In. tipo 2	14.05%
	In. tipo 3	10%	In. tipo 3	7.81%
	In. tipo 4	5%	In. tipo 4	4.63%
Neutral	In. tipo 1	50%	In. tipo 1	42.42%
	In. tipo 2	30%	In. tipo 2	30.68%
	In. tipo 3	15%	In. tipo 3	15.9%
	In. tipo 4	5%	In. tipo 4	11%
Pesimista	In. tipo 1	40%	In. tipo 1	32.88%
	In. tipo 2	30%	In. tipo 2	27.83%
	In. tipo 3	20%	In. tipo 3	27.31%
	In. tipo 4	10%	In. tipo 4	11.97%

Tabla 2. Resultados con base en los escenarios

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La normatividad relacionado con los SAGS es insuficiente para cubrir los requisitos propios de los usuarios industriales; por lo tanto, se requiere generar una normatividad sobre la calidad de la potencia, que incluya las pérdidas sufridas por un usuario por SAGS.

El análisis de pérdidas debe hacerse considerando los diferentes sectores industriales, con el fin de establecer criterios para cada uno de ellos. Por medio de las redes bayesianas se puede analizar cualquier tipo de industria o proceso industrial de una manera ágil, ya que se pueden llenar los espacios vacíos que la falta de información deja en un modelo no probabilístico.

Así, para efectos regulatorios podría clasificarse los sectores industriales según el comportamiento a los SAGS, con el fin de mejorar y de poder estimar las relaciones que se necesitan para establecer los indicadores y normatividad.

Los equipos electrónicos son los que más problemas tienen a la hora de presentarse un SAGS, esto puede deberse al poco voltaje de suministro que requieren. La tendencia moderna es miniaturizar los equipos y que el

voltaje de suministro sea muy bajo, razón por la cual las empresas de distribución deben asegurarse que los fenómenos como los SAGS se presenten con la menor frecuencia posible.

De otra parte, una industria puede tomar decisiones de inversión a la hora de implementar correctivos por medio de la metodología de las redes bayesianas con el fin de no sobredimensionar las protecciones que una industria debe tener y a su vez mejorar la relación costo-beneficio.

Los resultados de la red muestran que cada industria puede tener subjetividad o diferentes puntos de opinión, haciendo aun mas complicado el trabajo de evaluar las pérdidas dado que cada opinión es importante para un estudio de este tipo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M.H.J. Bollen, *Understanding power quality problems- voltage SAGS and interruptions*, IEEE press, 2000.
- [2] Itansuca Ltda, *Estudio de costos de racionamiento de electricidad y gas natural*. Vol IV, Capítulo 3, Informe final, 1ra Revisión. Disponible: www.upme.gov.co/terminos/evaluacion/014_evaluacion.pdf
- [3] Norma CREG- 042 de 2004. Disponible: <http://domino.creg.gov.co/>
- [4] P. Hans, M. Rueda, G. Ramos, "Análisis de SAGS en redes de media tensión," Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, 2004.
- [5] G.A. Ramos, A. Torres, J.P. Rognon, "Reliability Analysis of Industrial Electrical Systems Using Bayesian Networks Considering Power Quality and Security Characteristics Applied to the IEEE 493 Standard Network" *IEEE Latin America Transactions*, vol. 5, no. 8, Dic. 2007.
- [6] D. Reyes, M. Rueda, A. Torres, "Bayesian Networks for Power Quality Analysis in the Industrial Sector," presented at the 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems-PMAPS, Stockholm, Jun. 2006.
- [7] Hugin GUI Help, version 6.8 lite. Hugin experts A/S. 1995-2007.
- [8] J. Milanovic, M. Aung, "Propagation of Asymmetrical SAGS and influence of boundary crossing lines on voltage SAGS prediction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 19, no 4, pp. 1819-1827, October 2004.
- [9] J. Martinez, J. Martin, "Voltage SAGS stochastic prediction using an electromagnetic transients program," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1975-1972, Oct, 2004.
- [10] E. Morales, definición de clustering y algoritmo EM, disponible: <http://ccc.inaoep.mx/~emorales/Cursos/KDD03/node45.html>

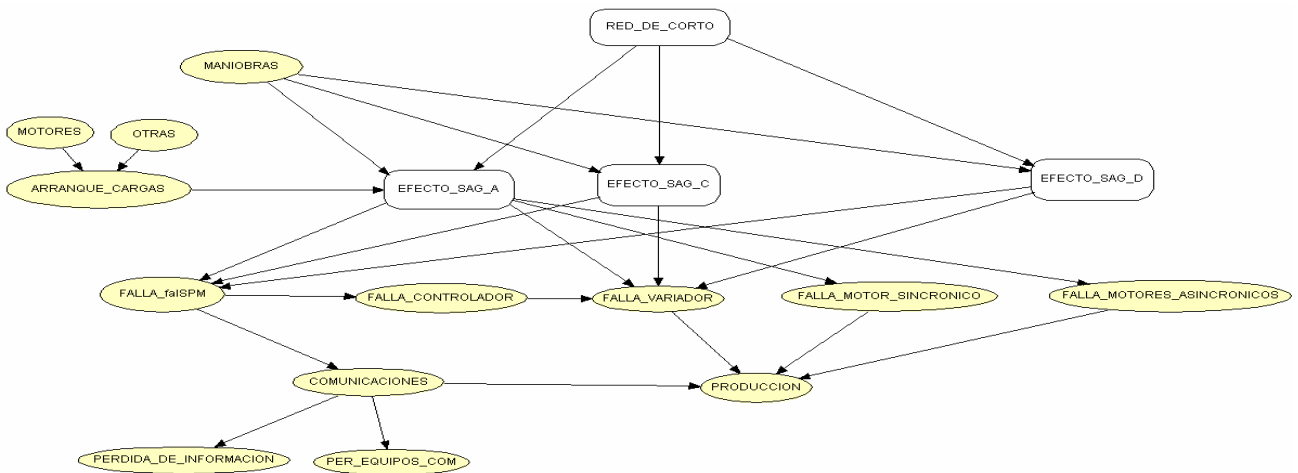


Figura 5. Red Bayesiana según la metodología propuesta

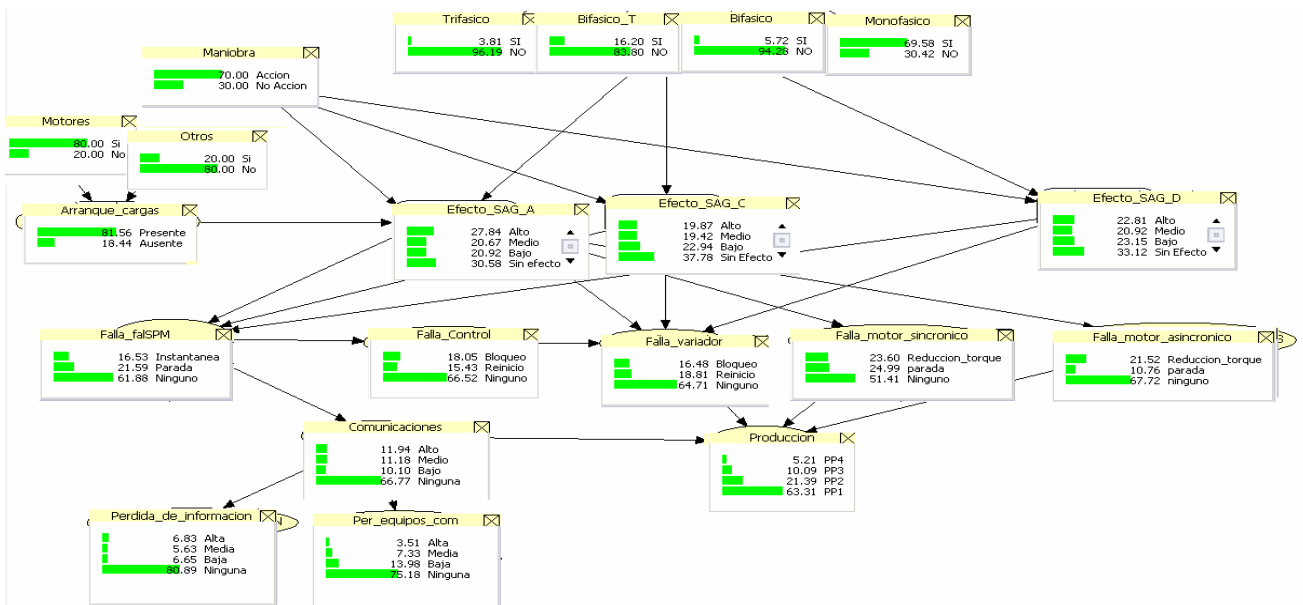


Figura 6. Simulación de la Red Bayesiana